

École Interfacultaire de Bioingénieurs
Facultés des Sciences et des Sciences Appliquées
Université Libre de Bruxelles, Université d'Europe

ÉTUDE ET OPTIMISATION DU SÉCHAGE SOLAIRE DE POISSON EN LIT FIXE

par
Caroline Heilporn

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Bioingénieur, option chimie et bioindustries
Spécialisation en biotechnologies agro-alimentaires

Promoteur : Benoît Haut
Service de Génie Chimique

Année académique 2008-2009

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon promoteur, Benoît Haut, qui m'a encadrée pendant toute ma recherche, à la fois en Belgique et au Mali. Il s'est toujours montré très disponible et prêt à répondre à (toutes) mes questions.

Je voudrais aussi remercier Floris van der Pol, Abdoulaye Timbely, Mamadou Samaké et Amadou Traoré, sans qui je n'aurais pu réaliser mon stage au Mali.

J'adresse également mes plus sincères remerciements à Mama et Amidou Djittéye, pour m'avoir accueillie dans leur famille pendant ces trois mois de stage. Ma découverte de l'Afrique a été rendue encore plus belle grâce à eux.

Je voudrais aussi remercier mes parents, ma soeur Géraldine et mes grands-parents pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée pendant la rédaction de ce mémoire.

Enfin, je voudrais remercier Diego de m'avoir soutenue pendant toute cette expérience, et plus particulièrement pendant mon palu. Mais surtout, je le remercie de ne pas s'être fâché pendant ces nombreux moments où je lui parlais de mon mémoire, même en dormant !

À vous tous qui m'avez soutenue,

À toi mon très cher Palu qui m'a tant fait souffrir et m'a beaucoup fait réfléchir à ma petite vie,

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont partagé cette expérience avec moi,

Merci !

Résumé

L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'utilisation rationnelle de séchoirs solaires, fixes et mobiles, et de la tester pour le séchage de poisson. Cette méthode doit permettre de déterminer des conditions de séchage les plus appropriées pour le Mali. Nous procédons en deux étapes.

Dans la première étape de ce travail, nous développons une analyse théorique basée sur des conditions moyennes de séchage. Cette analyse se construit sur l'étude de bilans de matière et d'énergie sur le séchoir, équivalente à une étude sur un lit fixe. Cette analyse est basée sur deux phénomènes majeurs, l'évaporation de l'eau et l'évacuation de la vapeur d'eau. Nous estimons la quantité d'eau maximale qui peut être enlevée du poisson en une journée de séchage sur les séchoirs solaires fixes et mobiles. Nous supposons que l'air se comporte comme un gaz parfait. Les séchoirs sont divisés en deux entités : la première permettant l'élévation de la température à l'intérieur du séchoir, et la deuxième séchant le poisson. Nous considérons que la température de séchage est constante sur la zone de séchage. L'ensemble des bilans nous permet alors de prédire le phénomène majeur qui limite le fonctionnement du séchage. C'est à l'aide de ce paramètre limitant que nous pré-définissons des valeurs réalistes des conditions de séchage. Cette limitation nous permet notamment de définir la quantité de poisson qui peut être introduite sur les différents séchoirs.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous évaluons l'applicabilité de la méthode à des situations réelles de séchage au Mali. Nous procédons au monitoring d'une série d'essais sur des séchoirs solaires, fixes et mobiles, et sur un autre type séchoir, le séchoir de type hangar, qui est une version actualisée des techniques de séchage utilisées par le passé, le séchage sur paillasses. Ce volet pratique du travail permet de vérifier l'applicabilité de la méthode et d'envisager des perspectives d'études ultérieures. Cette méthode nous permet enfin, d'élargir les conditions de séchage pré-définies par l'analyse théorique à des plages réalistes de bonnes conditions d'utilisation de ces séchoirs.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tables	viii
Notations utilisées	ix
1 Introduction	1
1.1 Cadre	1
1.1.1 Conservation des aliments au Mali	1
1.1.2 Séchage du poisson dans la région de Mopti	2
1.1.3 Pourquoi et comment améliorer les filières de séchage de poisson ?	2
1.2 Objectifs	6
1.3 Stratégie et plan du travail	7
2 Généralités	8
2.1 Séchage	8
2.2 Panneau solaire photovoltaïque	11
2.3 Séchage de poisson	12
3 Développement d'une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires de poisson	13
3.1 Introduction	13
3.2 Données	16
3.2.1 Données physico-chimiques	16
3.2.2 Températures	16

3.2.3	Quelques caractéristiques de l'eau et de l'air	18
3.2.4	Caractéristiques du ventilateur	20
3.2.5	Dimensions des différents types de séchoirs	21
3.2.6	Propriétés du plastique	24
3.2.7	Temps de séchage du poisson	25
3.3	Débit du ventilateur sans régulation	26
3.4	Échanges d'énergie entre le séchoir et l'environnement	28
3.4.1	Pertes de chaleur à travers la paroi en plastique	28
3.4.2	Densité de flux solaire	40
3.4.3	Densité de rayonnement de la surface en plastique	41
3.4.4	Densité de flux atmosphérique	41
3.4.5	Bilan net des flux sur le séchoir solaire à v_{\max}	42
3.5	Détermination d'un lien entre la température T_s et le débit du ventilateur	43
3.6	Évaluation numérique de h_f , q , $T_{p,\text{ext}}$, $T_{p,\text{int}}$, F_p et η_s	48
3.6.1	Coefficient de transfert de chaleur par convection forcée	48
3.6.2	Pertes globales de chaleur à travers la paroi à v_{\max}	49
3.6.3	Températures des faces intérieure et extérieure de la paroi en plastique	50
3.6.4	Densité de rayonnement de la surface en plastique	50
3.6.5	Efficacité d'absorption de l'énergie par le séchoir	51
3.7	Détermination du lien entre la quantité d'eau à extraire et le débit du ventilateur	51
3.8	Détermination du lien entre la quantité d'eau à extraire et le flux solaire	53
3.9	Conditions d'utilisation	55
3.10	Conclusion	56
4	Stage au Mali	59
4.1	La coopération au développement	59
4.2	Chronologie du stage	61
4.3	Difficultés rencontrées et anectodes scientifiques	64
4.3.1	Les difficultés	64
4.3.2	Anecdotes scientifiques	67
4.4	Relevés	68
4.4.1	Introduction	68
4.4.2	Conditions atmosphériques	68
4.4.3	Températures du séchoir	69
4.5	Présentation des résultats expérimentaux	69
4.6	Analyse des données	74

4.7	Remarques sur les séchoirs existants et les modifications qui doivent y être apportées	78
4.7.1	Séchoirs solaires fixe, mobile et de type hangar	78
4.7.2	Séchoir mobile	80
4.7.3	Séchoir fixe	80
4.7.4	Séchoir de type hangar	81
5	Manuel d'installation	82
5.1	Séchoir mobile	82
5.2	Séchoir fixe	83
5.3	Conseils généraux pour la mise en place des séchoirs	84
6	Manuel d'utilisation	86
6.1	Schéma d'utilisation du séchoir	86
7	Conclusions et perspectives	90
	Bibliographie	92
A	Légende du schéma d'utilisation du séchoir mobile	94
B	Caractéristiques physiques de l'eau à la pression atmosphérique	97
C	Fiche de suivi de séchage	99

Table des figures

1.1	Séchage sur paillasse à Tiadial Pouri	3
1.2	Séchoir mobile Konna Daga	4
1.3	Conception du séchoir mobile	5
1.4	Séchoir fixe Tiadial Pouri	5
1.5	Conception du séchoir fixe	6
1.6	Séchoir hangar Tiadial Pouri	6
3.1	Représentation de la zone de chauffe et de la zone de séchage sur le séchoir mobile	14
3.2	Vue de front du séchoir fixe	23
3.3	Séchoir de type hangar	24
3.4	Transferts de chaleur à travers la paroi en plastique	29
3.5	Bilan d'énergie : schéma du séchoir mobile	43
3.6	Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,1$ et $v_{\text{max}} = 3,11$ m/s	46
3.7	Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,01$ et $v_{\text{max}} = 1,44$ m/s	46
3.8	Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,001$ et $v_{\text{max}} = 0,67$ m/s	47
3.9	Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,0005$ et $v_{\text{max}} = 0,53$ m/s	47
4.1	Carte du Mali [13]	60
4.2	Campement de Tiadial Pouri : un séchoir fixe, un séchoir mobile et un séchoir de type hangar	66
4.3	Chargement du poisson sur le séchoir mobile par la population locale	66
4.4	Quantité d'eau enlevée en fonction du poids initial de poisson et du type de séchoir	73
4.5	Diminution du poids de poisson en fonction de la masse fraîche initiale et du type de séchoir	73

6.1	Manuel d'utilisation du séchoir mobile	89
B.1	Caractéristiques de l'eau entre 30 et 75 °C à la pression atmosphérique [16]	97
B.2	Caractéristiques de l'eau entre 30 et 75 °C à la pression atmosphérique (suite) [16]	98

Liste des tableaux

3.1	Données générales de séchage	16
3.2	Données climatiques moyennes mensuelles du Mali [14]	17
3.3	Températures d'utilisation	18
3.4	Tableau récapitulatif des caractéristiques de l'eau et de l'air	20
3.5	Caractéristiques du ventilateur	21
3.6	Dimensions séchoir mobile	21
3.7	Dimensions séchoir fixe	22
3.8	Dimensions des séchoirs de type hangar	24
3.9	Propriétés du plastique	25
3.10	Caractéristique de séchage du poisson	26
3.11	Températures caractéristiques des échanges de chaleur à travers la paroi en plastique	30
3.12	Densité de flux solaire moyenne au Mali en W/m^2	41
4.2	Séchoir mobile : essais de séchage sur différents poissons	71
4.3	Comparaison des différents types de séchoir : séchoir mobile, séchoir fixe et hangar	72

Notations utilisées

Symboles	Définitions	Unités
α	Coefficient de sécurité	–
β	Coefficient de dilatation de l'air	1/K
$c_{p,\text{air}}$	Chaleur spécifique massique de l'air	J/kgK
D_h	Diamètre hydraulique	m
e	Épaisseur du plastique	m
E	Énergie cinétique	m ² /s
e_s	Élévation par rapport au sol	m
ϵ_{air}	Émissivité de l'air	–
ϵ_p	Émissivité du plastique	–
F_{atm}	Densité de flux atmosphérique	W/m ²
F_{noire}	Densité de flux d'énergie émis par un corps noir	W/m ²
F	Densité de flux d'énergie émis par un corps non noir	W/m ²
F_p	Densité de rayonnement émis par la surface en plastique	W/m ²
F_s	Densité de flux solaire moyen	W/m ² K
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
Gr	Nombre de Grashof	–
h_f	Coefficient de transfert de chaleur par convection forcée	J/m ² sK
h_{fixe}	Hauteur du séchoir fixe	m
h_{hangar}	Hauteur totale des piliers	m
h_{mob}	Hauteur du séchoir mobile	m
h_{nat}	Coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle	J/m ² sK
HR	Humidité relative de l'air	–
η_s	Efficacité d'absorption de l'énergie par le séchoir	–

Symboles (suite)	Définitions (suite)	Unités (suite)
η_{sch}	Diminution en poids nécessaire pour obtenir une bonne qualité de séchage	–
η_{vent}	Rendement du ventilateur	–
l_{fixe}	Largeur du séchoir fixe	m
l_{hangar}	Largeur du séchoir hangar	m
l_{mob}	Largeur du séchoir mobile	m
L_c	Longueur caractéristique	m
L_m	Chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau	kJ/mol
L_k	Chaleur latente massique de vaporisation de l'eau	kJ/kg
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	W/mK
λ_{pvc}	Conductivité thermique du plastique	W/mK
M_{air}	Masse molaire de l'air	kg/mol
M_{eau}	Masse molaire de l'eau	kg/mol
$m_{eau,vap}$	Quantité d'eau qui est évacuée du séchoir	kg
$m_{eau,evac}$	Quantité d'eau qui évaporée grâce au flux solaire capté	kg
$m_{i,poisson}$	Masse initiale de poisson frais sur le séchoir	kg de poisson frais
$m_{s,poisson}$	Masse de poisson après séchage	kg poisson séché
μ_{air}	Viscosité de l'air	kg/ms
Nu	Nombre de Nusselt	–
Ω_p	Section droite du séchoir	m ²
Ω_{fixe}	Surface de séchage du séchoir fixe	m ²
Ω_{hangar}	Surface de séchage du séchoir hangar	m ²
Ω_{mobile}	Surface de séchage du séchoir mobile	m ²
P	Périmètre du séchoir	m
Pr	Nombre de Prandtl	–
p_{sat}	Pression de saturation de l'eau	Pa
p_{tot}	Pression atmosphérique totale	Pa
P_v	Puissance du ventilateur	W
q	Densité de flux d'énergie à travers la paroi en plastique	W/m ²
Q_{air}	Débit d'air dans le séchoir	kg d'air/s
R	Constante universelle des gaz parfaits	J/molK
Re	Nombre de Reynolds	–
R_{th}	Résistance thermique	m ² K/W
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	kg/m ³

Symboles (suite)	Définitions (suite)	Unités (suite)
σ	Constante de Stefan-Blotzmann	W/m ² K ⁴
T_{atm}	Température atmosphérique	K
$T_{\text{p,int}}$	Température de la face intérieure du plastique	K
$T_{\text{p,ext}}$	Température de la face extérieure du plastique	K
T_{ref}	Température de référence	K
t_s	Temps de séchage	h
T_s	Température de séchage	K
x_{hangar}	Longueur du séchoir type hangar	m
x_{fixe}	Longueur du séchoir fixe	m
x_{mob}	Longueur du séchoir mobile	m
$U(v)$	Coefficient global de transfert de chaleur à travers la paroi en plastique	W/m ² K
v	Vitesse de l'air	m/s
v_{max}	Vitesse maximale de l'air	m/s
y	Humidité molaire de l'air	moles d'eau/moles d'air sec
Y	Humidité massique de l'air	kg d'eau/kg d'air sec
Y_{sat}	Humidité de l'air à la pression de saturation	kg d'eau/kg d'air sec
Y_{in}	Humidité de l'air à l'entrée du séchoir	kg d'eau/kg d'air sec
Y_{out}	Humidité de l'air à la sortie du séchoir	kg d'eau/kg d'air sec

Chapitre 1

Introduction

1.1 Cadre

1.1.1 Conservation des aliments au Mali

Les pays d'Afrique sont les plus touchés par les problèmes d'insécurité alimentaire. L'inefficacité dans la production de produits de qualité, dans la conservation des aliments et dans leur emballage représente des barrières commerciales au niveau des marchés locaux, régionaux et internationaux. Ces barrières à la commercialisation freinent la croissance des revenus et augmentent la pauvreté déjà ancrée en Afrique.

Au Mali, la filière pêche est particulièrement concernée par ces problèmes de conservation car les zones de pêches sont souvent situées à l'écart des grands centres commerciaux. Le développement de techniques de conservation s'avère donc être une priorité.

D'après le Schéma Directeur de Développement de la Pêche et de l'Aquaculture au Mali, la pêche est un sous-secteur très important de l'économie nationale. Cette importance s'exprime à travers le potentiel des ressources existantes, le rôle socio-culturel, la création d'emplois, le rôle dans l'attente de sécurité alimentaire et la réduction de la pauvreté [2].

Au niveau de la production d'eau douce, le Mali est classé troisième parmi les pays africains. La production halieutique nationale s'élève à environ 100 000 tonnes de poisson par an, soit 4 % du Produit Intérieur brut (PIB) malien [2] (valeur ajoutée brute de la filière poisson = 90 milliards de francs CFA (FCFA), devise malienne; € 1,00 = 655 FCFA).

1.1.2 Séchage du poisson dans la région de Mopti

Le Delta Central du Niger est la plus grande zone de production de poisson au Mali. Cette grande présence de poisson est favorisée par l'inondation de la zone, provoquée par les fortes crues pendant la période d'hivernage et par l'affluent du Niger, le Bani. Les irrégularités hydro-climatiques et la variété des biotopes existants dans le Delta Central du Niger sont fort propices au bon développement de la vie aquatique car ils engendrent une forte diversité des conditions environnementales du milieu.

Il existe environ 130 espèces de poisson dans la zone deltaïque du Niger [2] et la production est d'autant plus forte que la crue est importante dans l'espace et dans le temps (forte saisonnalité et variation inter-annuelle liée à l'hydrologie). Les poissons pêchés en très grandes quantités ne peuvent pas tous être vendus frais. Du fait de la faiblesse des réseaux de communication et du manque de moyens de conservation appropriés pour le poisson frais, une grande proportion de cette production est commercialisée sous forme transformée, par fumage, braisage ou séchage. Les produits séchés sont plus spécifiques que les produits frais et peuvent donc être vendus à des prix plus élevés. Le développement d'approches de séchage plus efficace et plus hygiénique est donc devenu une véritable requête de la population.

1.1.3 Pourquoi et comment améliorer les filières de séchage de poisson ?

Actuellement, le séchage solaire du poisson est réalisé sur de simples paillasses, à l'air libre, comme le montre la Figure 1.1 [17]. Les problèmes majeurs de ce type de séchage sont dus au climat tropical du Mali. En effet, la forte présence de mouches et de poussière, libres d'entrer en contact direct avec le poisson, provoque le développement de bactéries dans le poisson. L'hygiène n'est pas non plus garantie car les vents fréquents contribuent au développement d'une couche de poussière à la surface du poisson. L'idée est donc de développer des méthodes de séchage plus élaborées afin d'obtenir une meilleure qualité de poisson. Ce facteur qualité induit d'une part, une amélioration de l'hygiène et, d'autre part, la décroissance du nombre de bactéries.

L'amélioration de l'hygiène est favorisée par la présence d'une bâche en plastique au-dessus du poisson, et aussi par la présence d'une moustiquaire à une des extrémités du séchoir. L'autre extrémité du séchoir est constituée d'une plaque en bois dans laquelle on fixe le ventilateur. Elle est donc her-

métique au passage d'insectes et de poussières. La diminution des bactéries, quant à elle, est favorisée par une élévation de la température de séchage, par rapport à la température de séchage sur paillasses. Nous voyons dans le Chapitre 3 que la température de séchage choisie est de 60°C.



FIG. 1.1 – Séchage sur paillasses à Tiadial Pouri

Dans le cadre d'un projet d'amélioration des méthodes de transformation et de commercialisation du poisson, l'ONG AFAR (Action pour le Formation et l'Auto-promotion Rurale) collabore avec le KIT (Royal Tropical Institute) basé à Amsterdam. L'objectif est d'améliorer et d'agrandir l'échelle des techniques de transformation et de conservation des produits de la pêche. Ce projet est financé par l'organisation CORDAID aux Pays-Bas (Organisation Catholique d'Aide au Développement) [18].

Deux prototypes de séchoir ont été développés par le *Royal Tropical Institute* (KIT) et mis en place au Mali pour une période test de 2 ans : l'un est un séchoir solaire fixe et l'autre est un séchoir solaire mobile, tous deux facilement transportables. Leur principe est très simple et adapté aux matériaux disponibles.

Le séchoir mobile présenté à la Figure 1.2 est constitué d'une structure assez basique : la partie inférieure est une bâche noire. Cette bâche noire est

recouverte d'une bâche en plastique. Le poisson est disposé sur un filet de séchage sous-tendu par des arcs courbés, à la fin d'une longueur de chauffe. La longueur de chauffe représente la partie du séchoir sur laquelle on ne dispose pas de poisson. Elle permet l'élévation de la température du séchoir pour atteindre la température désirée de séchage à la fin de cette longueur de chauffe. Dans le prolongement de cette zone de chauffe vient la zone de séchage proprement dite. C'est là que se trouve le filet de séchage sur lequel le poisson est disposé.

Les arcs courbés, auxquels est suspendu le filet de séchage, permettent d'éviter la mise en contact direct entre le poisson et la bâche noire de la partie inférieure du séchoir. De plus, à l'une des extrémités du séchoir, un ventilateur, alimenté par un panneau photovoltaïque, crée un courant d'air qui permet d'évacuer l'humidité de l'air. À l'autre extrémité du séchoir, une moustiquaire permet de réduire l'infestation par les insectes. Le schéma de principe est présenté à la Figure 1.3 [19].



FIG. 1.2 – Séchoir mobile Konna Daga

Le séchoir fixe, présenté à la Figure 1.4 est un peu plus large et plus long que le séchoir mobile. Il est constitué d'une base en banco (sable-ciment-eau). La surface supérieure de la base est couverte de ciment afin d'améliorer la solidité de la structure. Le fait que seule cette surface supérieure soit construite en ciment pur permet de diminuer fortement les coûts. La surface de la base correspondant à la zone de chauffe est couverte de peinture noire, ce qui améliore l'élévation de la température intérieure dans cette zone. Le filet de

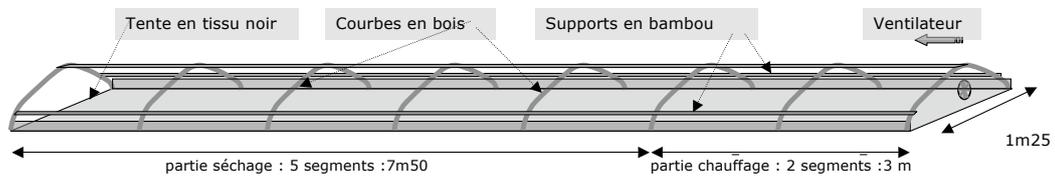


FIG. 1.3 – Conception du séchoir mobile

séchage, sur lequel est placé le poisson, est légèrement surélevé par rapport à la base du séchoir afin d'éviter tout contact entre le poisson et le ciment.

De manière générale, le séchoir fixe permet de sécher une plus grande quantité de poissons. Son mode de fonctionnement est identique à celui du séchoir mobile. Son schéma de principe, très similaire à celui du séchoir solaire mobile, est présenté à la Figure 1.5 [19].



FIG. 1.4 – Séchoir fixe Tiadial Pouri

Un troisième type de séchoir a aussi été mis en place : il s'agit d'un séchoir de type hangar, Figure 1.6. Les techniques de séchage de ce dernier type de séchoir sont fort similaires aux techniques de séchage préexistantes, c'est-à-dire les techniques du séchage sur paillasse. En effet, il est constitué de paillasse surélevées d'une hauteur d'un mètre, le tout étant recouvert d'une moustiquaire. Ce type de séchage permet donc une meilleure qualité sanitaire du poisson par rapport à la qualité du poisson séché sur paillasse, tout

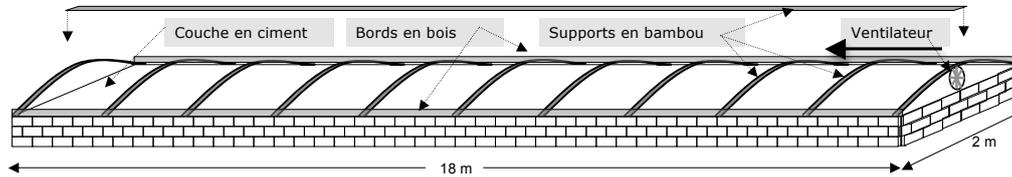


FIG. 1.5 – Conception du séchoir fixe

en gardant des coûts très faibles par rapport aux séchoirs solaires mobiles et fixes (600 000 FCFA pour le séchoir fixe, 450 000 FCFA pour le séchoir mobile et 15 000 FCFA pour le séchoir de type hangar).



FIG. 1.6 – Séchoir hangar Tiadial Pouri

1.2 Objectifs

L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'utilisation rationnelle des séchoirs solaires et de la tester. Cette méthode doit permettre de déterminer des conditions de séchage les plus appropriées pour le Mali.

Notre travail théorique est complété d'un volet pratique qui permet d'évaluer le degré d'applicabilité du modèle théorique à des situations réelles de

séchage. Cette seconde partie est réalisée au cours d'un stage d'une durée de trois mois dans le village de Youwarou, au Mali. Cette étude est menée en tenant compte du désir de la population de produire du poisson frais séché et du poisson fermenté séché en un temps d'un à deux jours. Cette étude du séchage solaire est développée sans perdre de vue les attentes pratiques auxquelles le séchage doit répondre : une durée de conservation supérieure à trois mois sans détérioration du poisson (moisissures, décomposition sous forme de poudre, ...) et une éventuelle réhydratation du produit séché pour le secteur de l'hôtellerie malienne.

1.3 Stratégie et plan du travail

Dans un premier temps, nous présentons quelques généralités sur le séchage et en particulier le séchage solaire de poisson. Ensuite, nous établissons une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires fixes et mobiles basée sur l'établissement de bilans de matière et d'énergie. L'étude des bilans sur le séchoir est équivalente à une étude sur un lit fixe. Les équations et les bilans se rapportant à cette partie sont exposés au Chapitre 3. La partie appliquée du mémoire, réalisée au cours du stage à Youwarou, est présentée dans le Chapitre 4. La méthode est utilisée avec succès et est validée par des relevés réguliers des différents paramètres de séchage (température, masses initiale et finale de poisson, tension DC au sein du ventilateur et durée de séchage). Une présentation des résultats et une analyse des données en comparaison avec les résultats théoriques complète ce chapitre. Les Chapitres 5 et 6 sont consacrés aux manuels d'installation et d'utilisation des séchoirs solaires à poisson, destinés aux populations de pêcheurs du Mali. Ces manuels sont écrits de façon très simple et schématique afin de favoriser leur meilleure compréhension par des populations majoritairement analphabètes.

Chapitre 2

Généralités

2.1 Séchage

Le séchage est une opération unitaire centrale dans les industries. Dans les pays développés, l'énergie utilisée dans les procédés de séchage est estimée à 8% des dépenses énergétiques des industries. En ce qui concerne les pays en voie de développement, comme le Mali, le séchage est une technique de conservation très répandue pour une grande variété de produits (le lait, les mangues, le poisson, la tomate, le gingembre, ...).

Le séchage est une technique d'enlèvement du liquide (généralement de l'eau) contenu dans un produit solide par changement de phase. Nous concentrons ici notre étude sur le séchage thermique qui se fait par apport de chaleur. Pour ce type de séchage, la quantité d'énergie à fournir est proportionnelle à sa chaleur latente de vaporisation (énergie qu'il faut fournir pour évaporer une mole d'eau liquide).

De manière générale, les objectifs du séchage sont :

- réduction des coûts de transport ;
- élimination de l'eau d'un produit pour empêcher sa détérioration ;
- élimination de l'eau d'un produit pour faciliter sa manipulation ;
- élimination de l'eau car elle est à exclure pour un procédé ultérieur.

Dans le cas du séchage solaire de poisson au Mali, le séchage est utilisé avant tout comme moyen de conservation du produit.

Deux phénomènes majeurs interviennent lors du séchage d'un produit

solide. Le premier est le transfert de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le solide. Cet apport de chaleur, peut se faire de manière directe, par exposition au soleil ou à des radiations, ou de manière indirecte, par exposition à un flux d'air chaud. Le deuxième phénomène est l'évacuation de la vapeur d'eau produite lors du phénomène d'évaporation grâce à la chaleur introduite. Cette élimination de la vapeur produite se fait de manière naturelle ou forcée (grâce à un ventilateur, par exemple). Dans les calculs de dimensionnement des installations, il est donc important de veiller à ce que ces deux phénomènes puissent avoir lieu, sans limitation. Ils déterminent donc la vitesse de séchage du produit considéré [10].

