

J'adresse mes remerciements à M. Stéphane GUILBERT, Directeur Scientifique Adjoint au CIRAD-SAR, pour m'avoir accueillie au sein de l'équipe "Génie et Technologie Agroalimentaires" et pour sa participation au jury de ma thèse.

Mes plus vifs remerciements vont à MM. Moustapha SOUMARE et Yoro DIAKITE, Directeurs respectifs de l'ISFRA-Bamako, pour leur accueil lors de mes missions, ainsi qu'à MM. Abdoulaye et Aziz COULIBALY, chercheurs à l'ISFRA-Bamako, pour leur participation active aux travaux de terrain effectués dans le cadre de ce projet.

J'exprime mes sincères remerciements à M. Daniel DANSOKO, Directeur du LHM-Mopti, pour l'aide qu'il a apportée à l'organisation des missions de terrain, ainsi qu'à Mme. Oumou TRAORE CISSE pour sa contribution consciencieuse à l'étude effectuée au Mali et pour son amitié.

Je remercie MM. Huu Hai VUONG et Jean CHAROY, Délégués respectifs du CIRAD au Mali, pour leur appui logistique et administratif aux missions de terrain ainsi que pour leur accueil chaleureux.

Mes remerciements vont à M. Christian ALBIGES, Responsable de la division Pêche et Pisciculture du CEMAGREF-Montpellier, pour m'avoir gracieusement permis d'assurer l'élevage du *Tilapia* dans les viviers du CEMAGREF. Je remercie également M. Olivier SCHLUMBERGER (CEMAGREF-Montpellier) pour ses conseils utiles à mon expérience en aquaculture.

Je tiens à remercier M. André THEMELIN, Ingénieur de Recherche au CIRAD-SAR, pour avoir initié ce projet et m'en avoir confié la gestion technique et financière, ainsi que M. Jean-Paul HEBERT, Conseiller Pédagogique à l'ENSIA-SIARC de Montpellier, pour l'aide apportée au début de ma formation doctorale.

J'adresse mes sincères remerciements à M. Dany GRIFFON, Directeur Adjoint aux Programmes (CIRAD-SAR) pour la confiance qu'il m'a accordée et l'appui qu'il a assuré à mon accueil au CIRAD en tant qu'allocataire de recherche.

J'exprime ma profonde gratitude à MM. Antoine COLLIGNAN (Ingénieur de Recherche) et Philippe BOHUON (Allocataire de Recherche) du CIRAD-SAR, pour l'apport de leurs compétences concernant la modélisation du séchage, ainsi qu'à M. Christian AYMARD (chercheur CNRS mis à disposition au CIRAD-SAR) qui a pris la peine de discuter mes travaux et d'y apporter ses compétences en biochimie.

Je remercie tous les étudiants stagiaires qui se sont initiés à la recherche dans le cadre de ce travail de thèse. J'ai ainsi apprécié l'aide apportée par Vincent GALLEGRO, Stéphane PASCAL, Séverine ALRIC, Elyssere RASOAMIARANIRINA et Frédérique DIRAISON.

Je tiens enfin à remercier toutes les personnes du CIRAD-SAR, et notamment de l'équipe "Génie et Technologie Agroalimentaires", pour l'ambiance chaleureuse et sympathique qu'elles ont su créer et leurs relations amicales qui ont contribué au bon déroulement de mon travail.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

LISTE DES SIGLES UTILISES 10

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES 13

INTRODUCTION 18

I. LE POISSON ALIMENT 21

I.1. Généralités 21

I.2. Causes d'altération du poisson 23

I.2.1. Evolution du muscle après la mort 23

I.2.2. Dégradation des matières azotées par autolyse 24

I.2.3. Dégradation par activité microbienne 24

I.2.4. Dégradation des matières grasses 26

I.2.5. Dégradation des nucléotides 27

I.2.6. Dégradation des glucides 27

I.2.7. Altérations dues aux traitements technologiques 27

I.3. Evaluation de la qualité du poisson 29

I.3.1. Qualité marchande 29

I.3.2. Qualité sensorielle 30

I.3.3. Qualité sanitaire 31

I.3.4. Qualité alimentaire 32

I.3.5. Caractéristiques physico-chimiques	33
II. LE CONTEXTE DE PECHE AU MALI	35
III. LE SECHAGE, PROCEDE DE STABILISATION	40
III.1. Théorie du séchage	40
III.2. Le séchage traditionnel du poisson en Afrique	47
IV. MATERIELS ET METHODES	54
IV.1. Matière première	54
IV.2. Méthodologie appliquée au Mali	56
IV.2.1. Paramétrage du procédé traditionnel	56
IV.2.2. Définition de la "qualité standard" du poisson séché au Mali	58
IV.2.3. Etude de l'opération traditionnelle de fermentation	58
IV.2.4. Essais d'incorporation d'additifs alimentaires dans le procédé traditionnel	59
IV.2.5. Identification des critères maliens de qualité du poisson séché	59
IV.3. Méthodologie appliquée en France	60
IV.3.1. Plan d'expérience - surface de réponse	60
IV.3.2. Dispositif expérimental de séchage	66
IV.3.3. Préparation du poisson avant séchage	68
IV.3.4. Représentation des cinétiques de séchage	70
IV.3.4.1. Courbes expérimentales	70
IV.3.4.2. Courbe caractéristique de séchage	70
IV.3.4.3. Modèle diffusif	71
IV.3.4.4. Réponses du plan d'expérience	74
IV.3.5. Préparation de l'échantillon pour les analyses de qualité	74

IV.4. Analyses de qualité	75
IV.4.1. Analyses microbiologiques	75
IV.4.1.1. Etude comparative de méthodes classiques et "nouvelles"	75
IV.4.1.2. Méthodes classiques utilisées	77
IV.4.1.3. Méthodes "nouvelles" testées	77
IV.4.2. Analyses de composition	81
IV.4.3. Analyses physico-chimiques	83
IV.4.4. Analyses biochimiques	85
V. RESULTATS ET DISCUSSION	99
V.1. Etudes préliminaires	99
V.1.1. Etude comparative microbiologique	99
V.1.2. Analyses de qualité testées mais non retenues	103
V.2. Travaux effectués au Mali	105
V.2.1. Contexte de l'étude	105
V.2.2. Métrologie et paramétrage du procédé traditionnel	109
V.2.3. Suivi de la qualité du poisson au cours de la transformation	116
V.2.4. Critères maliens de qualité du poisson séché	128
V.2.5. Opération traditionnelle de fermentation	130
V.2.6. Utilisation d'additifs alimentaires	133
V.2.7. La filière "poisson séché" au Mali	143
V.2.8. Aperçu ponctuel de la qualité de <i>Tilapia</i> séché prélevé sur les marchés de Mopti	145
V.3. Travaux effectués en France	152
V.3.1. Etude de l'opération de séchage	152
V.3.1.1. Description des courbes expérimentales	152
V.3.1.2. Modélisation des cinétiques de séchage	160
V.3.1.2.1. Durée du séchage	160

V.3.1.2.2. Courbe caractéristique de séchage	160
V.3.1.2.3. Modèle diffusif	163
V.3.1.3. Synthèse du volet séchage	165
V.3.2. Eléments de composition du <i>Tilapia</i>	165
V.3.3. Impact du séchage sur la qualité du poisson	165
V.3.3.1. Qualité microbiologique	167
V.3.3.2. Qualité physico-chimique	173
V.3.3.3. Qualité biochimique	175
V.3.4. Relation procédé-qualité et optimisation	185
VI. AMELIORATION DE LA QUALITE DU POISSON SECHE AU MALI	187
VI.1. Diffusion des connaissances acquises sur le terrain	187
VI.2. Propositions et recommandations	188
VI.3. Normes proposées pour la qualité du poisson séché au Mali	192
CONCLUSION	197
ILLUSTRATIONS DU SECHAGE DE POISSON AU MALI	200
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	204
ANNEXES	218
ANNEXE 1 : Valeurs expérimentales des réponses de séchage	220
ANNEXE 2 : Eléments de composition du <i>Tilapia</i> pour les différents essais de séchage	221
ANNEXE 3 : Valeurs expérimentales des réponses de la flore aérobie mésophile totale	222
ANNEXE 4 : Valeurs expérimentales des réponses des levures	

et moisissures	223
ANNEXE 5 : Mesures de couleur (valeurs expérimentales des indices "L", "a" et "b")	224
ANNEXE 6 : Valeurs expérimentales des critères physico-chimiques (pH et a_w)	225
ANNEXE 7 : Valeurs expérimentales des indices de qualité des lipides et de l'indice de l'hypoxanthine	226
ANNEXE 8 : Valeurs expérimentales des indices de qualité des matières azotées	227

PUBLICATIONS RELATIVES A LA THESE

RESUME ET MOTS-CLES

CHAPITRE 11. MÉTHODES

CHAPITRE 12. MÉTHODES DE TRAVAIL

CHAPITRE 13. MÉTHODES DE TRAVAIL	131
CHAPITRE 14. MÉTHODES DE TRAVAIL	132
CHAPITRE 15. MÉTHODES DE TRAVAIL	133
CHAPITRE 16. MÉTHODES DE TRAVAIL	134
CHAPITRE 17. MÉTHODES DE TRAVAIL	135
CHAPITRE 18. MÉTHODES DE TRAVAIL	136

Rapport-gratuit.com

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



LISTE DES SIGLES UTILISES

Sigles d'organismes :

CIRAD - SAR	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, département Systèmes Agroalimentaires et Ruraux, Montpellier, France.
USTL	Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France.
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Nantes, France.
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique, Theix, France.
ENSIC	Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Nancy, France.
CEMAGREF	Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Montpellier, France
CEREMHER	Centre de Recherches Mèze Hérault (Station de Lagunage), Mèze, France
ISFRA	Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée, Bamako, Mali.
LHM	Laboratoire d'Hydrobiologie de Mopti, Mopti, Mali.
OPM	Opération Pêche Mopti, Mopti, Mali.
AFNOR	Association Française de Normalisation.

Sigles relatifs à l'échantillonnage du poisson au Mali

F	frais (prélevé après capture)
Db	prélevé au débarquement
FR	prélevé après fermentation
S_x	prélevé au cours du séchage, "x" étant l'ordre chronologique du prélèvement.

Sigles relatifs au volet séchage

a_w	activité de l'eau (adimensionnel)
bh	base humide
MS	matière sèche
MB	matière brute
D	coefficient de diffusion apparent ($m^2 \cdot s^{-1}$)
k	coefficient d'échange de matière à l'interface ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
E_a	énergie d'activation ($J \cdot mole^{-1}$)
T	température de l'air de séchage ($^{\circ}C$)
HR	hygrométrie ou humidité relative de l'air de séchage (%)
V	vitesse de l'air de séchage (m/s)
X	teneur en eau du produit (kg eau/kg MS)
X_0	teneur en eau initiale (kg eau/kg MS)
X_{eq}	teneur en eau à l'équilibre (kg eau/kg MS)
X_{cr}	teneur en eau critique (kg eau/kg MS)
$-(dX/dt)$	vitesse ou allure de séchage (kg eau/kg MS $\cdot s^{-1}$)
$-(dX/dt)_{cte}$	vitesse de séchage en régime constant (kg eau/kg MS $\cdot s^{-1}$)
CCS	courbe caractéristique de séchage

Sigles relatifs à la partie microbiologique

HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
FAMT	flore aérobie mésophile totale
COL	coliformes
LM	levures et moisissures
ASR	anaérobies sulfito-réducteurs
UFC	unités formatrices de colonies
τ	taux de survie des germes (hr^{-1})

Sigles relatifs à la partie biochimique

NPN	azote non protéique
ABVT	azote basique volatil total
TNBS	trinitro benzène sulfonique
TBA	thiobarbituric acid (acide thiobarbiturique)
TCA	trichloroacetic acid (acide trichloracétique)
ATP	adénosine triphosphate
ADP	adénosine diphosphate
AMP	adénosine monophosphate
IMP	inosine monophosphate
I	inosine
Hx	hypoxanthine
K	indice de fraîcheur du poisson
AASC	acetic acid soluble colour
IP	indice de peroxyde
HPLC	chromatographie liquide haute pression
Tris	tampon hydroxyméthyl amino méthane

Sigles relatifs à la mesure de la couleur

L	indice de luminance
a	indice de rouge
b	indice de jaune

Sigles statistiques

R ²	coefficient de détermination
RLM	régression linéaire multiple

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX :

- Tab. IV.1.** Niveaux expérimentaux des paramètres de séchage
- Tab. IV.2.** Matrice expérimentale des essais de séchage
- Tab. IV.3.** Méthodes microbiologiques classiques utilisées dans l'étude comparative puis pour l'évaluation de la qualité sanitaire du poisson
- Tab. IV.4.** Gamme étalon de malonaldéhyde (test TBA)
- Tab. IV.5.** Gamme étalon d'hypoxanthine
- Tab. IV.6.** Gamme étalon de sérum albumine (test de Bradford)
- Tab. IV.7.** Gamme étalon de sérum albumine (test de Gornall)
-
- Tab. V.1.** Comparaison de tests microbiologiques classiques et "rapides"
- Tab. V.2.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle A₁)
- Tab. V.3.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle A₂)
- Tab. V.4.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle B₁)
- Tab. V.5.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle B₂)
- Tab. V.6.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle C₁)
- Tab. V.7.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle C₂)
- Tab. V.8.** Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali (cycle C₃)
- Tab. V.9.** Charges microbiennes de *Tilapia* (cycle A₁)
- Tab. V.10.** Charges microbiennes de *Tilapia* (cycle B₁)
- Tab. V.11.** Charges microbiennes de *Tilapia* (cycle B₂)
- Tab. V.12.** Charges microbiennes de *Tilapia* (fermentation traditionnelle)
- Tab. V.13.** Analyses biochimiques de *Tilapia* (cycle A₁)

Tab. V.14.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (cycle A2)
Tab. V.15.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (cycle B1)
Tab. V.16.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (cycle B2)
Tab. V.17.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (fermentation traditionnelle)
Tab. V.18.	Charges microbiennes de <i>Tilapia</i> (cycle C1)
Tab. V.19.	Charges microbiennes de <i>Tilapia</i> (cycle C2)
Tab. V.20.	Charges microbiennes de <i>Tilapia</i> (cycle C3)
Tab. V.21.	Flores lactique et acétique (cycles C1, C2 et C3)
Tab. V.22.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (cycle C1)
Tab. V.23.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (cycle C2)
Tab. V.24.	Analyses biochimiques de <i>Tilapia</i> (cycle C3)
Tab. V.25.	Teneurs en acides organiques (cycles C1, C2 et C3)
Tab. V.26.	Teneurs en acides organiques (échantillons marché Mopti)
Tab. V.27.	Composition chimique (échantillons marché Mopti)
Tab. V.28.	Critères physico-chimiques (échantillons marché Mopti)
Tab. V.29.	Couleur en systèmes Lab et Munsell (échantillons marché Mopti)
Tab. V.30.	Analyses biochimiques (échantillons marché Mopti)
Tab. V.31.	Indices de dégradation des lipides (échantillons marché Mopti)
Tab. V.32.	Coefficients de régression pour les réponses de séchage
Tab. V.33.	Coefficients de régression pour les charges microbiennes
Tab. V.34.	Coefficients de régression pour les critères physico-chimiques
Tab. V.35.	Coefficients de régression pour les indices biochimiques

Tab. VI.1. Normes bactériologiques françaises pour les produits de la pêche

FIGURES :

Fig. II.1. Le delta central du fleuve Niger

Fig. III.1. Transferts de matière et de chaleur dans la couche limite

Fig. III.2. Représentation des cinétiques de séchage

Fig. III.3. Courbe caractéristique de séchage (CCS)

Fig. III.4. Face dorsale d'un adulte de *Dermestes maculatus*

Fig. III.5. Face dorsale d'un adulte de *Necrobia rufipes*

Fig. IV.1. Différentes espèces de *Tilapia* utilisées dans l'étude

Fig. IV.2. Diagramme d'échantillonnage au Mali

Fig. IV.3. Points expérimentaux du plan d'expérience (composite, centré, orthogonal, rotatif, à 3 facteurs et 5 niveaux)

Fig. IV.4. Boucle de séchage (CIRAD-SAR) utilisée pour l'étude

Fig. IV.5. Mode de suspension du poisson dans le séchoir

Fig. IV.6. Configuration du poisson assimilée à une plaque plane semi-infinie

Fig. V.1. Allures de séchage au point central

Fig. V.2. Allures de séchage pour les essais 1 et 5

Fig. V.3. Allures de séchage pour les essais 5, 7 et 9

Fig. V.4. Allures de séchage pour les essais 11 et 15

- Fig. V.5.** Durée du séchage (t) en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.6.** Courbe caractéristique de séchage (1° transformation)
- Fig. V.7.** Courbe caractéristique de séchage (2° transformation)
- Fig. V.8.** Coefficient de diffusion apparent (D) en fonction de (température, vitesse)
- Fig. V.9.** Taux de survie de la flore aérobique mésophile totale en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.10.** Taux de survie des levures et moisissures en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.11.** Indice de luminance de la chair du poisson (L_C) en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.12.** Indice de rouge de la chair du poisson (a_C) en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.13.** Indice d'acide trinitrobenzène sulfonique (TNBS) en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.14.** Solubilité des protéines/Tris en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.15.** Solubilité des protéines/NaCl 0,6M en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.16.** Indice d'acide thiobarbiturique (TBA) en fonction de (température, hygrométrie)
- Fig. V.17.** Indice d'AASC (acetic acid soluble colour) en fonction de (température, vitesse)

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le poisson est une denrée très intéressante du point de vue nutritionnel, il constitue une source importante de protéines, notamment dans les pays en développement. Cependant, sa nature extrêmement périssable, ainsi que le manque de structures pour sa conservation en frais dans les pays tropicaux, induisent des pertes élevées et réduisent la disponibilité du poisson auprès des consommateurs. Des techniques traditionnelles de transformation (salage, séchage, fumage) sont perpétuées depuis des siècles, en vue de stabiliser ce produit fragile, d'assurer sa conservation et d'étaler sa consommation dans le temps.

Au Mali (pays d'Afrique de l'Ouest à activité de pêche continentale), le séchage du poisson est une technologie artisanale couramment utilisée et ancrée dans les traditions locales. Néanmoins, la qualité du poisson séché au Mali n'est ni régulière (dégradations biochimiques et microbiologiques, contaminations par la poussière et les insectes) ni contrôlée (aucun contrôle de la qualité du produit commercialisé n'existe). Ceci cause des difficultés de stockage, une baisse de la valeur nutritionnelle du produit, ainsi que des manques d'approvisionnement des centres urbains et des difficultés d'exportations régionales, et à fortiori internationales.

Le thème du projet, cadre de cette étude, est donc important par son impact sur l'équilibre alimentaire au Mali, et par extension à d'autres pays africains concernés par la pêche (maritime ou continentale). Les objectifs de cette étude visent donc à :

- maîtriser et améliorer la qualité (sanitaire et nutritionnelle) du poisson séché au Mali et assurer son contrôle par des tests facilement applicables sur le terrain ;
- optimiser le procédé de séchage du poisson en fonction de critères de qualité retenus et adaptés au contexte malien.

Ces deux objectifs ont pour trame commune le souci de réduire les pertes existantes en poisson séché au Mali, afin d'assurer une qualité commerciale et un approvisionnement plus important et plus régulier de ce produit sur les marchés maliens.

Cette étude associe deux disciplines complémentaires: le génie des procédés (en termes de séchage) et les sciences de l'aliment (en termes de qualité du produit). De même, les deux volets, recherche et développement, sont interactifs dans l'ensemble des

travaux, tant dans la partie "fondamentale" effectuée en France que dans celle, plus "appliquée", menée au Mali.

Une synthèse bibliographique présente, en trois chapitres, chacun des thèmes de notre étude. Le chapitre I concerne le poisson en tant que matière première alimentaire, il présente les différentes altérations du poisson et les diverses méthodes d'évaluation de sa qualité. Le chapitre II décrit le contexte de pêche spécifique au Mali, en mettant l'accent sur la complexité et la multitude de facteurs et d'acteurs qui y sont impliqués. Quant au chapitre III, il aborde le séchage en tant que procédé de stabilisation, sous deux aspects, l'un théorique et l'autre plus appliqué au contexte africain.