Lors du séchage de denrées alimentaires telles que le poisson par une méthode thermique, nous distinguons trois phases de séchage [4, 10, 15]. Ces différentes phases varient en fonction des caractéristiques de l'air et du produit.

1. **Première phase : Vitesse de séchage croissante** - Cette phase est généralement assez courte. Elle correspond à l'élévation de la température du produit nécessaire au déclenchement de l'évaporation de l'eau qu'il contient. Nous atteignons alors une température constante d'équilibre. À partir de ce moment, la vitesse de séchage augmente car le phénomène d'évaporation est d'autant plus facile que le produit est chaud.
2. **Deuxième phase : Vitesse de séchage constante** - Cette phase correspond à l'évaporation de l'eau qui se trouve à la surface du produit. En effet, la surface extérieure du produit est entièrement recouverte d'eau qui est emportée par le courant d'air. Il se forme alors une couche limite de diffusion dans le gaz autour des particules solides. Dans le gaz juste au contact de la surface extérieure du solide, la pression partielle en vapeur d'eau est quasi égale à la pression de saturation dans la même condition de température $p_{\text{sat}}(T)$. La vitesse de séchage est proportionnelle à la différence entre la concentration en vapeur d'eau dans le gaz juste au contact de la surface extérieure du solide, et, la concentration en vapeur d'eau dans le gaz au loin. Le coefficient de proportionnalité dépend de l'écoulement du gaz autour du solide (et donc de sa forme).
La nature du solide n'influence quasiment pas la vitesse de séchage au cours de cette période.
3. **Troisième phase : Vitesse de séchage décroissante** - Lors de cette troisième phase, l'évaporation de l'eau se produit au niveau des

surfaces situées à l'intérieur du solide. Si ces surfaces d'évaporation possèdent une courbure importante (eau piégée dans des pores de petites tailles), la pression partielle de vapeur d'eau dans le gaz au contact de ces surfaces est inférieure à $p_{\text{sat}}(T)$. Comme la vitesse de séchage est toujours proportionnelle à la différence entre la concentration en vapeur d'eau dans le gaz au contact des surfaces d'évaporation et la concentration en vapeur d'eau dans le gaz au loin, le taux d'évaporation diminue au fur et à mesure que l'on va « chercher » l'eau dans des pores plus petits. Dans certains cas simples, on peut s'imaginer qu'il se crée dans les produits poreux, un front de vaporisation se dirigeant vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin de plus en plus important à parcourir, la vitesse de séchage diminue de plus en plus.

Plus la surface de contact entre l'air et le produit est importante, plus l'évaporation de l'eau contenue dans le produit se fait facilement. L'augmentation de cette surface de contact permet aussi de diminuer les risques de croûtage. Le phénomène de croûtage se produit lorsque l'eau liquide se trouvant à la surface du produit s'évapore plus vite que le temps nécessaire aux nouvelles molécules d'eau, provenant des couches inférieures du solide, pour arriver en surface. Une croûte se forme alors à la surface du produit et empêche le bon déroulement de l'évaporation. La diminution en poids désirée (voir Chapitre 3) pour assurer une bonne qualité de séchage n'est donc plus obtenue. Par contre, si le produit est coupé en plus petits morceaux, la distance que doivent parcourir les molécules d'eau venant du centre du solide est plus courte. Ceci diminue donc le risque que le phénomène d'évaporation soit plus rapide que l'arrivée des nouvelles molécules d'eau en surface. Ce phénomène de croûtage est d'autant plus fréquent dans les trois cas suivants : d'une part, si l'air à l'intérieur du séchoir est peu humide, d'autre part, si la vitesse de l'air est élevée, et enfin, si le poisson est gros [9].

Le séchage du poisson se réalise dans des séchoirs de type tunnels, par séchage direct. Un ventilateur, alimenté par une source d'énergie, crée un courant d'air dans le séchoir afin d'évacuer la vapeur d'eau produite. La source d'énergie est, dans le cas du Mali, une source d'énergie solaire transformée par un panneau photovoltaïque en électricité alimentant le ventilateur. Ce type de séchage solaire comporte un grand avantage pour les populations maliennes : la source d'énergie est (quasi) illimitée et gratuite.

2.2 Panneau solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques comportent des semi-conducteurs capables de transformer de manière directe le rayonnement solaire en électricité. Malgré un coût relativement élevé (environ un tiers du prix total des séchoirs, dans le cas des séchoirs fixes et mobiles de poisson) et un rendement assez faible (environ 10%), le solaire photovoltaïque représente une technologie séduisante, avec des perspectives d'avenir sans précédent, particulièrement dans les zones à fort ensoleillement comme le Mali. L'électricité obtenue peut être, soit utilisée directement (comme c'est le cas pour les séchoirs solaires de poisson) soit être stockée dans des batteries. Cette dernière possibilité permet d'ailleurs d'alimenter plusieurs régions isolées du Mali en électricité, ce qui est d'ailleurs le cas du village de Youwarou, où s'est déroulée la partie expérimentale de ce mémoire.

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de modules solaires, eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques. Ils agissent comme des générateurs et permettent de convertir directement l'énergie solaire en électricité.

Le principe de fonctionnement de ces panneaux photovoltaïques est assez simple. Une cellule photovoltaïque est constituée de deux couches d'un matériau semi-conducteur, le Silicium. La première couche est chargée positivement car elle est dopée avec du Bore, qui possède moins d'électrons que le Silicium. La deuxième couche, par contre, est chargée négativement car elle est dopée avec du Phosphore qui possède plus d'électrons que le Silicium. Lorsqu'un photon de lumière arrive à la surface d'un panneau photovoltaïque, il crée une rupture entre un atome de Silicium et un électron, ce qui crée une charge électrique. Les atomes chargés positivement se répartissent alors suivant leur charge dans les zones dopées en Bore et en Phosphore. Une tension électrique est donc créée. On parle d'effet photovoltaïque [22].

L'énergie réellement captée par un module solaire dépend de la surface et de la puissance nominale du panneau mais aussi de l'ensoleillement, variable selon la latitude, la saison, l'heure de la journée, la météo, ... La régulation de la tension délivrée par le panneau photovoltaïque est donc assez complexe. Nous conseillons donc l'utilisation d'un régulateur afin de s'assurer que la tension délivrée reste constante.

2.3 Séchage de poisson

Dans de nombreuses régions du monde, l'accès à la glace ou à des systèmes de réfrigération n'est pas disponible. La réduction de l'humidité (teneur en eau) du poisson par un procédé de séchage est un moyen de conservation qui permet la mise à disposition d'une source stable de protéines pouvant être transportée vers des régions pour lesquelles l'accès au poisson frais est limité. De plus, le séchage permet de conserver le poisson plus longtemps et de l'utiliser comme épice, par exemple, dans certains plats typiques africains. Depuis plusieurs siècles, de nombreuses populations ont recours au séchage pour allonger le temps de conservation ou pour donner un goût, une texture particulière au poisson. [4]

Lors d'un procédé de séchage de poisson, la température de séchage doit être contrôlée régulièrement. En effet, si la température de l'air dans le séchoir est trop élevée, le poisson commence à cuire et cela entraîne une dénaturation des protéines (élément nutritif important pour les populations africaines!). On considère généralement que la température de séchage doit approcher les 60°C [5, 11]. Ce choix est le résultat d'un compromis entre une température de séchage assez élevée pour permettre une bonne élimination des bactéries et une température assez faible que pour éviter que le poisson ne se détériore (par décomposition ou cuisson).

Remarque : nous ne nous sommes pas intéressés à l'étude bactériologique du poisson car ce point sort du cadre de ce mémoire.

Le résultat du séchage s'observe notamment par une diminution en poids du poisson. La diminution en poids, caractéristique d'une bonne qualité de séchage, est évaluée à 60% ou plus. Cette valeur est estimée par les pêcheurs maliens eux-mêmes après de nombreuses décennies de pratique du séchage.

Il existe plusieurs espèces de poisson dans le Delta Central du Niger, au Mali. Ces espèces sont de tailles différentes et donc, leur vitesse et donc leur temps de séchage sont différents. Comme nous l'avons vu dans la Section 2.1, il est important de veiller à avoir la plus grande surface de contact possible entre le poisson et l'air présent dans le séchoir. Plus la surface de contact est grande, plus le phénomène d'évaporation se réalise facilement. C'est pour cette raison que, au cours du stage, nous avons conseillé aux pêcheurs de couper les plus gros poissons, tels que le poisson chien, en morceaux de plus petite taille afin d'assurer une bonne conversion de l'eau liquide contenue dans le poisson, en vapeur d'eau dans l'air, à l'intérieur du séchoir.

Chapitre 3

Développement d'une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires de poisson

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les paramètres de séchage caractéristiques d'une bonne utilisation des séchoirs mobile et fixe. Ces paramètres sont évalués en tenant compte des données fixes et invariables du séchage. Parmi celles-ci, il y a la longueur de chauffe, la durée de séchage, le flux solaire moyen et la température de séchage. Les paramètres restant à définir sont :

- le débit d'air du ventilateur nécessaire pour le séchage de la quantité de poisson considérée ;
- la quantité de poisson frais qui peut être introduite par séchoir

Remarque : la durée de séchage n'est pas un paramètre imposé par la théorie. Néanmoins, elle est considérée comme un paramètre invariable car ce sont les pêcheurs eux-mêmes qui ont demandé à ce que les séchoirs soient conçus pour permettre des séchages en un à deux jours.

La température de séchage T_s choisie est égale à 60°C comme indiqué à la Section 2.3. Pour rappel, cette valeur est le résultat d'un compromis entre une température de séchage assez élevée pour permettre une bonne élimination des bactéries et une température assez faible que pour éviter que le poisson ne se détériore (par décomposition ou cuisson).

Pour assurer le bon fonctionnement des séchoirs, cette température T_s

doit être atteinte à la fin de la longueur de chauffe. Le débit d'air du ventilateur (premier paramètre inconnu) est donc intrinsèquement déterminé par la température de séchage T_s . En effet, si nous ne réglons pas correctement ce débit d'air, la température de séchage ne pourra pas être atteinte après la longueur fixée.

Pour rappel, la zone de chauffe est la surface qui s'étend depuis le ventilateur jusqu'au début de la surface de séchage proprement dite, comme nous le voyons à la Figure 3.1. La zone de chauffe ne contient donc pas de poisson : elle sert uniquement à l'élévation progressive de la température dans les séchoirs.

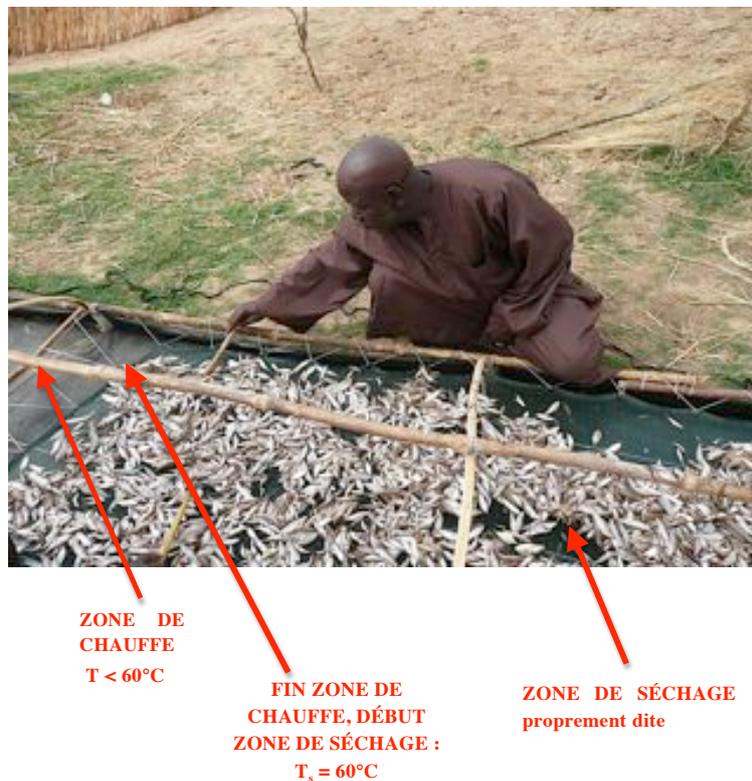


FIG. 3.1 – Représentation de la zone de chauffe et de la zone de séchage sur le séchoir mobile

La masse de poisson frais pouvant être placée sur la surface de séchage des séchoirs solaires fixes et mobiles (deuxième paramètre inconnu) est, quant à

elle, déterminée grâce à l'expression des deux conditions suivantes :

1. Le débit d'air du ventilateur étant fixé, seule une quantité déterminée de vapeur d'eau, produite lors du phénomène d'évaporation, peut être évacuée du séchoir : la masse de poisson frais doit donc être choisie afin qu'elle ne limite pas l'évacuation de la vapeur d'eau et donc que l'air n'arrive pas à saturation (nous désirons être à moins de 10% de la saturation).
2. La masse de poisson frais acceptable dépend aussi du flux d'énergie capté par les séchoirs solaires. C'est ce flux qui rend possible l'évaporation de l'eau du poisson. D'après les pêcheurs maliens, il faut une diminution de poids de minimum 60% entre le poisson frais et le poisson séché pour que le poisson soit considéré comme étant de bonne qualité. Si cette diminution de poids est atteinte, le poisson ne se ramollit pas avec le temps et on évite le développement de moisissures, de bactéries, ...

La quantité maximale admissible de poisson frais introduite dans le séchoir dépend donc aussi cette quantité maximum d'eau à évaporer.

Dans ce chapitre, nous développons donc une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires satisfaisant les conditions énoncées ci-dessus. Cette méthode est basée sur l'établissement de bilans de matière et d'énergie.

Les échanges d'énergie à considérer sont ceux entre le séchoir et l'environnement. Dans ce but, les différents paramètres à évaluer sont :

- les coefficients de transfert de chaleur par convection forcée, par conduction et par convection naturelle ;
- les densités de flux solaire, de flux atmosphérique et de flux de la surface plastique.

L'ensemble de ces données nous permet alors de déterminer l'efficacité d'absorption de l'énergie par les séchoirs solaires.

Par la suite, nous posons l'hypothèse que l'air se comporte comme un gaz parfait, notamment au niveau de l'évaluation de sa masse volumique : celle-ci intervient pour le calcul des nombres adimensionnels au niveau du transfert de chaleur 3.4.

3.2 Données

3.2.1 Données physico-chimiques

Les données physico-chimiques nécessaires au développement de cette méthode sont présentées à la Table 3.1.

Accélération de la pesanteur	g	9,81	m/s ²
Chaleur latente de vaporisation de l'eau	L_k	2256.10 ³	kJ/kg
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5,6703.10 ⁻⁸	W/m ² K ⁴
Constante universelle des gaz parfaits	R	8,314	J/mol K
Densité de flux solaire moyen	F_s	788	W/m ²
Émissivité de l'air	ϵ_{air}	0,9	–
Humidité relative de l'air ambiant	HR	0,15	–
Masse molaire moyenne de l'air	M_{air}	0,02884	kg/mol
Masse molaire de l'eau	M_{eau}	0,018	kg/mol
Pression atmosphérique	p_{tot}	101325	Pa = kg/s ² m
Température de référence	T_{ref}	303,15	K
Pression de saturation de l'eau à T_{ref}	$p_{\text{sat}}(T_{\text{ref}})$	4242	Pa
Viscosité de l'air	μ_{air}	1,8.10 ⁻⁵	kg/m s

TAB. 3.1 – Données générales de séchage

3.2.2 Températures

Dans l'analyse du fonctionnement des séchoirs solaires fixes et mobiles, nous considérons deux températures : la température atmosphérique T_{atm} et la température à l'intérieur du séchoir, que l'on appellera la température de séchage T_s .

Les relevés de températures moyennes mensuelles au Mali [14], présentés à la Table 3.2, montrent que la température atmosphérique varie principalement entre 22°C et 33,5°C au cours de l'année.

Les variations de température de mois en mois, peuvent sembler assez faibles à première vue. Néanmoins, il est important de tenir compte de ces variations, celles-ci pouvant influencer fortement la qualité du séchage. En effet, la température de séchage autour de 60°C à l'intérieur du séchoir doit impérativement être atteinte afin d'obtenir les meilleures conditions d'élimination des micro-organismes présents dans le poisson. Cette température est bien

évidemment plus facile à obtenir pendant les mois les plus chauds, contrairement aux mois un peu plus "froids", en présence de vent et de nuages.

Mois	Température de l'air (°C)	Humidité relative –	Pression atmosphérique (Pa)
Janvier	22,7	0,194	97900
Février	25,3	0,155	97800
Mars	28,9	0,148	97500
Avril	32,3	0,177	97300
Mai	33,5	0,289	97400
Juin	31,2	0,481	97500
Juillet	27,9	0,66	97600
Août	27,2	0,695	97700
Septembre	28,9	0,567	97600
Octobre	30,4	0,323	97600
Novembre	27,9	0,192	97700
Décembre	23,0	0,197	97900
Annuel	28,3	0,341	97600

TAB. 3.2 – Données climatiques moyennes mensuelles du Mali [14]

Dans ce travail, nous centrons notre analyse sur les mois de février, mars et avril (mois durant lesquels le stage a été effectué) afin de pouvoir comparer le modèle théorique à l'expérience. Pendant cette période, la température quotidienne varie généralement entre 25°C et 45°C. Nous considérons l'hypothèse que la température moyenne de l'atmosphère T_{atm} est de 30°C, température observée, de manière générale, lors du stage.

Comme nous l'avons expliqué à la Section 3.1, la température de séchage est définie comme la température atteinte à la fin de la zone de chauffe.

Nous faisons également l'hypothèse que cette température de séchage T_s de 60°C est constante sur toute la longueur de séchage : en effet, il est très simple de montrer que toute variation est négligeable dans le développement de la méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires. Néanmoins, nous constatons que la température intérieure au séchoir croît légèrement suivant la direction axiale du séchoir. La température est donc toujours légèrement plus élevée à l'extrémité opposée au ventilateur et correspondant à la fin de la zone de séchage. C'est pour cette raison que nous conseillons,

dans le Chapitre 6, de placer les plus gros poissons à l'extrémité opposée au ventilateur.

Les températures atmosphérique et de séchage sont reprises à la Table 3.3.

Température atmosphérique	T_{atm}	303,15	K
Température de séchage	T_s	333,15	K

TAB. 3.3 – Températures d'utilisation

3.2.3 Quelques caractéristiques de l'eau et de l'air

L'objectif de ce Chapitre 3 est de calculer la quantité maximale de poisson frais qui peut être introduite dans les séchoirs fixes et mobiles, après avoir préalablement fixé la vitesse de l'air à l'intérieur de ces séchoirs. La vitesse de l'air dans le séchoir et l'énergie apportée sous forme de chaleur doivent à la fois assurer un débit d'air suffisant de manière à éliminer la vapeur d'eau produite, mais aussi fournir une quantité d'énergie suffisants pour l'évaporation de l'eau que contient le poisson, en un temps de séchage donné t_s . Une de ces deux phénomènes, l'évaporation ou l'évacuation, est limitant et détermine la quantité maximale d'eau (et donc la quantité de poisson frais qui peut être introduite dans les séchoirs) qui peut être enlevée dans conditions moyennes de séchage utilisées. Cette limitation est étudiée dans les Sections 3.7 et 3.8.

Dans la Section 3.7, nous devons notamment nous assurer que l'air en sortie du séchoir possède une humidité d'au moins un ordre de grandeur supérieure à l'humidité de saturation. Les paramètres de l'air à saturation, à savoir, la pression et l'humidité de l'air, sont déterminés respectivement aux Équations 3.3 et 3.8.

La résolution des bilans de matière sur le séchoir nécessite quant à elle une évaluation préalable de la masse volumique de l'air sec ρ_{air} et de la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau L_m . Ces deux paramètres sont calculés dans les Équations 3.11 et 3.9.

Pression de l'air à saturation et à la température de séchage T_s

L'Équation 3.1 est l'équation de Clapeyron sous sa forme linéarisée. Elle décrit l'équilibre entre un liquide et sa vapeur [10] et permet d'évaluer la pression de saturation à une température donnée. D'après les tables thermodynamiques de l'eau [5], la pression de vapeur saturante de l'eau à la température de référence, $T_{\text{ref}} = 30^\circ\text{C}$, est égale à 4242 Pa. Celle-ci nous permet d'en déduire la pression de saturation à la température de séchage (Équation 3.3) de 60°C .

$$\ln\left(\frac{p_{\text{sat}}(T_s)}{p_{\text{sat}}(T_{\text{ref}})}\right) = -\frac{L_m}{R}\left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right) \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow p_{\text{sat}}(T_s) = p_{\text{sat}}(T_{\text{ref}}) \exp\left(-\frac{L_m}{R}\left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right) \quad (3.2)$$

$$p_{\text{sat}}(T_s) = p_{\text{sat}}(333,15) = 18099,7 \text{ Pa} \quad (3.3)$$

Humidité de l'air à saturation et à la température de séchage

Soit y l'humidité de l'air en moles d'eau par moles d'air et Y l'humidité de l'air en kg d'eau par kg d'air. Nous définissons y , la fraction molaire de l'humidité dans l'air dans l'Équation 3.4.

$$y = \frac{Y}{\frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{air}}} + Y} = \text{HR} \frac{p_{\text{sat}}(T_s)}{p_{\text{tot}}} \quad (3.4)$$

La relation donnée à l'Équation 3.5 nous permet de calculer à l'Équation 3.8, la valeur de l'humidité de l'air à saturation et à la température de séchage.

$$\frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{\left(\frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{air}}}\right) + Y_{\text{sat}}(T_s)} = \frac{p_{\text{sat}}(T_s)}{p_{\text{tot}}} \quad (3.5)$$

$$Y_{\text{sat}}(T_s) = \left(\frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{air}}}\right) \frac{p_{\text{sat}}(T_s)}{p_{\text{tot}} - p_{\text{sat}}(T_s)} \quad (3.6)$$

$$Y_{\text{sat}}(T_s) = \left(\frac{0,018}{0,02884}\right) \frac{18099,7}{101325 - 18099,7} \quad (3.7)$$

$$Y_{\text{sat}}(T_s) = 0,1357 \text{ kg d'eau/kg d'air sec} \quad (3.8)$$

Masse volumique de l'air sec

Ayant émis l'hypothèse que l'air se comporte comme un gaz parfait, nous évaluons à l'Équation 3.9, la masse volumique de l'air sec à la température de séchage considérée (60°C).

$$\rho_{\text{air}} = \frac{p_{\text{tot}} M_{\text{air}}}{R T_s} = \frac{101325.0,02884}{8,314.333,15} \quad (3.9)$$

$$\rho_{\text{air}} = 1,055 \text{ kg/m}^3 \quad (3.10)$$

Chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau

Enfin, à partir de la valeur de la chaleur latente massique de vaporisation de l'eau donnée dans la Table 3.1, nous évaluons la chaleur latente molaire correspondante :

$$L_m = L_k \cdot M_{\text{eau}} = 2256.10^3.0,018 = 40608 \text{ kJ/mol} \quad (3.11)$$

Pression de saturation à la T_s	$p_{\text{sat}}(T_s)$	18099,7	Pa
Humidité de l'air à saturation et à la T_s	$Y_{\text{sat}}(T_s)$	333,15	K
Masse volumique de l'air sec	ρ_{air}	1,055	kg/m ³
Chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau	L_m	40608	kJ/mol

TAB. 3.4 – Tableau récapitulatif des caractéristiques de l'eau et de l'air

3.2.4 Caractéristiques du ventilateur

Les caractéristiques du ventilateur sont présentées à la Table 3.5. Celles-ci sont directement dépendantes de celles du panneau photovoltaïque. En effet, c'est ce dernier qui alimente le ventilateur en énergie. En faisant varier la puissance fournie par le panneau photovoltaïque au ventilateur, le rendement (pertes d'énergie entre le panneau et le ventilateur) de ce dernier peut être régulé et donc implicitement, la puissance qui lui est délivrée et par là même sa vitesse. La vitesse de rotation du ventilateur régule ainsi le débit de l'air dans le séchoir et donc aussi la température à l'intérieur du séchoir.

De manière à atteindre une température de séchage de 60°C après une longueur de chauffe donnée, la puissance reçue par le ventilateur doit donc être modulée. Un lien entre la température de séchage et le débit du

ventilateur est établi dans la Section 3.5.

Dans la Table 3.5, nous donnons une valeur arbitraire de 0,25 au rendement du ventilateur. C'est en effet avec ces valeurs que nous avons commencé l'analyse du processus de séchage.

Rendement	η_{vent}	0,25	–
Puissance du panneau photovoltaïque du séchoir fixe	$P_{\text{v,fixe}}$	60	W
Puissance du panneau photovoltaïque du séchoir mobile	$P_{\text{v,mobile}}$	50	W

TAB. 3.5 – Caractéristiques du ventilateur

3.2.5 Dimensions des différents types de séchoirs

Séchoir mobile (Tente)

La structure et la schéma de principe de ce séchoir mobile sont présentés au Chapitre 1.

Il convient à présent de préciser les grandeurs caractéristiques de ce séchoir, à savoir : la longueur totale x_{mob} , la largeur l_{mob} et la hauteur h_{mob} du séchoir, respectivement. Les valeurs numériques de ces paramètres, ainsi que celle de la surface de séchage, sont données à la Table 3.6.

Remarque : le rôle de la bâche noire, constituant la partie inférieure du séchoir, est détaillé au Chapitre 5.

Hauteur	h_{mob}	0,43	m
Largeur	l_{mob}	1,25	m
Longueur	x_{mob}	10,5	m
Surface de séchage	Ω_{mob}	9,375	m ²

TAB. 3.6 – Dimensions séchoir mobile

Séchoir fixe

La conception du séchoir fixe, très proche de celle du séchoir mobile, et le schéma de principe s'y rapportant sont présentés dans le Chapitre 1.

Les mêmes grandeurs caractéristiques que celles envisagées dans le cas du séchoir mobile sont à prendre en considération. Les valeurs numériques de ces paramètres (x_{fixe} , l_{fixe} et h_{fixe}), ainsi que celle de la surface de séchage, sont donnés à la Table 3.7.

Hauteur	h_{fixe}	0,4	m
Largeur	l_{fixe}	2	m
Longueur	x_{fixe}	18	m
Surface de séchage	Ω_{fixe}	24	m ²

TAB. 3.7 – Dimensions séchoir fixe

Dans la suite du travail, nous faisons l'hypothèse que la couverture en plastique des séchoirs fixes et mobiles, décrit, avec la face supérieure de la base, une forme triangulaire. Cette section triangulaire est désormais appelée section droite du séchoir, Ω_p . La représentation simplifiée du séchoir est schématisée à la Figure 3.2.

La surface de cette section droite du séchoir intervenant dans le calcul du débit d'air, une évaluation numérique de celle-ci, pour les deux types de séchoir, est donnée aux Équations 3.12 et 3.13.

$$\Omega_{p,\text{fixe}} = \frac{l_{\text{fixe}} h_{\text{fixe}}}{2} = \frac{2,0,4}{2} = 0,4 \text{ m}^2 \quad (3.12)$$

$$\Omega_{p,\text{mob}} = \frac{l_{\text{mob}} h_{\text{mob}}}{2} = \frac{1,25,0,43}{2} = 0,27 \text{ m}^2 \quad (3.13)$$

Les côtés plastiques des sections droites des séchoirs sont appelés longueurs caractéristiques, L_c , et interviennent par la suite pour le calcul du diamètre hydraulique suivant lequel l'air s'écoule dans le séchoir.

Considérons deux triangles rectangles inscrits dans la section droite du séchoir et utilisons le *Théorème de Pythagore* pour formuler l'expression de la longueur caractéristique d'un séchoir à l'Équation 3.14. Les calculs précis des longueurs caractéristiques des séchoirs fixes et mobiles sont respectivement présentés dans les Équations 3.15 et 3.16.

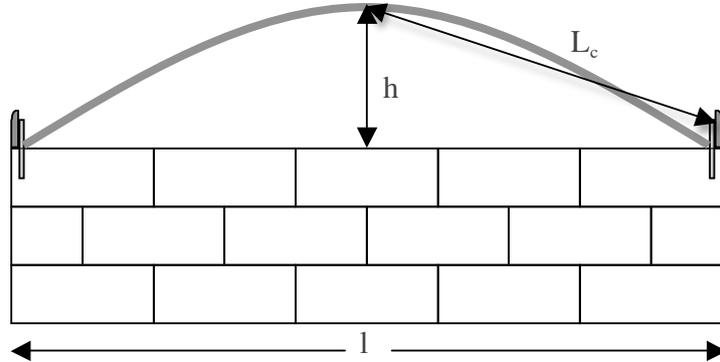


FIG. 3.2 – Vue de front du séchoir fixe

$$L_c = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + h^2} \quad (3.14)$$

$$L_{c,\text{fixe}} = \sqrt{\left(\frac{l_{\text{fixe}}}{2}\right)^2 + h_{\text{fixe}}^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{2}\right)^2 + 0,4^2} = 1,08 \text{ m} \quad (3.15)$$

$$L_{c,\text{mob}} = \sqrt{\left(\frac{l_{\text{mob}}}{2}\right)^2 + h_{\text{mob}}^2} = \sqrt{\left(\frac{1,25}{2}\right)^2 + 0,43^2} = 0,76 \text{ m} \quad (3.16)$$

Séchoir de type hangar

Les séchoirs de type hangar sont constitués d'une structure en piliers d'une hauteur h_{hangar} . Le poisson est séché sur une planche de branches de saboi (terme local pour lequel il n'existe pas de traduction française) qui est fixée à une élévation e_s par rapport au sol. L'ensemble du dispositif est recouvert par une moustiquaire pour protéger le poisson de l'infestation par les mouches [20]. La température de séchage est donc égale, dans ce cas-ci, à la température atmosphérique. Le schéma est repris à la Figure 3.3. Les grandeurs caractéristiques identiques à celles envisagées dans le cas des séchoirs fixes et mobiles sont à prendre en considération et sont reprises dans la Table 3.8.

Élévation par rapport au sol	e_s	1	m
Hauteur totale des piliers	h_{hangar}	1,3	m
Longueur	x_{hangar}	4	m
Largeur	l_{hangar}	1,5	m
Surface de séchage	Ω_{hangar}	6	m ²

TAB. 3.8 – Dimensions des séchoirs de type hangar

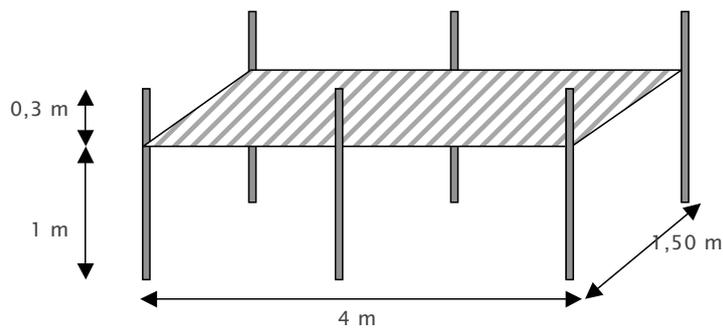


FIG. 3.3 – Séchoir de type hangar

3.2.6 Propriétés du plastique

Les radiations arrivant à la surface d'un solide sont soit absorbées, soit réfléchies. Un corps qui absorbe complètement les radiations qu'il reçoit est appelé corps noir. Il ne réfléchit aucun rayonnement. La fraction du rayonnement incident qui est absorbée s'appelle l'absorbance. Les corps noirs sont caractérisés par la même absorbance, qui vaut 1, quelles que soient la fréquence et la température du rayonnement incident.

L'énergie radiante émise par un corps noir fixe la limite supérieure de l'énergie qui peut être émise par tout type de surface. Cette énergie radiante est une fonction de la température du rayonnement incident. En effet, le flux d'énergie total émis par une surface noire (Équation 3.17) est égal à :

$$F_{\text{noire}} = \sigma.T^4 \quad (3.17)$$

Cette équation est connue sous le nom de *loi de Stefan-Boltzmann* [6]. La constante de Stefan-Boltzmann σ vaut $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Dans le cas des corps non-noirs à la température T , le flux d'énergie émis devient :

$$F = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.18)$$

La constante ϵ caractérise l'émissivité du corps considéré et elle doit être évaluée à la température T (dans le cas du corps noir, $\epsilon = 1$).

Par la suite, nous utilisons les émissivités spécifiques au plastique et à l'atmosphère afin de calculer les flux de chaleur s'y rapportant.

Le plastique est également caractérisé par un coefficient de conduction thermique correspondant à la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 K/m. Cette grandeur nous permet, par la suite, d'évaluer le flux de chaleur à travers la paroi en plastique. [21]

Émissivité du plastique	ϵ_p	0,90	–
Conductivité thermique	λ_{pvc}	0,17	W/mK
Épaisseur du plastique	e	0,001	m

TAB. 3.9 – Propriétés du plastique

3.2.7 Temps de séchage du poisson

Un seul paramètre caractérise vraiment le séchage de poisson : le temps de séchage nécessaire pour atteindre une bonne qualité de poisson séché, temps imposé par les pêcheurs maliens, et pouvant varier entre un et deux jours en fonction de la taille du poisson. Néanmoins, nous évaluons par la suite tous les paramètres nécessaires pour obtenir un temps de séchage minimal fixé à un jour.

Remarque : Il est important de noter que nous considérons des journées de séchage d'une durée approximative de huit heures. En effet, les séchoirs ne sont pas équipés de batteries et le ventilateur ne peut donc pas fonctionner

pendant la nuit. Dans le Chapitre 4, les essais caractérisés par un temps de séchage de vingt heures correspondent donc à trois journées de séchage, deux de huit heures et une de quatre heures. Néanmoins, le poisson reste à l'intérieur du séchoir pendant la nuit. Malheureusement, aucune évolution de la température n'a pu être relevée pendant la nuit. Nous n'avons donc aucune idée quant au refroidissement possible à l'intérieur du séchoir pendant ce laps de temps, évalué à 16 heures.

Temps de séchage	t_s	8	h
------------------	-------	---	---

TAB. 3.10 – Caractéristique de séchage du poisson

3.3 Débit du ventilateur sans régulation

Le débit délivré par le ventilateur est un des paramètres les plus importants dans l'utilisation des séchoirs solaires. En effet, le débit délivré par le ventilateur crée un courant d'air de vitesse v à l'intérieur du séchoir. Ce courant d'air permet d'évacuer l'humidité de l'air due à l'évaporation de l'eau contenue dans le poisson et ce, afin d'éviter les phénomènes de saturation de l'air.

Ainsi, lorsque la vitesse de l'air v augmente, la température de séchage T_s diminue. Et donc, à température de séchage T_s constante, la quantité de vapeur d'eau enlevable augmente. Ceci a pour conséquence qu'il est impératif de fixer au mieux la masse de poisson frais introduite dans le séchoir, en considérant une température de séchage de 60°C, afin de pouvoir évacuer un maximum de la vapeur produite lors du phénomène d'évaporation.

Évaluons le débit d'air maximum que peut fournir le ventilateur, et donc la vitesse maximale du courant d'air, fonction de la puissance du panneau photovoltaïque P_v et de la surface de la section droite du séchoir Ω_p .

Les paramètres suivants sont à considérer :

- Q_{air} , le débit de l'air dans le séchoir en kg d'air/s ;
- v , la vitesse de l'air dans le séchoir en m/s ;
- P_v , la puissance du panneau photovoltaïque en W ;
- η_{vent} , le rendement du ventilateur.

La puissance fournie par le ventilateur au fluide, l'air, est fonction à la fois, de P_v et de η_{vent} . Les Équations 3.19 et 3.20 donnent la puissance réellement fournie respectivement par le ventilateur du séchoir fixe et par le ventilateur du séchoir mobile.

$$\eta_{\text{vent}} P_{v,\text{fixe}} = 0,25.60 = 15 \text{ W} \quad (3.19)$$

$$\eta_{\text{vent}} P_{v,\text{mob}} = 0,25.50 = 12,5 \text{ W} \quad (3.20)$$

Par définition, le débit de l'air est égal au produit de la surface d'écoulement du fluide par la vitesse de ce même fluide. Les valeurs de celui-ci dans le cas des séchoirs solaires fixes et mobiles sont données dans les Équations 3.21 et 3.22. Celles-ci ne peuvent pas être calculées exactement car nous n'avons pas encore déterminé la vitesse de l'air maximale acceptable pour atteindre une température de séchage T_s de 60°C à la fin de la longueur de chauffe. Les valeurs des surfaces de sections droites Ω_p utilisées ci-dessous sont calculées à la Section 3.2.5 et la masse volumique de l'air sec est évaluée à la Section 3.2.3.

$$Q_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} v \Omega_{p,\text{fixe}} = 1,055.v.0,4 = 0,42v \text{ kg d'air/s} \quad (3.21)$$

$$Q_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} v \Omega_{p,\text{mob}} = 1,055.v.0,27 = 0,28v \text{ kg d'air/s} \quad (3.22)$$

Exprimons E , l'énergie fournie au fluide (l'air) par le ventilateur de manière générale dans l'Équation 3.23. Celle-ci peut être évaluée pour le séchoir solaire fixe et pour le séchoir solaire mobile.

$$E = m \frac{v^2}{2} \quad (3.23)$$

Considérons m égal à 1 kg de manière à simplifier les calculs. Le produit des Équations 3.23 et 3.21 ou 3.22, peut être identifié aux Équations 3.19 et 3.20, définissant la puissance fournie par le ventilateur (dimension de la valeur obtenue identique).

$$Q_{\text{air}} E = \eta_{\text{vent}} P_v \quad (3.24)$$

Nous développons cette équation :

$$\rho_{\text{air}} \frac{v^3}{2} \Omega_p = \eta_{\text{vent}} P_v \quad (3.25)$$

La vitesse de l'air dans les cas spécifiques des séchoirs fixes et mobiles est donnée par les Équations 3.26 et 3.27.

$$v_{\text{fixe}} = \sqrt[3]{\frac{2 \eta_{\text{vent}} P_{\text{v,fixe}}}{\rho_{\text{air}} \Omega_{\text{p,fixe}}}} \quad (3.26)$$

$$v_{\text{mob}} = \sqrt[3]{\frac{2 \eta_{\text{vent}} P_{\text{v,mob}}}{\rho_{\text{air}} \Omega_{\text{p,mob}}}} \quad (3.27)$$

Remarque : Dans la Section 3.2.4, nous avons fixé le rendement du ventilateur de manière générale pour le séchoir solaire fixe et pour le séchoir solaire mobile. Si, lorsque nous calculons le débit nécessaire pour atteindre une température de séchage de 60°C, le rendement n'est plus identique pour le séchoir fixe et pour le séchoir mobile, nous devons alors également considérer des valeurs différentes de η_{vent} . Cette contrainte supplémentaire doit être considérée par la suite car la même température de séchage T_s doit être obtenue en une longueur plus courte pour le séchoir mobile que pour le séchoir fixe.

En particulier, si η_{vent} vaut 1, la vitesse de l'air dans le séchoir est donnée aux Équations 3.26 et 3.27 pour les séchoirs fixes et mobiles, respectivement [3].

$$\begin{aligned} v_{\eta_{\text{vent}}=1,\text{fixe}} &= \sqrt[3]{\frac{2 P_{\text{v,fixe}}}{\rho_{\text{air}} \Omega_{\text{p,fixe}}}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{2.60}{1,055.0,4}} = 6,6 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} v_{\eta_{\text{vent}}=1,\text{mob}} &= \sqrt[3]{\frac{2 P_{\text{v,mob}}}{\rho_{\text{air}} \Omega_{\text{p,mob}}}} \\ &= \sqrt[3]{\frac{2.50}{1,055.0,27}} = 7 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (3.29)$$

3.4 Échanges d'énergie entre le séchoir et l'environnement

3.4.1 Pertes de chaleur à travers la paroi en plastique

Nous présentons à la Figure 3.4 le schéma global des pertes de chaleur par convection et conduction, à travers la paroi. La variable X représente la

distance entre un point extérieur et un point situé au centre du séchoir.

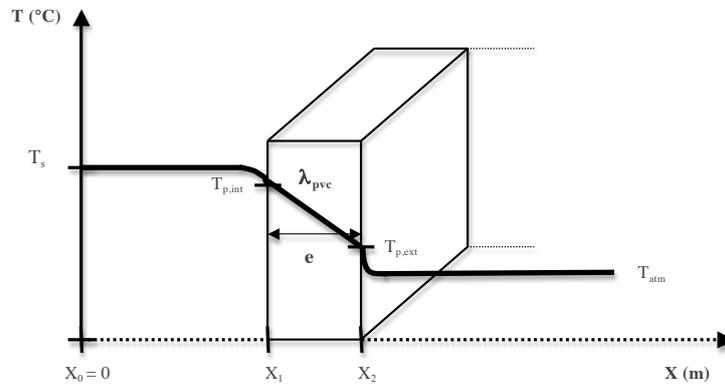


FIG. 3.4 – Transferts de chaleur à travers la paroi en plastique

Pour pouvoir évaluer les pertes de chaleur à travers la paroi en plastique, nous avons besoin de connaître plusieurs valeurs de température : la température de séchage T_s , la température de la face intérieure du plastique $T_{p,int}$, la température de la face extérieure au plastique $T_{p,ext}$ et la température de l'atmosphère T_{atm} . Parmi ces températures, seules les températures de séchage et de l'atmosphère ont été introduites à la Section 3.2.2. Les deux autres sont inconnues.

Nous considérons que le flux d'énergie, sous forme de chaleur, se déplace vers l'extérieur des séchoirs solaires, dans la direction opposée au ventilateur. En effet, la température de séchage T_s est plus élevée que la température atmosphérique et un flux de chaleur se crée pour essayer de réchauffer les éléments d'air de l'atmosphère.

Nous introduisons trois phénomènes successifs qui ont lieu entre le séchoir et l'environnement. Ces phénomènes sont développés plus amplement dans les sections qui suivent.

1. transfert par convection forcée entre l'air ambiant du séchoir et la face intérieure du plastique
2. transfert par conduction dans l'épaisseur du plastique
3. transfert par convection naturelle entre la face extérieure du plastique et l'atmosphère

Pour pouvoir donner un ordre de grandeur aux différents termes de transfert de chaleur, nous devons connaître les valeurs de $T_{p,int}$ et de $T_{p,ext}$. Nous faisons donc l'hypothèse que la température de la face intérieure de plastique est légèrement inférieure à celle de séchage. De même, la température de la face extérieure du plastique est légèrement inférieure à celle de la face intérieure, tout en restant supérieure à la température de l'atmosphère. Nous fixons donc arbitrairement les valeurs de $T_{p,int}$ et $T_{p,ext}$ comme égales à 328,15 K et 323,15 K, respectivement.

Nous pouvons facilement prouver que ces températures n'ont finalement que peu d'influence sur le bilan net des flux d'énergie du séchoir. En effet, si l'on fait varier ces températures de 10 degrés, par exemple, la différence sur l'efficacité d'absorption du séchoir est tout à fait négligeable. Néanmoins, si nous utilisons les coefficients de transfert de chaleur que ces températures nous permettent de déterminer, nous pouvons alors réévaluer ces valeurs de façon plus précise. Ce point est détaillé dans la Section 3.6.

La Table 3.11 récapitule les températures qui sont utilisées dans la suite de cette Section 3.4.1.

Température atmosphérique	T_{atm}	303,15	K
Température de séchage	T_s	333,15	K
Température intérieure du plastique	$T_{p,int}$	328,15	K
Température extérieure du plastique	$T_{p,ext}$	323,15	K

TAB. 3.11 – Températures caractéristiques des échanges de chaleur à travers la paroi en plastique

Introduction théorique

Soit q la densité de flux d'énergie, sous forme de chaleur, entre le séchoir et l'environnement en W/m^2 . Cette densité de flux doit être évaluée individuellement pour chacun des trois phénomènes de transfert de chaleur qui ont lieu entre le séchoir et l'environnement.

1. **La convection forcée** - Le phénomène de convection correspond à la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou liquide dont les molécules sont en mouvement. Le fluide considéré dans notre cas est l'air. Nous détaillons ci-dessous le phénomène de convection de façon

un peu plus approfondie [11].

Lorsque l'air et le plastique ne sont pas à la même température, une certaine quantité de chaleur est échangée entre le solide et les éléments de fluide à son contact. C'est cet échange de chaleur que nous appelons la conduction thermique.

Lorsque l'élément d'air a échangé de la chaleur, il se déplace et un autre élément d'air vient le remplacer au contact du solide. Au cours de son déplacement, l'élément d'air initial rencontre d'autres éléments d'air avec lesquels il échange de la chaleur par conduction.

Au niveau élémentaire, on parle donc de conduction thermique, le phénomène global est appelé convection thermique : celle-ci est le résultat de la combinaison entre le phénomène de conduction et le mouvement des éléments d'air.

Le transfert de chaleur s'opère donc en deux phases :

- La première phase est caractérisée par l'échange de chaleur par conduction entre la surface de la paroi en plastique et une mince couche d'air au voisinage de cette surface ;
- La deuxième phase correspond au déplacement des éléments d'air situés dans la mince couche de fluide vers la masse de l'air. Ce déplacement se fait soit naturellement, suite à une variation de la masse volumique du film refroidi par rapport à la masse volumique de l'air en masse (au loin du produit solide), soit artificiellement par l'action d'une pompe ou d'un agitateur. Nous parlons dès lors de convection naturelle et de convection forcée.

Le phénomène de convection, qu'il soit naturel ou forcé, correspond donc à un transport de chaleur par transfert de matière. [7]

Dans le cas des séchoirs solaires, la convection forcée est le mouvement de l'air forcé par le ventilateur, indépendamment des phénomènes thermiques. Le ventilateur crée un gradient de pression extérieure qui provoque les déplacements des éléments d'air. Ce phénomène est donc étroitement lié à l'écoulement de l'air dans le séchoir.

Nous définissons la densité de flux d'énergie du phénomène de convection forcée dans l'Équation 3.30.

$$q = h_f (T_s - T_{p,int}) \quad (3.30)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection forcée h_f est déterminé en tenant compte du régime d'écoulement de l'air dans

le séchoir suivant une étude dimensionnelle appropriée permet de déterminer ce coefficient. Celui-ci nous permet ensuite d'en déduire la densité de flux d'énergie, sous forme de chaleur, entre le séchoir et la face intérieure du plastique.

2. **La conduction thermique** - Le phénomène de conduction thermique se définit comme la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission. Cette conduction thermique est liée à l'existence d'un gradient de température au sein de la paroi en plastique.

L'Équation 3.31 détermine la densité de flux d'énergie q , sous forme de chaleur, liée au phénomène de conduction thermique.

La variable R_{th} correspond à la résistance thermique de la paroi en plastique : elle se définit comme le rapport entre l'épaisseur de la paroi e et la conductivité du plastique λ_{pvc} et se mesure en W/m^2K .

$$q = \frac{\lambda_{pvc}}{e} (T_{p,int} - T_{p,ext}) = \frac{(T_{p,int} - T_{p,ext})}{R_{th}} \quad (3.31)$$

3. **La convection naturelle** - Le phénomène de convection naturelle correspond à un écoulement d'air provoqué par l'action d'une poussée d'Archimède résultant d'une différence de masse volumique dans le fluide.

Dans le cas des séchoirs solaires, la température du fluide croît à proximité de la paroi en plastique et entraîne une diminution de la masse volumique de l'air. De plus, la diminution de la masse volumique dépend de la dilatation de l'air, qui est elle-même dépendante de l'élévation de la température. Comme l'air ambiant a ici une température plus faible, il exerce une pression vers le haut et provoque le déplacement des éléments d'air chaud. De nouveaux éléments d'air froid remplacent les éléments originellement présents.

Nous établissons dès lors l'Équation 3.32 qui décrit la densité de flux d'énergie q , sous forme de chaleur, induite par le phénomène de convection naturelle.

$$q = h_{nat} (T_{p,ext} - T_{atm}) \quad (3.32)$$

Toutes les différences de température exprimées dans les densités de flux énoncées ci-dessus peuvent être exprimées en fonction de la différence de

température de l'air à travers la section transversale du séchoir, c'est-à-dire en fonction de $(T_s - T_{\text{atm}})$.

L'Équation 3.33 définit le bilan global des flux d'énergie, sous forme de chaleur, à travers la paroi en plastique.

$$q = \frac{T_s - T_{\text{atm}}}{\left(\frac{1}{h_{\text{nat}}} + R_{\text{th}} + \frac{1}{h_f(v_{\text{max}})}\right)} = U(v) (T_s - T_{\text{atm}}) \quad (3.33)$$

$$\Rightarrow U(v) = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{\text{nat}}} + R_{\text{th}} + \frac{1}{h_f(v_{\text{max}})}\right)} \quad (3.34)$$

$U(v)$, défini à l'Équation 3.34 est le coefficient global de transfert de chaleur au travers de la paroi et v_{max} est la vitesse maximale admissible de l'air.

Pour la suite des différents développements, nous considérons que l'air est caractérisé par les propriétés suivantes :

- ρ_{air} , la masse volumique de l'air
- μ_{air} , la viscosité de l'air
- $c_{p,\text{air}}$, la chaleur spécifique massique de l'air
- λ_{air} , la conductivité thermique de l'air
- β_{air} , le coefficient de dilatation thermique

De manière à évaluer le coefficient de transfert de chaleur global à travers la paroi en plastique et par là même, la densité de flux globale, nous évaluons chacun des phénomènes de transfert de chaleur séparément. Le coefficient de transfert de chaleur par convection forcée ne peut être entièrement détaillé dans cette section car nous ne connaissons par encore la vitesse de l'air dans le séchoir. h_f et $U(v)$ sont donc donnés numériquement à la Section 3.6.

Densité de flux d'énergie q par transfert de chaleur par convection forcée

Les pertes de chaleur par convection forcée ont lieu à l'intérieur du séchoir, entre le courant d'air à la température T_s et la face intérieure de la paroi en plastique à la température $T_{p,\text{int}}$. Dans l'analyse dimensionnelle, nous considérons les propriétés de l'air à la température moyenne du transfert de chaleur.

$$T_{\text{moy}} = \frac{T_{\text{p,int}} + T_s}{2} = \frac{328,15 + 333,15}{2} = 330,65 \text{ K} = 57,5 \text{ °C} \quad (3.35)$$

La densité de flux de chaleur par convection forcée est donnée à l'Équation 3.30. Nous devons donc déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection forcée h_f par analyse dimensionnelle. La détermination de ce coefficient par expérience est rendue impossible à réaliser à cause du trop grand nombre d'expériences nécessaires.

Les nombres de Nusselt, Prandtl et Reynolds, nombres adimensionnels caractérisant respectivement l'échange thermique, les propriétés thermiques du fluide ainsi que le régime d'écoulement du fluide, lors d'une circulation forcée de ce dernier à l'intérieur d'un tube cylindrique vont nous permettre de déterminer h_f .

- le nombre de Nusselt décrit l'efficacité du transfert de chaleur par le fluide en écoulement laminaire ou turbulent, par rapport à un simple transfert par conduction. Si Nu est égal à 1, le transfert se fait uniquement par conduction.

$$\text{Nu} = \frac{h_f D_h}{\lambda_{\text{air}}} \quad (3.36)$$

- le nombre de Prandtl a un rôle important dans les phénomènes de convection :

$$\text{Pr} = \frac{c_{\text{p,air}} \mu_{\text{air}}}{\lambda_{\text{air}}} \quad (3.37)$$

- le nombre de Reynolds tient compte de la dynamique de l'écoulement du fluide :

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{air}} v D_h}{\mu_{\text{air}}} \quad (3.38)$$

Le nombre caractérisant les effets de bords, aussi appelé abscisse réduite $\frac{x}{D_h}$, n'est pas considéré dans notre raisonnement, celui-ci n'intervient plus quand nous sommes suffisamment loin des extrémités du tube (pas contre la paroi). [1, 12]

Dans le nombre de Reynolds, D_h est le diamètre hydraulique qui est le diamètre suivant lequel l'air s'écoule dans le séchoir. Les Équations 3.39 et

3.40 définissent le diamètre hydraulique spécifique des séchoirs solaires fixes et mobiles, respectivement.

$$D_{h,fixe} = \frac{4\Omega_{p,fixe}}{2L_{c,fixe} + l_{fixe}} = \frac{4,0,4}{2,1,08 + 2} = 0,38 \text{ m} \quad (3.39)$$

$$D_{h,mob} = \frac{4\Omega_{p,mob}}{2L_{c,mob} + l_{mob}} = \frac{4,0,27}{2,0,76 + 1,25} = 0,39 \text{ m} \quad (3.40)$$

Les propriétés spécifiques de l'air pour la température moyenne de transfert de chaleur considérée sont données dans la littérature [7] et reprises ci-dessous.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{air} = 1,0679 \text{ kg/m}^3 \\ \mu_{air} = 1,99 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m s} \\ c_{p,air} = 1,0078 \text{ kJ/kg K} \\ \lambda_{air} = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ kJ/m s K} \\ \beta_{air} = 3,025 \cdot 10^{-3} \text{ K} \end{array} \right. \quad (3.41)$$

L'évaluation des nombres adimensionnels nous donne les valeurs suivantes :

$$Pr = \frac{1,0078 \cdot 10^3 \cdot 1,99 \cdot 10^{-5}}{2,83 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3} = 0,7087 \quad (3.42)$$

$$Re_{fixe} = \frac{1,0679 \cdot v_{fixe} \cdot 0,38}{1,99 \cdot 10^{-5}} = 20392,1 v_{fixe} \quad (3.43)$$

$$Re_{mob} = \frac{1,0679 \cdot v_{mob} \cdot 0,39}{1,99 \cdot 10^{-5}} = 20928,7 v_{mob} \quad (3.44)$$

La relation générale qui lie les nombres adimensionnels dans le cas de la convection forcée est présentée à l'Équation 3.45.

$$Nu = k Re^m Pr^n \quad (3.45)$$

où k est une constante de proportionnalité et les exposants m et n sont dépendants de la géométrie et du régime d'écoulement.