Dans le chapitre IV, est décrite la méthodologie expérimentale suivie dans notre étude, ainsi que la répartition géographique des travaux réalisés (recherche appliquée au Mali et démarche plus fondamentale en France). Les matériels (dispositif de séchage, stratégie expérimentale, appareils de mesure) et les méthodes (protocoles d'analyses de qualité) y sont détaillés.

Les résultats obtenus et leur interprétation font l'objet du chapitre V. L'influence du procédé de séchage sur la qualité du poisson et les limites du modèle choisi à cet effet (résultats de la phase France) sont analysées. De même, les données collectées sur le procédé traditionnel et la qualité standard du poisson séché au Mali, tout en tenant compte des contraintes liées au contexte malien, sont traitées.

Le chapitre VI résume la dernière partie de ce mémoire. Il retrace le bilan des connaissances acquises et leur diffusion sur le terrain. De plus, ce chapitre propose des normes pour la qualité du poisson séché au Mali et des recommandations pour en améliorer la qualité.

La conclusion est une réflexion qui dégage les points forts de notre étude et énonce des perspectives de recherche-développement.

LE POISSON ALIMENT

I. LE POISSON ALIMENT

I.1. GENERALITES

Le poisson est l'un des rares produits alimentaires qui ne peut pas être contrôlé avant capture. De plus, c'est une denrée extrêmement périssable qui se dégrade rapidement après capture, en 12 à 20 heures hors réfrigération, à des températures voisines ou supérieures à 20°C.

La composition chimique de la chair (ou partie consommable du muscle) de poisson frais (non transformé), qu'il s'agisse de poisson marin ou d'eau douce, se rapproche très sensiblement de celle des animaux terrestres. Les principaux éléments constitutifs de la chair de poisson sont : l'eau (65 à 84%), les protéines (15 à 24%) , les lipides (0,1 à 22%), les éléments minéraux (0,8 à 2%), les glucides (essentiellement du glycogène) en faible quantité (0,3% dans le poisson, 3% chez les mollusques) et des vitamines (hydro- et liposolubles) (Sainclivier, 1983 ; TDRI, 1986 a ; Piclet, 1987). La composition chimique du poisson varie d'une espèce à l'autre, et même à l'intérieur d'une même espèce, en fonction du cycle biologique annuel.

La teneur en lipides de la chair de poisson fluctue en fonction de l'espèce (poissons gras, semi-gras, maigres), de l'âge (les plus âgés étant les plus gras), du sexe, de la saison et de la partie musculaire du poisson. Cette teneur est toujours inversement proportionnelle à la teneur en eau. Les poissons sont ainsi classés en maigres (<5%), semi-gras (5 à 8%) et gras (8 à 25%). Notons que ces teneurs sont celles relevées dans le muscle ; elles peuvent être plus ou moins élevées dans d'autres parties du poisson (Piclet, 1987). La forte teneur du poisson en acides gras insaturés lui confère un grand avantage nutritionnel et diététique (diminution du cholestérol sanguin et incidence sur les maladies cardio vasculaires) (Lampila, 1987 ; Piclet, 1987; Simopoulos, 1991).

Les matières azotées du poisson sont essentiellement constituées de protéines, mais contiennent également des quantités non négligeables d'azote non protéique (NPN). Le NPN comprend des acides aminés libres (lysine, histidine) ; des dipeptides (carnosine, ansérine); des dérivés aminés (taurine, urée) ; de la créatine ; de la créatinine ; des bases volatiles dont l'ammoniac , l'oxyde de triméthylamine TMAO (essentiellement dans

les poissons marins) ; des acides nucléiques et des nucléotides (Sainclivier, 1983 ; Piclet, 1987).

Notons que les teneurs en protéines trouvées dans la littérature doivent être traitées avec prudence, étant donné qu'une confusion est souvent faite entre teneur en azote total ("crude protein" en terminologie anglo-saxonne) et teneur en protéines vraies. En effet, la teneur non négligeable du poisson en NPN peut fausser les pourcentages si l'on n'en tient pas compte. Par ailleurs, le facteur 6,25 de conversion entre azote total et azote protéique est controversé, étant donné qu'il est basé sur une teneur moyenne de 16% d'azote dans la protéine. D'autres facteurs (5,7 ou 5,82) sont proposés par Sosulski et Imăfidon (1990). Une autre source d'erreur dans la littérature est le manque de précision concernant la localisation de l'échantillon analysé dans le poisson. La plupart des chiffres se réfère à la chair ou au muscle alors que la peau contient aussi des matières azotées (cette remarque est également valable pour les lipides du poisson). De plus, il est rarement précisé si les pourcentages donnés sont rapportés à la matière fraîche ou sèche de l'échantillon analysé. Sainclivier (1983) souligne que de nombreuses publications citent des valeurs allant de 30 à 92 grammes de protéines pour 100g de matière sèche, et que ces chiffres sont sujets à caution en raison d'un échantillonnage souvent insuffisant ou non représentatif, et de la non prise en compte de l'histoire du poisson (sexe, âge, saison, lieux de pêche et alimentation).

Selon leur localisation dans le poisson, les protéines peuvent être classées en (Sainclivier, 1983 ; Piclet, 1987) :

- protéines extracellulaires dites aussi protéines du stroma ou protéines "de soutien" ou protéines du tissu conjonctif. Elles sont insolubles dans les solutions salines. Ce sont le collagène, l'élastine, la kératine et la connectine.

- protéines intracellulaires, subdivisées en :

- fraction myogène, hydrosoluble, extractible en solution de faible force ionique. Cette fraction comprend les protéines sarcoplasmiques (myoglobine, albumines, globulines, nucléoprotéines) ;

- fraction myofibrillaire peu soluble, elle comprend les protéines dites "de structure" (myosine, actine, actomyosine) et les protéines "régulatrices"

(tropomyosine, troponines, actinines, protéines de la strie M, protéines C). Les protéines myofibrillaires sont solubles dans des solutions à force ionique élevée.

Le poisson est pauvre en glucides ; le glycogène est le sucre essentiel du muscle du poisson. Du ribose libre peut apparaître dans les muscles de certains poissons.

I.2. CAUSES D'ALTERATION DU POISSON

I.2.1. Evolution du muscle après la mort

La chair d'un poisson vivant et sain est stérile. Immédiatement après la mort du poisson, les phénomènes physiologiques observés du vivant de l'animal sont modifiés. On distingue trois phases dans l'évolution du muscle après la mort :

- la phase "*pré-rigor* " : caractérisée par un chevauchement des protéines myofibrillaires (actine et myosine). Ce glissement est favorisé par l'énergie apportée par le catabolisme de l'adénosine triphosphate (ATP). Le pH est voisin de 7, l'arrêt de la circulation sanguine prive le muscle d'oxygène, provoque une chute du potentiel rédox et crée un milieu propice à l'anaérobiose. Cette anaérobiose favorise la transformation du glycogène en acide lactique, le muscle est encore mou ;

- la phase de "rigidité cadavérique" ou "*rigor mortis* " : définie par le durcissement du muscle et la perte de son extensibilité. L'épuisement de l'ATP disponible favorise les liaisons entre actine et myosine, avec formation irréversible d'actomyosine. Par ailleurs, la formation d'acide lactique abaisse le pH jusqu'à une valeur limite de 6, appelée pH ultime et en deçà de laquelle aucun abaissement de pH n'est possible, en raison du pouvoir tampon des protéines du muscle. La durée et l'intensité de la "*rigor mortis* " dépendent de l'espèce de poisson, de son état au moment de la capture (fatigue, stress) et de la température. La "*rigor mortis* " induit une diminution de l'extractibilité des protéines et une baisse de leur capacité de rétention d'eau.

- la phase "*post-rigor* " ou phase de "résolution de la *rigor mortis* " : le muscle s'attendrit progressivement et redevient souple, les protéines sarcoplasmiques sont partiellement hydrolysées, le pH remonte vers 7. Les mécanismes de cette phase ne sont

pas très bien connus, ils sembleraient dus à des processus autolytiques (faibles au départ), accompagnés d'une baisse de la solubilité des protéines et d'une fragilisation des cellules.

I.2.2. Dégradation des matières azotées par autolyse

Parallèlement à la "résolution de la *rigor mortis*", des processus autolytiques prennent place progressivement dans la chair du poisson et peuvent entraîner sa dégradation complète. Cette autolyse est due à des enzymes endogènes, protéases tissulaires (cathepsines) et protéases digestives qui dissocient les protéines en de petites molécules et provoquent leur interaction avec d'autres constituants. Cette autolyse conduit à la formation d'acides aminés libres et donc à l'augmentation de la teneur en azote non protéique (Sainclivier, 1983). Toutes ces modifications créent un milieu encore plus favorable au développement bactérien.

I.2.3. Dégradation par activité microbienne

La microbiologie du milieu aquatique conditionne de façon notoire celle des poissons, mollusques et crustacés. Normalement, la chair des poissons ou des crustacés est stérile, les régions contaminées sont les branchies, le mucus qui recouvre la peau et le tube digestif.

La flore de surface des poissons et crustacés d'eau de mer est essentiellement constituée par des bactéries appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Aeromonas*, *Flavobacterium*, *Serratia*, *Sarcina*, *Proteus*, *Vibrio*, *Bacillus*, *Corynebacterium*. Elle est plus ou moins psychrophile selon la température de l'eau. En eau douce, on rencontre en outre les germes *Lactobacillus*, *Alcaligenes*, *Streptococcus*, *Brevibacterium*.

La flore intestinale est surtout constituée de bactéries appartenant aux genres *Achromobacter*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Escherichia*, *Clostridium*, *Vibrio*.

Des levures peuvent être isolées du poisson frais (*Rhodotorula*, *Candida* et *Torulopsis*). Le poisson transformé (séché, fumé) et stocké peut être contaminé par des moisissures (*Aspergillus*, *Penicillium*) (Motohiro, 1988).

Des poissons pêchés en eau douce chaude peuvent présenter des germes pathogènes tels que *Salmonella* et *Clostridium* (Guiraud et Galzy, 1980 ; Sainclivier, 1983), ainsi que des parasites (trématodes, nématodes comme l'anisakis). Les poissons d'eau chaude présentent un plus grand pourcentage de mésophiles (*Bacillus*, *Corynéformes*, *Micrococcus*) et peu de psychrophiles (*Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*).

A la mort du poisson et suite aux phénomènes d'autolyse, les bactéries présentes à la surface et dans les viscères du poisson envahissent la chair et s'y multiplient rapidement. Ainsi, *Alteromonas putrefaciens* réduit l'oxyde de triméthylamine TMAO, grâce à une N-oxyde réductase et produit de la triméthylamine TMA. La dégradation de TMA (par une TMA oxydase) libère de la diméthylamine DMA et du formol. Notons que le TMAO se trouve surtout dans le poisson de mer, et peu ou pas dans le poisson d'eau douce. L'ammoniac, déjà apparu lors de l'autolyse, augmente rapidement sous l'effet de l'activité bactérienne.

Les enzymes bactériennes peuvent aussi agir sur les acides aminés libres avec formation de composés aminés non volatils tels que la putrescine (à partir de l'ornithine), la spermidine et la spermine (successivement à partir de l'acide glutamique), l'agmatine (à partir de l'arginine), la cadavérine (à partir de la lysine) et l'histamine (à partir de l'histidine) (Sainclivier, 1983).

Les bactéries dégradent également les acides aminés soufrés (cystéine, cystine et méthionine) en donnant du sulfure d'hydrogène et des sulfures volatils du type méthylmercaptan et diméthylsulfure.

Enfin, la prolifération bactérienne ramollit la chair du poisson ; elle provoque la formation d'une couche visqueuse épaisse sur la peau et les ouïes, et engendre différentes odeurs (aigre, ammoniacale, putride, piquante, terreuse et de type sulfhydryle) (TDRI, 1986 a). Notons que la première odeur perçue est due à l'autolyse, s'y ajoutent ensuite les odeurs dues aux activités bactériennes.

De mauvaises conditions d'entreposage peuvent entraîner le développement de moisissures sur du poisson déshydraté (séché, fumé). Ces moisissures n'influent pas

directement sur la texture de la chair, mais leur présence en affecte la flaveur et l'apparence. Elles peuvent également sécréter certaines mycotoxines.

I.2.4. Dégradation des matières grasses

L'altération des matières grasses du poisson est due à :

- l'hydrolyse des glycérides par les lipases tissulaires du poisson. Cette hydrolyse, appelée lipolyse, semble le plus souvent indépendante de l'altération bactérienne. La lipolyse conduit à la formation d'acides gras libres dont la présence accélère le deuxième phénomène de dégradation, à savoir :

- l'oxydation (ou rancissement) par action de l'oxygène sur ces acides gras insaturés. L'oxydation se déroule en trois phases :

- une phase d'initiation avec formation de radicaux libres ;
- une phase de propagation avec formation et accumulation d'hydroperoxydes ;
- une phase d'arrêt avec formation de composés tels qu'aldéhydes, cétones, époxydes, acides volatils et alcools. Ces composés sont responsables des odeurs et flaveurs rances caractéristiques des graisses altérées.

Le fort degré d'insaturation des lipides et acides gras du poisson (entre 65 et 80%) (Piclet, 1987) favorise l'oxydation de ces matières grasses (Woolfe, 1975). De plus, cette oxydation dépend de la température (elle est accélérée par une élévation de température mais reste assez rapide à -20°C) et de la lumière (la formation des peroxydes et leur dégradation sont accélérées par la lumière). Notons enfin que l'oxydation des lipides passe par un maximum à de faibles activités de l'eau.

La congélation, la pasteurisation (combinée à un stockage au froid), ainsi qu'une forte concentration en sel, retardent la lipolyse (Kaitaranta, 1982). L'oxydation des lipides constitue souvent la réaction de détérioration limitante pour la conservation du poisson, en particulier lorsque le développement microbien est empêché par la congélation, la stérilisation ou la déshydratation. Ainsi, les poissons gras séchés rancissent rapidement au cours du stockage (Cheftel *et al.*, 1986 ; Regenstein et Regenstein, 1991).

1.2.5. Dégradation des nucléotides

La dégradation *post mortem* du glycogène consomme rapidement l'ATP, principal nucléotide du muscle du poisson vivant. Cette dégradation suit la séquence :

ATP → ADP → AMP → IMP → Inosine → Hypoxanthine + Ribose

(avec ADP = adénosine diphosphate ; AMP = adénosine monophosphate ; IMP = inosine monophosphate). Cette série de transformations commence sous l'effet de l'activité autolytique (enzymes endogènes) et se poursuit avec l'action bactérienne.

Le monophosphate d'inosine IMP contribue à la flaveur appréciée du poisson frais alors que l'hypoxanthine a un goût amer indésirable (Jones *et al.* , 1964 ; Burt, 1977 ; TDRI, 1986 a ; Regenstein et Regenstein, 1991).

1.2.6. Dégradation des glucides

Le poisson est pauvre en glucides. Suite à l'anaérobiose qui s'installe après la mort du poisson, le glycogène (glucide principal du muscle) se dégrade en glucose puis en acide lactique. Dans les mollusques, le produit final de la glycolyse est l'acide pyruvique. L'acide succinique se retrouve dans les muscles de poissons et coquillages, et à plus faible teneur, certains acides organiques tels que les acides fumarique, citrique, malique et acétique (Sainclivier, 1983).

En dehors du glucose libre issu de la glycogénolyse, du glucose est originellement présent, en petites quantités, dans les muscles de poisson. De plus, le ribose et le ribose-5-phosphate (termes ultimes de la dégradation de l'ATP) participent à des réactions de "brunissement non enzymatique" avec production de composés responsables de flaveurs du poisson.

1.2.7. Altérations dues aux traitements technologiques

Outre les altérations précédemment décrites (sur poisson non transformé), les traitements technologiques peuvent induire d'autres types d'altérations :

- la congélation et le marinage entraînent une dénaturation des protéines du poisson par changement de leur conformation, ce qui affecte la texture ;
- les protéines peuvent être altérées par les traitements thermiques (clivages peptidiques) ou lors du marinage (protéolyses enzymatiques). Ceci entraîne l'apparition de petits peptides qui changent le profil gustatif (aigreur, amertume) ;
- l'interaction des protéines avec les produits d'oxydation des lipides (radicaux libres, cétones, aldéhydes) conduit à la formation de complexes insolubles. Ceci modifie la flaveur propre (Khayat et Schwall, 1983 ; Sainclivier, 1985), entraîne une diminution de la digestibilité de ces protéines (Opstvedt, 1988) et une dureté de la texture (Lampila, 1987);
- le groupe ϵ -NH₂ de la lysine peut réagir avec les fonctions amide d'autres acides aminés tels que l'asparagine et la glutamine (Bjarnasson et Carpenter, 1970 ; Hurrell *et al.* , 1976 ; Afolabi *et al.* , 1984 ; Opstvedt, 1988). En outre, ce groupe ϵ -NH₂ est très réactif vis-à-vis de la déhydroalanine (DHA)(formée dans les protéines ayant subi des traitements thermiques et/ou alcalins) pour donner de la lysino alanine (LAL) (Sternberg *et al.* , 1975). Toutes ces réactions sont responsables de pertes nettes de lysine ;
- modification de la couleur par brunissement non enzymatique ou réactions de Maillard. Ces réactions proviennent de l'interaction des protéines et acides aminés, notamment la lysine (Afolabi *et al.* , 1984) avec le ribose (produit par dégradation des nucléotides) ou avec les aldéhydes et cétones (provenant de l'oxydation des lipides), donnant ainsi des colorations allant du jaune au brun (Sainclivier, 1985). L'apparition de telles couleurs peut être considérée comme favorable dans le poisson séché ou fumé à chaud ;
- destruction des vitamines par les traitements thermiques. Les vitamines liposolubles sont altérées par leur interaction avec les radicaux libres issus de l'oxydation des lipides. Parmi les vitamines hydrosolubles, les vitamines B sont faiblement sensibles (à divers degrés) aux traitements thermiques, sauf la thiamine (vitamine B₁), sensible à la chaleur surtout en milieu non acide. Des pertes de 0 à 30% en pyridoxine (vitamine B₆) et de 20 à 30% en acide panthoténique sont notées dans le poisson séché. Dans les conserves de poisson, l'acide panthoténique est détruit de 30 à 40% (Sainclivier, 1985 ; Sainclivier, 1988).

Toutes ces modifications peuvent être bénéfiques (apparition de couleurs et de saveurs agréables, amélioration de la digestibilité), mais elles peuvent également être non désirables (diminution de l'extractibilité et de la solubilité des protéines, abaissement de leur capacité de rétention d'eau et de leur pouvoir d'émulsification des matières grasses, réduction de leur aptitude à former des gels, affaiblissement d'autres propriétés fonctionnelles et sensorielles et diminution de leur valeur biologique (Sikorski, 1980).

1.3. EVALUATION DE LA QUALITE DU POISSON

En regard de toutes les dégradations possibles du poisson après capture (cf. 1.2.), l'évaluation et le contrôle de la qualité de ce produit alimentaire s'imposent. Différents moyens permettent d'estimer cette qualité. Notons que la plupart des méthodes de contrôle de la qualité a été développée pour le poisson "frais" (après capture) ; certaines de ces méthodes ont ensuite été adaptées au poisson transformé.

1.3.1. Qualité marchande

L'achat de poisson est conditionné par un certain profil global regroupant différents critères. Pour le poisson frais, un examen applicable dans les criées et dans les ports de pêche, consiste à observer la peau (mucus, pigmentation), les yeux (teinte et affaissement), la rigidité de la chair (abdominale et dorsale), l'odeur (légère et fraîche). Pour le poisson frais présenté en tranches ou en filets, l'examen porte sur les critères déjà cités, sur d'éventuelles décolorations ou taches de sang, ainsi que sur un examen après cuisson des filets (odeur et saveur). Pour les crustacés et les mollusques, sont également examinés les muscles, les membranes et les coquilles (Sainclivier, 1983).