La littérature nous renseigne sur les valeurs de k , m et n dans le cas d'une géométrie tubulaire en écoulement turbulent qui est, par la suite, le modèle utilisé pour décrire les séchoirs solaires (le déplacement de l'air dans le séchoir est assimilé à celui d'un écoulement turbulent, $Re > 4000$). Dans ce cas, les

valeurs de k , m et n sont respectivement 0,023, 0,8 et 0,3, ce qui nous permet d'évaluer la valeur du nombre de Nusselt à la fois pour le séchoir fixe et pour le séchoir mobile. [7] Cette corrélation s'appelle la *formule de Colburn* et elle n'est valable que si $10000 < Re < 120000$ et si $0,7 < Pr < 120$, ce qui est le cas ici. [1]

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad (3.46)$$

$$Nu_{\text{fixe}} = 0,023.Re_{\text{fixe}}^{0,8}.0,7087^{0,3} \quad (3.47)$$

$$Nu_{\text{mob}} = 0,023.Re_{\text{mob}}^{0,8}.0,7087^{0,3} \quad (3.48)$$

Néanmoins, nous remarquons que le nombre de Nusselt étant dépendant de la vitesse de l'air, son expression est différente pour le séchoir fixe et pour le séchoir mobile.

Le calcul du nombre de Nusselt à l'aide de l'Équation 3.46 rend alors évident celui du coefficient h_f .

Les coefficients de transfert de chaleur par convection forcée dans le cas des séchoirs fixes et mobiles sont donnés aux Équations 3.49 et 3.50, respectivement.

$$\begin{aligned} h_{f,\text{fixe}} &= \frac{Nu_{\text{fixe}} \lambda_{\text{air}}}{D_{h,\text{fixe}}} = \frac{Nu_{\text{fixe}}.2,83.10^{-5}}{0,38} \\ &= 7,45.10^{-5} Nu_{\text{fixe}} \text{ kJ/m}^2\text{sK} \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} h_{f,\text{mob}} &= \frac{Nu_{\text{mob}} \lambda_{\text{air}}}{D_{h,\text{mob}}} = \frac{Nu_{\text{mob}}.2,83.10^{-5}}{0,39} \\ &= 7,26.10^{-5} Nu_{\text{mob}} \text{ kJ/m}^2\text{sK} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Les équations 3.49 et 3.50 sont résolues à la Section 3.6, après avoir déterminé la vitesse de l'air dans les séchoirs solaires fixes et mobiles.

Densité de flux d'énergie par transfert de chaleur par conduction thermique dans le plastique

Pour pouvoir évaluer la densité de flux de chaleur associée au transfert de chaleur par conduction thermique dans la paroi, nous évaluons la résistance

thermique de la paroi en plastique. Cette résistance thermique est égale au rapport entre l'épaisseur du plastique et sa conductivité thermique.

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda_{\text{pvc}}} = \frac{0,001}{0,17} = 0,006 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (3.51)$$

L'Équation 3.52 est donc l'expression de la densité de flux de chaleur par conduction thermique existant à travers la paroi en plastique.

$$\begin{aligned} q &= \lambda_{\text{pvc}} \frac{T_{\text{p,int}} - T_{\text{p,ext}}}{e} = \frac{T_{\text{p,int}} - T_{\text{p,ext}}}{R_{\text{th}}} \\ &= \frac{328,15 - 323,15}{0,006} = 833,33 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (3.52)$$

Remarque : La résistance thermique ne dépend que de l'épaisseur et des caractéristiques du plastique choisi et a donc une valeur unique pour les deux types de séchoirs, fixes et mobiles.

Densité de flux d'énergie par transfert de chaleur par convection naturelle

Les pertes de chaleur par convection naturelle ont lieu sur la surface extérieure de la paroi en plastique, entre la face extérieure du plastique à la température $T_{\text{p,ext}}$ et l'air ambiant à la température T_{atm} . Tout comme dans le cas de la convection forcée, nous résolvons une analyse dimensionnelle sur les séchoirs solaires fixes et mobiles afin de déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle h_{nat} . Nous évaluons ce coefficient h_{nat} à la température moyenne de transfert de chaleur, calculée dans l'Équation 3.53.

$$T_{\text{moy}} = \frac{T_{\text{p,ext}} + T_{\text{atm}}}{2} = \frac{323,15 + 303,15}{2} = 313,15 \text{ K} = 40 \text{ °C} \quad (3.53)$$

Pour pouvoir évaluer le coefficient h_{nat} , nous procédons à une analyse dimensionnelle sur les séchoirs solaires fixes et mobiles. Nous introduisons ci-dessous les trois nombres adimensionnels qui interviennent dans cette analyse :

– le nombre de Nusselt :

$$\text{Nu} = \frac{h_{\text{nat}}L}{\lambda} \quad (3.54)$$

– le nombre de Grashof :

$$\text{Gr} = \frac{\rho_{\text{air}}^2 \cdot \beta_{\text{air}} \cdot g \cdot L_c^3 \cdot \Delta T}{\mu_{\text{air}}^2} \quad (3.55)$$

– le nombre de Prandtl :

$$\text{Pr} = \frac{c_{p,\text{air}} \cdot \mu_{\text{air}}}{\lambda_{\text{air}}} \quad (3.56)$$

Le nombre de Grashof a le même rôle que le nombre de Reynolds dans la convection forcée et tient donc compte du caractère non dynamique de ce type de convection. Le paramètre L_c représente la longueur caractéristique dont les valeurs respectives pour les séchoirs solaires fixes et mobiles sont reprises aux Équations 3.15 et 3.16, respectivement.

Les propriétés spécifiques de l'air pour la température moyenne de transfert de chaleur considérée sont données dans la littérature [7]. Les valeurs correspondantes sont données ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\text{air}} = 1,1267 \text{ kg/m}^3 \\ \mu_{\text{air}} = 1,912 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m s} \\ c_{p,\text{air}} = 1,0042 \text{ kJ/kg K} \\ \lambda_{\text{air}} = 2,71 \cdot 10^{-5} \text{ kJ/m s K} \\ \beta_{\text{air}} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \end{array} \right. \quad (3.57)$$

Nous procédons dès lors à la résolution de l'analyse dimensionnelle. Plus particulièrement, nous évaluons ci-dessous les nombres de Prandtl et de Grashof.

$$\text{Pr} = \frac{1,0042 \cdot 10^3 \cdot 1,912 \cdot 10^{-5}}{2,71 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3} = 0,7085 \quad (3.58)$$

$$\text{Gr}_{\text{fixe}} = \frac{1,1267^2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 1,08^3 \cdot (323,15 - 303,15)}{(1,912 \cdot 10^{-5})^2} = 2,72 \cdot 10^9 \quad (3.59)$$

$$\text{Gr}_{\text{mob}} = \frac{1,1267^2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 0,76^3 \cdot (323,15 - 303,15)}{(1,912 \cdot 10^{-5})^2} = 9,52 \cdot 10^8 \quad (3.60)$$

L'Équation 3.61 représente la forme des relations que nous trouvons dans la littérature pour l'évaluation des phénomènes de convection naturelle dans les fluides. Dans cette équation, C est une constante de proportionnalité et

m est dépendant de la température.

$$\text{Nu} = C (\text{Gr Pr})^m \quad (3.61)$$

Les valeurs des constantes C et m sont données dans la littérature en fonction de la géométrie et de la valeur du produit Gr Pr . Ce produit Gr Pr est égal à $1,93 \cdot 10^9$ pour le séchoir fixe et à $6,74 \cdot 10^8$ pour le séchoir mobile. La géométrie du système où a lieu le transfert de chaleur par convection naturelle peut être assimilée à la face supérieure d'une plaque chaude (la paroi en plastique).

D'après les tables de corrélations, nous trouvons que C vaut 0,15 alors que m vaut 0,33 pour $8 \cdot 10^6 < \text{Gr Pr} < 10^{11}$. Ceci nous permet de calculer les deux nombres de Nusselt caractéristiques des séchoirs solaires fixes et mobiles, respectivement.

$$\text{Nu}_{\text{fixe}} = 0,15(1,93 \cdot 10^9)^{0,33} = 173,91 \quad (3.62)$$

$$\text{Nu}_{\text{mob}} = 0,15(6,74 \cdot 10^8)^{0,33} = 122,9 \quad (3.63)$$

Les valeurs des nombres de Nusselt rendent alors évident le calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle, h_{nat} , des séchoirs solaires fixes et mobiles donnés aux Équations 3.64 et 3.65.

$$h_{\text{nat,fixe}} = \frac{\text{Nu}_{\text{fixe}} \lambda_{\text{air}}}{L_{c,\text{fixe}}} = \frac{173,91 \cdot 2,71 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{1,077} = 4,38 \text{ J/m}^2\text{sK} \quad (3.64)$$

$$h_{\text{nat,mob}} = \frac{\text{Nu}_{\text{mob}} \lambda_{\text{air}}}{L_{c,\text{mob}}} = \frac{122,9 \cdot 2,71 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{0,7586} = 4,39 \text{ J/m}^2\text{sK} \quad (3.65)$$

Les valeurs des coefficients de transfert de chaleur par convection naturelle dans le cas du séchoir fixe et du séchoir mobile sont très semblables. Par la suite, nous faisons donc l'hypothèse que :

$$h_{\text{nat,mob}} \simeq h_{\text{nat,fixe}} = h_{\text{nat}} = 4,38 \text{ J/m}^2\text{sK} \quad (3.66)$$

Cette valeur du coefficient de transfert de chaleur nous permet, dès à présent, de calculer la densité de flux d'énergie, sous forme de chaleur, mesurée lors du phénomène de convection naturelle.

$$q = h_{\text{nat}} (T_{\text{p,ext}} - T_{\text{atm}}) = 4,38(323,15 - 303,15) = 87,6 \text{ W/m}^2 \quad (3.67)$$

Coefficient global de transfert de chaleur $U(v)$ à travers la paroi à v_{\max}

De manière à pouvoir déterminer la vitesse maximale de l'air afin d'obtenir une température de séchage de 60°C , nous devons à présent considérer les pertes globales d'énergie à travers la paroi en plastique. Ces pertes sont fonctions du coefficient global de transfert de chaleur $U(v)$ que nous déterminons ci-dessous grâce à la relation 3.34, établie précédemment, et qui tient compte des différents phénomènes de transfert de chaleur venant d'être envisagés.

$$U(v_{\max}) = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{\text{nat}}} + R_{\text{th}} + \frac{1}{h_f(v_{\max})}\right)} \quad (3.68)$$

Ce coefficient, qui dépend de la vitesse de l'air maximale admissible, nous permet ainsi d'évaluer le bilan global des pertes de chaleur à travers la paroi en plastique. Il se mesure en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Les valeurs de ce coefficient ainsi que celle du bilan sont présentées à la Section 3.6 qui établit la vitesse maximum admissible de l'air dans les séchoirs solaires.

3.4.2 Densité de flux solaire

On appelle la densité de flux solaire l'énergie émise par le soleil qui, sous forme de rayonnement, arrive à la surface de la terre par seconde et par mètre carré de surface horizontale de rayonnement. Cette densité de flux se mesure en W/m^2 . Elle dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'exposition de la paroi au soleil à l'instant considéré.

Dans le cas du séchage solaire de poisson, nous considérons la densité de flux solaire moyenne reçue par les séchoirs au cours d'une journée. Si on restreint la durée de séchage à environ 4 heures autour du zénith ($\sim 13\text{h}$), on obtient une valeur plus représentative de la densité de flux solaire réellement captée par les séchoirs pendant la période de séchage. Les valeurs de densité de flux solaire moyenne sont données dans la table 3.12. [14]

Période	$F_{s,\text{moyen}}$	$F_{s,+/-4\text{hzenit}}$	Lever du soleil	Coucher du soleil
01/02 - 15/02	546	693	7h26	18h53
16/02 - 28/02	570	728	7h20	18h56
01/03 - 15/03	590	760	7h11	18h58
16/03 - 31/03	607	788	7h00	18h59
01/04 - 15/05	617	807	6h50	19h00

TAB. 3.12 – Densité de flux solaire moyenne au Mali en W/m^2

3.4.3 Densité de rayonnement de la surface en plastique

Comme nous l'avons introduit dans la Section 3.2.6, la densité de flux d'énergie, sous forme de rayonnement, émise par des surfaces non-noires à la température T est égale à :

$$F = \epsilon \sigma T^4$$

Nous adaptons facilement cette équation au cas de la densité de rayonnement de la surface en plastique. La température que nous devons considérer dans ce cas-ci est celle de la face extérieure de la paroi en plastique $T_{\text{p,ext}}$. Dans ce cas-ci, nous devons utiliser la température réelle de la face extérieure de la paroi en plastique. Cette température peut être calculée grâce aux coefficients de transfert de chaleur évalués précédemment. La densité de rayonnement de la surface en plastique est donnée de manière théorique à l'Équation 3.69. Sa valeur exacte est déterminée dans la section 3.6 après avoir évalué la valeur de h_f , qui nécessite de connaître la vitesse maximale admissible de l'air.

$$\begin{aligned} F_p &= \epsilon_p \sigma T_{\text{p,ext}}^4 = 0,9.5,6703.10^{-8}.T_{\text{p,ext}}^4 \\ &= 5,1.10^{-8}T_{\text{p,ext}}^4 \text{ W}/\text{m}^2 \end{aligned} \quad (3.69)$$

3.4.4 Densité de flux atmosphérique

Une partie du flux solaire émis par le soleil est absorbé par l'atmosphère. Ce flux absorbé par l'atmosphère est ensuite réémis à une longueur d'onde différente. C'est ce dernier flux que l'on nomme le flux atmosphérique.

Dans cette section, nous calculons la densité du flux atmosphérique. Le

raisonnement à suivre est identique à celui utilisé dans le cas de la densité du rayonnement de la surface en plastique. En effet, ce dernier est également une partie du flux solaire initialement absorbé par les éléments de la paroi en plastique et réémis à une longueur d'onde différente.

Dans ce cas-ci, la température considérée est celle de l'atmosphère T_{atm} . L'Équation 3.70 ci-dessous définit la densité de flux atmosphérique.

$$\begin{aligned} F_{\text{atm}} &= \epsilon_{\text{atm}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{atm}}^4 = 0,9,5,6703 \cdot 10^{-8} \cdot 303,15^4 \\ &= 431 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (3.70)$$

3.4.5 Bilan net des flux sur le séchoir solaire à v_{max}

Dans les sections précédentes, nous avons évalué les différents termes de flux qui interviennent dans le cas des séchoirs solaires de poisson. Nous pouvons donc désormais évaluer l'efficacité d'absorption d'énergie de ces séchoirs, η_s .

L'Équation 3.71 décrit l'expression de l'efficacité d'absorption de l'énergie.

$$\eta_s = \frac{(lx F_s - 2L_c x F_p + lx F_{\text{atm}} - 2L_c x q)}{lx F_s} \quad (3.71)$$

Nous notons que q (Équation 3.33), la densité globale des flux d'énergie à travers la paroi en plastique, ne peut être définie que si l'on connaît la vitesse de l'air dans le séchoir. De plus, la densité de flux solaire, F_s , varie en fonction de la période considérée (Table 3.12). Il faut donc choisir une période afin d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de l'efficacité d'absorption des séchoirs.

Cette Équation 3.71, au même titre que toutes les équations relatives au transfert de chaleur par convection forcée, est donc évaluée dans la Section 3.6. Néanmoins, nous exprimons déjà ci-dessous l'Équation 3.71 appliquée aux deux cas particuliers des séchoirs solaires fixes et mobiles.

$$\eta_{s,\text{fixe}} = \frac{(l_{\text{fixe}} x_{\text{fixe}} F_s - 2L_{c,\text{fixe}} x_{\text{fixe}} F_p + l_{\text{fixe}} x_{\text{fixe}} F_{\text{atm}} - 2L_{c,\text{fixe}} x_{\text{fixe}} q_{\text{fixe}})}{l_{\text{fixe}} x_{\text{fixe}} F_s} \quad (3.72)$$

$$\eta_{s,\text{mob}} = \frac{(l_{\text{mob}} x_{\text{mob}} F_s - 2L_{c,\text{mob}} x_{\text{mob}} F_p + l_{\text{mob}} x_{\text{mob}} F_{\text{atm}} - 2L_{c,\text{mob}} x_{\text{mob}} q_{\text{mob}})}{l_{\text{mob}} x_{\text{mob}} F_s} \quad (3.73)$$

3.5 Détermination d'un lien entre la température T_s et le débit du ventilateur

L'objectif de cette section est de déterminer le débit du ventilateur nécessaire pour obtenir une température adéquate pour le séchage (60°C) à la fin de la zone de chauffe donnée. Cette longueur est de 3 mètres pour le séchoir mobile et de 6 mètres pour le séchoir fixe.

La Figure 3.5 est le schéma qui est utilisé pour écrire le bilan d'énergie sur le séchoir. L représente la longueur du séchoir selon la direction axiale z .

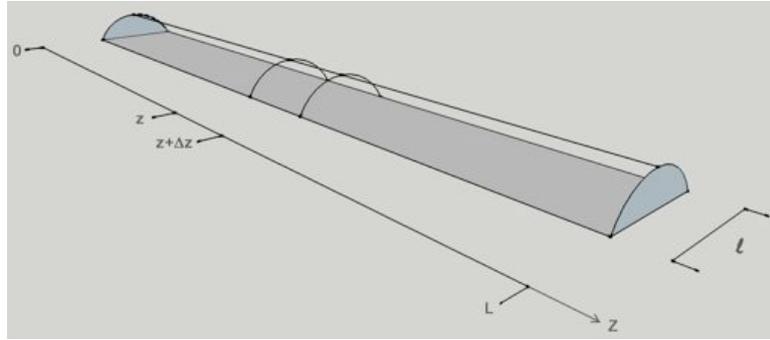


FIG. 3.5 – Bilan d'énergie : schéma du séchoir mobile

Nous considérons le bilan d'énergie sur une tranche $[z, z + \Delta z]$ du séchoir et $T(z)$ l'évolution de la température selon la position axiale z dans le séchoir. Nous distinguons des termes d'énergie entrante et des termes d'énergie sortante de cette tranche. Ces différents termes ont été introduits dans les sections précédentes et sont détaillés ci-après [8] :

1. **Termes d'énergie entrante dans la tranche en z :**

- le flux d'énergie lié au phénomène de convection : $v \Omega_p \rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} T(z)$;
- le flux atmosphérique : $\Delta z l \epsilon_{\text{air}} \sigma T_{\text{atm}}^4$;
- le flux solaire direct : $\Delta z l F_s$.

2. **Termes d'énergie sortante de la tranche en $z + \Delta z$:**

- le flux d'énergie lié au phénomène de convection : $v \Omega_p \rho_{\text{air}} c_{p,\text{air}} T(z + \Delta z)$;
- le flux d'énergie correspondant au transfert de chaleur global à travers la paroi en plastique : $2L_c \Delta z U(v) (T(z) - T_{\text{atm}})$;
- le flux d'énergie lié au rayonnement de la paroi en plastique : $2L_c \Delta z \epsilon_p \sigma T_{p,\text{ext}}(z)^4$.

Dans la Section 3.4.1, nous faisons l'hypothèse que $T_{p,int}$ est égal à 328,15 K et que $T_{p,ext}$ est égal à 323,15 K. Nous pouvons à présent, grâce aux expressions des coefficients de transfert de chaleur (par convection forcée, naturelle et par conduction) et sachant que la densité de flux d'énergie sous forme de chaleur à travers la paroi est constante, donner une expression exacte de ces températures grâce à la résolution du Système d'Équation 3.74.

$$\begin{cases} q = U(v) (T(z) - T_{atm}) = h_f (T(z) - T_{p,int}(z)) \\ q = U(v) (T(z) - T_{atm}) = \frac{(T_{p,int}(z) - T_{p,ext}(z))}{R_{th}} \\ q = U(v) (T(z) - T_{atm}) = h_{nat} (T_{p,ext}(z) - T_{atm}) \end{cases} \quad (3.74)$$

La résolution de ce système de trois équations (Équation 3.74), nous permet d'exprimer les températures de la face intérieure et de la face extérieure de la paroi en plastique, en fonction de $T(z)$ et de T_{atm} .

$$T_{p,int}(z) = T(z) - \frac{U(v)}{h_f} (T(z) - T_{atm}) \quad (3.75)$$

$$T_{p,ext}(z) = T(z) - U(v) (T(z) - T_{atm}) \left(\frac{1}{h_f} + R_{th} \right) \quad (3.76)$$

L'équation de bilan d'énergie sur une tranche $[z, z + \Delta z]$ du séchoir s'écrit donc :

$$\begin{aligned} v\Omega_p\rho_{air}c_{p,air}T(z) + \Delta z l\epsilon_{air}\sigma T_{atm}^4 + \Delta z lF_s &= v\Omega_p\rho_{air}c_{p,air}T(z + \Delta z) \\ &+ 2L_c\Delta z U(v)(T(z) - T_{atm}) \\ &+ 2L_c\Delta z\epsilon_p\sigma \left(T(z) - U(v)(T(z) - T_{atm}) \left(\frac{1}{h_f} + R_{th} \right) \right)^4 \end{aligned} \quad (3.77)$$

Nous décrivons dans l'Équation 3.78 ce même bilan sous forme différentielle.

$$\begin{aligned} v\Omega_p\rho_{air}c_{p,air} \frac{dT}{dz} &= lF_s + l\epsilon_{air}\sigma T_{atm}^4 \\ &- 2L_c U(v)(T(z) - T_{atm}) \\ &- 2L_c\epsilon_p\sigma \left(T(z) - U(v)(T(z) - T_{atm}) \left(\frac{1}{h_f} + R_{th} \right) \right)^4 \end{aligned} \quad (3.78)$$

Nous résolvons cette équation en utilisant la commande NDSolve du logiciel *Mathematica*. Cette résolution est portée sur un graphique représentant l'évolution de la température intérieure du séchoir en fonction de la position dans le séchoir suivant la direction z . En faisant varier le rendement du ventilateur η_{vent} , et donc la vitesse de l'air à l'intérieur du séchoir, nous trouvons la vitesse maximale admissible pour que la température atteigne la température de séchage T_s égale à 60°C au bout de la zone de chauffe. Pour rappel, la zone de chauffe mesure 3 m dans le cas du séchoir mobile et 6 m dans le cas du séchoir fixe.

Les Figures 3.6, 3.7, 3.8 et 3.9 représentent l'évolution de la température en fonction de la position z dans le cas du séchoir fixe. D'après ces graphiques et les conditions de fonctionnement imposées au logiciel pour obtenir ces graphiques, nous concluons que la vitesse maximale admissible pour l'air est de $0,53$ m/s dans le cas du séchoir fixe. Un raisonnement analogue peut être tenu pour le séchoir mobile et, dans ce cas, la vitesse maximale admissible de l'air est de $0,28$ m/s. Si nous dépassons ces vitesses lors de l'utilisation des séchoirs, la température de 60°C n'est pas atteinte en fin de zone de chauffe et nous n'obtenons pas, dans ce cas, une bonne qualité de poisson.

Remarque : Dans la pratique, lors du stage au Mali, nous ne possédions aucun moyen pour mesurer v . Nous avons donc procédé à une régulation indirecte de la vitesse de l'air en plaçant un filet sur la panneau photovoltaïque pour qu'il délivre une tension réduite au ventilateur. Nous avons alors modulé cette diminution de tension pour obtenir une température de séchage de 60°C à la fin de la zone de chauffe. Nous estimons donc que la vitesse de l'air devait s'approcher des valeurs déterminées dans ce chapitre.

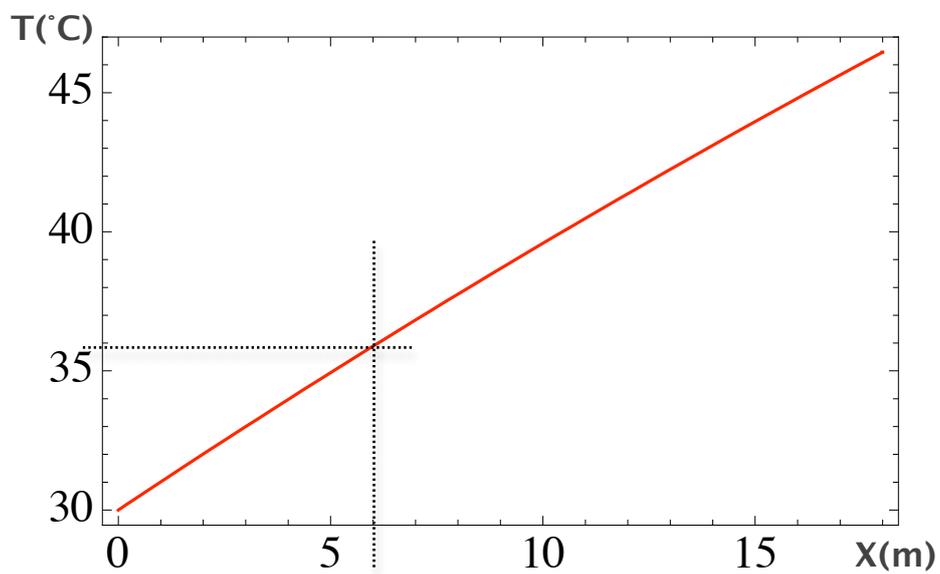


FIG. 3.6 – Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,1$ et $v_{\text{max}} = 3,11$ m/s

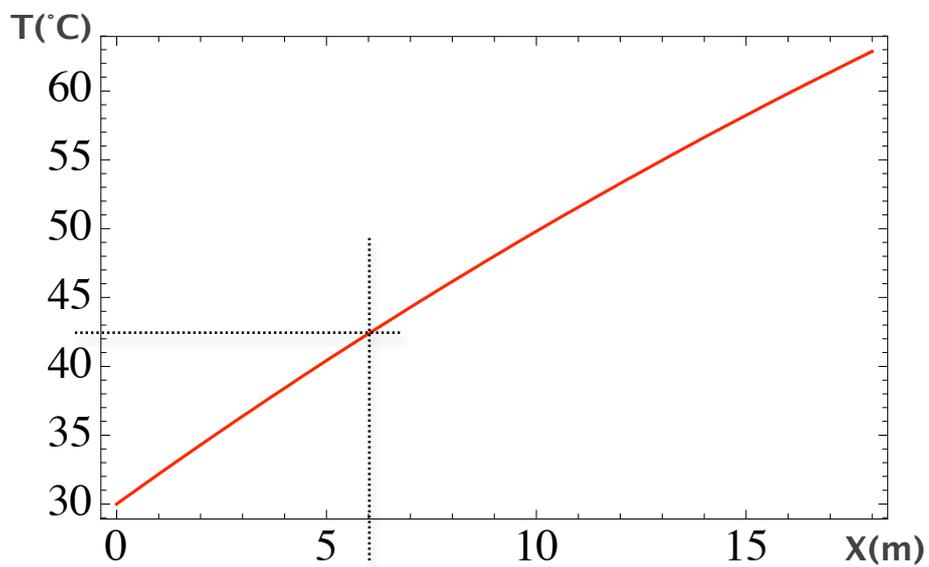


FIG. 3.7 – Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,01$ et $v_{\text{max}} = 1,44$ m/s

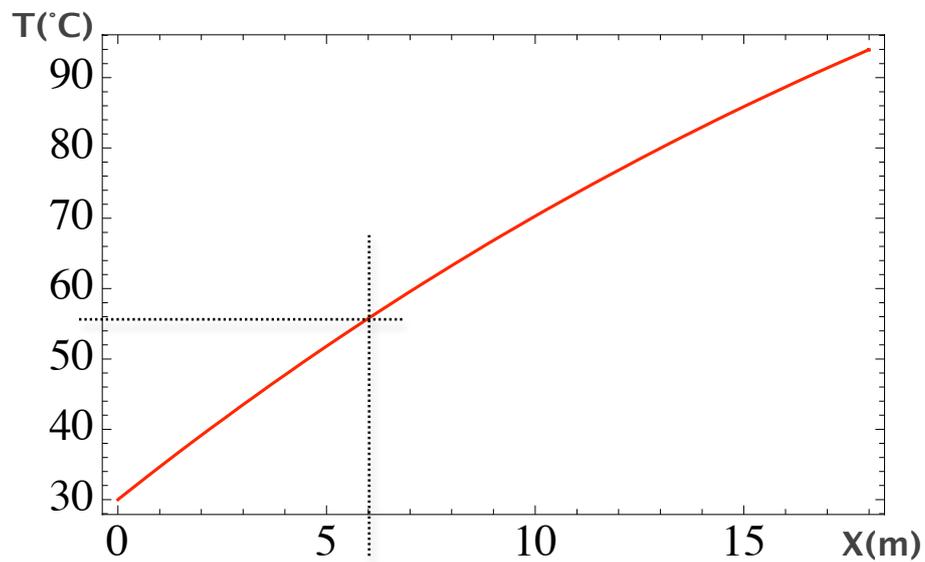


FIG. 3.8 – Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,001$ et $v_{\text{max}} = 0,67$ m/s

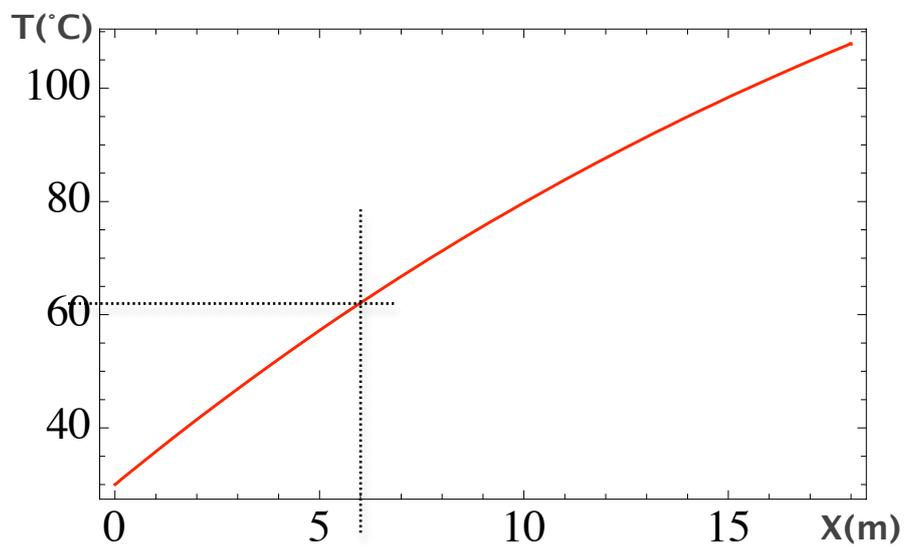


FIG. 3.9 – Évolution de la température de séchage en fonction de la position dans le séchoir fixe : $\eta_{\text{vent}} = 0,0005$ et $v_{\text{max}} = 0,53$ m/s

3.6 Évaluation numérique de h_f , q , $T_{p,\text{ext}}$, $T_{p,\text{int}}$, F_p et η_s

3.6.1 Coefficient de transfert de chaleur par convection forcée

La vitesse maximale admissible de l'air évaluée à la Section 3.5 nous permet à présent de déterminer les nombres de Reynolds correspondants à la convection forcée. Les nombres décrits dans les Équations 3.43 et 3.44 deviennent donc :

$$\text{Re}_{\text{fixe}} = \frac{1,0679.0,53.0,38}{1,99.10^{-5}} = 10807,8 \quad (3.79)$$

$$\text{Re}_{\text{mob}} = \frac{1,0679.0,28.0,39}{1,99.10^{-5}} = 5860 \quad (3.80)$$

Nous utilisons les valeurs obtenues ci-dessus dans les Équations 3.81 et 3.82 afin de déterminer les nombres de Nusselt, dans le cas des séchoirs solaires fixes et mobiles, respectivement. Nous obtenons alors :

$$\text{Nu}_{\text{fixe}} = 0,023.10807,8^{0,8}.0,7087^{0,3} = 34,98 \quad (3.81)$$

$$\text{Nu}_{\text{mob}} = 0,023.5860^{0,8}.0,7087^{0,3} = 21,44 \quad (3.82)$$

D'après les équations 3.49 et 3.50, nous pouvons à présent déterminer les valeurs des coefficients de transfert de chaleur par convection forcée à la vitesse maximale admissible de l'air dans les séchoirs solaires. Ces coefficients sont donnés aux Équations 3.83 et 3.84.

$$\begin{aligned} h_{f,\text{fixe}}(v_{\text{max}}) &= \frac{\text{Nu}_{\text{fixe}} \lambda_{\text{air}}}{D_{h,\text{fixe}}} = \frac{34,98.2,83.10^{-5}.10^3}{0,38} \\ &= 2,6 \text{ J/m}^2\text{sK} \end{aligned} \quad (3.83)$$

$$\begin{aligned} h_{f,\text{mob}}(v_{\text{max}}) &= \frac{\text{Nu}_{\text{mob}} \lambda_{\text{air}}}{D_{h,\text{mob}}} = \frac{21,44.2,83.10^{-5}.10^3}{0,39} \\ &= 1,6 \text{ J/m}^2\text{sK} \end{aligned} \quad (3.84)$$

La densité de flux d'énergie résultant des phénomènes de transfert de chaleur par convection forcée à travers la paroi est donc donnée aux

Équations 3.85 et 3.86.

$$q_{\text{fixe}} = h_{\text{f,fixe}} (T_s - T_{\text{p,int}}) = 2,6.(333,15 - 328,15) = 13 \text{ W/m}^2 \quad (3.85)$$

$$q_{\text{mob}} = h_{\text{f,mob}} (T_s - T_{\text{p,int}}) = 1,6.(333,15 - 328,15) = 8 \text{ W/m}^2 \quad (3.86)$$

3.6.2 Pertes globales de chaleur à travers la paroi à v_{max}

Comme nous l'avons vu dans la Section 3.4.1, les pertes globales d'énergie, sous forme de chaleur, à travers la paroi à v_{max} sont évaluées sur la section transversale du séchoir. La différence de température globale considérée est donc égale à $(T_s - T_{\text{atm}})$. Les coefficients de transfert de chaleur évalués dans la section précédente vont être associés à la résistance thermique (Équation 3.51) et au coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle (Équation 3.66) afin d'évaluer le coefficient global de transfert de chaleur $U(v)$, (Équation 3.34) dans le cas des séchoirs fixes et mobiles.

$$U(v_{\text{max,fixe}}) = \frac{1}{\left(\frac{1}{4,38} + 0,006 + \frac{1}{2,6}\right)} = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.87)$$

$$U(v_{\text{max,mob}}) = \frac{1}{\left(\frac{1}{4,38} + 0,006 + \frac{1}{1,6}\right)} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.88)$$

Les valeurs de ces coefficients nous permettent enfin d'évaluer un bilan global des flux d'énergie à travers la paroi définissant les pertes d'énergie globales maximales liées au transfert de chaleur à travers la paroi en plastique, respectivement dans le cas des séchoirs fixes et mobiles.

$$q_{\text{max,fixe}} = 1,6(333,15 - 303,15) = 48 \text{ W/m}^2 \quad (3.89)$$

$$q_{\text{max,mob}} = 1,2(333,15 - 303,15) = 36 \text{ W/m}^2 \quad (3.90)$$

Nous remarquons que, contrairement au phénomène de transfert de chaleur par convection naturelle, les densités de flux par convection forcée sont différentes pour les séchoirs fixes et mobiles. Nous les nommons respectivement, $q_{\text{max,fixe}}$ et $q_{\text{max,mob}}$.

3.6.3 Températures des faces intérieure et extérieure de la paroi en plastique

D'après les Équations 3.75 et 3.76, nous pouvons dès à présent calculer les valeurs réelles des températures des faces intérieure et extérieure de la paroi en plastique. Ces températures, calculées pour $T(z) = T_s$, sont données ci-dessous.

$$\begin{aligned}
 T_{p,int,fixe} &= T_s - \frac{U(v_{max,fixe})}{h_{f,fixe}(v_{max})} (T_s - T_{atm}) \\
 &= 333,15 - \frac{1,6}{2,6} (333,15 - 303,15) \\
 &= 314,7 \text{ K}
 \end{aligned} \tag{3.91}$$

$$\begin{aligned}
 T_{p,ext,fixe}(z) &= T_s - U(v_{max,fixe}) (T_s - T_{atm}) \left(\frac{1}{h_{f,fixe}(v_{max})} + R_{th} \right) \\
 &= 333,15 - 1,6 (333,15 - 303,15) \left(\frac{1}{2,6} + 0,006 \right) \\
 &= 314,4 \text{ K}
 \end{aligned} \tag{3.92}$$

$$\begin{aligned}
 T_{p,int,mob} &= T_s - \frac{U(v_{max,mob})}{h_{f,mob}(v_{max})} (T_s - T_{atm}) \\
 &= 333,15 - \frac{1,2}{1,6} (333,15 - 303,15) \\
 &= 310,6 \text{ K}
 \end{aligned} \tag{3.93}$$

$$\begin{aligned}
 T_{p,ext,mob}(z) &= T_s - U(v_{max,mob}) (T_s - T_{atm}) \left(\frac{1}{h_{f,mob}(v_{max})} + R_{th} \right) \\
 &= 333,15 - 1,2 (333,15 - 303,15) \left(\frac{1}{1,6} + 0,006 \right) \\
 &= 310,4 \text{ K}
 \end{aligned} \tag{3.94}$$

3.6.4 Densité de rayonnement de la surface en plastique

La densité de rayonnement de la surface en plastique est donnée par l'Équation 3.69. Nous pouvons désormais la calculer en utilisant les valeurs de la température extérieure de la paroi en plastique, à la fois pour le séchoir fixe et pour le séchoir mobile. Cette densité de rayonnement est présentée aux Équations 3.95 et 3.96.

$$F_{p,\text{fixe}} = 5,1 \cdot 10^{-8} T_{p,\text{ext}}^4 = 5,1 \cdot 10^{-8} \cdot 314,4^4 = 498,3 \text{ W/m}^2 \quad (3.95)$$

$$F_{p,\text{mob}} = 5,1 \cdot 10^{-8} T_{p,\text{ext}}^4 = 5,1 \cdot 10^{-8} \cdot 310,4^4 = 473,4 \text{ W/m}^2 \quad (3.96)$$

3.6.5 Efficacité d'absorption de l'énergie par le séchoir

Nous avons désormais toutes les informations nécessaires à la résolution des Équations 3.72 et 3.73. Cette efficacité est calculée en considérant un flux solaire moyen F_s égal à 755 W/m^2 .

$$\begin{aligned} \eta_{s,\text{fixe}} &= \frac{(2.18.755 - 2.1,08.18.498,3 + 2.18.431 - 2.1,08.18.48)}{2.18.755} \\ &= 0,79 \end{aligned} \quad (3.97)$$

$$\begin{aligned} \eta_{s,\text{mob}} &= \frac{(1,25.10,5.755 - 2.0,76.10,5.473,4 + 1,25.10,5.431 - 2.0,76.10,5.36)}{1,25.10,5.755} \\ &= 0,75 \end{aligned} \quad (3.98)$$

3.7 Détermination du lien entre la quantité d'eau à extraire et le débit du ventilateur

Dans la Section 3.5, nous avons déterminé la vitesse maximale admissible de l'air dans les séchoirs solaires fixes et mobiles. Le débit du ventilateur est donc à présent également fixé. De plus, nous savons que le temps de séchage est un paramètre fixé par les pêcheurs. Il nous reste donc à déterminer quelle est la masse de poisson frais qui peut être introduite dans le séchoir pour que l'air à la sortie de celui-ci, soit à moins de 10% de la saturation, cette valeur garantissant une bonne qualité de séchage de poisson [10].

Considérons les notations ci-dessous :

- Y_{in} , l'humidité de l'air entrant dans le séchoir en kg d'eau/kg d'air ;
- Y_{out} , l'humidité de l'air quittant le séchoir en kg d'eau/kg d'air ;
- η_{sch} , la diminution de poids attendue d'un bon séchage ;
- $m_{i,\text{poisson}}$, la masse de poisson frais introduite dans le séchoir en kg de poisson frais ;

- $m_{\text{eau,evac}}$, la masse de vapeur d'eau que peut évacuer le séchoir lors d'un séchage de bonne qualité en kg d'eau.

Comme précédemment, nous faisons l'hypothèse que la température sur la zone de séchage est constante. La température à la sortie du séchoir est donc égale à T_s , 60°C.

Nous déduisons donc l'Équation 3.99 qui exprime la masse de vapeur d'eau, produite lors de l'évaporation, qui peut être évacuée lors du séchage. Pour rappel, nous obtenons une bonne qualité de poisson si la diminution de poids, η_{sch} , est supérieure ou égale à 60%.

$$m_{\text{eau,evac}} = \eta_{\text{sch}} m_{\text{i,poisson}} = 0,6 m_{\text{i,poisson}} \quad (3.99)$$

Établissons le bilan de matière sur le séchoir :

$$v\rho_{\text{air}}\Omega_p(Y_{\text{out}} - Y_{\text{in}}) = \frac{m_{\text{eau,evac}}}{t_s} \quad (3.100)$$

$$\Rightarrow Y_{\text{out}} = Y_{\text{in}} + \frac{m_{\text{eau,evac}}}{v\rho_{\text{air}}\Omega_p t_s} \quad (3.101)$$

Tenant compte du fait que l'humidité de l'air quittant le séchoir doit être à moins de 10% de la saturation,

$$Y_{\text{out}} < \frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{10}$$

et reprenant le bilan de matière établi ci-dessus, il vient :

$$\Rightarrow \frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{10} > Y_{\text{in}} + \frac{m_{\text{eau,evac}}}{v\rho_{\text{air}}\Omega_p t_s} \quad (3.102)$$

$$\Rightarrow m_{\text{eau,evac}} < v\rho_{\text{air}}\Omega_p t_s \left(\frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{10} - Y_{\text{in}} \right) \quad (3.103)$$

D'après l'Équation 3.4, l'humidité de l'air à l'entrée du séchoir Y_{in} peut s'exprimer en fonction de la pression de saturation à l'entrée du séchoir, c'est-à-dire la pression de saturation à T_{atm} et de la pression atmosphérique. L'Équation 3.104 calcule l'humidité de l'air entrant dans le séchoir en se

servant des données de la Table 3.1.

$$\begin{aligned}
Y_{\text{in}} &= \frac{\text{HR} \frac{p_{\text{sat}}(T_{\text{atm}})}{p_{\text{tot}}}}{1 - \text{HR} \frac{p_{\text{sat}}(T_{\text{atm}})}{p_{\text{tot}}}} \frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{air}}} \\
&= \frac{0,15 \cdot \frac{4242}{101325}}{1 - 0,15 \frac{4242}{101325}} \frac{0,018}{0,02884} \\
&= 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ kg d'eau/kg d'air} \tag{3.104}
\end{aligned}$$

Si nous considérons que la vitesse de l'air dans chacun des séchoirs est égale à sa vitesse maximale admissible, à savoir 0,53 m/s pour le séchoir fixe et 0,28 m/s pour le séchoir mobile, et que la masse volumique de l'air à T_s est égale à 1,055 kg/m³ (Équation 3.9), nous pouvons en déduire la masse d'eau maximale qui peut être évacuée par chacun des séchoirs lors d'un séchage de bonne qualité et données par les Équations 3.105 et 3.106.

$$\begin{aligned}
m_{\text{eau,evac,fixe}} &< v_{\text{max,fixe}} \rho_{\text{air}} \Omega_{\text{p,fixe}} t_s \left(\frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{10} - Y_{\text{in}} \right) \\
&< 0,53 \cdot 1,055 \cdot 0,4 \cdot 8 \cdot 3600 \left(\frac{0,1357}{10} - 3,94 \cdot 10^{-3} \right) \\
&< 62 \text{ kg d'eau} \tag{3.105}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{\text{eau,evac,mob}} &< v_{\text{max,mob}} \rho_{\text{air}} \Omega_{\text{p,mob}} t_s \left(\frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{10} - Y_{\text{in}} \right) \\
&< 0,28 \cdot 1,055 \cdot 0,27 \cdot 8 \cdot 3600 \left(\frac{0,1357}{10} - 3,94 \cdot 10^{-3} \right) \\
&< 22,1 \text{ kg d'eau} \tag{3.106}
\end{aligned}$$

D'après l'Équation 3.99, nous déduisons donc que la quantité maximale de poisson frais qui peut être introduite sur le séchoir est égale à 103,3 kg de poisson sur le séchoir fixe et à 36,9 kg de poisson sur le séchoir mobile. Cette quantité de poisson est déduite d'après une durée de séchage fixée à un jour.

3.8 Détermination du lien entre la quantité d'eau à extraire et le flux solaire

De la même manière qu'à la section précédente, nous évaluons ici la quantité maximale d'eau qui peut être évaporée lors d'un essai de séchage.

Soit $m_{\text{eau,vap}}$ la masse d'eau qui peut être évaporée du poisson et η_{sch} la diminution de poids désirée après le séchage égale à 60%. L'Équation 3.99 peut être adaptée et nous obtenons alors l'Équation 3.107 :

$$m_{\text{eau,vap}} = \eta_{\text{sch}} m_{\text{i,poisson}} = 0,6 m_{\text{i,poisson}} \quad (3.107)$$

L'Équation 3.108 décrit le bilan d'énergie sur le séchoir. Ce bilan nous permet de déterminer la masse d'eau qui peut être évaporée grâce au courant d'air existant dans le séchoir.

$$m_{\text{eau,vap}} L_k = \eta_s \langle F_s \rangle \Omega t_s \quad (3.108)$$

Dans la suite, nous nommons z la longueur de chauffe du séchoir solaire. Si nous remplaçons le flux solaire moyen $\langle F_s \rangle$ par l'expression détaillée des différents termes de flux, nous obtenons alors le bilan d'énergie suivant :

$$m_{\text{eau,vap}} < \frac{1}{L_k} \left[l (x - z) F_s + l (x - z) F_a - \left(2 L_c (x - z) \frac{T_s - T_{\text{atm}}}{\left(\frac{1}{h_f(v_{\text{max}})} + R_{\text{th}} + \frac{1}{h_{\text{nat}}} \right)} \right. \right. \\ \left. \left. - 2 L_c (x - z) \epsilon_p \sigma \left(T_s - \frac{T_s - T_{\text{atm}}}{\left(\frac{1}{h_f(v_{\text{max}})} + \frac{e}{\lambda_{\text{pvc}}} + \frac{1}{h_{\text{nat}}} \right)} \left(\frac{1}{h_f(v_{\text{max}})} + \frac{e}{\lambda_{\text{pvc}}} \right) \right)^4 \right] t_s \quad (3.109)$$

Nous résolvons alors ce bilan pour les séchoirs solaires fixes et mobiles, respectivement aux Équations 3.110 et 3.111 afin de déterminer la masse d'eau qui peut être évaporée sur chacun de ces séchoirs. Dans cette équation, nous considérons que le F_s est égal au flux solaire moyen (755 W/m^2) sur la période considérée à la Table 3.12.

$$m_{\text{eau,vap,fixe}} < \frac{1}{2256.10^3} \cdot \left[2 \cdot (18 - 6) \cdot 755 + 2 \cdot (18 - 6) \cdot 431 \right. \\ \left. - \left(2 \cdot 1,077 \cdot (18 - 6) \cdot \frac{333,15 - 303,15}{\left(\frac{1}{2,6} + 0,006 + \frac{1}{4,38} \right)} \right) \right. \\ \left. - 2 \cdot 1,077 \cdot (18 - 6) \cdot 0,956703 \cdot 10^{-8} \cdot \left(333,15 - \frac{333,15 - 303,15}{\left(\frac{1}{2,6} + 0,006 + \frac{1}{4,38} \right)} \cdot \left(\frac{1}{2,6} + 0,006 \right) \right)^4 \right] \cdot 8.3600$$

$$< 183,8 \text{ kg d'eau} \quad (3.110)$$

$$\begin{aligned}
m_{\text{eau,vap,mob}} &< \frac{1}{2256 \cdot 10^3} \cdot \left[1,25 \cdot (10,5 - 3) \cdot 755 + 1,25 \cdot (10,5 - 3) \cdot 431 \right. \\
&\quad - \left(2,0,7586 \cdot (10,5 - 3) \cdot \frac{333,15 - 303,15}{\left(\frac{1}{1,6} + 0,006 + \frac{1}{4,38}\right)} \right) \\
&\quad - 2,0,7586 \cdot (10,5 - 3) \cdot 0,9,5,6703 \cdot 10^{-8} \cdot (333,15 \\
&\quad \left. - \frac{333,15 - 303,15}{\left(\frac{1}{1,6} + 0,006 + \frac{1}{4,38}\right)} \cdot \left(\frac{1}{1,6} + 0,006\right)\right)^4 \cdot 8,3600 \\
&< 67,4 \text{ kg d'eau} \quad (3.111)
\end{aligned}$$

D'après l'Équation 3.99, la quantité de poisson frais qui peut être introduite sur le séchoir sans limiter l'évaporation de l'eau contenue dans le poisson est donc égale à 306,3 kg de poisson sur le séchoir fixe et à 112,3 kg de poisson sur le séchoir mobile. Comme dans la section précédente, la quantité de poisson est déduite d'après une durée de séchage fixée à un jour.

3.9 Conditions d'utilisation

Dans cette section, nous tirons des conclusions à partir des différents bilans de matière et d'énergie qui ont été présentés dans ce chapitre. L'objectif est de déterminer quel est le facteur limitant entre l'évaporation de l'eau du poisson et l'évacuation de la vapeur d'eau produite par l'évaporation. Le facteur limitant est celui qui permet d'enlever la masse d'eau la plus faible, c'est-à-dire, celui qui permet de sécher la plus petite quantité de poisson.

D'après les Sections 3.7 et 3.8, nous concluons que le phénomène d'évacuation de la vapeur d'eau est le facteur limitant le séchage. C'est donc d'après les masses maximales de poissons obtenues à la Section 3.7 que nous déterminons les quantités de poisson qui peuvent être introduites sur les séchoirs solaires fixes et mobiles.

Nous reprenons maintenant les résultats dans leur ordre d'importance. D'après les différents bilans d'énergie et de matière présentés dans ce chapitre, nous pouvons déterminer des conditions rationnelles d'utilisation des séchoirs solaires fixes et mobiles. En effet, il faut avant tout s'assurer que le débit du ventilateur est régulé de manière telle que la température de séchage atteigne au minimum 60°C à la fin de la longueur de chauffe. L'étude de l'évolution de la température dans le séchoir nous a permis de déterminer

que la vitesse du courant d'air doit être inférieure à 0,28 m/s dans le cas du séchoir mobile et inférieure à 0,53 m/s dans le cas du séchoir fixe. Si cette vitesse est dépassée, la température sera trop faible pour permettre une bonne élimination des bactéries.

Lorsque la vitesse de l'air est fixée, le débit de l'air est fixé et il ne reste plus qu'un paramètre à définir : la quantité de poisson frais qui peut être introduite dans le séchoir par journée de séchage. D'après l'analyse faite dans les Sections 3.7 et 3.8, nous pouvons conclure que c'est l'évacuation de la vapeur d'eau du séchoir qui est le facteur limitant le séchage. Il est donc préférable de ne pas dépasser les masses de 104 kg pour le séchoir fixe et de 37 kg pour le séchoir mobile.

Si les conditions déterminées ci-dessus sont respectées, la méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires développée dans ce chapitre détermine que :

- Dans le cas du **séchoir mobile**, la **vitesse de l'air** v doit être **inférieure à 0,28 m/s** et la **quantité maximale de poisson** qui peut être séchée est de **36,9 kg/j** ;
- Dans le cas du **séchoir fixe**, la **vitesse de l'air** ne doit **pas dépasser 0,53 m/s** et la **quantité maximale admissible de poisson** est de **103,3 kg/j**.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous développons une méthode permettant de définir les conditions d'utilisation rationnelle des séchoirs solaires à poisson. Les résultats de cette analyse se basent sur deux conditions : la première, fournir assez d'énergie pour évaporer l'eau contenue dans le poisson ; la deuxième, avoir un débit d'air, à l'intérieur du séchoir, capable d'évacuer la vapeur d'eau produite lors du phénomène d'évaporation, sans arriver à une limitation du fonctionnement des séchoirs. Ces deux conditions sont analysées indépendamment les unes des autres. Comme nous avons montré que l'évaporation n'est pas limitante, l'énergie apportée, sous forme de chaleur, est donc supérieure à l'énergie nécessaire par rapport à la quantité d'eau à enlever. Nous observons donc une légère augmentation de la température, par rapport aux 60°C de référence, le long des séchoirs.

Nous pourrions ré-envisager cette analyse en étudiant simultanément ces deux phénomènes. Nous prédirons alors probablement que les séchoirs peuvent contenir plus de poisson que les quantités déterminées précédemment, c'est-à-dire, dans le cas du séchoir mobile, plus de 37 kg de poisson frais. En effet, comme nous l'avons identifié, c'est l'évacuation de la vapeur d'eau qui est le facteur limitant le séchage. De ce fait, si nous voulons un séchage de bonne qualité et uniforme sur la zone de séchage, nous devons nous limiter à une quantité d'eau à enlever inférieure à la quantité réelle que nous pouvons évaporer, compte tenu de l'énergie fournie. Lorsqu'on avance dans la zone de séchage, nous observons alors une augmentation de la température car la quantité d'énergie apportée est supérieure à celle réellement nécessaire pour l'évaporation. Néanmoins, nous remarquons que cette élévation de température est assez faible car les poissons n'étaient pas abîmés lors des essais de séchage. Nous pouvons donc placer un peu plus de poisson que prévu dans ce séchoir mobile, sans compromettre son bon fonctionnement. En effet, si l'on introduit plus de poisson que la quantité déterminée à la Section 3.7, c'est-à-dire une quantité supérieure à celle nécessaire pour garder une humidité de l'air en sortie inférieure à 10% de la saturation, nous nous attendons à ce qu'il persiste une certaine quantité de vapeur que le débit d'air du séchoir ne sait pas évacuer. Néanmoins, la température réelle de séchage en sortie T_{out} est plus élevée que la température de séchage de référence, T_s et la valeur de saturation de l'air également. L'humidité de l'air réelle à la sortie du séchoir, Y_{out} est donc supérieure à l'humidité de l'air en sortie calculée à la température de référence de 60°C, $Y_{\text{out,ref}}$. Or, la qualité (ou la vitesse de séchage) à la fin de séchoir n'est pas contrôlée par Y_{out} mais bien par :

$$\frac{Y_{\text{out}}}{Y_{\text{sat}}(T_{\text{out}})}$$

Dès lors, si on introduit 50 kg de poisson (par exemple) par journée de séchage, l'augmentation de l'humidité réelle de l'air en sortie, $Y_{\text{out}} > Y_{\text{out,ref}}$, est compensée par la température en sortie qui est elle aussi supérieure à la température de référence, 60°C (car on apporte trop d'énergie que celle nécessaire pour l'évaporation). En conclusion, si l'on introduit plus de poisson dans les séchoirs, les deux phénomènes majeurs intervenant au cours du séchage se compensent et conduisent à un séchage uniforme.