Différents barèmes de cotation existent. Le barème de la CEE comporte une notation allant de 0 (altéré) à 3 (frais) et juge directement le "degré de fraîcheur" (df). Il permet ainsi de classer les poissons frais en : catégorie extra ($df \geq 2,7$) ; catégorie A ($2 \leq df \leq 2,7$) et catégorie B ($1 \leq df \leq 2$). Ce barème comprend également un calibrage basé sur le poids individuel ou le nombre de pièces au kilogramme (Sainclivier, 1983). Dans les pays tropicaux, ces barèmes de qualité sont inexistants.

Pour le poisson transformé, des critères spécifiques de qualité marchande s'ajoutent aux précédents. Ainsi, lors de l'achat du produit, les critères suivants interviennent (Emberley et Mills, 1987) :

- le conditionnement (emballage, étiquetage) pour les conserves et les nouveaux produits élaborés à base de poisson,
- l'exsudation de jus et le délitage : sur poisson congelé,
- la présence d'arêtes, de caillots de sang ou de décolorations : sur poissons et crustacés congelés ou réfrigérés (Bremner, 1988),
- la présence de particules étrangères (sable, pierres), le degré d'infestation par les insectes, le degré d'émiettement et de fragmentation : sur poisson transformé en régions tropicales.

1.3.2. Qualité sensorielle

L'analyse sensorielle permet une connaissance plus poussée des réactions des consommateurs. Ceci met en jeu l'examen de critères organoleptiques du produit, tels que l'aspect, la couleur, l'odeur, la flaveur (saveur, goût, arôme) et la texture.

Bien que l'analyse sensorielle fasse appel aux sens humains et qu'elle puisse être sujette à la fatigue ou aux erreurs, elle reste cependant irremplaçable comme estimation subjective de la qualité. Par conséquent, toute analyse sensorielle doit être menée en fonction des habitudes alimentaires, de l'acceptation par le consommateur et du marché potentiel auquel s'adresse le produit testé.

Différentes méthodes sont utilisées en analyse sensorielle : méthodes de classement de produits ; tests de différence (comparaisons par paires, test duo-trio, test triangulaire) ; analyse quantitative descriptive du profil sensoriel (Borderias *et al.*, 1983 ; Afolabi *et al.*, 1984 ; Lee et Toledo, 1984 ; Cheftel *et al.*, 1986 ; TDRI, 1986 b ; Sawyer, 1987).

1.3.3. Qualité sanitaire

Évaluée par des analyses microbiologiques, elle consiste à dénombrer les principaux germes pouvant contaminer le poisson (cf. 1.2.3.). Ces dénombrements concernent notamment la flore aérobie mésophile totale, les coliformes totaux et fécaux, les streptocoques fécaux, les staphylocoques, les anaérobies sulfito-réducteurs, les salmonelles, les levures et moisissures.

Notons que de nouvelles méthodes d'analyse microbiologique, dites "rapides" ou "en kits" sont de plus en plus utilisées, afin de pallier la lourdeur et l'exigence des méthodes classiques. Parmi ces méthodes, les tests suivants : Pétrifilm, Millipore, Isogrid, Redigel, Spiral, Microtest, Tecra, Biocontrol 1-2, Spectate, Oxoïd peuvent être signalés (Fung *et al.* , 1987 ; Holbrook *et al.* , 1989 ; Humbert *et al.* , 1989). La qualité microbiologique du poisson peut également être évaluée par des mesures de conductance ou d'impédance électrique (Gibson *et al.* , 1984 ; Ogden, 1986 ; Van Spreekens et Stekelenburg, 1986 ; Huisin't Veld *et al.* , 1988) ou par la mesure du temps de réduction d'un colorant (résazurine, bleu de méthylène) (Mallikarjuna Reddy *et al.* , 1990) ou encore par le suivi (par luminescence ou fluorescence) de la diminution de l'ATP (Huisin't Veld *et al.* , 1988).

La recherche de parasites, tels que l'anisakis dans le poisson de mer frais (par mesure du degré de transmission d'une lumière blanche incidente par le filet de poisson analysé, le parasite y apparaissant comme une tache opaque), ainsi que l'évaluation du degré d'infestation par les insectes (sur poisson transformé en régions tropicales) sont également des moyens d'estimer la qualité hygiénique du poisson.

Un autre aspect de la qualité sanitaire du poisson concerne sa contamination par des éléments chimiques (métaux et plus particulièrement le mercure, pesticides, engrais, détergents et hydrocarbures) polluant les eaux de pêche. Des études ont montré que la pollution chimique et la contamination bactériologique des eaux étaient corrélées, surtout dans des lieux fermés. Plusieurs conventions ont été établies par les Nations Unies afin de surveiller les pollutions chimiques des eaux de pêche au niveau mondial.

1.3.4. Qualité alimentaire

Elle est évaluée au moyen d'analyses chimiques et/ou biochimiques basées sur des critères de perte de fraîcheur et de qualité. Ces analyses sont basées sur le dosage de composés formés suite à l'évolution et à la dégradation des différents constituants du poisson (cf. 1.2). Nous distinguons ainsi (Sainclivier, 1983 ; TDRI, 1986 b) :

- les indices de dégradation des matières azotées :

- indices du degré d'autolyse tels que les dosages de l'azote basique volatil total (ABVT), de la triméthylamine (TMA), de la diméthylamine (DMA) et des amines non volatiles;

- indices de protéolyse et d'altération des protéines comme le test à l'acide trinitrobenzène sulfonique (TNBS), le dosage des acides aminés libres, la détermination de la digestibilité *in vitro* (McKellar, 1981 ; Knipfel *et al.* , 1970) ;

- d'autres mesures telles que la capacité de rétention d'eau et le taux de solubilité des protéines sont des indices de la fonctionnalité des protéines (Cheftel *et al.* , 1986) ;

- les mesures de dégradation des matières lipidiques comme les indices d'acide, de peroxyde, d'iode, le test d'acide thiobarbiturique (TBA), la mesure de l'absorbance spécifique en UV, le test à l'anisidine (Pearson, 1976 ; Siu et Draper, 1978 ; Balogun, 1988);

- l'évaluation du degré du catabolisme des nucléotides : dosages de l'hypoxanthine (Hx), évaluation de l'indice K :

$$(K = \frac{\text{Inosine (I)} + \text{Hx}}{\text{ATP} + \text{ADP} + \text{AMP} + \text{IMP} + \text{I} + \text{Hx}} \times 100)$$
 par des méthodes colorimétriques (Jahns *et al.* , 1976), polarographiques (Luong *et al.* , 1989, 1991), enzymatiques (Isono, 1990 ; Luong *et al.* , 1992) ou par chromatographie liquide haute pression (Ryder, 1985) ;

- dosage de composés volatils tels que composés carbonylés, sulfures volatils et substances responsables d'arômes spécifiques (Josephson *et al.* , 1987 ; Lindsay *et al.* , 1987).

La qualité alimentaire est également évaluée par des tests biologiques (digestibilité protéique apparente, utilisation protéique nette, digestibilité protéique *in vivo* , valeur biologique, coefficient d'efficacité protéique, teneur en acides gras ω -3 insaturés (Acton et Rudd, 1987 ; Lampila, 1987; Opstvedt, 1988 ; Debry et Pelletier, 1991 ; Dillon, 1992).

Les différents tests cités plus haut mesurent l'évolution biochimique des constituants du poisson. Ils sont utilisés comme critères de perte de qualité mais rares sont ceux qui sont parfaitement corrélés avec l'examen organoleptique. Par ailleurs, certains tests chimiques ne sont réellement significatifs qu'en fin de dégradation (produit complètement avarié) alors qu'un début d'altération devrait être décelé rapidement. Notons que le manque de fiabilité de certains tests chimiques est souvent dû à une variabilité liée à l'histoire du produit avant analyse (espèce, sexe, alimentation, lieu et conditions de capture, saison et environnement, température et durée de conservation à bord et à terre), d'où la nécessité de connaître ces facteurs. Enfin, l'utilisation d'une panoplie de tests diversifiés est préférable à un test isolé pour la recherche d'une appréciation objective de la détérioration du poisson et d'une meilleure corrélation avec l'analyse sensorielle qui, bien que subjective, reste très importante (Sainclivier, 1983 ; TDRI, 1986 a).

1.3.5. Caractéristiques physico-chimiques

Elles sont le plus souvent déterminées par des méthodes physiques et/ou instrumentales. Elles regroupent les mesures suivantes : pH, activité de l'eau (a_w), couleur, texture (par pénétrométrie, exsudation, cisaillement, coupure, ...), degré de contractilité des muscles, propriétés diélectriques du muscle et de la peau (conductance, impédance) (Sainclivier, 1983 ; Gibson *et al.* , 1984 ; TDRI, 1986 b).

LE CONTEXTE DE PECHE AU MALI

II. LE CONTEXTE DE PECHE AU MALI

Le Mali est un pays d'Afrique de l'Ouest à activité de pêche continentale, de par l'existence du fleuve Niger. Ce fleuve prend sa source en Guinée, traverse le Mali puis le Niger et le Nigéria. Au niveau du Mali, le fleuve, en se ramifiant et en recevant les eaux de son affluent, le Bani, délimite un delta intérieur communément appelé "delta central du Niger" où l'activité de pêche est très intense. Le delta du Niger est une immense plaine alimentée principalement par les eaux de pluie et qui comprend plusieurs biotopes aquatiques (bras du fleuve, plaines inondées, mares, lacs, canaux d'irrigation alimentés par les eaux de barrages) (fig. II.1).

Le régime hydrologique du fleuve Niger est caractérisé par quatre phases principales : crue, hautes eaux, décrue et étiage. La filière "pêche" au Mali est un objet d'étude relativement complexe, suite à l'hétérogénéité des biotopes (cités plus haut) du fleuve et à ses différents régimes hydrologiques. Ceci induit une grande variabilité intra-annuelle (saisonnière) et inter-annuelle des peuplements ichtyologiques. Les migrations observées chez les poissons sont liées aux déplacements de l'eau et à la recherche de zones favorables pour leur nutrition et leur reproduction (Laé, 1988).

Cette variabilité du milieu et de la ressource entraîne deux types de comportement chez les pêcheurs :

- d'une part, une stratégie de migration liée à la poursuite du poisson (qui se déplace en fonction de l'eau). Ceci entraîne une extrême diffusion des points de débarquement du poisson (campements temporaires) et une spécialisation saisonnière (campements permanents) ;
- d'autre part, une grande diversité des pratiques et engins de pêche ainsi que l'utilisation d'une panoplie large permettant d'exploiter les différents biotopes et espèces suivant la saison. Les principaux engins de pêche utilisés au Mali sont : la ligne, le filet à senne, le filet dormant, le filet maillant dérivant, l'épervier et le panier. La pirogue sert aux déplacements dans le fleuve ou dans ses bras.

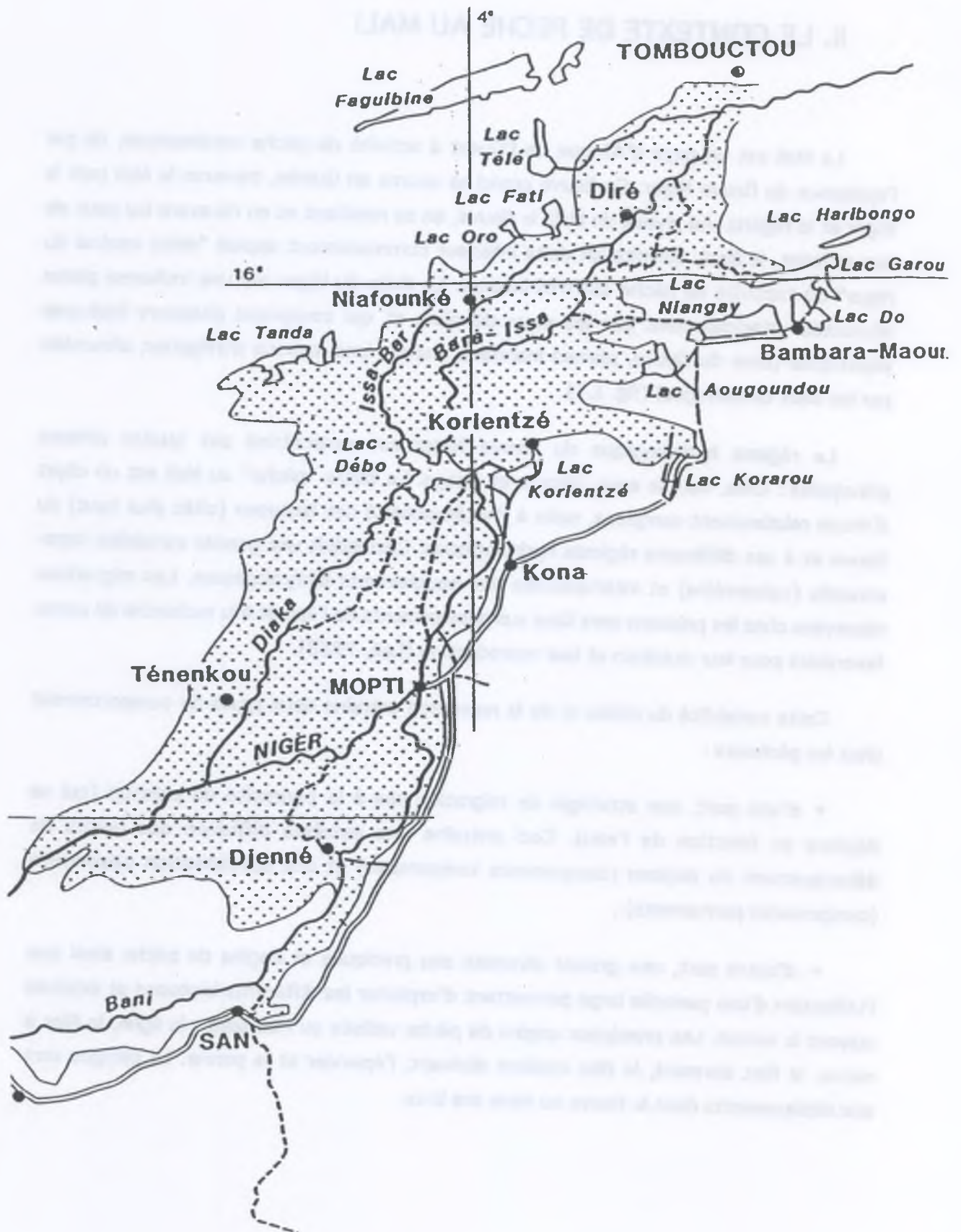


Figure II.1. Le delta central du fleuve Niger (les zones d'inondation sont représentées en pointillé. In : Laé, 1988

Ajoutons à cela le caractère composite des populations de pêcheurs qui se répartissent souvent en professionnels (ethnies Bozo et Somono), saisonniers ou occasionnels, présentant des niveaux d'activité variables et des traditions de pêche différentes (ethnies Bambara, Sonraï, Marka et Peul) (Thémelin et Gerbe, 1987 ; Laé, 1991).

L'activité de pêche est donc largement dépendante du niveau d'eau dans le fleuve Niger. Quensièrè (1991) distingue les saisons de pêche suivantes :

- Juin-Septembre: activité nulle de pêche en raison de la saison des pluies et de la crue du fleuve;
- Octobre-Décembre: début de la décrue du fleuve, la pêche reprend progressivement; cette saison est caractérisée par un climat froid ;
- Janvier-Mai: décrue progressive puis basses eaux, l'activité halieutique est très intense. Les pêcheurs professionnels et occasionnels exploitent au mieux les poissons qui abandonnent les zones inondées pour retourner au fleuve. Notons que cette période se subdivise en deux; de Janvier à Mars où la pêche est plus intense dans le fleuve et moins dans les zones inondées (afin de permettre aux poissons de se développer), puis de Mars à Mai où c'est la "pêche collective", à la fois dans le fleuve et dans les eaux de retenue (poissons isolés dans les mares ou les lacs) ;
- Mai-Juin: saison d'étiage, les activités de pêche se ralentissent et se limitent à la capture de poissons concentrés dans les petites mares. Les pêcheurs migrants retournent dans leurs villages.

Les sécheresses successives au Mali (1972-1973 et 1980) ont provoqué la disparition de certains lacs semi-permanents du delta du Niger; ceci a contraint bon nombre de pêcheurs à pratiquer l'agriculture (cultures de subsistance). Notons que le secteur de la pêche au Mali subit depuis quelques années une récession importante et une baisse des captures. Plusieurs facteurs sont en cause: sécheresses déjà évoquées; désorganisation de la gestion coutumière de la pêche; altération du rythme des crues par des barrages hydro-électriques ou hydro-agricoles (Markala, Sélingué) et par conséquent, réduction des zones d'accès aux poissons; utilisation des eaux de barrages pour des besoins d'irrigation; utilisation croissante des zones de frai à des fins agricoles (Quensièrè, 1991).

Seuls les pêcheurs proches des centres urbains peuvent vendre du poisson frais; quant aux autres, ils vendent surtout du poisson transformé (séché, fumé, braisé, grillé). En fait, ils établissent des campements temporaires où ils s'installent avec leurs familles. L'activité de pêche devient ainsi familiale. Les hommes capturent le poisson, les femmes le transforment et assurent sa vente, soit directement sur de petits marchés, soit à des intermédiaires. Cette filière de la pêche (capture et transformation), essentiellement artisanale au Mali, emploie de 100.000 à 150.000 personnes (pêcheurs, transformatrices, revendeuses, intermédiaires, main d'oeuvre occasionnelle, transporteurs).

· Bien que le Mali soit un pays enclavé, le poisson représente un élément important de son régime alimentaire. La consommation moyenne (par personne par an) en poisson frais est de 2,2 kg au niveau national, et celle de poisson transformé est de 6,8 kg (TDRI & CEASM, 1986). D'après les statistiques de 1986, le Mali exportait de 10 à 20% de son poisson transformé (principalement en Côte d'Ivoire, au Ghana et au Burkina Faso). Actuellement, les prises de poisson ont diminué et le Ghana devient auto-suffisant ; ces chiffres ne sont pas encore réactualisés par des statistiques récentes, suite aux problèmes politiques survenus dernièrement dans le pays.

**LE SECHAGE,
PROCEDE DE STABILISATION**

III. LE SECHAGE, PROCEDE DE STABILISATION

III.1. THEORIE DU SECHAGE

Le séchage des produits solides par l'air chaud est une opération unitaire très utilisée dans les industries agricoles et alimentaires (fruits, légumes, produits carnés). Il vise à prolonger la durée de conservation du produit alimentaire et à ralentir ses dégradations biologiques ; il abaisse son activité en eau et réduit les activités enzymatiques et microbiennes (Sainclivier, 1985).

Quand un produit est mis en contact avec de l'air chaud, il se produit un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de la différence de température existant entre les deux. Simultanément, la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air et la surface du produit détermine un transfert d'eau de celui-ci vers l'air. Ce transfert de matière se fait sous forme de vapeur d'eau ; ceci implique donc qu'une partie de la chaleur arrivant au produit est employée pour vaporiser l'eau. Ce type de séchage, appelé séchage par entraînement ou par évaporation (par opposition au séchage par ébullition) sera traité ici. Notons que les transferts externes ont lieu dans une couche limite peu épaisse située autour du produit (fig. III.1.)

L'évolution de ces transferts simultanés de chaleur et de matière au cours de l'opération de séchage conduit à diviser schématiquement celle-ci en trois phases au cours de la cinétique de séchage (évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps) et sur l'allure de séchage (courbe obtenue par dérivation de la précédente par rapport au temps). Cette allure de séchage représente la vitesse de séchage en fonction du temps ou de la teneur en eau (fig. III.2.). Ces trois phases sont les suivantes (Bimbenet, 1978 ; Daudin, 1983) :

- *phase 0 ou période de mise en régime* : au début du séchage, le produit est généralement plus froid que l'air, la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit est faible ; par conséquent, le transfert de matière et la vitesse de séchage le sont aussi. La chaleur arrivant en excès entraîne une élévation de la température du produit, et donc une augmentation progressive de la vitesse de séchage. Ce phénomène continue jusqu'à ce que le transfert de chaleur compense exactement le transfert de matière. Cette phase peut être d'autant plus courte que la forme du produit est mince ou que l'écart de température entre le produit et l'air est faible.