D'après cette première analyse découplée, nous déterminons donc un premier point de fonctionnement qui, à vitesse de l'air fixée, nous permet de sécher un peu plus de poisson que la quantité prédite par le modèle. Notre développement fixe donc une plage d'utilisation de l'appareil qui mènera à

une bonne qualité de séchage.

Remarque : Pour le stage, nous avons centré notre analyse sur le séchoir mobile. Au vu des paramètres que nous connaissions à ce moment-là, nous avons évalué une quantité maximale de poisson égale à 50 kg. Tous les essais de séchage sont donc basés sur cette valeur.

Nous rappelons que pour tout le développement de cette analyse théorique, nous n'avons considéré que deux phénomènes majeurs intervenant lors du séchage de poisson. Nous avons en effet posé l'hypothèse que le phénomène d'extraction de la vapeur d'eau, du centre du poisson jusqu'à sa surface, n'est pas limitant. Nous voyons dans le Chapitre 4 que, pour les plus gros poissons en tous cas, la théorie s'écarte de la réalité. Une étude de la cinétique d'extraction de la vapeur d'eau du poisson devrait permettre de déterminer dans quels cas ce phénomène peut effectivement être considéré comme non limitant. Cette étude n'est pas réalisée dans le cadre de ce mémoire.

Chapitre 4

Stage au Mali

4.1 La coopération au développement

L'organisation d'un stage de mémoire au Mali s'inscrit dans une perspective de coopération au développement. Ce stage, de même que le sujet de mémoire s'y rapportant, sont proposés au service de Génie Chimique de l'Université Libre de Bruxelles par le *Royal Tropical Institute* (KIT) basé à Amsterdam, aux Pays-Bas. Cette collaboration se trouve d'autant plus valorisée par la collaboration avec une ONG malienne, l'ONG AFAR (Action pour la Formation et l'Auto promotion Rurale) [17].

Le projet de séchage solaire de poisson est mis en place suite à une réelle demande de la population de pêcheurs (Ethnie Bozos) de développement de techniques plus appropriées de séchage, permettant une meilleure conservation des produits.

L'énergie solaire ne manquant pas en Afrique, les premières idées de séchoir se sont basées sur les méthodes de séchage sur paillasse, préalablement utilisées par les pêcheurs. L'idée est d'améliorer ce procédé tout en permettant une protection contre l'infestation par les insectes et une forte diminution des bactéries présentes dans le poisson en développant des températures de séchage plus élevées.

La stage s'est déroulé à Youwarou entre le 17 janvier et le 20 avril 2009. Ce village est indiqué par la flèche rouge sur la carte à Mali, à la Figure 4.1.

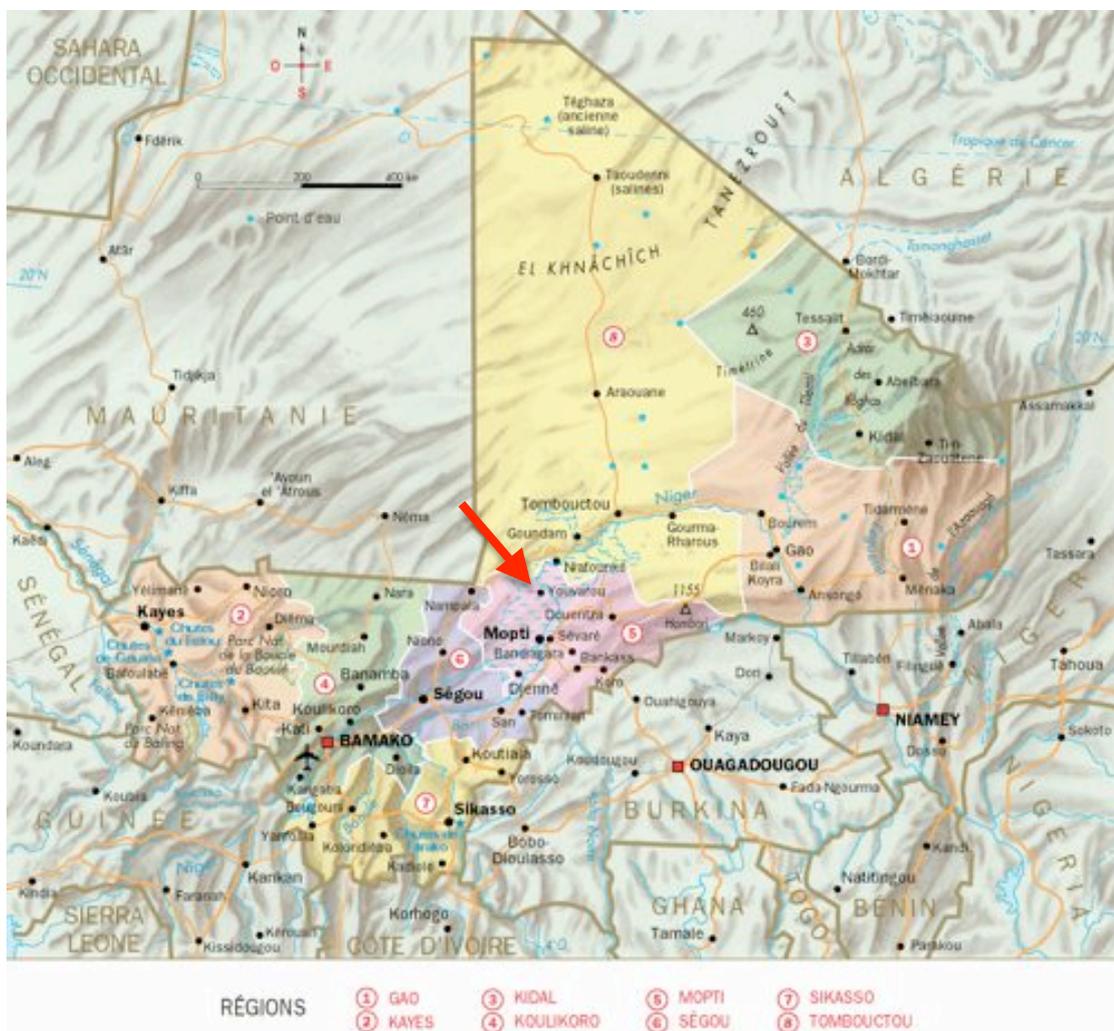


FIG. 4.1 – Carte du Mali [13]

Il n'y a pas vraiment de responsable pour le projet "séchage de poisson" à Youwarou. Durant le stage, nous avons donc dû travailler avec plusieurs responsables différents, selon leurs disponibilités. Néanmoins, la plupart du temps, la débrouillardise et le langage des gestes nous ont permis d'arriver à des résultats très satisfaisants, à la fois d'un point de vue scientifique et d'un point de vue humain.

4.2 Chronologie du stage

Dans la table ci-dessus, nous présentons la chronologie du stage, semaine par semaine. Nous remarquons que les analyses de février sont moins poussées que celles des mois de mars et d'avril. Pendant cette période, les mauvaises conditions climatiques (ciel fort couvert avec des vents assez forts) ne sont pas propices à une bonne utilisation des séchoirs solaires. La température extérieure est trop faible (elle ne permet pas d'atteindre une température de séchage appropriée) et il est même parfois impossible pour les pêcheurs de sortir leurs pirogues pour aller pêcher car le vent est trop fort. La quantité de poisson pêchée en février est donc significativement plus faible que par la suite et les séchoirs se sont donc retrouvés à plusieurs reprises inutilisés.

Le village de Youwarou se trouve dans la zone inondée du Mali après la période d'hivernage. L'accès aux différents sites de séchage est donc difficile et restreint. Cet accès se fait en pirogue et, vers la fin du stage, en moto, selon la disponibilité des membres de l'ONG AFAR se trouvant sur place. Le fait que les séchages ne se font pas directement dans le village de Youwarou contribue également à la difficulté d'avoir des relevés de mesures réguliers.

Période	Activité
Du 17 janvier au 19 janvier 2009	Arrivée à Bamako Visite de la ville et extension du VISA
Le 20 janvier 2009	Départ de Bamako, arrivée à Sévaré
Du 21 janvier au 24 janvier 2009	Rencontre avec l'ONG AFAR Visite IER-Trans (Institut d'Économie rurale) pour présenter la phase en test du projet de séchage de poisson en vue d'une collaboration future Présentation du premier prototype de séchoir fixe utilisé pour le séchage de mangues et d'échalotes (coût : 4 000 000 FCFA)
Le 25 janvier 2009	Départ vers Youwarou (une journée en pinasse)
Du 26 janvier au 1 ^{er} février 2009	Installation des séchoirs solaires sur des campements proches de Youwarou : - abandon de la construction d'un séchoir fixe à Daga Niamandé car les Bozos (Ethnie de pêcheurs maliens) se sont déplacés

Période (suite)	Activité (suite)
	<ul style="list-style-type: none"> - installation d'un séchoir fixe à Tiadial Pouri (panneau photovoltaïque de 80W) - installation d'un séchoir mobile à Tiadial Pouri (panneau photovoltaïque de 60W) - installation d'un séchoir mobile à Konna Daga (panneau photovoltaïque de 75W)
Le 2 février 2009	Installation d'un ancien prototype de séchoir mobile à Youwarou
Le 3 février 2009	<p>Début des essais sur le séchoir de Youwarou : étude de l'évolution de la température à l'intérieur du séchoir</p> <p>Objectif : avoir une température de 60°C à la fin de la zone de chauffe</p> <p>Essais : avec ventilation normale, avec ventilation réglée (boîtier et filet), sans ventilation, panneau face/dos au soleil</p>
Les 5 et 9 février	Monitoring de séchage à Konna Daga (séchoir mobile)
Le 16 février 2009	<p>Visite de Floris Van der Pol (responsable projet KIT)</p> <ul style="list-style-type: none"> - discussion sur l'avancement du stage et analyse des premiers résultats - récapitulatif des objectifs de stage - boîtier régulateur de tension défectueux : alternatives possibles - visite des différents sites de séchage - élaboration de fiches de suivi de séchage
Le 17 février 2009	<p>Changement du panneau photovoltaïque à Konna Daga : 50W à la place de 75W</p> <p>Monitoring de séchage à Konna Daga (séchoir mobile)</p>
Du 18 au 22 février 2009	<p>Finalisation des fiches de suivi de séchage (Français/Bambara) (voir Annexe C)</p> <p>Boîtier inutilisable : essais de régulation avec différents filets (taille des mailles différentes)</p> <p>La poursuite des essais de séchage et du monitoring ont lieu à Konna Daga uniquement car des enfants ont détruit le séchoir fixe de Tiadial Pouri. Le groupement responsable de l'autre séchoir installé à Tiadial Pouri, un séchoir mobile, s'est quant à lui déplacé vers un autre site, beaucoup plus loin</p>
Les 23 et 24 février 2009	Étude de l'évolution de la température à l'intérieur du séchoir à Konna Daga

Période (suite)	Activité (suite)
	Mise en place d'un filet sur le panneau photovoltaïque pour diminuer la tension DC (de 17-19V à 2-3V)
Du 25 au 28 février 2009	Conditions météorologiques très mauvaises, pas de pêche, pas de poisson, pas de séchage!
Du 28 février au 14 mars 2009	Mon Palu adoré!
Le 28 février 2009	Mise en place de la première perfusion. Le dispensaire de Youwarou étant considéré comme insalubre par le médecin local, la perfusion est placée dans la famille où je loge. L'aiguille est très grosse car il n'y en a plus de petites. Le désinfectant : une bouteille de parfum... Après avoir repiqué à 5 reprises, l'infirmier a enfin trouvé une veine!
Le 1 ^{er} mars 2009	Rapatriement Europ Assistance vers la Clinique Pasteur située à Bamako (9 km à l'arrière d'une moto avec de fortes chutes de tension, 200 km en Jeep à travers la brousse et puis petit Jet privé à partir de Mopti...)
Le 11 mars 2009	Sortie de la clinique pour un petit séjour de convalescence dans un hôtel assez proche. Les perfusions sont enfin terminées mais les symptômes n'ont pas totalement disparu
Le 15 mars 2009	Retour à Youwarou, fin de convalescence
Du 16 au 20 mars 2009	Bilan avec un responsable de l'ONG AFAR quant à mes objectifs de fin de stage Mise en place des thermomètres sur tous les sites de séchage qui n'en avaient pas encore Explication des fiches de suivi de séchage aux Bozos
Les 21 et 23 mars 2009	Monitorages des essais de séchage à Konna Daga (séchoir mobile) et remplissages des fiches de suivi de séchage Rappels détaillés sur le procédé de séchage et les paramètres de référence que nous avons établis (comment remplir les séchoirs, en quelle quantité, comment suivre l'évolution de la température, comment utiliser le panneau photovoltaïque pour obtenir une bonne qualité de séchage (mise en place du filet), température de séchage appropriée pour le poisson, ...) Rappel de l'importance de la mise en place du filet sur le panneau photovoltaïque

Période (suite)	Activité (suite)
Du 24 mars au 02 avril 2009	Suivi de séchage et monitoring des différents paramètres de séchage (séchoir mobile) Installation des séchoirs fixes et de types hangar à Konna Daga
Le 3 avril 2009	Monitoring de séchage à Konna Daga (séchoirs fixe et de type hangar)
Du 4 avril au 7 avril 2009	Bilan sur les différents sites de séchage, finalisation des expériences et derniers conseils aux populations Bozos
Le 8 avril 2009	Ce n'est qu'un au revoir... (départ Youwarou)
Le 9 avril 2009	Bilan de stage avec le responsable de projet et le vice-président de l'ONG AFAR Visite coopérative Djiguiseme (production de jus de fruits)
Du 10 au 13 avril 2009	Visite de Tombouctou la mystérieuse
Du 14 au 17 avril 2009	Randonnée en Pays Dogon
Le 18 avril 2009	Dernier jour à Mopti
Le 19 avril	Retour sur Bamako avec le vice-président de l'ONG AFAR Retour en Belgique avec une petit souvenir : la shigellose, également appelée dysenterie bacillaire. Traitement à haute doses d'antibiotiques pendant 20 jours...

4.3 Difficultés rencontrées et anecdotes scientifiques

4.3.1 Les difficultés

Plusieurs difficultés sont rencontrées lors de ce stage.

La difficulté la plus importante a sans aucun doute été la difficulté de la langue. Les pêcheurs maliens sont pour la plupart analphabètes et ne connaissent pas le français (ni l'anglais). En effet, leur mode de vie nomade favorise le fait qu'ils ne parlent que leur propre dialecte (il existe 10 dialectes différents au Mali!) et que seuls un ou deux parmi eux, généralement le chef ou le représentant du village, parle le Bambara (deuxième langue officielle au Mali, après le français). La communication s'est donc souvent réalisée

par la gestuelle. Une petite dizaine de fois au cours des trois mois, l'un des membres de l'ONG AFAR nous a accompagné sur les campements de pêcheurs où sont installés les séchoirs solaires afin d'améliorer et surtout d'accélérer la bonne compréhension du procédé de séchage.

Un autre facteur qui contribue à la complexification du stage est la difficulté d'accès aux différents campements sur lesquels sont installés les séchoirs. La Figure 4.2 est une photo de l'îlot sur lequel le premier séchoir fixe est installé. Ce site, Tiadial Pouri, est complètement encerclé par le fleuve jusqu'au mois d'avril. L'accès ne peut donc se faire qu'en pirogue, puis en moto lors des 3 dernières semaines de stage. C'est pour cette raison que l'analyse est réalisée sur un ancien prototype de séchoir (constitué de 2 ventilateurs beaucoup plus puissants que celui du nouveau modèle de séchoir), et ce, pendant le premier mois de stage, jusqu'à la mi-février. Nous notons que les matériaux utilisés pour construire ce séchoir sont importés d'Europe et sont donc plus chers et plus performants (moins de frottement des hélices du ventilateur, paroi en plastique résistante aux rayons UV,...) que ceux que nous trouvons au Mali et qui sont d'ailleurs utilisés dans la conception des prototypes actuels de séchoir solaire. Les résultats de l'analyse sur ce type de séchoir ne sont pas présentés dans ce travail car les résultats obtenus sont fort différents de ceux obtenus sur les nouveaux modèles de séchoir. La comparaison de ces résultats n'est donc pas un atout majeur pour ce travail.

Les essais de séchage sont fort dépendants des conditions climatiques. En effet, l'accès aux sites de séchage, même en pirogue, est impossible lorsque le vent est très fort.

Les pêcheurs veulent toujours se charger eux-mêmes de la mise en place des poissons sur les différents séchoirs. Il n'est donc pas toujours facile d'être présent lors des chargements et déchargements du poisson car ils "oublient" souvent de nous prévenir, ce qui rend presque impossible une étude de bout en bout du procédé de séchage. De plus, la Figure 4.3 montre que les pêcheurs ne font pas toujours très attention à la manière dont ils remplissent le séchoir. Il a donc fallu prendre le temps de bien leur expliquer pourquoi il est nécessaire de faire attention.

Les populations ont une forte tendance à vouloir surcharger les séchoirs afin de pouvoir sécher toujours plus de poisson. Malheureusement, ces expériences en surcharge ne conduisent pas à de bons résultats. Ces séchages, réalisés assez loin des conditions de référence préalablement définies par



FIG. 4.2 – Campement de Tiadial Pouri : un séchoir fixe, un séchoir mobile et un séchoir de type hangar



FIG. 4.3 – Chargement du poisson sur le séchoir mobile par la population locale

la modélisation (maximum 50 kg de poisson), ne sont donc pas pris en compte dans l'analyse des résultats. Néanmoins, ils nous permettent déjà de remarquer qu'il est important de ne pas dépasser la quantité de poisson recommandée par le modèle développé au Chapitre 3. De plus, si le filet de séchage est rempli, même si les 37 kg de poisson (pour le séchoir mobile) ne sont pas atteints, il ne faut pas surperposer les poissons dans le séchoir !

4.3.2 Anecdotes scientifiques

Mises à part les difficultés rencontrées, plusieurs autres éléments ont contribué à nous faire remarquer le manque de connaissances scientifiques des pêcheurs maliens. En voici deux exemples assez amusants ci-dessous.

Dans la logique des populations locales, ce sont les ventilateurs qui permettent de mieux sécher le poisson. Or, si nous y réfléchissons un peu, les ventilateurs ne sont présents que pour créer un courant d'air, permettant de diminuer l'humidité de l'air résultant du phénomène d'évaporation, dans le séchoir. Si la vitesse de l'air augmente, alors la température de séchage diminue et la qualité du poisson séché est alors moins bonne.

Au cours des premières semaines de séchage, les villageois ont développé une forte tendance à re-réguler la vitesse du ventilateur dès que nous avions le dos tourné. Ceci, alors que nous essayions d'optimiser au mieux le débit du ventilateur pour obtenir de bonnes conditions de séchage. Il a donc fallu leur expliquer petit à petit et de manière répétée, l'intérêt de diminuer la vitesse du courant d'air dans les séchoirs.

Suivant cette même logique, les pêcheurs ont voulu améliorer eux-mêmes un des premiers prototypes de séchage. En effet, pensant que la durée de séchage serait plus faible si la vitesse de l'air était plus élevée, ils ont eu l'idée d'ajouter un deuxième ventilateur... face au premier, à l'autre extrémité du séchoir !

4.4 Relevés

4.4.1 Introduction

Différents paramètres sont relevés au cours des essais de séchage :

- la date et le lieu de séchage ;
- le type de séchoir utilisé
- les conditions météorologiques ;
- la température à l'intérieur du séchoir (relevée toutes les deux heures) ;
- la masse de poisson frais placée dans le séchoir ;
- la masse de poisson après le séchage ;
- l'heure de début et l'heure de fin de séchage ;
- le type de poisson ;
- la qualité du poisson séché (qualité visuelle : luisance, présence de poussières, décomposition, ...);
- l'homogénéité du séchage.

La tension DC entre le panneau photovoltaïque et le ventilateur est relevée au cours de plusieurs essais sur l'analyse de l'évolution de la température à l'intérieur du séchoir. Les relevés de mesure ont montré que la tension ne varie pas de manière très significative au cours de la journée : 17 à 19 V sans régulation, 2 à 3 V avec régulation (par utilisation du boîtier régulateur).

Après quelques semaines, plusieurs fils de connections du boîtier ont brûlé. Il a fallu faire preuve d'ingéniosité et trouver un autre moyen pour pouvoir réguler la tension. Nous avons utilisé des filets placés sur la face supérieure des panneaux photovoltaïques et les variations de tension se sont alors révélées être d'autant plus faibles. Ces mesures n'ont donc plus été prises de manière systématique pour chaque essai de séchage.

4.4.2 Conditions atmosphériques

Dans les données de la NASA, la température moyenne de l'air varie entre 25 et 33°C, au Mali, entre février et avril [14]. Comme dans le Chapitre 3, nous posons ici l'hypothèse que la température atmosphérique a une valeur moyenne de 30°C, valeur moyenne de la température observée au cours d'une journée, pendant le stage. Cette valeur concorde avec les ordres de grandeur donnés par le logiciel RETScreen, qui se base sur les données de température de la NASA. Dans le cadre de ce chapitre, nous utilisons les

valeurs moyennes mensuelles de la Table 3.12, propres aux différents essais de séchage afin de pouvoir comparer la théorie à l'expérience sur le terrain.

Nous remarquons que les conditions climatiques du mois de février ne sont pas les plus idéales pour obtenir une bonne qualité de séchage. En effet, plusieurs essais sans ventilateur ont été réalisés dans le cadre de l'étude de l'évolution de la température à l'intérieur du séchoir. Le courant d'air dans le séchoir ne dépendait donc que de l'intensité du vent. Néanmoins, la température n'a pas pu atteindre les 60°C souhaités. Le séchage solaire de poisson peut donc éventuellement se faire à partir du mois de février. Toutefois, les conditions optimales de séchage (d'après les hypothèses présentées au Chapitre 3) ne sont réunies qu'à partir du mois de mars, lorsque la température extérieure augmente.

Nous notons l'importance de connaître la direction préférentielle des vents sur les sites d'installation des séchages afin d'éviter que le ventilateur ne crée un courant d'air opposé à la direction du vent.

4.4.3 Températures du séchoir

La température à l'intérieur du séchoir est relevée à la fin de la zone de chauffe (3 m dans le cas du séchoir mobile et de 6 m dans le cas du séchoir fixe). Au Chapitre 3, nous faisons l'hypothèse que la température la plus appropriée pour le séchage se situe aux alentours de 60°C. Cette valeur est le résultat d'un compromis entre une température assez élevée pour permettre une bonne élimination des bactéries et une température pas trop élevée pour éviter toute détérioration du poisson (on ne veut pas le cuire ni le frire!).

4.5 Présentation des résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus lors du stage au Mali.

La variété des poissons utilisés pour le séchage dépend de la saison. Trois espèces de poisson ont été pêchées durant le stage : *Mormyrus rume* (le nana), assez petit, *Tilapia niloticus* (la carpe), de taille moyenne, et *Hydrocion forskali* (le poisson chien), de plus grande taille. Ces trois espèces de poissons sont représentatives de la plus grande partie des poissons

présents dans le Delta Central du Niger. Nous notons que suivant les espèces pêchées, les pêcheurs ont tendance à favoriser le séchage des plus gros poissons.

La Table 4.2 présente les différents essais de séchage qui ont été réalisés sur le séchoir mobile. Toutes les espèces de poisson énoncées plus haut sont représentées parmi les différents essais de séchage.

La Table 4.3 présente tous les essais de séchage qui ont été faits, que ce soit sur les séchoirs mobiles, les séchoirs fixes ou les séchoirs de type hangar. Nous notons qu'il n'y a qu'un seul essai pour les séchoirs fixe et de type hangar. Ceci est dû au fait que ces séchoirs n'ont été prêts pour leur utilisation que début avril 2009.

La Figure 4.4 représente une courbe de la quantité d'eau enlevée suite au séchage (en kg) en fonction de la masse initiale de poisson et du type de séchoir. Par contre, la Figure 4.5 représente le graphique de la diminution en poids (en %) en fonction de la masse initiale de poisson et du type de séchoir. Les données chiffrées utilisées pour dessiner ces deux graphiques se trouvent dans la Table 4.3.

Nom usuel	Nana		Carpe		Poisson Chien	
	<i>Mormyrus rhume</i>		<i>Tilapia niloticus</i>		<i>Hydrocion porskali</i>	
Numéro du lot	1	5	3	2	4	6
Date	5-févr-2009	21-mars-2009	17-févr-2009	9-févr-2009	1-mars-2009	23-mars-2009
Tension DC (V)	17-19	2-4	17-19	17-19	17-19	2-4
État de fermentation	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais
Masse initiale (kg poisson)	29	47	33	56	55	40
Masse après séchage (kg poisson séché)	11,8	14	9,2	17	14,5	15
Diminution du poids (%)	59,31	70,21	72,12	69,64	73,64	62,5
Relevés de température (°C)						
Jour 1						
09h00	34,5	29	-	40	52	38,3
11h00	41	64	-	51,2	58,7	49,9
13h00	50	48	25	58	61	58,8
15h00	48,2	41	21	60	53	51,8
17h00	37	36	-	38,7	37,2	38,4
Jour 2						
09h00	32	-	37	27,8	28,2	39,5
11h00	37,8	-	40	38	49,1	52,3
13h00	47	-	32	42,7	53	57,7
15h00	57,2	-	39,2	30	60	49,3
17h00	30	-	30	29	43	39
Durée totale de séchage (h)	20	8	12	17	16	16

TAB. 4.2 – Séchoir mobile : essais de séchage sur différents poissons

Type de séchoir	Nana			Mobile (Tente)			Fixe	Hangar
	Mormyrus rhume			Carpe				
Nom usuel	<i>Mormyrus rhume</i>			<i>Tilapia niloticus</i>			Poisson Chien	
Nom scientifique	<i>Mormyrus rhume</i>			<i>Tilapia niloticus</i>			<i>Hydrocion porskali</i>	
Numéro du lot	1	5	3	2	4	6	7	8
Date	5-févr-2009	21-mars-2009	17-févr-2009	9-févr-2009	1-mars-2009	23-mars-2009	3-avr-2009	3-avr-2009
Tension DC (V)	17-19	2-4	17-19	17-19	17-19	2-4	2-4	2-4
État de fermentation	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais
Masse initiale (kg poisson)	29	47	33	56	55	40	60	15
Masse après séchage (kg poisson séché)	11,8	14	9,2	17	14,5	15	21	5
Diminution du poids (%)	59,31	70,21	72,12	69,64	73,64	62,5	65	66,67
Relevés de température (°C)								
Jour 1								
09h00	34,5	29	-	40	52	38,3	39,8	32,5
11h00	41	64	-	51,2	58,7	49,9	46,9	42,9
13h00	50	48	25	58	61	58,8	52,5	40,5
15h00	48,2	41	21	60	53	51,8	42,4	42
17h00	37	36	-	38,7	37,2	38,4	34	39,2
Jour 2								
09h00	32	-	37	27,8	28,2	39,5	52,4	39,2
11h00	37,8	-	40	38	49,1	52,3	60	40
13h00	47	-	32	42,7	53	57,7	54,2	42
15h00	57,2	-	39,2	30	60	49,3	47,2	37
17h00	30	-	30	29	43	39	44,3	39
Jour 2								
09h00	-	-	-	-	-	-	-	35,7
11h00	-	-	-	-	-	-	-	43,2
13h00	-	-	-	-	-	-	-	52
Durée totale de séchage (h)	20	8	12	17	16	16	16	20

TAB. 4.3 – Comparaison des différents types de séchoir : séchoir mobile, séchoir fixe et hangar

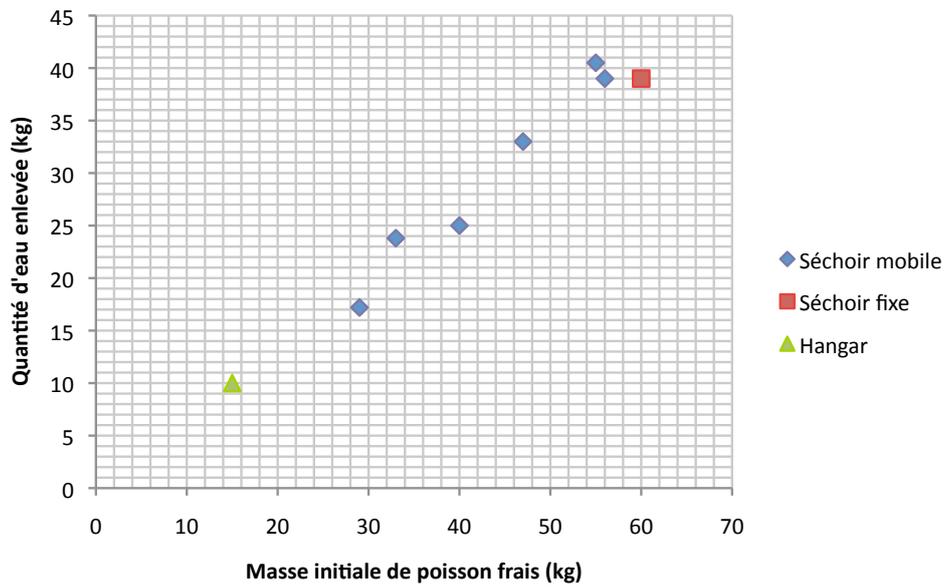


FIG. 4.4 – Quantité d'eau enlevée en fonction du poids initial de poisson et du type de séchoir

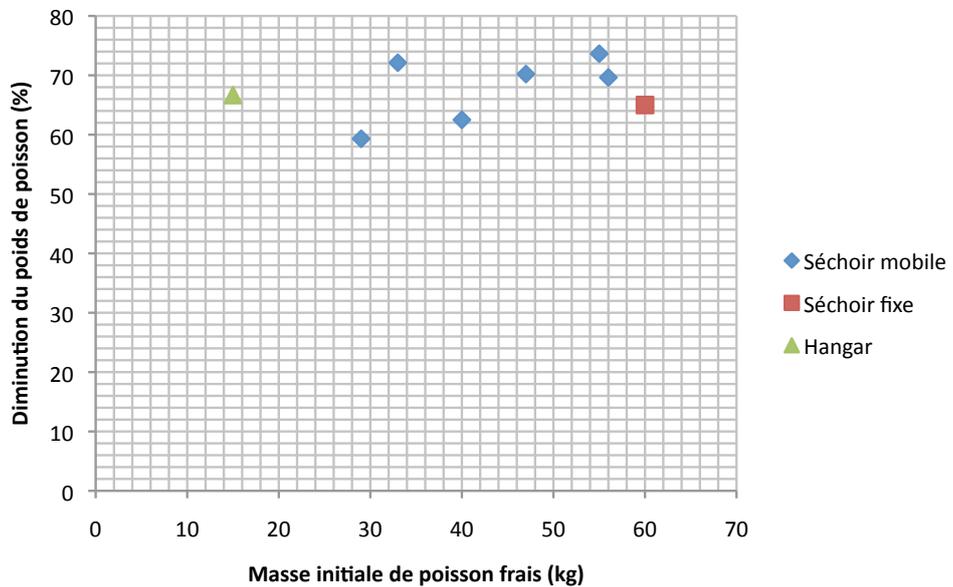


FIG. 4.5 – Diminution du poids de poisson en fonction de la masse fraîche initiale et du type de séchoir

4.6 Analyse des données

Dans le Chapitre 3, nous déterminons des conditions d'utilisation rationnelles des séchoirs solaires, et donc des ventilateurs, nécessaires pour obtenir une température de séchage de 60°C à la fin de la longueur de chauffe. Cette température nous permet de déterminer la quantité de poisson qui peut être placée dans les séchoirs solaires. De plus, nous désirons que le séchage soit homogène sur le séchoir, et nous devons donc faire en sorte que l'humidité en sortie du séchoir soit inférieur à 10% de l'humidité de saturation :

$$Y_{\text{out}} < \frac{Y_{\text{sat}}(T_s)}{10}$$

Dans le cas des séchoirs de poisson, nous trouvons que l'évacuation de la vapeur d'eau limite le bon fonctionnement des séchoirs.

Les conditions d'utilisation dans l'analyse théorique sont basées sur une étude dans des conditions moyennes de séchage et sont utilisées comme points de référence pour un séchage de bonne qualité. Toutefois, selon la période, les conditions de séchage réelles sont plus ou moins bonnes que celles utilisées dans l'analyse faite au Chapitre 3. Le temps nécessaire pour le séchage doit donc être adapté en fonction de la réalité et pas uniquement en se basant sur la théorie. Ceci ne pose pas de problème car les pêcheurs maliens pratiquent le séchage de poisson depuis plusieurs décennies et sont donc capables d'évaluer visuellement la bonne qualité du séchage.

Lorsque nous observons les essais réalisés, nous remarquons qu'ils s'écartent quelque peu des résultats obtenus par la méthode développée précédemment. Notamment, dans les conditions de séchage de 21 mars, 47 kg de poisson sont séchés en huit heures alors que l'analyse théorique prédisait un séchage de maximum 37 kg de poisson en une journée. Ces écarts par rapport à l'analyse théorique s'expliquent par le fait que la méthode ne fait que prédéfinir de bonnes conditions d'utilisation tout en se basant sur des conditions moyennes de séchage. Les conditions d'utilisation développées au Chapitre 3 ne sont pas strictes, et la quantité de poisson introduite dans le séchoir mobile, notamment, peut être supérieure à 37 kg. Ceci s'explique par le fait que les conditions moyennes de séchage utilisées dans l'analyse théorique sont, par rapport à l'essai du 21 mars 2009, moins bonnes que les conditions réelles de séchage. De plus, comme le phénomène d'évaporation n'est pas limitant, nous amenons dans le séchoir plus de chaleur que celle nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le poisson. Nous nous attendons donc à une élévation de la température de séchage T_s .

le long du séchoir, ce qui permet de sécher un peu plus rapidement que prévu.

De plus, certains essais ont une durée de séchage supérieure à une journée. Néanmoins, si le séchage dure plus longtemps, la quantité de poisson qui peut être introduite dans le séchoir mobile est logiquement supérieure aux 37 kg de poisson, prédéterminés pour une durée de séchage d'un jour (8 heures). Si la quantité de poisson introduite dans le séchoir est supérieure à 37 kg/j et que les conditions d'utilisation sont les mêmes que dans la méthode développée précédemment, les pêcheurs laisseront simplement le poisson sécher un peu plus longtemps.

Nous analysons à présent les résultats de la Table 4.2 correspondant aux essais réalisés sur le séchoir mobile. En effet, c'est sur ce séchoir qu'ont eu lieu la plus grande partie des expériences car les séchoirs fixes et de type hangar n'ont été opérationnels que début avril. D'après la méthode rationnelle d'utilisation du séchoir développée au Chapitre 3, la masse de poisson frais maximale qui peut être séchée est de 37 kg/j. Cette valeur n'est pas celle qui a été utilisée comme référence pendant le stage au Mali. En effet, nous nous sommes basés sur une quantité maximale de poisson frais de 50 kg car nous ne possédions pas encore tous les renseignements nécessaires pour faire une analyse plus fine du séchage. Le temps de séchage de référence est fixé à 8 heures et la diminution de poids doit être supérieur ou égale à 60%.

Si nous comparons ces valeurs de référence à celles obtenues en pratique, nous remarquons que la durée de séchage varie assez fort en fonction du type de poisson. Nous expliquons ceci par le fait que l'extraction de l'eau se fait plus facilement pour les petits poissons que pour les plus gros. En effet, le trajet que la vapeur d'eau doit parcourir pour arriver à la surface du poisson est plus grand dans le cas du poisson chien que dans le cas du poisson nana. Nous remarquons bien dans la Table 4.2 que les durées de séchage sont proportionnelles à la taille du poisson. Toutefois, il y a une exception : l'essai de séchage n°1, du 5 février 2009. La durée de séchage atteint 20 heures, ce qui est le temps de séchage le plus long, tous séchages confondus. Nous l'expliquons par les mauvaises conditions météorologiques : le ciel était fort couvert, en présence de beaucoup de vent. La température à l'intérieur du séchoir n'a jamais atteint les 60°C. Et, si la température de séchage est plus faible, le gradient de température avec l'atmosphère est moins important et l'extraction de l'eau par évaporation se fait donc moins facilement.

L'essai n°3 du 17 février 2009 a également eu lieu avec des conditions climatiques défavorables : nous observons que la température n'a jamais

dépassé les 40°C à l'intérieur du séchoir. Ceci explique donc que, même si la masse initiale de poisson frais était plus faible que la masse de référence, le faible gradient de température entre l'atmosphère et l'intérieur du séchoir a conduit à allonger la durée de séchage.

La Figure 4.4 montre que la quantité d'eau enlevée croît linéairement avec la masse de poisson frais introduite dans les séchoirs, pour chacun des essais effectués, quelle que soit l'espèce de poisson. Comme nous nous y attendons dans le Chapitre 3, la quantité de poisson qui peut être introduite dans les séchoirs, pour une durée de séchage de un jour, peut être augmentée par rapport à la valeur de référence de 37 kg de poisson frais par jour. Nous recommandons dès lors d'introduire des quantités de poisson proches de 50 kg/j dans le cas du séchoir mobile. Néanmoins, nous conseillons de ne pas dépasser cette valeur car nous ne savons pas comment la courbe évolue au-delà de 50 kg de poisson à sécher par jour. Cette flexibilité entre l'analyse théorique et la réalité est d'autant plus renforcée que les pêcheurs sont capables d'évaluer eux-mêmes la qualité du poisson séché, c'est-à-dire si la diminution en poids est bien de 60% ou plus. La Figure 4.5 indique quant à elle que la diminution de poids obtenue lors des différents essais de séchage varie toujours entre 60 et 75%. De telles diminutions sont indispensables pour obtenir une bonne qualité de séchage.

Si nous analysons maintenant l'essai de séchage n°7, du 3 avril 2009, réalisé sur un séchoir fixe, la masse initiale de poisson a été choisie comme égale à 60 kg afin de rester proche des données références valables pour le séchoir mobile. Au cours de cet essai, 60 kg de poisson ont été séché en 16h. Pourtant, le modèle théorique du Chapitre 3 prévoit que l'on devrait pouvoir sécher 103 kg de poisson/j. Plusieurs raisons expliquent ce triplement de la durée de séchage : premièrement, même si les conditions météorologiques sont plus favorables par rapport à celles des autres essais, la température à l'intérieur du séchoir n'est toutefois pas égale à 60°C du début à la fin du séchage : ceci peut contribuer, en partie, à allonger la durée de séchage. De plus, cet essai concerne le séchage du poisson chien, qui est un très gros poisson. L'extraction de la vapeur d'eau jusqu'à la surface du poisson pour permettre l'évaporation se fait donc plus lentement que pour les plus petits poissons et devient le facteur limitant le séchage. Dans l'analyse théorique, nous considérons que la cinétique d'extraction de la vapeur d'eau n'est pas limitante. La taille des poissons n'a donc pas d'influence sur les conditions déterminées dans le Chapitre 3. Néanmoins, au vu du monitoring des essais de séchage, nous prédisons qu'un essai de séchage du nana, dans les mêmes conditions,

mènera probablement à des résultats très concluants, avec un temps de séchage plus proche, voire inférieur, aux valeurs de référence utilisées dans la méthode d'utilisation rationnelle du séchage. Il est dès lors envisageable de sécher des quantités de poisson plus élevées que 60 kg sur les séchoirs fixes.

Remarque : l'extraction de l'eau des gros poissons est plus limitante que pour les plus petits. En effet, plus le gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur du séchoir est élevé, c'est-à-dire, plus la température de séchage est élevée, plus le séchage est rapide. Expérimentalement, nous observons ce phénomène par des petits problèmes d'homogénéité. En effet, les poissons en bout de zone de séchage seront toujours mieux séchés que ceux placés au début de celle-ci. Ce problème n'est pas observé dans les essais de séchage sur les petits poissons. C'est pourquoi, dans le cas de séchage simultané de différentes espèces de poissons, nous conseillons de placer les plus gros poissons à l'extrémité opposée au ventilateur puis de revenir petit à petit vers le centre, c'est-à-dire vers la fin de la longueur de chauffe, avec des poissons de taille décroissante.

Enfin, si nous comparons les résultats expérimentaux obtenus pour le séchoir de type hangar et que nous les comparons à ceux des séchoirs solaires fixes et mobiles, nous voyons que la capacité de séchage est nettement plus faible dans le cas du séchoir type hangar. En effet, il faut 20 heures pour sécher à peine 15 kg de poisson. La durée de séchage pour une même quantité de poisson que sur les autres séchoirs est plus de quatre fois supérieure ! Ce type de séchage est donc préférable par rapport au séchage sur paillasse actuellement utilisé. Néanmoins, si les frais d'acquisition d'un séchoir solaire fixe ou mobile ne sont pas un problème majeur, nous conseillons d'investir dans ce type de séchoir dont l'efficacité est désormais prouvée.

L'analyse théorique représente donc assez bien les essais réels de séchage de poisson. Cette analyse nous a permis de développer des conditions d'utilisation du séchoir (v , $m_{i,\text{poisson}}$) basées sur des conditions moyennes de séchage. C'est un progrès énorme dans l'étude de l'utilisation de ces séchoirs car les populations locales étaient tout à fait incapables de les utiliser auparavant. Dès lors, si on veille à atteindre une température de séchage de 60°C à la fin de la zone de chauffe et que la quantité appropriée de poisson est introduite dans les séchoirs, alors, le séchage sera de bonne qualité.

Les différents essais de séchage nous fournissent donc plus d'information sur la cinétique d'extraction de la vapeur d'eau suivant la direction radiale du poisson : les petits poissons sèchent bien plus rapidement que les

plus gros. La cinétique d'extraction joue donc un rôle, non négligeable, dans la modélisation du séchage de poisson (au moins dans le cas des plus gros poissons). Ce phénomène devrait donc être investigué ultérieurement.

Enfin, nous remarquons qu'il y a une réelle augmentation de la température de séchage suivant la direction axiale des séchoirs. Toutefois, notre hypothèse de considérer la température de séchage comme constante et égale à 60°C n'était pas mauvaise. En effet, les poissons situés à l'extrémité (opposée au ventilateur) du séchoir sèchent mieux que ceux situés plus au centre sans toutefois être cuits ou frits. La température ne subit donc qu'une légère augmentation dans la zone de séchage car sinon, nous observerions des dégradations du poisson.

En conclusion, suivant la taille du poisson à sécher et son organisation dans le séchoir, la durée de séchage prévue par la méthode d'utilisation rationnelle de séchage est minimaliste. Néanmoins, si les conditions générales d'utilisation sont respectées, que la masse initiale de poisson ne dépasse pas 50 kg de poisson, dans le cas des séchoirs mobiles, et que le séchage se fait en présence de conditions climatiques favorables, les relevés de mesures obtenus s'approcheront très fort de ceux obtenus par l'analyse théorique. La méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires mobiles et fixes développée dans le Chapitre 3 est donc un bon outil de référence pour établir de bonnes conditions de séchage.

4.7 Remarques sur les séchoirs existants et les modifications qui doivent y être apportées

4.7.1 Séchoirs solaires fixe, mobile et de type hangar

Le débit du ventilateur est un facteur très influent sur la qualité du séchage solaire de poisson. Si on souffle trop fort, le courant d'air dans le séchoir est plus important et limite l'élévation de la température dans le séchoir. Or, comme nous l'avons vu précédemment, il est important de pouvoir atteindre une température proche de 60°C pour avoir une bonne qualité de séchage. En effet, une température trop basse défavorise l'élimination des bactéries alors qu'une température trop élevée ferait cuire le poisson. On fait donc un compromis en choisissant une température de séchage de 60°C. Ce compromis permet alors à la fois une température favorisant l'élimination des bactéries mais sans toutefois

risquer de dégrader les propriétés organoleptiques et structurales du poisson.

Pour pouvoir réguler au mieux le débit du ventilateur afin d'établir des vitesses de l'air qui nous intéressent, nous plaçons des filets sur la face supérieure du panneau photovoltaïque. Actuellement, tous les séchoirs ne disposent pas encore de ces filets. Il est important de les mettre, au plus vite, à la disposition des populations de manière à pouvoir améliorer grandement le temps et la qualité de séchage (17 à 19 V de tension sans filet alors qu'avec filet la tension varie entre 2 et 3 V!).

Toutefois, il est important de contrôler fréquemment la température de séchage. En effet, lorsque celle-ci atteint 65°C, nous conseillons de retirer le filet une dizaine de minutes afin d'éviter les risques de surchauffe et les dégâts que cela pourrait occasionner au poisson. Ensuite, le filet doit être remplacé sur le panneau afin d'éviter une trop forte baisse de la température qui aurait pour conséquence de diminuer le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur du séchoir.

Pendant les mois de très forte chaleur, si la température extérieure est vraiment élevée (supérieure à 45°C), le filet peut être soulevé lorsque le soleil est proche du zénith (entre 12h et 14h) afin d'éviter des dégradations du poisson.

De manière générale, pour que tous les séchoirs installés puissent fonctionner correctement et que nous puissions poursuivre la phase de test, il faut encore :

- placer des thermomètres sur tous les séchoirs qui n'en ont pas encore et développer un suivi de séchage pour chaque essai réalisé, quel que soit le séchoir. Actuellement, il manque un thermomètre à Konna Daga sur un séchoir de type hangar et il manque 2 thermomètres à Tiadial Pouri, un pour le séchoir mobile et un pour le séchoir de type hangar.
- changer les panneaux photovoltaïques de Tiadial Pouri qui sont encore beaucoup trop puissants. Il est important de ne pas dépasser une puissance de 60W, même si 50W est préférable pour le séchoir mobile. À plus grande échelle, nous pourrions uniformiser la puissance des panneaux solaires utilisés pour les séchoirs fixes et mobiles à une puissance de 60W. Ceci permettra de réduire encore un peu le coût des séchoirs.
- démarrer un suivi économique le plus rapidement possible car rien n'a encore été mis en place à ce jour.

Remarque : Il serait plus approprié d'utiliser des panneaux photovoltaïques de puissance bien plus faible. Néanmoins, les populations ne veulent pas envisager cette possibilité. En effet, les pêcheurs utilisent aussi ces panneaux pour recharger leurs batteries. Un panneau moins puissant ne pourraient pas leur convenir. De plus, ils sont persuadés qu'en cas de forte chaleur (mois de mai et juin), un panneau moins puissant ne suffirait pas.

4.7.2 Séchoir mobile

Les résultats des différents essais réalisés sur le séchoir solaire mobile sont très bons. La construction du séchoir ne présente pas de problème apparent. Nous conseillons un panneau photovoltaïque d'une puissance maximale égale à 50W car un panneau plus puissant ne permettrait pas d'atteindre de bonnes températures de séchage.

4.7.3 Séchoir fixe

Il est important de ne pas utiliser des panneaux photovoltaïques plus puissants que 60W (même si cela intéresse fort les populations pour pouvoir recharger leurs batteries). Comme dans le cas du séchoir mobile, si la puissance du ventilateur est trop élevée, il est impossible de réguler le débit du ventilateur assez bas que pour pouvoir obtenir de bonnes conditions de séchage.

Le plus gros problème qui ait été observé sur ce type de séchoir concerne le filet de séchage. En effet, son maillage est trop fin et l'huile du poisson bouche facilement les trous du filet. De plus, à cause de la présence de l'huile, le poisson colle au filet et cela provoque de gros dégâts du point de vue de la qualité visuelle du poisson. Ce problème est d'autant plus marqué que le poisson séché dans les séchoirs est réputé pour être plus luisant que le poisson séché sur paille. Une mauvaise qualité visuelle a donc une forte influence sur la vente du poisson séché.

Nous proposons une solution : utiliser un filet de séchage identique à celui utilisé pour les séchoirs mobiles. Dans cette perspective, nous conseillons l'utilisation de deux demi longueurs de filet pour couvrir la zone de séchage. Ceci permettrait d'éviter que le filet ne s'affaisse car il est plus léger et donc moins résistant que celui qui est utilisé pour l'instant et nous voulons que le filet soit le mieux tendu possible, de manière à éviter tout contact entre les

poissons et la face supérieure de la base, en ciment.

La bâche en plastique installée sur le séchoir fixe de Konna Daga présente l'autre problème lié aux séchoirs fixes. Contrairement à la bâche des autres séchoirs (y compris les séchoirs fixes autres que celui de Konna Daga), celle-ci est fabriquée directement au Mali et n'est donc pas importée. Son problème est qu'elle chauffe assez fort car elle n'a pas la caractéristique d'être résistante aux rayons UV alors que les autres le sont. Ce réchauffement du plastique n'a pas d'impact direct sur le séchage du poisson car cela n'influence pas l'évolution de la température à l'intérieur du séchoir. C'est plus un ennui d'ordre pratique. Néanmoins, nous pensons que le changement de cette bâche en plastique n'est pas indispensable. Nous conseillons de décharger le poisson en fin de soirée. Ceci permet non seulement de diminuer la température de la bâche, mais aussi d'augmenter de quelques heures la durée du séchage, ce qui n'est pas un problème du tout.

4.7.4 Séchoir de type hangar

La critique qui doit être faite vis-à-vis des séchoirs de type hangar concerne l'utilisation de branches d'arbres pour la construction des dispositifs de séchage. En effet, ces branches, contrairement aux perches, ne présentent pas une surface lisse. La moustiquaire va donc se détruire en quelques utilisations. Il est donc important d'utiliser des perches ou autres bois lisses, même si cela doit coûter un petit peu plus cher. Si cette remarque n'est pas respectée, des trous vont se faire dans la moustiquaire et son efficacité sera réduite. Cela reviendra donc à peu près au même que de faire du séchage sur paillasse.

Chapitre 5

Manuel d'installation

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes étapes de l'installation des séchoirs solaires. Nous commençons par le cas du séchoir solaire mobile.

5.1 Séchoir mobile

La partie inférieure du séchoir est constituée d'une bâche noire. Afin d'éviter que cette bâche ne soit en contact direct avec le sol, une surface isolante, de dimensions légèrement supérieures à celles de la surface du séchoir, est étalée à l'endroit où se trouvera le séchoir. Cette surface isolante permet d'éviter les problèmes d'humidité et de moisissures qui se développeraient si la bâche était placée directement sur le sol. La bâche noire se place juste au dessus de cette couche isolante et est fixée au sol par des piquets.

Huit supports en bambou, en forme de demi arc de cercle, sont répartis sur toute la longueur du séchoir. Nous avons donc un total de sept segments. La zone de chauffe est constituée de deux de ces segments, les cinq autres étant pour la zone de séchage du poisson.

Des perches en bambou, tranchées en deux, sont placées suivant trois lignes sur toute la longueur du séchage. Elles sont liées par de la ficelle aux demi arcs de cercle mis en place ci-avant. Ces perches donnent au séchoir sa forme tridimensionnelle.

Un filet, faisant office de claie de séchage, est rattaché aux demi arcs de cercle. C'est sur cette claie que le poisson est placé pour le séchage. Il est important de remarquer que ce filet de séchage ne couvre pas toute la

surface du séchoir, mais elle couvre uniquement la zone de séchage.

L'installation est alors recouverte par une bâche en plastique qui est maintenue au reste de la structure par des cordages élastiques. Ces cordages sont eux-mêmes attachés aux piquets qui maintiennent le tout attaché au sol.

Le ventilateur est fixé dans une plaque en bois qui est placée à une des extrémités du séchoir. L'orientation du séchoir est choisie pour être perpendiculaire à la direction la plus fréquente du vent. En effet, nous ne voulons ni risquer que le ventilateur ne crée un courant d'air opposé à la direction préférentielle du vent, ni que le vent n'alimente le séchoir avec un courant d'air trop rapide (v doit être proche de 1 à 2 km/h, suivant le type de séchoir, ce qui correspond à une vitesse beaucoup plus faible que celle du vent)!

Enfin, le ventilateur doit être raccordé à un panneau photovoltaïque de 50W. Ce panneau sera couvert d'un filet afin de pouvoir diminuer la tension délivrée au ventilateur par le panneau photovoltaïque.

Si ce projet de séchage solaire de poisson s'étend, par la suite, au niveau national, nous pouvons alors envisager des panneaux de 60W à la fois pour le séchoir fixe et pour le séchoir mobile. Il faut cependant veiller à placer un filet approprié sur le panneau photovoltaïque afin d'atteindre les 60°C désirés comme température de séchage. Cette uniformisation de la puissance des panneaux pourrait très probablement permettre une réduction des coûts de ces séchoirs.

5.2 Séchoir fixe

La grande différence qui existe entre le séchoir fixe et le séchoir mobile est la présence d'une base en ciment. En réalité, seule la couche supérieure de cette base est construite en ciment. La surface extérieure de cette base est construite en briques qui sont fabriquées sur place avec un mélange de sable, d'eau et d'un peu de ciment. Le centre des briques est rempli de terre battue ou de sable. Le séchoir est donc surélevé d'une soixantaine de centimètres (trois hauteurs de briques) par rapport au sol. La partie de la base en ciment correspondant à la zone de chauffe, est couverte de peinture noire afin d'améliorer l'élévation de la température dans le séchoir.