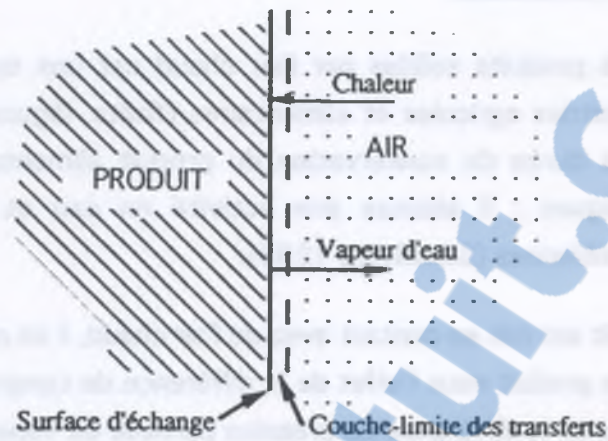


Figure III.1. Transferts de matière et de chaleur dans la couche limite.
In : Desmorieux, 1992

- *phase 1 ou période de séchage à allure constante* : lors de cette phase, la quantité d'eau disponible dans le produit est très grande et l'eau s'évapore à la surface du produit comme de l'eau libre. La pression de vapeur d'eau à la surface est constante et égale à la pression de vapeur d'eau pure à la température du produit. La surface du produit est à la température humide du fait que les transferts de matière et de chaleur se compensent. Cette période (caractérisée par une vitesse de séchage constante) se poursuit tant que la migration de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit suffit à compenser l'évaporation de l'eau en surface. Cette phase est essentiellement régie par un coefficient de transfert externe dépendant des conditions aérauliques.

- *phase 2 ou période de séchage à allure décroissante* : dès que l'eau fait défaut en surface, la vitesse de séchage diminue ; elle est alors imposée par celle des transferts internes. Ce phénomène a été illustré par la présence simultanée de zones humides et d'autres "sèches" à la surface. La vitesse de séchage commence à diminuer avec l'apparition de ces îlots "secs". Ces hétérogénéités internes ont une grande influence sur les transferts de masse à l'interface air/produit (Prat, 1991), elles sont essentiellement dues à la structure des produits biologiques (assemblage de cellules contenant l'eau sous forme de solution), ainsi qu'à leur caractère hygroscopique et déformable (Daudin, 1983). Ce ralentissement de la vitesse de séchage a également été expliqué en termes de "front de vaporisation" qui s'enfonce progressivement dans le produit, rendant plus long le parcours de l'eau vers la surface (Bimbenet, 1978). Ajoutons à cela les effets des corps solubles qui, en phase 1, accompagnent l'eau vers la surface et y sont déposés après évaporation de l'eau. Ce phénomène, appelé croûtage de surface, s'explique ainsi par l'imperméabilisation de la surface du fait de son assèchement et de l'accumulation de solutés.

Au point de transition entre les périodes 1 et 2, la teneur en eau du produit est appelée teneur en eau "critique" " X_{Cr} ". Le transfert de chaleur n'étant plus compensé, la température du produit augmente et tend asymptotiquement vers la température de l'air. A ce moment-là, le facteur limitant est la migration interne de l'eau ; la pression partielle de l'eau dans le produit est en équilibre avec celle de l'air ; la vitesse de séchage est nulle, elle est supposée traduire le transfert diffusif de l'eau dans le domaine hygroscopique.

La phase 2 de séchage à allure décroissante se divise parfois en deux ou trois périodes, avec inflexions successives de la pente de la courbe. Ceci concerne surtout des produits tels que la laine ou le bois. Pour les produits agricoles et alimentaires, il est difficile de déceler des cassures bien nettes sur les courbes expérimentales de séchage.

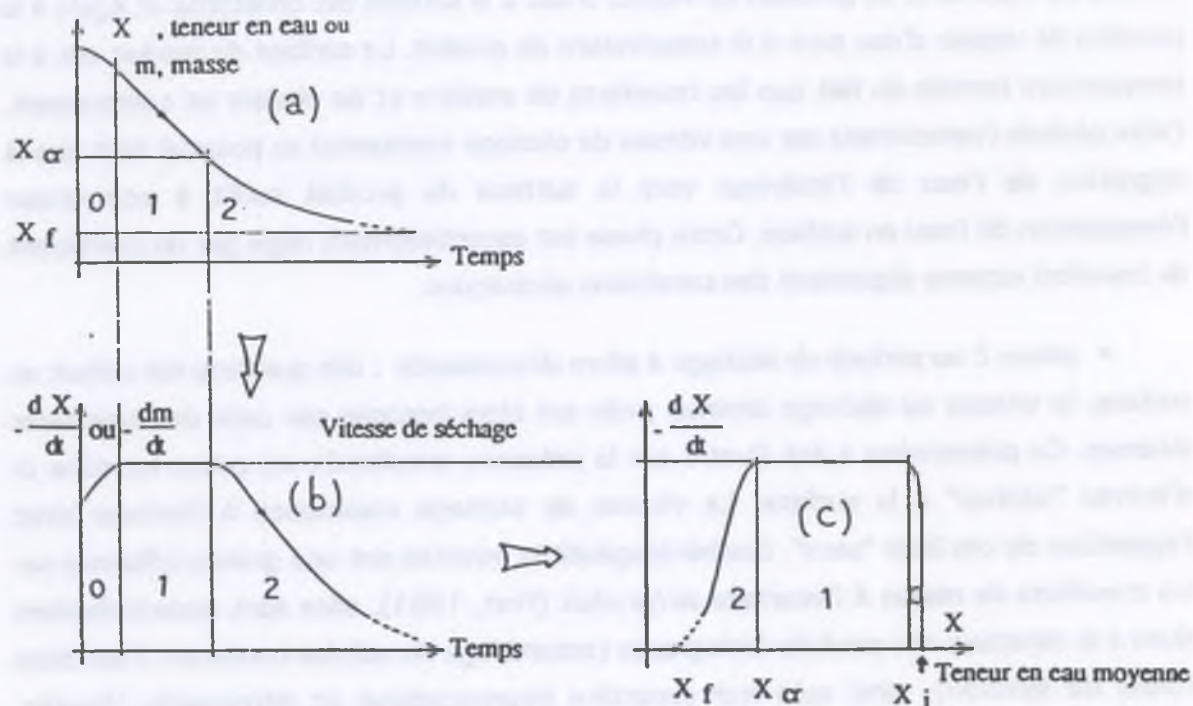


Figure III.2. Représentation des cinétiques de séchage. In : Bimbenet, 1978

Phase 0 : mise en température.

Phase 1 : vitesse de séchage constante.

Phase 2 : période de ralentissement.



Notons que dans le séchage de produits biologiques (notamment agricoles et alimentaires), seule la phase 2 ou période de séchage à allure décroissante est observée. La période à vitesse de séchage constante existe très rarement. Ceci pourrait s'expliquer par la compensation des deux phénomènes suivants : d'une part, la pression de vapeur d'eau à la surface du produit tend à diminuer car la migration interne de l'eau est faible, et d'autre part, elle tend à augmenter car la température du produit s'élève (Daudin, 1983).

Différentes méthodologies permettent d'exploiter les cinétiques expérimentales de séchage. Dans notre étude, nous en traiterons deux : le concept de la courbe caractéristique de séchage et un modèle de transfert de matière par diffusion. La courbe caractéristique de séchage (CCS) (fig. III.3.) consiste en une normation convenable de la teneur en eau et de la vitesse de séchage, dans le but d'obtenir une courbe unique pour un produit donné, de dimension déterminée, indépendamment des conditions aérothermiques (vitesse, température et hygrométrie de l'air de séchage) (Keey et Ashworth, 1979 ; Desmorieux, 1992).

La teneur en eau normée " Φ " est exprimée par : $\Phi = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}$ où :

"X" est la teneur en eau (kg eau/kg de matière sèche MS) ;

" X_{eq} " est la teneur en eau à l'équilibre thermodynamique, déterminée par l'isotherme de désorption. Elle correspond à la valeur limite obtenue au bout d'un temps infini pour un produit soumis à des conditions données de température et d'hygrométrie ;

" X_{cr} " est la teneur en eau critique, marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2).

La vitesse de séchage ($-dX/dt$) est normée par celle en phase constante ou phase 1 ($-dX/dt$)_{cte}. Ceci donne une fonction : $f(\Phi) = \frac{-dX/dt}{(-dX/dt)_{cte}}$

La courbe caractéristique de séchage revient donc à tracer $f(\Phi) = \Phi$ pour les différentes cinétiques expérimentales de séchage. Ce tracé exige la connaissance de " X_{cr} ", " X_{eq} " et " $(-dX/dt)_{cte}$ ". Notons que cette méthode est une approche semi-empirique fondée sur une analyse simplifiée du procédé. Elle n'interprète pas les différents mécanismes par des équations phénoménologiques, mais elle s'appuie sur les résultats expérimentaux et les exprime de manière à les rendre exploitables, dans le double but de caractériser le séchage du produit et de dimensionner un séchoir (Desmorieux, 1992).

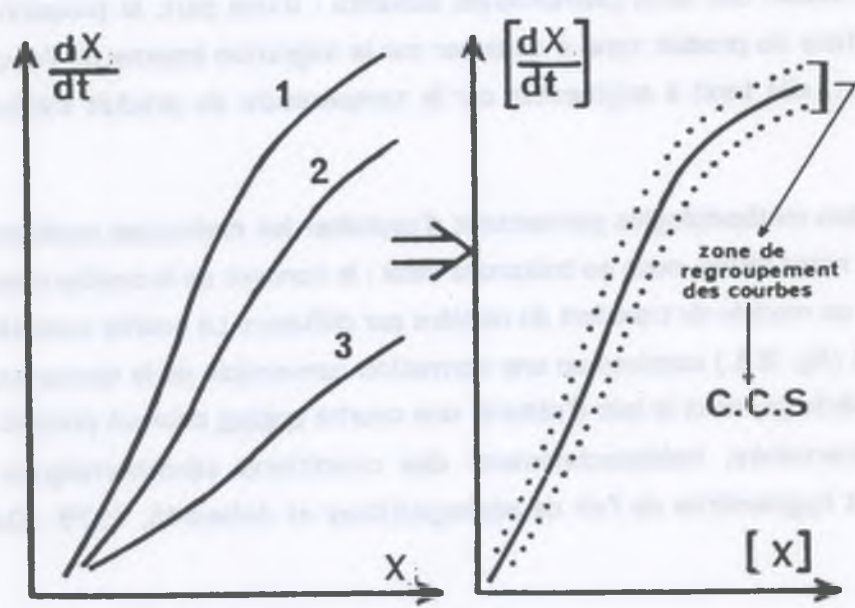


Figure III.3. Courbe caractéristique de séchage (CCS). In : Daudin, 1983

Une autre transformation (Fornell *et al.*, 1980) consiste à normer la vitesse de séchage $(-dX/dt)$ en la divisant par le produit $(T_a - T_e)(v_a)^{0,5}$ où " T_a " et " T_e " sont respectivement les températures sèches et humide de l'air, " v_a " sa vitesse. La "CCS" est obtenue en traçant la vitesse normée par la teneur en eau " X ". Le terme $(T_a - T_e)(v_a)^{0,5}$ représente l'influence des propriétés de l'air sur l'allure de séchage en phase 1, si elle existe.

La méthode de la courbe caractéristique a été utilisée pour le séchage de plusieurs produits biologiques ou alimentaires (Fornell *et al.*, 1980 ; Daudin, 1982 ; Desmorieux, 1992) ; du bois (Keey et Ashworth, 1979) ainsi que pour des granulés de silicagel (Ashworth et Carter, 1980).

La deuxième méthode que nous traitons concerne un modèle de transfert de matière par diffusion isotherme. Une modélisation complète, tenant compte de tous les gradients et flux, est difficilement applicable aux produits agro-alimentaires. En effet, ceux-ci possèdent une structure variable dans l'espace et dans le temps ainsi que des caractéristiques physiques souvent mal connues ; d'autre part, ils se déforment pendant le séchage pour compenser en partie le départ de l'eau (diminution de leur surface par contraction des tissus). Des modèles simplifiés sont donc requis pour ces produits biologiques et alimentaires, à savoir des systèmes mathématiques plus facilement exploitables, obtenus en considérant uniquement les mécanismes les plus influents, ce qui limite le nombre de coefficients.

Le modèle diffusif répond à ces critères et traduit de façon simplifiée les résultats expérimentaux de séchage, en ajustant la valeur du coefficient de diffusion apparent. Cette démarche néglige l'effet des gradients de température et de pression totale ; elle suppose la température constante à l'intérieur du produit. Cette simplification revient à confondre tous les transferts internes, en faisant l'hypothèse que le gradient de potentiel le plus important est le gradient de teneur en eau.

Le modèle obéit à la loi de Fick qui se traduit par l'équation du flux de matière :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \text{div} (D \overrightarrow{\text{grad}} X) \quad \text{où "D" est le coefficient de diffusion apparent de l'eau dans}$$

le produit. En général, " D " désigne le transfert global d'eau, bien que pouvant se diviser en deux termes, l'un concernant la diffusion de l'eau liquide et l'autre, celle de la vapeur (Jaros *et al.*, 1992). La valeur de " D " est toujours obtenue par ajustement des courbes expérimentales ; elle suit une loi d'Arrhénius :

$$D = D_0 \exp (-E_a/RT) \quad \text{où "E}_a\text{" est l'énergie d'activation en J. mole}^{-1} ;$$

"R" étant la constante des gaz parfaits ; $R = 8,314 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{mole}^{-1}$.

L'établissement de l'équation simplifiée de diffusion implique plusieurs hypothèses (Daudin, 1982 ; Nogueira et Park, 1992) qui sont les suivantes :

- le coefficient de diffusion est constant et englobe tous les phénomènes intervenant dans la migration de l'eau, à savoir les transferts de masse et de chaleur ;
- le produit est homogène, il a une forme régulière, simple et symétrique ;
- le mouvement de l'eau résulte d'un gradient de teneur en eau dans le produit ;
- la surface du produit se met immédiatement en équilibre avec l'air de séchage ;
- la teneur en eau d'équilibre du produit avec l'air est déduite d'une courbe de sorption du produit.

De par sa simplicité, cette démarche a souvent été appliquée pour le séchage de produits agricoles et alimentaires : poisson (Jason, 1958 ; Jason et Peters, 1973) ; oignons (Mazza et Lemaguer, 1980) ; céréales (Jaros *et al.*, 1992) ; viande (Mulet *et al.*, 1992) ; banane (Nogueira et Park, 1992).

III.2. LE SECHAGE TRADITIONNEL DU POISSON EN AFRIQUE

Dans les pays tropicaux, le poisson se détériore très rapidement du fait des températures ambiantes élevées. Les structures de conservation du poisson en frais (réfrigération, congélation) sont très rares et coûteuses. Les méthodes traditionnelles de traitement (séchage, salage, fumage, braisage, grillage, marinage) constituent donc le principal moyen de conservation du poisson (Sainclivier, 1985).

Les produits traditionnels transformés circulent plus facilement dans le commerce que le poisson frais, étant donné leur activité de l'eau plus faible et leur volume réduit. Ceci joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la consommation des zones éloignées. Par ailleurs, le poisson constitue une source importante de protéines, il contribue à combler les carences alimentaires et la malnutrition protéique souvent répandues dans les pays en développement et notamment en Afrique (FAO, 1984 ; CTA & TDRI & CEASM, 1986).

De plus, le poisson transformé dans les pays tropicaux sert à la préparation de plats particuliers ; son utilisation est donc étroitement liée aux habitudes et goûts alimentaires des consommateurs. Ajoutons à ceci le fait que ces transformations artisanales du poisson créent des emplois et des sources de revenus (notamment aux femmes, acteurs dynamiques de la filière) et s'intègrent donc dans le tissu social de ces pays (TDRI, 1986 b ; CTA & TDRI & CEASM, 1986).

Ainsi, le séchage est l'une des techniques de transformation du poisson les plus répandues dans les pays en développement, notamment en Afrique (Occidentale, Equatoriale, Afrique du Sud). Il est souvent associé au salage et/ou au fumage. Le séchage en Afrique utilise le soleil comme principale source d'énergie, ce qui le rend tributaire des variations climatiques saisonnières et diurnes/nocturnes.

Avant séchage, le poisson subit un parage préliminaire (écaillage, éviscération et ouverture en deux pour les gros poissons) ainsi qu'une fermentation de quelques heures à 2 jours. L'étape de fermentation est importante car elle confère au poisson traité un goût fort et typique. Le poisson est ensuite étalé au soleil, directement sur le sol ou sur des nattes et litières de paille tressée, ou encore sur des claies surélevées et des râteliers (souvent le toit de la hutte). Le poisson est retourné régulièrement pendant le séchage. La durée du séchage varie de 3 à 10 jours selon la saison et la taille du poisson (Sainclivier, 1985 ; TDRI, 1986 b). La surélévation (sur claies ou râteliers) du poisson au cours du séchage fait partie des améliorations récentes en Afrique. Au Mali, seuls 4% des pêcheurs continuent de sécher le poisson à même le sol (Stomal, 1991). Cette surélévation des poissons permet d'une part, de favoriser le passage de l'air à travers le produit, et d'autre part, de limiter les contaminations extérieures du poisson (poussière, sable, insectes, parasites, animaux prédateurs et rongeurs, eau de pluie stagnante, ...).

En vue de réduire davantage ces risques de contamination, des séchoirs artisanaux utilisant des sous-produits agricoles comme combustible ont été testés (Orejana et Embuscado, 1983 ; Sison *et al.*, 1983 ; Villadsen et Flores, 1983 ; Souness, 1990). De même, des séchoirs solaires ont été conçus et proposés aux pays africains (Ismail, 1983 ; Rubbi *et al.*, 1983 ; Sachithanathan *et al.*, 1986 ; Curran *et al.*, 1986 ; Osei-Opare et Kukah, 1989). Les séchoirs solaires testés en Afrique n'ont pas tous eu un succès remarquable pour plusieurs raisons : faute d'intégration dans le tissu social et économique local, manque d'adaptation aux conditions climatiques variables, ainsi que pour des problèmes de maintenance (Ferenczi, 1985 ; TDRI, 1986 b ; Desmorieux, 1992). Il existe plusieurs types de séchoirs solaires dont les principaux utilisés en Afrique sont :

- séchoir à absorption directe de chaleur solaire : le poisson est directement chauffé par le soleil à travers une paroi transparente ;

- tente solaire : les rayons solaires pénètrent à travers les parties transparentes, la chaleur étant absorbée par des parties noires, ce qui augmente la température interne du séchoir ;

- séchoir à capteur solaire et chambre de séchage : constitué d'un tapis de sol en PVC noir et d'un toit incliné en verre. Dans ce type de séchoir, l'air est préchauffé avec un système de capteurs solaires plans avant de pénétrer dans l'enceinte de séchage proprement dite.

Le séchage est donc un moyen de stabiliser le produit, mais ceci n'empêche pas des taux élevés de pertes en poisson séché. On entend par "pertes" le poisson potentiellement disponible pour l'alimentation humaine, mais qui n'est en fait ni consommé ni vendu en tant que produit traditionnellement traité. Cette définition ne tient donc pas compte d'un autre type de pertes appelées pertes directes ou pertes avant transformation. Ces pertes directes concernent les rejets importants de captures industrielles (sous licence) dans certains pays ; la mévente du poisson frais en saison de forte production et par manque d'infrastructures de conservation en frais ainsi que la perte de poisson par insuffisance d'aires et d'espaces de séchage en saison de pêche abondante. Les "pertes de poisson séché" (pertes liées à la transformation et au stockage), réduisent les quantités de poisson disponibles, soit en abaissant la valeur marchande du produit, soit en diminuant sa valeur nutritive. Ces pertes comportent plusieurs aspects : pertes nutritionnelles par rancissement des lipides et/ou par altération des protéines, dégradations microbiennes (moisissures, bactéries halophiles sur le poisson salé-séché), émiettement (certaines espèces telles que le *Tilapia* sont plus fragiles que d'autres), infestation par les insectes, notamment par des coléoptères (*Dermestes maculatus*, *Dermestes frischii* et *Necrobia rufipes*) et par des mouches à viande (surtout sur du poisson encore humide en début de séchage) (fig. III.4. et III.5.). L'infestation par les insectes demeure le problème crucial de la conservation du poisson séché, surtout non salé (Osuji, 1974 a, 1974 b ; Daniel et Etoh, 1983 ; Wood, 1983 ; TDRI, 1987 ; FAO, 1989).