Des supports en bois, disposés sur la largeur et la longueur du séchoir, sont fixés à la base cimentée par des barres de fer plat introduites directement dans le ciment. La structure est alors constituée de neuf segments de deux mètres chacun. Six d'entre eux définissent la partie de séchage alors que les trois autres représentent la partie chauffage du séchoir.

Un grillage est placé sur la surface du ciment qui correspond à la zone de séchage. Ce grillage sert de support au filet de séchage afin d'éviter tout risque que ce dernier n'entre en contact avec la zone cimentée.

Un filet de séchage est placé juste au-dessus de ce grillage. Il est attaché latéralement par des rubans.

L'ensemble du séchoir est alors recouvert par une bâche plastique. Cette bâche est maintenue près de la base du séchoir par une bande élastique que l'on attache en forme de zigzag, d'un bout à l'autre du séchoir.

Le ventilateur est, comme dans le cas du séchoir mobile, placé à l'une des extrémités du séchoir, choisie en fonction de la direction préférentielle du vent. Une fois le ventilateur mis en place, il est raccordé au panneau photovoltaïque.

5.3 Conseils généraux pour la mise en place des séchoirs

De manière générale, que ce soit dans le cas du séchoir fixe ou du séchoir mobile, la surface choisie pour l'installation du séchoir doit être plane.

Cette surface doit être choisie de façon à ce que le séchoir soit un maximum exposé au soleil pendant les heures les plus chaudes de la journée. Il est préférable de choisir des zones dégagées plutôt que des emplacements vides au centre d'un campement. Les zones d'ombrage sont aussi à éviter.

Comme nous l'avons dit précédemment, il faut être attentif à la direction préférentielle du vent. En effet, comme nous l'avons prédit au Chapitre 3, la vitesse de l'air à l'intérieur du séchoir doit être de l'ordre de 1 à 2 km/h, ce qui est largement inférieur à la vitesse du vent. Le séchoir doit donc être orienté, autant que possible, perpendiculairement à la direction préférentielle du vent afin d'éviter que ce dernier ne vienne renforcer, voire s'opposer, au courant d'air créé par le ventilateur.

Enfin, il faut veiller à ce que les claies de séchage soient bien tendues et à ce que les mailles du filet ne soient pas trop petites et ne puissent pas se boucher. En effet, si le poisson rentre en contact avec de l'eau ou de l'huile, qui sont souvent présentes dans le bas du séchoir, ou, si les mailles se bouchent, il y a un risque de cuire, voire frire, le poisson, plutôt que de le sécher.

Chapitre 6

Manuel d'utilisation

6.1 Schéma d'utilisation du séchoir

La Figure 6.1 représente le schéma d'utilisation du séchoir mobile. La conversion pour le cas du séchoir fixe peut se faire très facilement. Il suffit de changer les quantités de poisson introduites et d'employer un panneau photovoltaïque plus puissant. Le principe général d'utilisation est le même. La légende de ce schéma est présentée à l'Annexe A.

Nous reprenons étape par étape le schéma d'utilisation du séchoir mobile :

1. **Panneau solaire et ventilateur** - Le panneau photovoltaïque est placé sur une surface plane à côté du séchoir. Un filet, identique à celui de séchage mais plus petit, est placé sur la face supérieure de ce panneau afin que la puissance délivrée au ventilateur puisse être réduite. C'est en réduisant cette puissance qu'on régule le débit du ventilateur et que la température dans le séchoir peut atteindre des températures aussi élevées que 60°C. Le panneau photovoltaïque est branché au ventilateur lorsque le poisson est chargé et que le plastique est mis en place pour assurer la fermeture du séchoir solaire.
2. **Quantité de poisson** - La quantité maximale de poisson frais qui peut être placée dans le séchoir mobile est de 50 kg (environ 140 kg pour le séchoir fixe). Si cette quantité de poisson n'est pas suffisante pour couvrir toute la surface de séchage, il faut privilégier l'espacement entre les poissons plutôt que l'augmentation de poids. La masse de poisson frais introduite dans le séchoir doit être inscrite dans le livre

de données.

- 3. Chargement du séchoir** - La Figure 6.1 montre bien la séparation entre les deux zones sur l'entièreté du séchoir : la zone de chauffe, noire, et la zone de séchage, constituée d'un filet de séchage sur lequel sont disposés les poissons à sécher.

Les poissons sont chargés dans le séchoir suivant le sens de la flèche, c'est-à-dire à partir de l'extrémité opposée au ventilateur. En effet, la température y est toujours un peu plus élevée qu'au centre du séchoir et le séchage y est donc plus efficace. De cette manière, si la quantité de poisson introduite dans le séchoir n'est pas suffisante pour couvrir toute la surface de séchage, et étant donné que la régulation de la vitesse de l'air ne peut se faire de manière très précise, la température de séchage en bout de séchoir sera d'autant meilleure pour atteindre une bonne qualité de séchage du poisson.

De plus, nous conseillons, dans le cas où plusieurs espèces de poissons, ou des poissons de tailles différentes, doivent être séchés simultanément, de placer les plus gros poissons en premier dans le séchoir, à l'extrémité opposée au ventilateur, puis de placer les autres poissons par ordre de taille décroissante vers la fin de la longueur de chauffe.

Le chargement doit avoir lieu le plus tôt possible dans la journée afin de permettre une élévation progressive de la température dans le séchoir.

- 4. Contrôle des étapes de séchage : main d'oeuvre et temps nécessaires** - La main d'oeuvre et le temps consacrés au chargement (poisson frais à placer dans le séchoir), au contrôle pendant le séchage et au déchargement (poisson séché à enlever du séchoir) sont également des paramètres qu'il faut inscrire dans le livre de données. La main d'oeuvre nécessaire pourra alors faire l'objet d'une étude plus économique.

Remarque : l'étape de chargement comprend à la fois le temps nécessaire pour installer le poisson sur le filet de séchage, mais aussi, le temps nécessaire au lavage et à la préparation du poisson (coupage, pesée,...).

- 5. Température** - Le paramètre le plus important du séchage est la température. Celle-ci doit être contrôlée méticuleusement et relevée régulièrement, d'autant plus pendant les périodes de très forte chaleur. Les relevés réguliers de température sont effectués lors du chargement,

à 9 heures, 11 heures, 13 heures, 15 heures et 17 heures (nous supposons une journée de séchage d'environ huit heures de séchage, centrées autour du zénith) et consignés dans un livre de données.

Si la température de séchage devient trop élevée, on augmente les risques de dégradation de la qualité du poisson. De ce fait, lorsque la température de séchage atteint des températures supérieures à 65°C, nous conseillons de survélever le filet placé sur le panneau photovoltaïque afin d'augmenter le débit du ventilateur et donc de diminuer la température de séchage. Quelques minutes suffisent pour faire baisser rapidement la température à l'intérieur du séchoir.

En présence de fortes chaleurs, la température de séchage est plus élevée et le poisson sèche plus rapidement.

6. **Déchargement** - L'étape n°6 correspond au déchargement du poisson. Comme nous l'avons dit à l'étape n°2, le poisson séché doit être pesé et cette valeur doit être indiquée dans le livre de données.
7. **Qualité du poisson** - Il est important de pouvoir évaluer la qualité du poisson. Cette qualité dépend de la diminution en poids du poisson. Soit $m_{i,\text{poisson}}$ la masse initiale de poisson mise à sécher et $m_{s,\text{poisson}}$ la masse de poisson mesurée après le séchage. La diminution du poids en pourcentage, c'est-à-dire $\left(\frac{m_{i,\text{poisson}} - m_{s,\text{poisson}}}{m_{i,\text{poisson}}}\right)100$, doit être supérieure à 60% pour assurer une bonne qualité de séchage.
8. **Homogénéité** - Il faut également veiller à surveiller l'homogénéité de séchage sur la longueur et la largeur du séchoir. Un poisson qui commence à se décomposer ou se briser, est considéré comme dégradé et n'est pas acceptable. Par contre, si le poisson est correctement séché et que la diminution en poids est supérieure à 60%, le poisson est dit de bonne qualité. L'objectif du séchage est bien sûr d'obtenir un maximum de poisson de bonne qualité au cours d'un séchage. Il est donc important de noter si, dans certaines parties de la zone de séchage, le poisson est plus sujet à être dégradé.
9. **Enregistrement des données** - De manière générale, il est important de bien conserver toutes les données relatives au séchage dans un livre de données. L'évolution du séchage doit être bien contrôlée. On ne peut en aucun cas charger le poisson et ensuite revenir huit heures plus tard pour le décharger sans avoir contrôlé l'évolution du séchage!

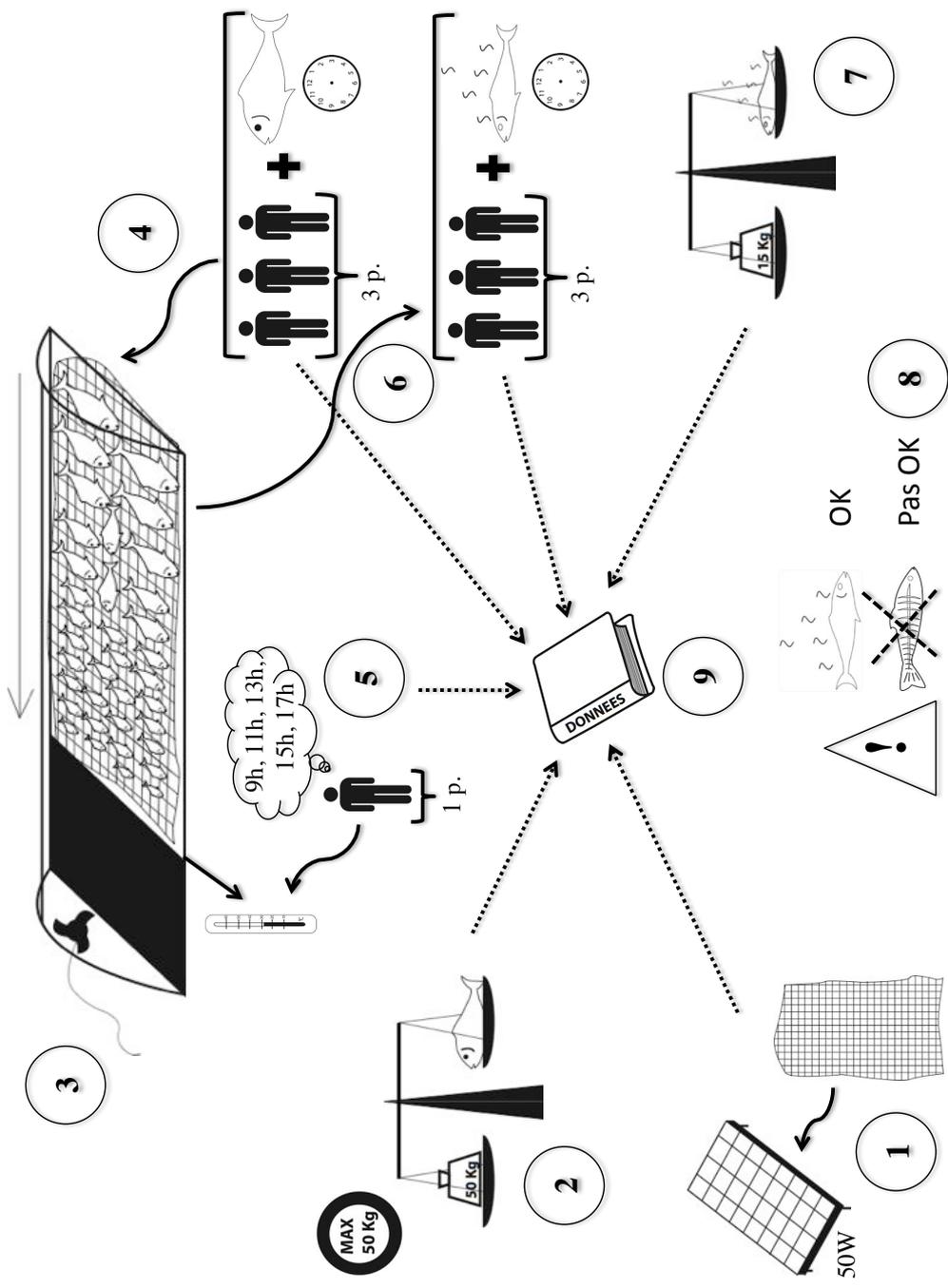


FIG. 6.1 – Manuel d'utilisation du séchoir mobile

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

Dans ce travail, nous avons développé une méthode rationnelle d'utilisation des séchoirs solaires à poisson, fixes et mobiles, en nous basant sur des bilans de matière et d'énergie. Ces bilans ont été combinés avec des données imposées, telles que la température et la durée de séchage, et des conditions moyennes de séchage, comme les propriétés de l'air et la température de référence.

Nous avons développé notre analyse théorique suivant les deux phénomènes majeurs intervenant dans le séchage de poisson :

- avoir un transfert de chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide, l'eau ;
- avoir un débit d'air suffisant à l'intérieur du séchoir pour évacuer la vapeur produite par l'évaporation.

La cinétique d'extraction de la vapeur d'eau du poisson, troisième phénomène intervenant lors du séchage, a été considérée comme non limitante.

D'après notre étude de bilans sur le séchoir, c'est le phénomène d'évacuation de la vapeur d'eau qui est le facteur limitant le fonctionnement du séchage. C'est ce phénomène d'évacuation qui nous a donc permis de pré-définir la quantité maximale d'eau qui peut être enlevée en une journée de séchage, c'est-à-dire la quantité maximale de poisson frais qui peut être introduite sur les séchoirs, afin que le séchage soit uniforme et de bonne qualité.

Ces considérations théoriques ont été testées au Mali, dans des conditions réelles de séchage. Le monitoring de différents essais de séchage a confirmé la bonne applicabilité du modèle théorique à des situations réelles de séchage.

Nous avons remarqué l'intérêt d'étudier, de manière plus approfondie,

die, la cinétique du séchage de poisson, car d'après les essais réalisés au Mali, les petits poissons sèchent plus vite que les grands. De plus, des quantités de poisson légèrement supérieures à celles prédéfinies par l'analyse théorique peuvent être placées sur le séchoir, sans limiter son bon fonctionnement. En effet, le séchage est toujours uniforme sur la zone de séchage et le poisson est de bonne qualité. Ces écarts entre l'analyse théorique et les essais de séchage s'expliquent par le fait que nous avons fait une analyse découplée des phénomènes d'évaporation et d'évacuation de l'eau. Au vu de ces écarts, il serait donc intéressant de ré-envisager l'analyse théorique en couplant ces deux phénomènes. Nous prédisons d'ores-et-déjà que la quantité de poisson qui pourra être introduite dans les séchoirs sera supérieure à celle déterminée dans le Chapitre 3 de ce travail.

En tant que Bioingénieur, notre travail pourrait également être complété par une étude bactériologique. Cette étude permettrait de définir la température de séchage, de manière plus spécifique, en fonction des micro-organismes présents dans le poisson.

D'un point de vue plus pratique, il serait intéressant de poursuivre les analyses de séchage sur le séchoir solaire fixe, notamment. Sa mise en place assez tardive a limité le monitoring régulier d'essais sur ce type de séchoir.

Enfin, la communication avec les populations Bozos devrait être favorisée par la présence d'un représentant de l'ONG AFAR, voire, si ce n'est pas possible, la présence d'un traducteur pendant toute la période de test du projet "séchage de poisson" afin d'améliorer les problèmes de communication.

Bibliographie

- [1] J. Brau. Transfert de chaleur par convection. Technical report, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 2006.
- [2] Ministère de la pêche et de l'élevage. *Schéma directeur de développement de la pêche et de l'aquaculture*, volume I. République du Mali, 2006.
- [3] G. Degrez. Thermodynamique appliquée. Technical report, Université Libre de Bruxelles, 2006.
- [4] P.E. Doe. Safety and quality issues in fish processing. In *Fish Drying*, pages 350–359. University of Tasmania, Hobart, 2002.
- [5] B. Deschamps et al. Fiches techniques du tomatosek. Technical report, Université Libre de Bruxelles, 2006-2007.
- [6] R.B. Bird et al. *Transport Phenomena*, chapter Energy Transport by Radiation, pages 487 – 509. Wiley, second edition, 2007.
- [7] V. Halloin. Éléments de transfert de matière et de chaleur. Technical report, Université Libre de Bruxelles, 2006.
- [8] V. Halloin. Génie des réacteurs monophasiques. Technical report, Université Libre de Bruxelles, 2007.
- [9] B. Haut. Introduction à l'opération unitaire de séchage. Technical report, Université de Ouagadougou, avril 2004.
- [10] B. Haut. Opérations unitaires physico-chimiques. Technical report, Université Libre de Bruxelles, 2009.
- [11] Y. Jannot. Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides. Technical report, Université de Bordeaux I, 2007.
- [12] Y. Jannot. Thermique solaire, 2007.
- [13] Encyclopédie Quid. Carte globale du mali, 2008.
- [14] Ressources naturelles du Canada. *Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres*. Données de la NASA.

- [15] J-F Rozis. Sécher des produits alimentaires : techniques, procédés, équipements. Technical report, GRET - Ministère de la coopération, Paris, 1995.
- [16] ThermExcel. Caractéristiques physiques de l'eau à la pression atmosphérique.
- [17] F. van der Pol. Programme d'activités pour l'innovation de la transformation des produits agricoles et l'amélioration de l'accès aux marchés. Royal Tropical Institute (KIT), Décembre 2007. Document de travail R14 : Développement de la filière poisson. Missions juin-novembre 2007.
- [18] F. van der Pol. Programme d'activités pour l'innovation de la transformation des produits agricoles et l'amélioration de l'accès aux marchés. Royal Tropical Institute (KIT), Juillet 2007. Document de travail R12.
- [19] F. van der Pol. Programme d'activités pour l'innovation de la transformation des produits agricoles et l'amélioration de l'accès aux marchés. Royal Tropical Institute (KIT), Juin 2008. Document de travail R16 : Rapport de mission du démarrage de la nouvelle phase.
- [20] F. van der Pol. Programme d'activités pour l'innovation de la transformation des produits agricoles et l'amélioration de l'accès aux marchés. Royal Tropical Institute (KIT), Novembre 2008. Document de travail R18 : Rapport de la formulation d'une stratégie de marketing pour le poisson séché amélioré et de contractualisation pour le sésame.
- [21] Wikipedia. Conduction thermique, dernière mise à jour le 1 juin 2009.
- [22] Wikipedia. Cellule photovoltaïque, dernière mise à jour le 27 mai 2009.

Annexe A

Légende du schéma d'utilisation du séchoir mobile



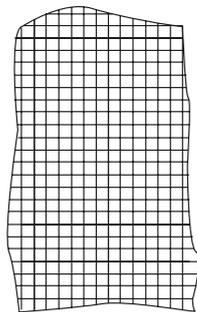
Poids de 15 kg



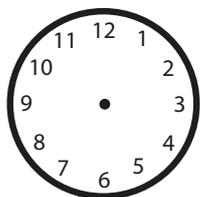
Poids de 50 kg



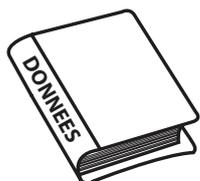
Balance



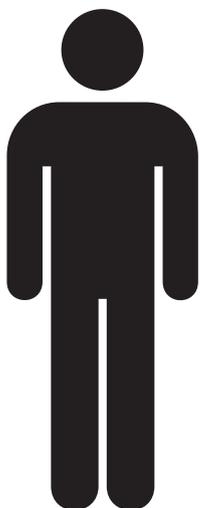
Filet de séchage



Horloge



Livre de données



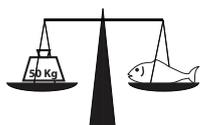
Main d'oeuvre



Panneau photovoltaïque



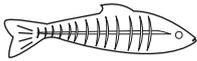
Pesée du poisson séché



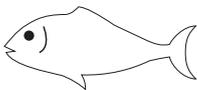
Pesée du poisson frais



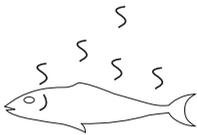
Poids maximum admissible de 50 kg



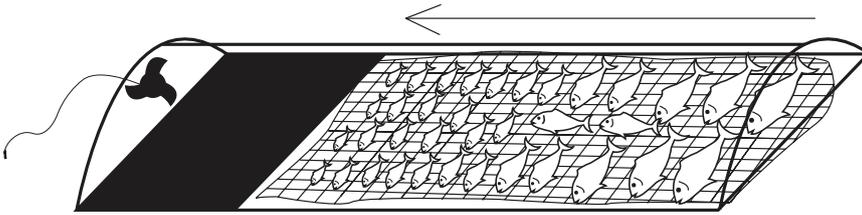
Poisson dégradé



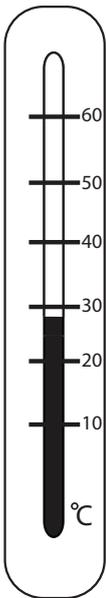
Poisson frais



Poisson séché



Séchoir
mo-
bile



Thermomètre

Annexe B

Caractéristiques physiques de l'eau à la pression atmosphérique

Température °C	Pression référence Pa	Pression de vapeur saturante Pa	Masse volumique (Density) kg/m ³	Chaleur sensible (Enthalpie spécifique)		Chaleur spécifique (ou massique)		Chaleur volumique kJ/m ³	Viscosité dynamique de l'eau kg/m.s
				kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg		
30.00	101325	4242	995.71	125.75	30.04	4.178	0.998	4160.53	0.000798
31.00	101325	4491	995.41	129.93	31.03	4.178	0.998	4159.13	0.000781
32.00	101325	4754	995.09	134.11	32.03	4.178	0.998	4157.73	0.000765
33.00	101325	5029	994.76	138.29	33.03	4.178	0.998	4156.33	0.000749
34.00	101325	5318	994.43	142.47	34.03	4.178	0.998	4154.92	0.000734
35.00	101325	5622	994.08	146.64	35.03	4.178	0.998	4153.51	0.000720
36.00	101325	5940	993.73	150.82	36.02	4.178	0.998	4152.08	0.000705
37.00	101325	6274	993.37	155.00	37.02	4.178	0.998	4150.65	0.000692
38.00	101325	6624	993.00	159.18	38.02	4.178	0.998	4149.20	0.000678
39.00	101325	6991	992.63	163.36	39.02	4.179	0.998	4147.74	0.000666
40.00	101325	7375	992.25	167.54	40.02	4.179	0.998	4146.28	0.000653
41.00	101325	7777	991.86	171.71	41.01	4.179	0.998	4144.80	0.000641
42.00	101325	8198	991.46	175.89	42.01	4.179	0.998	4143.30	0.000629
43.00	101325	8639	991.05	180.07	43.01	4.179	0.998	4141.80	0.000618
44.00	101325	9100	990.64	184.25	44.01	4.179	0.998	4140.28	0.000607
45.00	101325	9582	990.22	188.43	45.01	4.180	0.998	4138.75	0.000596

FIG. B.1 – Caractéristiques de l'eau entre 30 et 75 °C à la pression atmosphérique [16]

46.00	101325	10085	989.80	192.61	46.00	4.180	0.998	4137.20	0.000586
47.00	101325	10612	989.36	196.79	47.00	4.180	0.998	4135.64	0.000576
48.00	101325	11161	988.92	200.97	48.00	4.180	0.998	4134.06	0.000566
49.00	101325	11735	988.47	205.15	49.00	4.181	0.999	4132.47	0.000556
50.00	101325	12335	988.02	209.33	50.00	4.181	0.999	4130.87	0.000547
51.00	101325	12960	987.56	213.51	51.00	4.181	0.999	4129.25	0.000538
52.00	101325	13612	987.09	217.69	52.00	4.182	0.999	4127.61	0.000529
53.00	101325	14292	986.62	221.88	52.99	4.182	0.999	4125.97	0.000521
54.00	101325	15001	986.14	226.06	53.99	4.182	0.999	4124.30	0.000512
55.00	101325	15740	985.65	230.24	54.99	4.183	0.999	4122.63	0.000504
56.00	101325	16510	985.16	234.42	55.99	4.183	0.999	4120.94	0.000496
57.00	101325	17312	984.66	238.61	56.99	4.183	0.999	4119.24	0.000489
58.00	101325	18146	984.16	242.79	57.99	4.184	0.999	4117.52	0.000481
59.00	101325	19015	983.64	246.97	58.99	4.184	0.999	4115.79	0.000474
60.00	101325	19919	983.13	251.16	59.99	4.185	0.999	4114.05	0.000467
61.00	101325	20859	982.60	255.34	60.99	4.185	1.000	4112.30	0.000460
62.00	101325	21837	982.07	259.53	61.99	4.186	1.000	4110.53	0.000453
63.00	101325	22854	981.54	263.72	62.99	4.186	1.000	4108.75	0.000447
64.00	101325	23910	981.00	267.90	63.99	4.187	1.000	4106.97	0.000440
65.00	101325	25008	980.45	272.09	64.99	4.187	1.000	4105.17	0.000434
66.00	101325	26148	979.90	276.28	65.99	4.188	1.000	4103.36	0.000428
67.00	101325	27332	979.34	280.46	66.99	4.188	1.000	4101.54	0.000422
68.00	101325	28561	978.78	284.65	67.99	4.189	1.000	4099.71	0.000416
69.00	101325	29837	978.21	288.84	68.99	4.189	1.001	4097.88	0.000410
70.00	101325	31161	977.63	293.03	69.99	4.190	1.001	4096.03	0.000404
71.00	101325	32533	977.05	297.22	70.99	4.190	1.001	4094.18	0.000399
72.00	101325	33957	976.47	301.41	71.99	4.191	1.001	4092.31	0.000394
73.00	101325	35433	975.88	305.60	72.99	4.192	1.001	4090.45	0.000388
74.00	101325	36963	975.28	309.79	73.99	4.192	1.001	4088.57	0.000383
75.00	101325	38548	974.68	313.99	74.99	4.193	1.001	4086.69	0.000378

FIG. B.2 – Caractéristiques de l'eau entre 30 et 75 °C à la pression atmosphérique (suite) [16]

Annexe C

Fiche de suivi de séchage

Paramètres de suivi pour le séchage amélioré du poisson

	Fixe	Tente	Hangar
Type de séchoir			

A) Suivi technique par

Données générales			
Lot numéro		kg poisson frais mis au séchoir	
Endroit		Espèce de poisson	
Groupe		état (fermentation)	
Date chargement		heure de charge	

Température intérieur du séchoir (°C)			
	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Lors du chargement			
9h			
11h			
13h			
15h			
17h			
Observations (angle de la plaque solaire, vitesse courant d'air, turbulence, procédé de séchage, couverture)			

Déchargement			
Date déchargement		Heure de décharge	
kg poisson séché sorti		Qualité de séchage	

B) Suivi économique par

Temps de main d'œuvre			
	Préparation	Chargement	Déchargement
Durée (heures)			
Nombre de personnes			
Observations			

Temps de surveillance			
	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Durée (heures)			
Nombre de personnes			
Observations			

Achats frais		Livraisons séchés	
Poisson frais acheté (kg)		Poisson séché livré (kg)	
Montant (FCFA)		Montant (FCFA, en cas)	
Prix (FCFA/kg)		Prix (FCFA/kg, en cas)	
Espèce de poisson		Lieu de livraison	
Qualité		Nom du commerçant	
		Numéro du lot de vente	