Plusieurs insecticides ont été testés, tant sur le poisson même (pyréthrine ; Gardona ou tétrachlorvinphos ; deltaméthrine ; pyrimiphos-méthyl) que sur les nattes d'emballage (Malathion). Ces travaux ont été menés au Mali (FAO, 1984 ; LHM, 1984 ; Duguet *et al.*, 1985 ; Thémelin et Gerbe, 1987 ; Walker, 1987 ; Friendship, 1990), en Indonésie (Esser, 1990), en Thaïlande (Rattagool *et al.*, 1990), au Nigéria (FAO, 1984), au Malawi (TDRI, 1987) et au Kenya (Golob *et al.*, 1987).



Figure III.4. Face dorsale d'un adulte de *Dermestes maculatus*. In : FAO, 1989



Figure III.5. Face dorsale d'un adulte de *Necrobia rufipes*. In : FAO, 1989

Le pyrimiphos-méthyl, insecticide organo-phosphoré à rémanence de courte durée est commercialement connu sous le nom "Actellic". Il semble être une voie prometteuse pour la prévention de l'infestation du poisson séché par les insectes. En 1986, il a été approuvé conjointement par la FAO et l'OMS, il présente plusieurs avantages : efficacité technique, prix abordable, faible teneur en résidus. Le Gardona donne de bons résultats, mais son utilisation est limitée, faute d'étude toxicologique poussée. Notons que les transformatrices de poisson utilisent parfois des produits naturels (poivre, ail, végétaux locaux) connus pour leur pouvoir répulsif vis-à-vis des insectes. En Gambie, les transformatrices emploient un mélange de jus de lime et de piment broyé pour protéger le poisson (salé ou non) en cours de séchage. Le poivre, le piment et le sel sont utilisés en Malaisie, Indonésie, Inde et Nigéria (Esser, 1990).

Toutes les pertes (déjà citées) de poisson séché sont favorisées par certaines conditions telles que le manque d'hygiène dans les campements de pêcheurs et des conditions non maîtrisées d'entreposage et de transport du produit. En effet, le poisson séché est souvent stocké dans des locaux ouverts, non désinsectisés, parfois à même le sol, sans contrôle des conditions de température et d'hygrométrie ambiantes. De plus, il est transporté dans des paniers, des sacs de jute ou des feuilles de palmier, ce qui favorise son émiettement (FAO, 1984 ; Sainclivier, 1985 ; CTA & TDRI & CEASM, 1986 ; TDRI & CEASM, 1986 ; FAO, 1989).

Les pertes de poisson séché ont été estimées à 25% (équivalent en produit frais) par rapport à la production annuelle (U.S. National Academy of Sciences, 1978). Ce chiffre montre l'ampleur du problème de pertes de poisson séché, mais il varie en fonction du pays, de la saison, du climat et des facteurs locaux (méthodes de traitement, infrastructures de manutention et demande du marché). Ainsi, les pertes de poisson séché non salé, dues à *Dermestes* spp. ont été estimées à environ 50% en poids dans les conditions commerciales et d'entreposage actuelles d'une région à climat sec et chaud, elles sont de 10 à 30% au Sénégal et de 25% au Burkina Faso (FAO, 1984 ; Sainclivier, 1985 ; TDRI & CEASM, 1986). Notons que le niveau des pertes dues aux insectes (notamment *Dermestes* spp.) est directement proportionnel à la durée de stockage du poisson. D'autres chiffres (variant entre 10 et 60%) sont également mentionnés dans la littérature. Nous ne citerons pas leurs références ici par suite de leur fiabilité restreinte (étude incomplète, manque de précision quant aux pourcentages de pertes énoncés et à la nature du traitement concerné).

Enfin, les circuits de commercialisation du poisson séché sont très variés, ils impliquent plusieurs acteurs (pêcheurs, intermédiaires, commerçants itinérants, gros

commerçants et revendeuses au détail) et divers lieux de vente (vente directe dans les campements de pêcheurs, petits ou moyens marchés, ports de pêche, grandes villes). Ceci induit un grand écart de prix entre la production et la consommation, tout en créant une dépendance permanente du pêcheur vis-à-vis de son intermédiaire ou du commerçant (Jeay, 1977 ; FAO, 1984 ; TDRI & CEASM, 1986).

MATERIELS ET METHODES

The first part of the paper discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions, including sales, purchases, and expenses. This is essential for ensuring the integrity of the financial statements and for providing a clear audit trail. The second part of the paper focuses on the importance of maintaining accurate records of all assets and liabilities, including property, equipment, and accounts payable. This is essential for ensuring the accuracy of the balance sheet and for providing a clear audit trail. The third part of the paper discusses the importance of maintaining accurate records of all income and expenses, including salaries, wages, and interest. This is essential for ensuring the accuracy of the income statement and for providing a clear audit trail. The fourth part of the paper focuses on the importance of maintaining accurate records of all cash flows, including receipts and payments. This is essential for ensuring the accuracy of the cash flow statement and for providing a clear audit trail. The fifth part of the paper discusses the importance of maintaining accurate records of all taxes, including income tax, sales tax, and property tax. This is essential for ensuring the accuracy of the tax return and for providing a clear audit trail. The sixth part of the paper focuses on the importance of maintaining accurate records of all other financial information, including bank statements, credit card statements, and insurance policies. This is essential for ensuring the accuracy of the financial statements and for providing a clear audit trail.

IV. MATERIELS ET METHODES

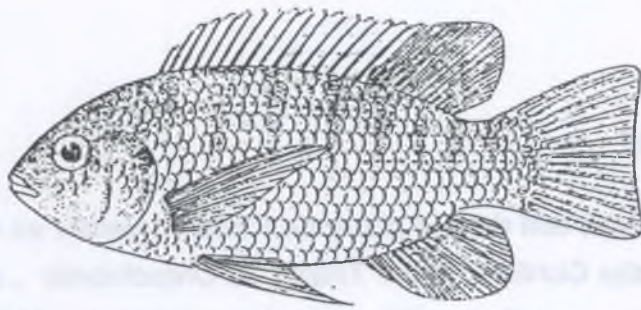
IV.1. MATIERE PREMIERE

Le poisson étudié dans ce travail, tant dans la phase de travail accomplie en France qu'au Mali, est le *Tilapia* (famille des Cichlidés, genre *Tilapia* ou *Oreochromis*, espèce *nilotica* (en France), *nilotica* ou *monodi* ou *zillii* selon les saisons (au Mali) (fig. IV.1.). Au Mali, le poisson est capturé dans le fleuve Niger ou dans l'un de ses bras. En France, nous avons assuré nous-mêmes l'élevage et l'entretien d'un lot de poisson (*Tilapia nilotica*). Ceci nous a permis d'une part, de travailler sur du poisson frais (sans congélation ou pré-traitement de conservation), et d'autre part, de garantir l'homogénéité de la matière première (calibre, poids, alimentation) et d'en maîtriser l'approvisionnement. Le lot de poisson a été initialement acheté au CEREMHER (station de lagunage et d'aquaculture, Mèze, France). L'élevage et l'entretien des poissons a été assuré dans des bassins thermostatés au CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, section Pisciculture, Montpellier, France). Les poissons ont été nourris quotidiennement avec de l'aliment pour carpe, calibre 4,5 mm (AQUALIM S.A., Nerfac, France) selon les recommandations des éleveurs d'origine.

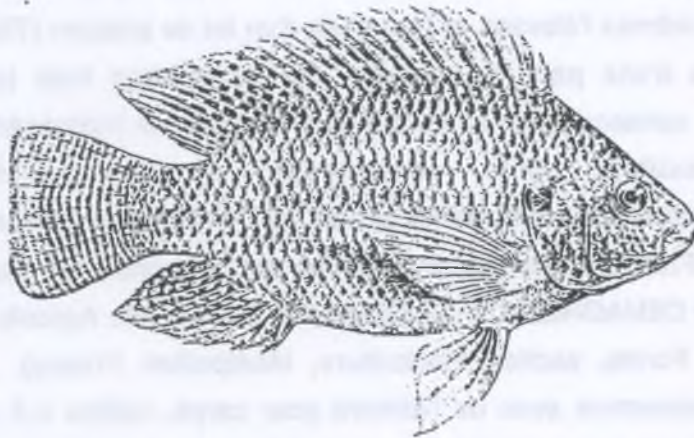
De même, nous avons étudié (en France) la qualité d'échantillons de *Tilapia* séché, prélevés sur les marchés de Mopti (plaque tournante du delta central du Niger, située à 650 km à l'est de Bamako) (cf. V.2.8.). Ces échantillons, notés (PSA), (PSB), (PSC) et (PSD) (PS = poisson séché) répondent aux caractéristiques suivantes :

- (PSA) et (PSB) : prélevés dans un campement de pêcheurs. Ces échantillons ont subi un traitement au Gardona (insecticide) puis un stockage de 2 ans à 4°C avant analyse. A l'achat, l'échantillon (PSA) est déclaré "fermenté" et (PSB) "non fermenté" ;
- (PSC) : prélevé dans le même campement, fermenté, traité au Gardona et stocké 3 ans avant analyse (1 an de stockage dans les conditions locales du campement puis 2 ans à 4°C) ;
- (PSD) : prélevé sur le marché de Mopti et stocké 1 an à 4°C avant analyse (pas d'information sur la fermentation ni sur le traitement à l'insecticide) ;

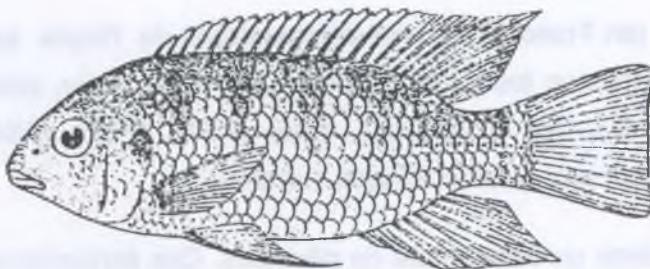
La qualité de ces échantillons est comparée à celle d'autres dont nous connaissons l'histoire avant traitement. Ces derniers sont notés :



(a) : *Tilapia nilotica*



(b) : *Tilapia monodi*



(c) et (d) : *Tilapia zillii*

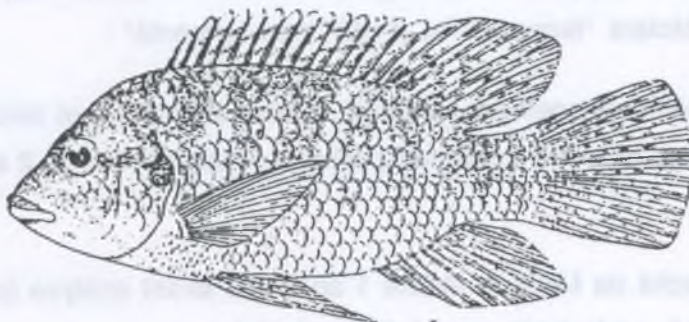


Figure IV.1. Différentes espèces de *Tilapia* utilisées dans l'étude. In : Lévêque et Paugy, 1984

- (PSE) : prélevé lors de notre travail de terrain à Mopti (saison Juin-Juillet), suivi depuis sa capture jusqu'à la fin de sa transformation, fermenté, non traité et congelé 1 an avant analyse ;
- (TF) : témoin frais élevé en France, non fermenté, non traité, analysé immédiatement après capture ;
- (TS) : témoin prélevé dans le même lot que TF et séché en France, non fermenté, non traité, analysé en fin de séchage (sans délai de stockage). Les paramètres de l'air de séchage sont : 50°C (température sèche), 15% (hygrométrie) et 2 m/s (vitesse).

IV.2. METHODOLOGIE APPLIQUEE AU MALI

La méthodologie décrite ci-dessous a été appliquée au Mali, dans la région de Mopti, en trois saisons de pêche différentes : Juin-Juillet (début de crue et de la saison des pluies, pêche rare), Décembre (décruée progressive, pêche abondante) et Avril-Mai (fin de décruée et étiage, fin de pêche intensive). Le procédé traditionnel a été suivi dans des campements de pêcheurs, les analyses de qualité du poisson ont été effectuées au Laboratoire d'Hydrobiologie de Mopti (LHM).

IV.2.1. Paramétrage du procédé traditionnel de séchage

Le suivi du procédé traditionnel de séchage du poisson a consisté à mesurer régulièrement les paramètres de l'air ambiant en cours de traitement et à les enregistrer manuellement et automatiquement.

La température de l'air ambiant de séchage et celle au coeur du poisson sont mesurées avec des sondes (thermocouples chromel-alumel type K) reliées à un boîtier de commutation Mesurix (mesures manuelles) et à une centrale de mesure Starlog 6003-81 Unidata (mesures automatiques).

L'humidité relative de l'air est mesurée à la fois avec un hygromètre (Hygrocor-Coreci) à lecture directe, et avec un psychromètre, type Jules Richard (mesure indirecte de l'hygrométrie à partir des températures sèche et humide).

La vitesse de l'air est mesurée à l'aide d'un anémomètre (Wallac GGA-35). L'énergie et la puissance solaires sont relevées au moyen d'un pyranomètre (Haenni Solar 118).

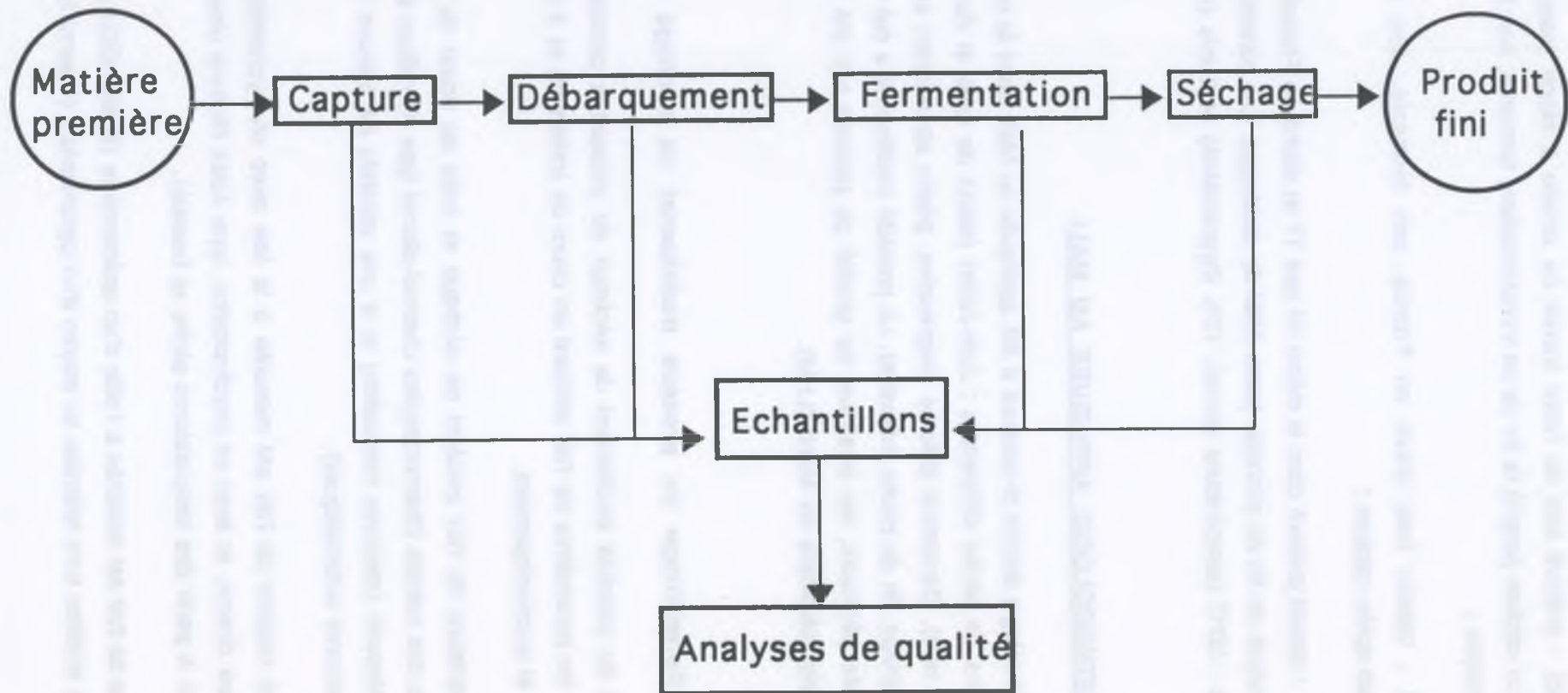


Figure IV.2. Diagramme d'échantillonnage au Mali

Les rendements de parage et de séchage du poisson sont évalués par pesées (avec une balance de cuisine) du poisson avant et après ces opérations.

IV.2.2. Définition de la "qualité standard" du poisson séché au Mali

Nous entendons par "qualité standard" du poisson séché au Mali, la qualité du poisson traditionnellement capturé et transformé. Dans le but de définir cette "qualité standard", nous avons accompagné les pêcheurs dans leurs sorties de pêche, puis nous avons suivi les différentes opérations jusqu'à la fin de la transformation. Sitôt après capture, un échantillon de 3 *Tilapias* est mis dans une glacière, il servira comme référence de la qualité initiale du poisson au Mali. Le lot restant est manutentionné traditionnellement. Après débarquement et tout au long des étapes traditionnelles de la transformation, des échantillons (3 poissons) sont prélevés et gardés à 4°C avant analyse (fig. IV.2.).

Notons que nous ne sommes nullement intervenus lors du procédé traditionnel de transformation, mais nous avons observé et noté les points qui nous semblaient critiques. Ceci rejoint le concept HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) de plus en plus utilisé en technologie alimentaire (Huisin't Veld *et al.*, 1988 ; Corlett Jr., 1989 ; Spencer Garrett III et Hudak-Roos, 1991). Ce concept est basé sur la multiplicité des contrôles lors des différentes étapes d'une chaîne de fabrication, plutôt qu'un contrôle de qualité unique sur le produit fini, en vue de repérer les goulots d'étranglement du procédé et d'en maîtriser les points critiques.

Cette démarche nous a permis, d'une part de collecter des observations et des informations sur la pêche et le procédé traditionnel de transformation et, d'autre part, de maîtriser l'histoire du poisson depuis sa capture jusqu'à la fin de sa transformation, ce qui est important pour la comparaison des résultats. Les analyses de qualité effectuées au cours de ce suivi sont détaillées dans la partie IV.4.

IV.2.3. Etude de l'opération traditionnelle de fermentation

La fermentation du poisson, étape préliminaire au séchage, est très importante dans le procédé traditionnel au Mali. Elle confère au produit des caractéristiques organoleptiques spécifiques (saveur, odeur, couleur, aspect et texture). Les travaux portant sur la fermentation du poisson en Afrique sont très rares ; aucune étude de cette opération n'a été effectuée au Mali. Les travaux disponibles dans la littérature traitent

surtout du poisson fermenté en Asie (avec salage et fermentation très poussée), ce qui diffère du poisson fermenté au Mali.

Des échantillons de poisson, prélevés en fin de fermentation et en fin de séchage, sont soumis d'une part à des dénombrements de flores lactique et acétique (cf. IV.4.1.), et d'autre part, à un dosage d'acides organiques (cf. IV.4.4.) par chromatographie liquide à haute pression (HPLC).

IV.2.4. Essais d'incorporation d'additifs alimentaires au procédé traditionnel

Il nous a semblé intéressant de tester certains additifs alimentaires, autorisés et faciles à utiliser, sur le poisson séché au Mali. Les additifs testés sont : le sel (250 g/litre de solution), le vinaigre (10% v/v), un mélange sel+vinaigre (250 g/l + 10% v/v), le bicarbonate de sodium (8% m/v) et l'acide lactique (1% v/v). Ils sont incorporés dans l'eau de fermentation du poisson.

L'impact de ces additifs est suivi en termes d'évolution de la qualité du poisson traité, ainsi que de son degré d'acceptation par des consommateurs maliens (jury représentatif choisi dans le campement de pêcheurs où l'étude est menée).

IV.2.5. Identification des critères maliens de qualité du poisson séché

Outre les aspects scientifiques et technologiques liés à la transformation du poisson par séchage au Mali, la notion de qualité est étroitement liée aux critères locaux d'appréciation du produit fini. Nous avons mené quelques enquêtes simples auprès de transformatrices et de ménagères (dans les campements de pêcheurs) et de revendeuses (sur les marchés de Mopti), afin de recueillir des informations sur les goûts locaux, les usages du poisson séché, les critères de commercialisation et les circuits principaux et intermédiaires de sa distribution.

IV.3. METHODOLOGIE APPLIQUEE EN FRANCE

IV.3.1. Plan d'expérience - Surface de réponse

L'influence du procédé de séchage sur la qualité du poisson a été étudiée selon un plan d'expérience associé à la méthodologie de la surface de réponse. Cette démarche permet de déterminer, en un nombre minimal d'essais, la (ou les) réponse(s) optimale(s) d'un système caractérisé par un certain nombre de facteurs (Goupy, 1990). Dans notre cas, les facteurs contrôlant le procédé sont les paramètres de séchage (température, hygrométrie et vitesse de l'air de séchage), et les réponses observées déterminent la qualité du poisson.

Ce plan d'expérience est basé sur un modèle mathématique du second degré qui tient compte des effets linéaires et quadratiques des facteurs, ainsi que des interactions entre ceux-ci. Le modèle explique ainsi les relations existant entre les facteurs expérimentaux (X_1, X_2, X_3) et la réponse observée (Y), il s'écrit sous la forme:

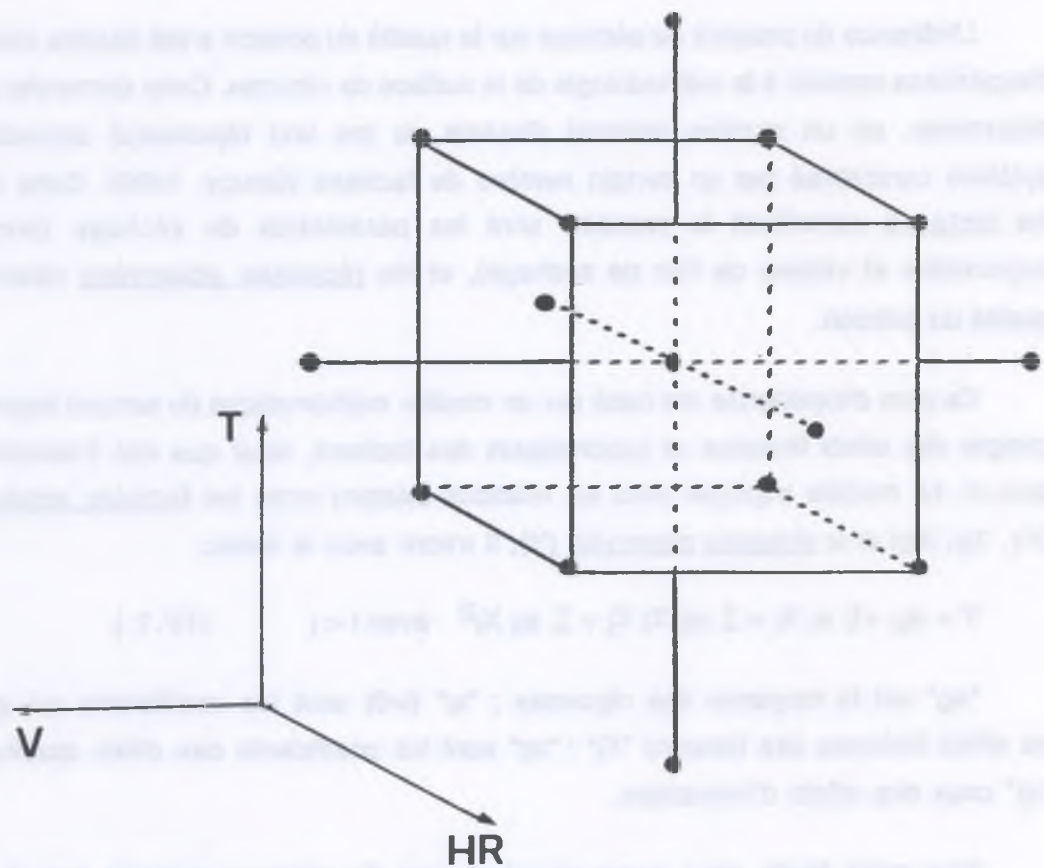
$$Y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \sum a_{ii} X_i^2 \quad \text{avec } i < j \quad (\text{IV.1.})$$

" a_0 " est la moyenne des réponses ; " a_i " ($i \neq 0$) sont les coefficients qui quantifient les effets linéaires des facteurs " X_i " ; " a_{ij} " sont les coefficients des effets quadratiques et " a_{ij} " ceux des effets d'interaction.

Pour notre étude, nous avons choisi un plan d'expérience complet (non fractionné), centré, composite, à trois facteurs et à cinq niveaux. Ce plan d'expérience recouvre un domaine expérimental sphérique ; la répartition spatiale des essais se découpe en trois groupes (fig. IV.3.) :

- un groupe d'expériences qui forme le plan factoriel 2^n ; " n " étant le nombre de facteurs expérimentaux à étudier. Dans notre cas, $n=3$; ce qui donne 8 expériences correspondant aux points factoriels ;

- une série de répétitions d'essais au centre du domaine expérimental. Cette série permet de tester si la variance des erreurs expérimentales est acceptable par rapport à celle des effets. Les points expérimentaux correspondant aux répétitions sont dits points centraux. Dans notre étude, nous répéterons le point central 3 fois, soit $n_0=3$. Ce nombre correspond au critère de la variance interne intégrée (Feinberg, 1990) ;



2^n points du factoriel

$2n$ points étoiles

n_0 répétitions du point central

Figure IV.3. Points expérimentaux du plan composite centré, orthogonal et rotatif, à 3 facteurs et 5 niveaux



- une série de $2n$ essais (avec $n=3$ dans notre cas; donc 6 expériences correspondant aux points axiaux) qui permet d'évaluer les termes du second degré du modèle mathématique. Ces points expérimentaux, appelés points en étoile, sont situés sur une sphère de rayon " Ω " délimitant le domaine expérimental considéré (Thompson, 1982; Yusof *et al.* , 1988).

La valeur de " Ω " est choisie de façon à permettre de prévoir les réponses du modèle, avec le même pouvoir dans toutes les directions à partir du point central; le plan est ainsi appelé rotatif. Pour notre étude, la valeur de 1,682 -qui correspond à $(2^n)^{1/4}$ - a été choisie pour " Ω ". Ainsi, les cinq niveaux des facteurs expérimentaux (dans notre plan d'expérience) correspondront aux valeurs codées suivantes: niveau central (0), niveaux intermédiaires (-1 et +1), niveau bas (-1,682) et niveau élevé (+1,682).

L'attribution de ces valeurs codées aux différents niveaux revient à remplacer les valeurs des facteurs par des valeurs centrées réduites ou codées, ceci permet alors de traiter tous les facteurs de la même manière. L'utilisation de valeurs codées (ou centrées réduites) assure une précision identique lors du calcul des coefficients et permet de comparer les effets des facteurs entre eux.

Ces niveaux permettent, à partir d'une matrice orthogonale en valeurs codées, de déterminer la gamme réduite d'essais à adopter. L'orthogonalité de la matrice est nécessaire pour avoir une indépendance linéaire des lignes et des colonnes, c'est-à-dire pour que les valeurs des facteurs varient indépendamment les uns des autres (Thompson, 1982 ; Gacula Jr. et Singh, 1984 ; Mudahar *et al.* , 1990). De plus, les essais expérimentaux sont effectués dans un ordre aléatoire (randomisation) afin d'éviter tout biais dû à une dépendance des facteurs. La randomisation des essais permet de considérer comme aléatoires des erreurs dues à des facteurs non contrôlés dont les variations de niveaux introduisent des erreurs systématiques impossibles à maîtriser. Il est alors possible d'utiliser les tests statistiques malgré la présence de ces erreurs systématiques (Goupy, 1988).

Pour notre étude, nous distinguerons:

- les facteurs étudiés : ce sont les paramètres de l'air de séchage ($n=3$)
 - température (en °C), notée (T) ,
 - hygrométrie ou humidité relative (en %), notée (HR) ,
 - vitesse (en m/s), notée (V) ;

Ces facteurs expérimentaux sont parfaitement contrôlés et leurs niveaux sont définis avec précision. Ils sont donc supposés ne pas introduire d'erreur ;

- les facteurs fixés (qui pourraient affecter le procédé de séchage mais qui sont arbitrairement fixés) :
 - espèce de poisson (*Tilapia nilotica*) ;
 - poids moyen du poisson (250 g) ;
 - sexe du poisson : mâle
 - orientation du poisson par rapport au flux d'air de séchage (flux horizontal agissant par léchage du produit) ;
 - mode standard de parage et de découpe du poisson avant séchage (poisson étêté, éviscéré, ouvert en deux, séchant avec la peau) ;
 - teneur en eau finale (autour de 15% b.h. correspondant à un a_w de 0,65 à 20°C) ;

Notons que certains de ces paramètres fixés peuvent évoluer, de façon aléatoire, au cours de la réalisation du plan d'expérience (comme la variation de la teneur en matière grasse due à un stress causé par le froid, ou la masse des individus qui oscille autour de 250 g). Ces variations aléatoires peuvent alors introduire une erreur expérimentale ou décalage dans la réponse. Ce type d'erreur est toutefois traité par les calculs statistiques, ce qui assure des expérimentations non biaisées et des résultats cohérents (Goupy, 1988) ;

- les réponses (ou caractéristiques du produit fini après séchage). Ces réponses sont les analyses de qualité (microbiologiques, physico-chimiques et biochimiques) effectuées en aval sur les poissons séchés. Ces analyses sont détaillées au paragraphe IV.4.

La méthodologie du plan d'expérience nécessite de fixer au préalable les bornes et la valeur centrale du domaine de variation de chaque facteur. Ainsi, des essais préliminaires de séchage du poisson du Mali ont été effectués, selon un plan factoriel complet à 2 facteurs (2^2) (Marc, 1989; Moustaid, 1989). Les conditions opératoires de ces essais sont 40 et 60°C pour la température, 10 et 60% pour l'hygrométrie et 2 m/s pour la vitesse de l'air de séchage.

Tableau IV.1. Niveaux expérimentaux des paramètres de séchage

	(-1,682)	(-1)	(0)	(+1)	(1,682)
Température (°C)	30	38	50	62	70
Hygrométrie (%)	15	23	35	47	55
Vitesse (m/s)	0,5	1,1	2,0	2,9	3,5

Tableau IV.2. Matrice expérimentale des essais de séchage

N° essai	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	Ordre expérimental
1	38 (-1)	23 (-1)	1,1 (-1)	11
2	62 (+1)	23 (-1)	1,1 (-1)	10
3	38 (-1)	47 (+1)	1,1 (-1)	2
4	62 (+1)	47 (+1)	1,1 (-1)	12
5	38 (-1)	23 (-1)	2,9 (+1)	15
6	62 (+1)	23 (-1)	2,9 (+1)	4
7	38 (-1)	47 (+1)	2,9 (+1)	16
8	62 (+1)	47 (+1)	2,9 (+1)	13
9	50 (0)	35 (0)	2,0 (0)	5
10	50 (0)	35 (0)	2,0 (0)	6
11	50 (0)	35 (0)	2,0 (0)	14
12	30 (-1,682)	35 (0)	2,0 (0)	9
13	70 (+1,682)	35 (0)	2,0 (0)	7
14	50 (0)	15 (-1,682)	2,0 (0)	1
15	50 (0)	55 (+1,682)	2,0 (0)	3
16	50 (0)	35 (0)	0,5 (-1,682)	17
17	50 (0)	35 (0)	3,5 (+1,682)	8

A partir des résultats de ces essais, nous avons fixé pour chaque facteur expérimental (T, HR, V), des valeurs correspondant respectivement au niveau central et à l'un des niveaux extrêmes (bas ou élevé) ou intermédiaires. Les valeurs correspondant aux niveaux restants sont ensuite calculées (tableau IV.1.).

En appliquant la matrice en valeurs codées à ces niveaux retenus, nous obtenons la matrice expérimentale des 17 essais de séchage à effectuer (tableau IV.2.). Rappelons que ces essais de séchage sont effectués dans un ordre expérimental aléatoire afin d'éviter tout biais lié à des erreurs systématiques.

Les résultats du plan d'expérience sont exploités, statistiquement et graphiquement, au moyen du logiciel Statgraphics (Statistical Graphics Corporation, USA). Les coefficients du modèle mathématique ainsi que leurs écarts-types sont calculés par régression linéaire multiple (RLM). Les coefficients sont divisés par leurs écarts-types et comparés aux valeurs d'une loi de Student, ce qui indique leur seuil de signification, autrement dit, si ces coefficients sont statistiquement différents de zéro.

Enfin, la valeur globale du modèle est déterminée par une analyse de variance selon un test de Fischer. Le coefficient de la régression ou coefficient de détermination R^2 explique l'adéquation du modèle aux valeurs expérimentales.

La représentation graphique du modèle est traduite, soit par des surfaces de réponse, soit par des courbes d'isoréponses. Elle permet de visualiser directement l'optimum recherché. Chaque surface de réponse représente, dans un espace tridimensionnel, l'évolution d'une réponse (axe vertical) en fonction de 2 facteurs ou paramètres du procédé (axes horizontaux), le troisième facteur restant à un niveau fixe (le niveau central par exemple).

La méthodologie de surface de réponse associée à un plan d'expérience est souvent utilisée dans divers domaines : alimentaire (tant au niveau du procédé qu'au niveau du produit) (Lund, 1983 ; Steinberg *et al.* , 1984 ; Floros et Chinnan, 1988 a, b ; Diptee *et al.* , 1989 ; Hachigian, 1989 ; Mudahar *et al.* , 1989 ; Mudahar *et al.* , 1990 ; Rustom *et al.* , 1991 ; Surowka et Fik, 1992) ; génie chimique (Sado et Goupy, 1986) ; évaluation sensorielle (Henika, 1982 ; Giovanni, 1983)

Notons que le plan d'expérience choisi pour notre étude (centré, composite, rotatif, à 5 niveaux) réunit trois qualités majeures par rapport à d'autres schémas expérimentaux proposés pour l'étude des modèles du 2° degré :

- un nombre réduit d'expériences,
- une précision optimale,
- il confère au modèle un pouvoir de prédiction identique dans toutes les directions du domaine expérimental, à partir du point central ; on dit que ce plan présente une isovariance par rotation,

Comme la variabilité expérimentale n'est estimée que par la répétition du point central, la prédiction donnée par le modèle sera a priori maximale au centre du domaine et minimale à ses extrêmes.

IV.3.2. Dispositif expérimental de séchage

Les essais de séchage sont effectués au moyen d'un pilote ou "boucle de séchage", conçu et réalisé au CIRAD-SAR (fig. IV.4.). Ce dispositif est basé sur le séchage par entraînement à l'air chaud, il permet de contrôler et de maîtriser les conditions de séchage fixées, à savoir la température sèche, la température de rosée (corrélée à l'hygrométrie) et la vitesse de l'air de séchage. Le produit à sécher peut être, soit disposé sur des claies perpendiculairement au flux d'air (gaine verticale), soit suspendu à une grille et soumis à un séchage par le flux d'air parallèle. Nous avons adopté cette dernière disposition en suspendant les poissons par des crochets. La grille (porte-produit) est solidaire d'un châssis qui repose, à poste fixe, sur une balance de précision (Mettler, capacité 16 kg, précision 0,1g), d'où la possibilité de pesée en continu. L'évolution de la masse du produit est suivie en cours de traitement, avec possibilité de déviation du flux d'air lors de la pesée. Pour nos essais, nous avons choisi de ne pas dévier l'air au cours de la pesée, afin de limiter les perturbations du système. Nous avons vérifié au préalable (dans la gaine horizontale) la faible variation de la pesée en fonction de la déviation.

La circulation de l'air est assurée par un ventilateur centrifuge (de puissance 4 kW sous 380 V) équipé d'un variateur électronique de vitesse. Le chauffage de l'air est réalisé par une batterie de résistances électriques (puissance 15 kW sous 380 V). Le contrôle de l'hygrométrie de l'air commande :

- soit la déshumidification par renouvellement d'air à l'aide de deux vannes papillon (extraction-admission) à positionneurs électropneumatiques,
- soit l'humidification par injection de vapeur à l'aide d'une vanne électromagnétique.

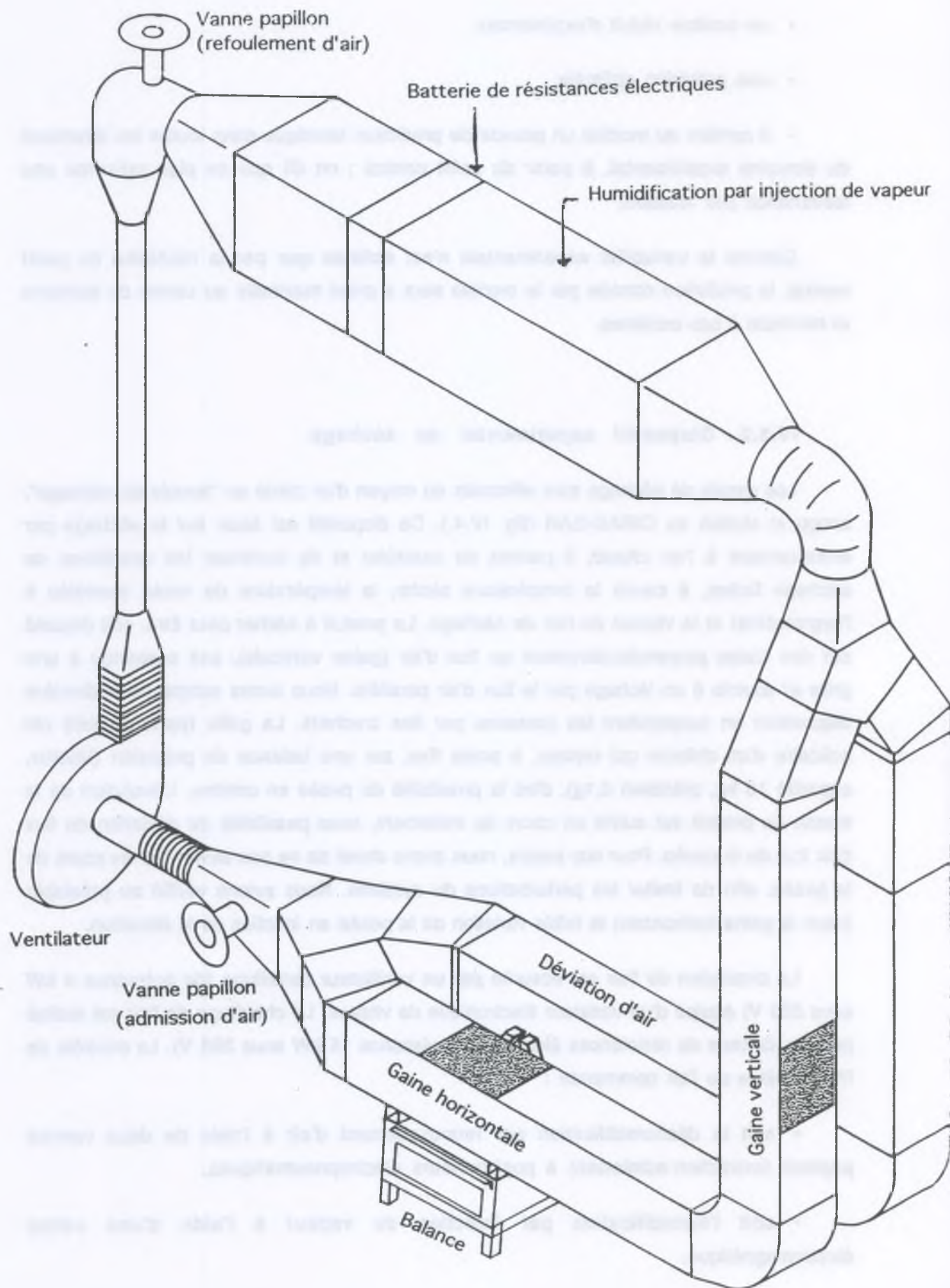


Figure IV.4. Boucle de séchage utilisée (CIRAD-SAR)

Le fonctionnement de l'ensemble est régi par des régulateurs à action PID (proportionnelle, intégrale et dérivée), à partir des paramètres de l'air de séchage mesurés à l'attaque du produit. Le rôle de l'action proportionnelle est de réduire les écarts entre la consigne et la mesure dans un rapport fixe. L'action intégrale permet d'annuler les écarts permanents. Quant à l'action dérivée, elle corrige les écarts proportionnellement à leur vitesse d'apparition.

Le capteur de température sèche est du type canne pyrométrique à sonde platine PT 100 Ω ; la vitesse est mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud. Quant à l'hygrométrie, elle est mesurée par un capteur de température de rosée. Ce dernier affiche la température d'un débit d'air (0,5 à 0,6 l/min) prélevé dans le séchoir par une petite pompe puis refroidi par condensation sur un miroir à effet Peltier. Des essais préliminaires nous ont permis de déterminer la distribution des profils de vitesse dans la boucle de séchage et de vérifier leur uniformité.

Deux modes de conduite permettent de piloter la boucle de séchage :

- mode manuel, par affichage de consignes locales sur régulateurs, commande par bouton poussoir de la pesée et lecture directe sur l'indicateur digital de la balance ;
- mode automatique, au moyen d'un logiciel conversationnel permettant d'une part, la programmation de consignes externes sur les régulateurs et la commande de la pesée, et d'autre part, l'acquisition des températures (sèche et de rosée) et de la masse du produit à des intervalles de temps fixés.

IV.3.3. Préparation du poisson avant séchage

4 à 5 poissons sont utilisés par essai de séchage. Après capture, les poissons sont écaillés, étêtés et éviscérés. La queue et les nageoires sont éliminées, mais la peau est gardée. Les poissons sont régulièrement rincés aux différentes étapes du parage, afin d'éviter leur contamination par les parties éliminées. La table et les instruments de découpe sont nettoyés et javellisés rapidement après la manipulation. Ensuite, une incision est pratiquée sur toute la longueur dorsale du poisson, ce qui permet d'ouvrir les poissons en deux (fig. IV.5.). Les deux parties dorsales du poisson sont ainsi situées de part et d'autre des deux parties ventrales. Enfin, les poissons sont essuyés avec du papier absorbant et suspendus à une grille en acier inox au moyen de 4 crochets chacun. En fin de séchage, un poisson est stocké pendant 2,5 à 3 mois dans une enceinte (30°C) contenant une solution saturée de NaCl ($a_w = 0,75$). L'équilibre entre le poisson et le sel permet d'une part, de

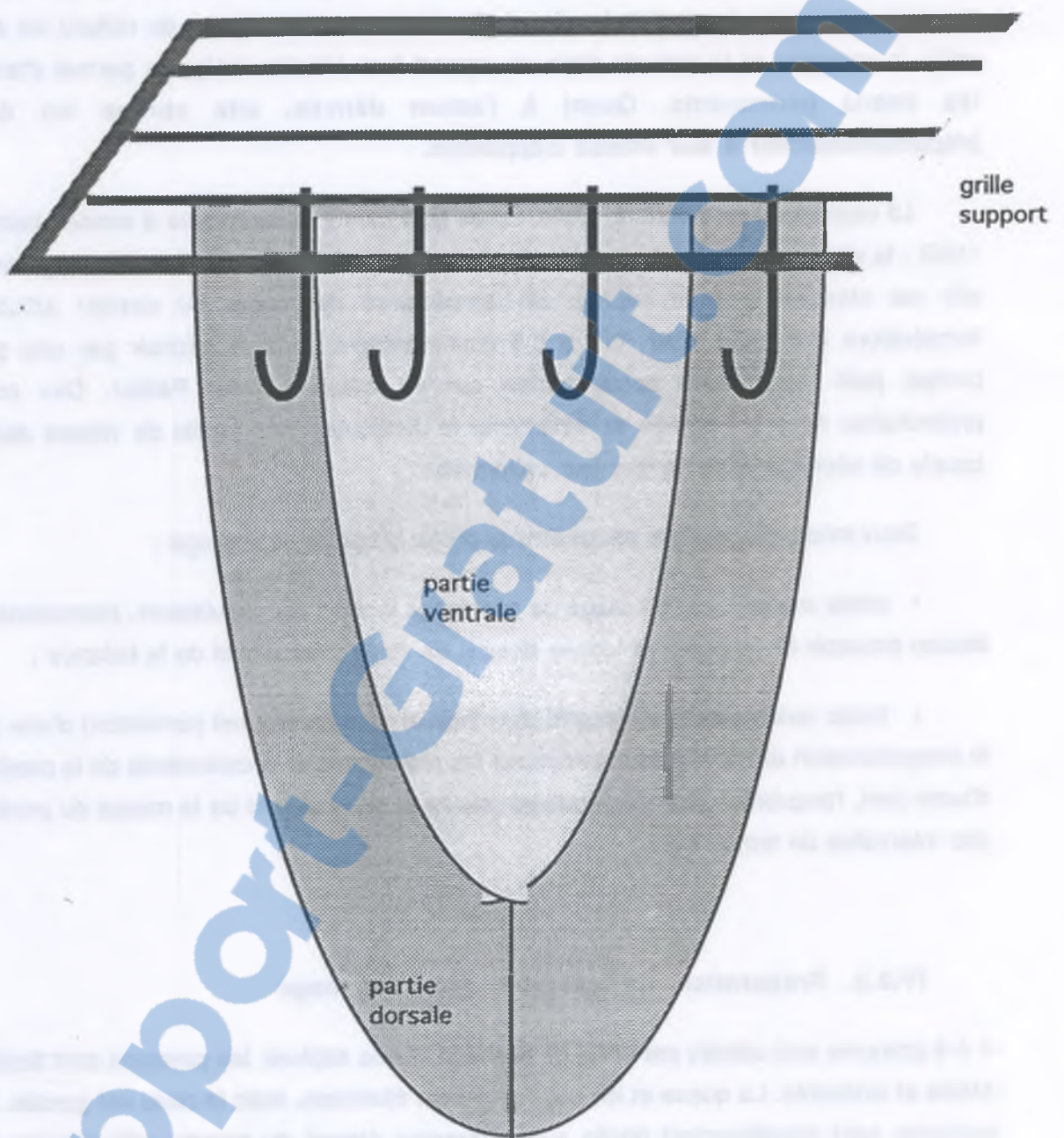


Figure IV.5. Mode de suspension du poisson dans le séchoir

ne pas biaiser la mesure de la couleur par des teneurs en eau finales différentes et d'autre part, ceci simule des conditions tropicales d'entreposage en vue d'évaluer la qualité microbiologique du poisson ainsi stocké.

IV.3.4. Représentation des cinétiques de séchage

IV.3.4.1. Courbes expérimentales

Les cinétiques expérimentales de séchage sont représentées graphiquement de deux manières. La première courbe représente l'évolution de la teneur en eau du poisson en fonction du temps $X = f(t)$; la deuxième montre la vitesse de séchage (ou allure de séchage) en fonction de la teneur en eau $\frac{dX}{dt} = f(X)$. Cette dernière est obtenue par dérivation de la courbe précédente, selon un ajustement polynomial du 3^e degré par la méthode des moindres carrés, avec calcul de la pente au point médian d'un ensemble de 5 points.

IV.3.4.2. Courbe caractéristique de séchage

La courbe caractéristique de séchage (CCS) a été déterminée selon deux transformations, la première consiste à tracer la vitesse de séchage normée $f(\Phi)$ en fonction de la teneur en eau normée " Φ " pour l'ensemble de nos essais de séchage, avec :

$$f(\Phi) = \frac{-dX/dt}{-(dX/dt)_{cte}} \quad \text{et} \quad \Phi = \frac{X-X_{eq}}{X_{cr}-X_{eq}} \quad (\text{IV.2.}) \quad \text{où :}$$

"X" est la teneur en eau (kg eau/kg de matière sèche MS) au cours du temps ;

" X_{eq} " est la teneur en eau à l'équilibre (kg eau/kg MS), déterminée à partir de l'isotherme de désorption pour nos conditions expérimentales de température et d'hygrométrie ;

" X_{cr} " est la teneur en eau critique (kg eau/kg MS), marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2)

" $(-dX/dt)_{cte}$ " est la vitesse de séchage en phase constante (période 1). " X_{cr} " et " $(-dX/dt)_{cte}$ " sont difficilement visibles sur les cinétiques de séchage des produits

alimentaires, étant donné que ces dernières ne présentent pas de phase de séchage isenthalpique (à régime constant). Comme " X_{cr} " et " $(-dX/dt)_{cte}$ " correspondent à la transition entre les phases de séchage à régimes constant et décroissant, elles ont été relevées sur les courbes expérimentales en tant que valeurs maximales relevées en début de séchage (après la mise en régime ou montée en température).

Les conditions d'application de cette transformation sont :

$$f(\Phi) = 1 \text{ pour } \Phi > 1 ;$$

$$0 \leq f(\Phi) \leq 1 \text{ pour } 0 < \Phi < 1 ; \quad (IV.3.)$$

$$f(\Phi) = 0 \text{ pour } \Phi = 0$$

$$f'(\Phi) > 0.$$

La deuxième transformation consiste à normer la vitesse de séchage " (dX/dt) " en la divisant par le produit $(T_a - T_e)(v_a)^{0,5}$ puis à la tracer en fonction de la teneur en eau X .

$$f(\Phi) = \frac{dX/dt}{(T_a - T_e)(v_a)^{0,5}} \text{ et } \Phi = X \quad (IV.4.)$$

" T_a " et " T_e " sont respectivement les températures sèche et humide de l'air, " v_a " sa vitesse, pour les différentes conditions expérimentales de nos essais.

IV.3.4.3. Modèle diffusif

Le transfert par diffusion obéit à la loi de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \text{div} [D \overrightarrow{\text{grad } X}]$$

En considérant les transferts monodimensionnels, on obtient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - D \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (IV.5.)$$

Le coefficient de diffusion apparent " D " est constant afin d'obtenir une solution analytique. Le processus de diffusion est supposé monodimensionnel et se produit à l'intérieur d'un milieu délimité par deux plans parallèles à $x = \pm l$ (fig. IV.6.). On utilise la configuration de la plaque plane semi-infinie, soumise à un environnement d'air fixe

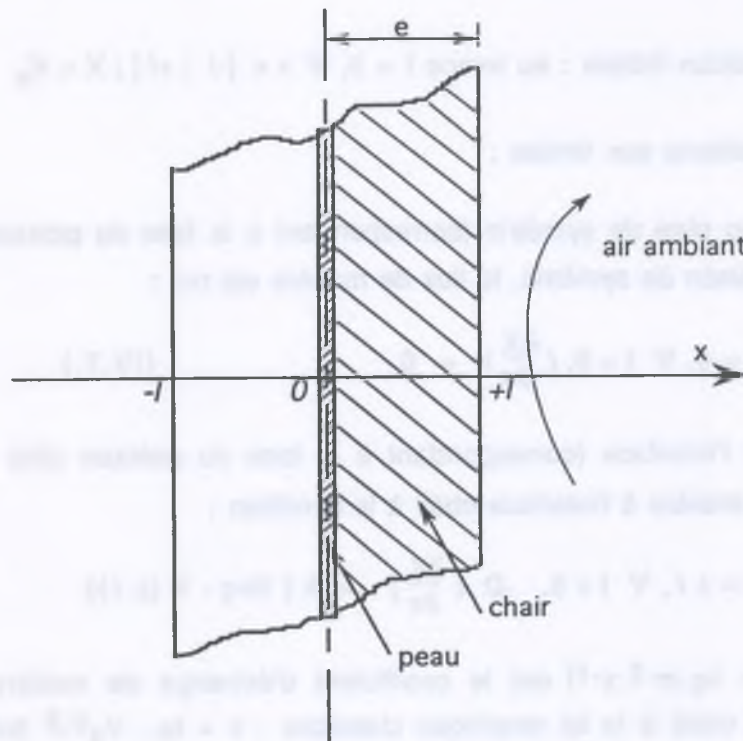


Figure IV.6. Configuration du poisson assimilée à une plaque plane semi-infinie

(température, hygrométrie et vitesse). La demi-épaisseur de cette plaque correspond à l'épaisseur moyenne du poisson. La peau du poisson n'échangeant pas avec l'extérieur est assimilée à l'axe de symétrie de la plaque plane.

La résolution de l'équation de diffusion (IV.5.) nécessite l'application des conditions suivantes :

- condition initiale : au temps $t = 0, \forall x \in [-l ; +l] ; X = X_0$ (IV.6.)

- conditions aux limites :

- au plan de symétrie (correspondant à la face du poisson ayant conservé la peau): par raison de symétrie, le flux de matière est nul ;

pour $x = 0, \forall t > 0, \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right) = 0$ (IV.7.)

- à l'interface (correspondant à la face du poisson côté chair) : le transfert convectif de matière à l'interface obéit à la condition :

pour $x = \pm l, \forall t > 0, -D \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right) = k [X_{eq} - X(\pm l)]$ (IV.8.)

"k" (en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est le coefficient d'échange de matière (vapeur d'eau) à l'interface. Il obéit à la loi empirique classique : $k = k_0 \cdot V_a^{0,5}$ tirée de la relation de Lewis entre les nombres adimensionnels de Reynolds, Nusselt et Prandtl ;

$X(\pm l)$ est la teneur en eau à l'interface (kg eau/kg MS).

La solution de l'équation (IV.5.) est donnée par Crank (1975) :

$$X = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L^2 \exp\left(\frac{-\beta_n^2 D t}{l^2}\right)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + L^2 + L)} \quad (\text{IV.9.})$$

avec $L = \frac{l k}{D}$ (IV.10.)

"X" = teneur en eau à l'instant "t", en kg d'eau/kg MS ;

" X_{eq} " = teneur en eau (kg d'eau/kg MS) à l'équilibre thermodynamique. " X_{eq} " est déterminée à partir de l'isotherme de désorption du produit ;

" X_0 " = teneur en eau initiale (à $t = 0$), en kg d'eau/kg MS ;

" D " = coefficient apparent de diffusion de l'eau (en $m^2.s^{-1}$) ;

" l " = demi-épaisseur de la plaque plane , ce qui correspond à l'épaisseur moyenne du poisson, soit $6,74 \times 10^{-3} m$;

" β " = solution de l'équation transcendante $\beta \cdot \tan \beta = L$;

" k " et " D " sont identifiés par la méthode de l'Aliénor (Cherruault et Guillez, 1987), selon une fonction objectif qu'on cherche à minimiser. Cette fonction objectif représente la somme des erreurs relatives correspondant aux écarts entre les teneurs en eau expérimentales et simulées.

IV.3.4.4. Réponses du plan d'expérience

Afin de combiner la méthodologie du plan d'expérience et celle des modèles explicatifs du séchage, nous avons adopté " X_{cr} ", " $-(dX/dt)_{cte}$ " et " D " comme réponses à expliquer par le modèle polynomial du 2° degré adopté dans le plan d'expérience. De même, le temps de séchage nécessaire pour arriver à la teneur en eau de 15,8% (b.h) est pris comme réponse. Cette teneur en eau finale correspond à un a_w de 0,65 à 20°C (a_w permettant une bonne stabilité bactériologique du produit).

IV.3.5. Préparation de l'échantillon pour les analyses de qualité

Les termes "frais" et "séché" sont employés pour désigner respectivement le poisson avant et après séchage. Avant analyse, le poisson frais est étêté, équeuté, les nageoires et l'arête centrale sont éliminées, puis l'ensemble (parties dorsale et ventrale, peau) est broyé au robot ménager (moulinette) ; les petites arêtes sont ainsi broyées avec la chair et la peau. Le poisson séché est directement broyé à la moulinette étant donné qu'il a subi le parage avant séchage. Nous avons choisi ce type de parage et de broyage afin d'effectuer les analyses sur un échantillon homogène et représentatif de l'ensemble du poisson et se rapprochant au mieux du poisson tel que consommé au Mali. Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons le terme "prise d'essai" pour désigner ce broyat de poisson (frais ou séché).

IV.4. ANALYSES DE QUALITE

IV.4.1. Analyses microbiologiques

Dans la phase de travail en France, la qualité microbiologique du poisson est évaluée à différentes étapes de sa transformation (frais, séché puis stocké pendant 2,5 à 3 mois à 30°C et 75% d'hygrométrie) en réalisant les analyses suivantes : numération de la flore aérobie mésophile totale, des coliformes totaux et des levures et moisissures. Dans la phase de travail au Mali, s'ajoutent aux précédentes les analyses suivantes : détection de salmonelles, dénombrement d'anaérobies sulfito-réducteurs et de bactéries lactiques et acétiques (sur le poisson fermenté). A partir de la suspension-mère (5 g de poisson stérilement broyés dans 45 ml de solution saline NaCl 0,9%), des dilutions décimales sont préparées etensemencées. Après incubation, les colonies sont comptées.

La flore aérobie mésophile totale donne une indication sur l'histoire du produit et sur son état de fraîcheur, ainsi que sur la qualité de sa manutention et de son traitement. Les coliformes révèlent la rigueur des conditions de traitement ou d'éventuelles contaminations dues à l'homme. Les levures et moisissures sont de bons indicateurs pour le stockage ultérieur. Les anaérobies sulfito-réducteurs et les salmonelles sont des pathogènes pouvant entraîner des toxi-infections. Enfin, les bactéries lactiques et acétiques sont des indicateurs de la fermentation.

IV.4.1.1. Etude comparative de méthodes microbiologiques classiques et "nouvelles"

Les analyses microbiologiques sont généralement assez lourdes et exigent du matériel et du temps de préparation et de mise en oeuvre. Dans le but de rechercher des tests "rapides" et aisément applicables sur le terrain au Mali, nous avons au préalable mené une étude comparative des méthodes traditionnelles (ensemencement sur gélose dans des boîtes de Petri) et des méthodes nouvelles, dites "rapides", vendues en kits. Pour cela, nous avons travaillé sur des souches pures de bactéries et nous avons comparé les résultats obtenus avec les différentes méthodes. Les souches testées sont: *Escherichia coli* G15 ; *Enterobacter aerogenes* ; *Citrobacter* ; *Saccharomyces cerevisiae* CBS 1512 ; *Clostridium sporogenes* ; *Salmonella typhimurium* IP 5858 ; *Proteus mirabilis* ; *Micrococcus luteus* ; *Staphylococcus aureus* IP 483 et *Streptococcus faecalis* IP 53152.

Tableau IV.3. Méthodes microbiologiques classiques utilisées dans l'étude comparative puis pour l'évaluation de la qualité sanitaire du poisson

Germe recherché	Milieu de culture	Ensemencement	Incubation	Type de colonies
Flore aérobie mésophile totale	gélose Plate Count Agar (PCA)	0,1 ml en surface ou 1 ml dans la masse	48 à 72 h (30°C)	toutes colonies
Coliformes	gélose lactosée au désoxycholate (DCL) ou gélose lactosée biliée au cristal violet (VRBL)	1 ml dans la masse	24 h à 37°C	colonies rouges de diamètre supérieur à 0,5 mm
Levures et moisissures	gélose glucosée à l'extrait de pomme de terre (PDA) additionnée d'acide tartrique 10% (pH 3,5)	0,1 ml en surface ou 1 ml dans la masse	3 à 5 jours (30°C)	colonies rondes pour levures colonies filamenteuses pour moisissures
Anaérobies sulfito-réducteurs	gélose viande-foie (VF) dans tubes prêts à l'emploi	1 ml dans la gélose préalablement fondue au bain-marie et refroidie jusqu'à 45°C. Refroidissement immédiat dans l'eau froide après ensemencement	24 h à 37°C	colonies noires
<i>Salmonella</i>	pré-enrichissement: eau peptonée tamponnée enrichissement: bouillon sélénite-cystine isolement: gélose <i>Salmonella-Shigella</i> SS ou gélose Rambach	25 g dans 225 ml d'eau peptonée tamponnée 10 ml de milieu pré-enrichi dans 100 ml de bouillon sélénite-cystine étalement de 0,1 ml par épuisement sur la surface de la gélose SS ou Rambach	16 à 24 h (37°C) 48 h à 37°C 48 h à 37°C (SS) ou 24 h à 37°C (Rambach)	colonies incolores ou à centre noir (sur SS) ou colonies rose fuschia (sur Rambach)
Bactéries lactiques	gélose Man, Rogosa et Sharpe (MRS)	1 ml dans la masse	24 à 48 h (30°C)	colonies lenticulaires
Bactéries acétiques	milieu de Carr	0,1 ml en surface	24 à 48 h (30°C)	colonies vertes

Les cultures de ces souches ont été réalisées sur bouillon nutritif ordinaire, sauf pour *Clostridium sporogenes* cultivé sur bouillon de Rosenow et maintenu en anaérobiose par un bouchon de paraffine. Chaque souche a été testée d'une part, en phase exponentielle de croissance (incubation 24 heures à 37°C) et d'autre part, 3 jours après la phase exponentielle (incubation de 24 heures à 37°C puis 3 jours à 20°C). Ceci nous a permis d'apprécier l'influence de l'état physiologique du micro-organisme sur la sélectivité et la spécificité des méthodes testées. Toutes les manipulations sont répétées 3 fois afin d'exploiter statistiquement les résultats, avec réalisation d'un témoin positif (souche pure X à tester) ; d'une flore totale (constituée par le mélange de toutes les souches, y compris la souche X) et d'un témoin négatif (la flore totale excepté la souche X).

IV.4.1.2. Méthodes microbiologiques classiques utilisées

Elles consistent à ensemencer (en masse ou en surface) des suspensions (dilutions décimales) des souches étudiées dans des boîtes de Petri contenant des milieux gélosés stérilisés. La numération des colonies est faite après incubation des boîtes ensemencées dans des conditions spécifiques de température et de durée (tableau IV.3.)

Notons que les méthodes classiques de détermination de flore aérobie mésophile totale (FAMT), coliformes (COL) et levures et moisissures (LM) ont été uniquement appliquées aux souches pures, lors de l'étude comparative (phase France) et sur le poisson lors des campagnes A et B au Mali (l'investissement financier, important au début de l'étude, pour équiper le laboratoire à Mopti, nous a contraints à utiliser les méthodes classiques moins coûteuses). Par la suite, les "kits" rapides ont été utilisés pour l'évaluation de la qualité du poisson, en France (FAMT, COL et LM) et au Mali (FAMT, COL, LM et salmonelles). La numération d'anaérobies sulfito-réducteurs (ASR) et de bactéries lactiques et acétiques est effectuée par les méthodes classiques, uniquement au Mali.

IV.4.1.3. Méthodes microbiologiques nouvelles testées

- Pétrifilm (Société 3M Santé) : ce test est constitué d'un double feuillet ; le film inférieur sert de support à un milieu de culture et à un agent gélifiant. Le film supérieur est enduit d'un gel soluble à l'eau froide et d'un indicateur qui colore les colonies. Les deux films sont perméables, optimisant ainsi la diffusion de l'oxygène durant le développement des micro-organismes.

L'ensemencement est réalisé par dépôt de 1 ml de la suspension-mère ou d'une dilution décimale, au centre du film inférieur. Le film supérieur est alors rabattu et l'inoculum est réparti à l'aide d'un diffuseur plastique. L'eau contenue dans l'échantillon réhydrate les composants et forme entre les deux films, une gélose de 20 cm². Cette gélification s'obtient en 2 minutes.

Pour le Pétrifilm / flore totale, le milieu de culture utilisé est le PCA (Plate Count Agar), l'indicateur redox utilisé pour faciliter la numération des colonies est le chlorure de triphényltétrazolium (TTC); celui-ci vire au rouge lors de sa réduction par les micro-organismes. De plus, il diffuse lentement et n'inhibe pas la croissance des germes. Les colonies apparaissent rouges et sont comptées après une incubation de 48-72 heures à 30°C.

Le Pétrifilm / coliformes représente les mêmes caractéristiques que celui de la flore totale, avec les spécificités suivantes : le milieu de culture utilisé est le VRBL (gélose biliée lactosée au cristal violet et au rouge neutre). L'incubation dure 24 heures à 30°C (pour les coliformes totaux) ou à 44°C (pour les coliformes fécaux). Les colonies apparaissent rouges avec des bulles de gaz dues à la fermentation du lactose.

Le Pétrifilm / levures et moisissures est basé sur le même principe que les deux précédents. Il contient un milieu de culture de type OGA (gélose glucosée à l'oxytétracycline) ainsi que des antibiotiques (chloramphénicol et chlortétracycline) qui inhibent la croissance des bactéries contaminantes. La composition de l'agent gélifiant a été étudiée pour limiter les phénomènes d'envahissement. La numération des levures et des moisissures est facilitée par la présence d'un indicateur coloré, le 5 bromo- 4 chloro- 3- indoxyl- phosphate (BCIP) qui donne un précipité bleu en présence de phosphatase (enzyme produite majoritairement par les levures et les moisissures). Après 3 à 5 jours d'incubation à 20 ou 25°C, les levures forment de petites colonies bleu/vert ou blanchâtres, alors que les moisissures sont de taille plus importante et donnent des pigmentations noires, jaunes ou vertes, selon la moisissure considérée.

Notons que le Pétrifilm / levures et moisissures n'a pas fait l'objet de cette étude comparative entre méthodes classiques et nouvelles, étant donné qu'il n'était pas encore commercialisé au moment de la réalisation de cette étude. Il a cependant été utilisé dans la suite des travaux, suite à l'efficacité prouvée du Pétrifilm / flore totale et du Pétrifilm / coliformes.

• Test Tecra (*Vitek Systems, USA, commercialisé par la Société 3M Santé*) : basé sur une réaction immuno-enzymatique de type ELISA, il permet la détection des salmonelles grâce à l'utilisation d'anticorps hautement purifiés. Il se compose d'une microplaque constituée de cupules sécables les unes des autres, au fond desquelles sont fixés les anticorps spécifiques. Ce test nécessite les opérations préalables suivantes :

- pré-enrichissement dans de l'eau peptonée tamponnée (18-22 h à 37°C) ;
- enrichissement dans du bouillon sélénite-cystine (16 h à 37°C) ;
- post-enrichissement dans du bouillon M préchauffé à 37°C (16 h à 37°C) ;
- * "thermisation" (15 minutes à 100°C).

L'échantillon "thermisé" est alors introduit dans la plaque Tecra, et additionné de réactifs spécifiques. En 2 heures, la présence d'antigènes spécifiques de salmonelles dans l'échantillon analysé est indiquée par une coloration verte visible à l'oeil nu et évaluée grâce à un comparateur de couleur. Il faut signaler que ce kit facilite l'étape d'isolement par épuisement et d'éventuelles confirmations sur galeries API, mais il nécessite les différentes étapes classiques (citées plus haut dans ce paragraphe) d'enrichissement. D'ailleurs, jusqu'à présent, aucun test de détection des salmonelles ne permet de s'affranchir de ces étapes préliminaires, d'où la relativité de l'appellation "kit rapide".

• Microtest A (*Société France Organo Chimique*) : ce test est constitué d'une lame à double face quadrillée. La face claire contient de la gélose PCA (Plate Count Agar) et un indicateur coloré, le chlorure de triphényltétrazolium (TTC), pour la numération de la flore totale. La face foncée contient une gélose au malt pour la numération des levures et moisissures. La lame est trempée dans la suspension ou dilution à tester, puis elle est égouttée et replacée dans son boîtier pour incubation (48-72 h à 30°C). Les colonies des germes mésophiles (flore totale) sont colorées en rouge ; les levures sont rondes, de couleur beige ou blanche, et les moisissures apparaissent en forme de colonies de "poils" largement étalées. Le nombre de bactéries est évalué par comparaison à une table de référence livrée avec le kit.

• Microtest SR (*Société France Organo Chimique*) : ce test est constitué d'un tube contenant un milieu gélosé permettant la réduction du sulfite en H₂S. L'ensemencement consiste à tremper un capillaire dans la suspension ou dilution à analyser, à l'égoutter

légèrement sur du papier absorbant puis à l'enfoncer dans le tube gélosé qui sera bouché et incubé 48 h à 37°C. Le développement des sulfito-réducteurs est caractérisé par la formation de sulfure de fer noir. La coloration noire peut apparaître à n'importe quel endroit du tube. Son intensité dépend du degré de contamination. Les résultats ne sont pas quantitatifs mais approximatifs. L'utilisation de ce test est cependant assez délicate, surtout dans le cas de germes pathogènes, compte tenu des nombreuses manipulations du capillaire et du risque de contact avec la suspension microbienne analysée.

- Test Spectate (*May-Baker, Glasgow, Ecosse, commercialisé par les Laboratoires Humeau*) : le test est composé de 2 réactifs qui sont des mélanges de suspensions de latex rouge, bleu et vert. Chaque couleur correspond à une sensibilisation du latex avec un anticorps spécifique d'un groupe de *Salmonella*. Le test est réalisé sur les zones-test (cercles) d'une carte réactionnelle. Une goutte de chaque réactif est ajoutée à une goutte de la suspension à analyser (soit le bouillon d'enrichissement, soit une colonie remise en suspension dans une solution saline NaCl 0,9%). Le tout est mélangé avec un stick en bois et bien étalé dans la zone-test, puis agité sur un agitateur rotatif pendant 4 minutes. En présence de salmonelles, le latex sensibilisé avec l'anticorps spécifique au groupe de cette salmonelle va s'agglutiner avec apparition d'un croissant coloré et changement de la couleur de fond. Le test est également réalisé sur des témoins positifs (réactifs latex contenant des suspensions de bactéries mortes).

- Biocontrol 1-2 Test (*Biocontrol Systems Inc., USA, commercialisé par AES Laboratoires*) : ce test est une méthode qualitative de détection rapide des salmonelles mobiles dans les produits alimentaires. Il est constitué d'un dispositif à usage unique en matière plastique, composé de 2 chambres. La plus petite, ou chambre d'inoculation, contient un bouillon d'enrichissement sélectif au tétrathionate, additionné de vert brillant et de L-sérine. La plus grande, ou chambre de migration, contient un milieu semi-solide peptoné non sélectif. Les deux chambres sont reliées par une ouverture. La partie supérieure de la chambre de migration comporte un espace contenant des anticorps H polyvalents (flagellaires).

La réalisation du test consiste à ensemercer 0,1 ml du bouillon d'enrichissement à analyser et d'incuber le dispositif 24 h à 37°C. Cet inoculum va subir un enrichissement sélectif dans la chambre d'inoculation, puis les salmonelles mobiles présentes vont se déplacer à travers un milieu de mobilité non sélectif (chambre de migration) ; et enfin, elles seront immobilisées par les anticorps anti-H flagellaires. Cette immobilisation des

salmonelles aboutit au développement d'une bande de cellules ou "immunobande", visible à l'oeil nu, au sein du milieu de mobilité. La forme de l'immunobande est comparée à un témoin positif ou négatif.

- Millipore (Millipore Corporation) : L'échantillonneur Millipore est constitué de 2 membranes ; l'une extérieure est un filtre dont les pores ont un diamètre de 0,45 μm , et l'autre intérieure, est un tampon contenant le milieu nutritif. Un évent est incorporé à la partie supérieure arrière de la languette. Cette configuration permet d'aspirer par capillarité, 1 ml de la suspension ou dilution à analyser, à travers le filtre qui retient les micro-organismes à sa surface. Le tampon est ainsi réhydraté et le milieu de culture diffuse à travers les pores du filtre, fournissant alors aux micro-organismes les composés nécessaires à leur développement. L'échantillonneur ensemencé par aspiration capillaire est ensuite remis dans son boîtier plastique et mis à incuber à 30°C pendant 24 h (pour les coliformes), 48 h (pour la flore totale) et 72 h (pour les levures et moisissures). Le comptage des colonies est facilité par le quadrillage du filtre.

IV.4.2. Analyses de composition

Ces analyses (à l'exception de la teneur en eau) sont effectuées uniquement en France par manque d'appareillage adéquat au Mali.

- Teneur en eau

La teneur en eau est mesurée après séchage d'un broyat de poisson (environ 5 g) à 103°C, jusqu'à poids constant, en général pendant 24 heures (Batistuti *et al.*, 1991 ; Oreskovich *et al.*, 1992).

- Teneur en cendres

La teneur en cendres est déterminée par combustion d'un échantillon de 2 g à 900°C pendant 3 heures. Les cendres résultant de la combustion complète sont pesées. Pour le poisson frais, le broyat est pré-séché dans une étuve sous vide, afin d'éviter les projections dans le four et d'assurer une combustion complète de l'échantillon (AFNOR-V03720).

- Teneur en lipides

L'extraction des lipides est réalisée au moyen d'un appareil de soxhlet (chauffage à reflux) avec l'hexane comme solvant. Pour le poisson frais, le broyat est d'abord pré-séché sous vide car une forte teneur en eau gêne l'extraction des lipides. La prise d'essai (10 g) est pesée dans une cartouche d'extraction qui est fixée dans l'appareil puis ajustée à la fiole contenant l'hexane (300 ml). L'ensemble est chauffé à reflux pendant 6 heures, la matière grasse de l'échantillon est ainsi entraînée dans le solvant. Le mélange solvant/extrait lipidique est ensuite évaporé sous vide, à une température ne dépassant pas 30°C et la matière grasse récupérée est pesée. La teneur en lipides est alors calculée en pourcentage par rapport à la prise d'essai.

- Extraction de l'azote non protéique NPN (non proteic nitrogen)

Pour le poisson frais, 20 g de broyat sont mélangés avec 8 ml d'eau distillée et 12 ml d'acide trichloracétique (TCA) à 20% (m/v). Le mélange est agité pendant 15 minutes puis filtré. Le filtrat est alors ajusté à 40 ml avec de l'eau distillée. Pour le poisson séché, on utilise le même protocole d'extraction mais en mélangeant 5 g de broyat de poisson séché avec 20 ml d'eau distillée et 10 ml de TCA 20% (m/v).

Cet extrait trichloracétique permet d'une part, de doser l'azote non protéique NPN et d'autre part, de mesurer les indices de dégradation des matières azotées, à savoir l'azote basique volatil total (ABVT) et le test à l'acide trinitrobenzène sulfonique (TNBS).

- Dosage de l'azote total et de l'azote non protéique NPN

Le dosage d'azote total a été effectué sur du broyat de poisson frais et séché, et celui d'azote non protéique a été déterminé sur l'extrait trichloracétique NPN (cf. paragraphe précédent). L'appareil utilisé est le LECO-CHN 600 (Laboratoire d'Analyses Organiques du CIRAD). Le principe de la mesure est basé sur la combustion d'un échantillon (de poids connu) dans de l'oxygène (O₂) pur, à une température de 950°C environ. Les produits éventuels résultant de cette combustion sont le gaz carbonique (CO₂), la vapeur d'eau (H₂O), l'azote (N₂), des oxydes d'azote (NO_x) et des oxydes de soufre.

Les oxydes de soufre sont adsorbés sur de l'oxyde de calcium. Les gaz résultants sont mélangés dans un ballon tampon; une aliquote est alors prélevée de ce mélange et transportée par un gaz vecteur, l'hélium, dans un récipient contenant du cuivre chaud et un catalyseur permettant l'élimination de l'O₂ et la réduction des NO_x en N₂. Le CO₂ est éliminé par de la soude (NaOH), et la vapeur d'eau est éliminée par du perchlorate de magnésium. Le gaz restant est l'azote (N₂) qui est alors mesuré par conductivité thermique.

La cellule de mesure de l'azote est constituée d'un pont de Wheatstone parcouru par un courant et thermocontrôlé à $53 \pm 1^\circ\text{C}$ afin d'éviter les variations de température ambiante. Il est constitué de 2 filaments de référence et de 2 filaments de mesure, maintenus dans des conditions constantes de température, de débit et de pression. L'hélium est le gaz vecteur considéré comme référence dans ce pont, et toute variation de conductivité thermique (par rapport à l'hélium), due à la présence du gaz analysé (en l'occurrence l'azote) est détectée par les filaments de mesure. Ce signal est alors intégré et affiché en pourcentage de masse de l'échantillon analysé. Connaissant la teneur en eau de la prise d'essai, le résultat peut être aussi exprimé par rapport à la matière sèche.

Notons que pour le poisson frais, le broyat a été pré-séché sous vide jusqu'à une teneur en eau de 3 à 4%, pour une combustion plus efficace de l'échantillon et pour une manipulation plus pratique.

IV.4.3. Analyses physico-chimiques

- Mesure de l'activité de l'eau a_w (France)

L'activité de l'eau (a_w) du broyat de poisson est mesurée avec un hygromètre Thermoconstanter Novasina, après étalonnage de l'appareil avec une gamme de sels d' a_w connus. L'échantillon (2 à 3 g) est placé dans une capsule qui est enfermée de façon étanche dans une chambre de mesure stabilisée à 30°C (Kitic *et al.*, 1986). Le produit se met ainsi en équilibre avec l'humidité relative de l'air de la chambre de mesure. La sonde électronique se trouvant dans la chambre de mesure saisit la valeur de l' a_w et la transmet par module d'amplification et affichage digital. La température de 30°C a été choisie comme température de mesure car elle correspond à celle moyenne de stockage du poisson séché au Mali.

- Mesure du pH (phases France et Mali)

Le pH est déterminé à l'aide d'un pHmètre Bioblock Scientific 93313 avec affichage digital et compensation automatique de la température. 5 g de broyat sont mis en suspension dans 50ml d'eau distillée (Ohashi *et al.*, 1991), et agités pendant 2 minutes avant mesure du pH.

Ce protocole a été adopté après plusieurs essais, notamment de la technique des dilutions consistant en la mesure du pH après addition au broyat d'une quantité constante d'eau distillée, à un intervalle régulier de temps. Nous n'avons pas pu obtenir une bonne reproductibilité avec cette technique. De plus, il est important d'agiter la suspension continuellement car la sédimentation du broyat entraîne une diminution du pH et fausse la mesure. Le temps d'agitation avant mesure doit également être respecté pour assurer l'homogénéité des valeurs.

L'électrode pour solides serait idéale pour la mesure du pH du poisson frais, mais ne serait pas adéquate pour le poisson séché ; d'autre part, son coût élevé pourrait empêcher son utilisation au Mali.

- Mesure de la couleur (phase France)

Cette mesure est effectuée au moyen d'un chromamètre Minolta CR100 après calibrage de l'appareil sur un solide blanc de référence (vitrolite). La tête de mesure du chromamètre (diamètre total de 60 mm, ouverture du faisceau réfléchi de 8 mm) contient une lampe à xénon pulsé fournissant un éclairage diffus dont la lumière réfléchie s'effectue sous un angle constant, la normale par rapport à l'échantillon. Les lectures provenant de la tête de mesure sont intégrées au moyen d'un micro-processeur puis affichées sur un cadran à cristaux liquides.

Le chromamètre offre 4 modes de mesure: "Lab", "Yxy", "LCH" et "Munsell". Nous en avons choisi deux: "Lab" et "Munsell". Le système "Lab" se rapproche davantage de nos perceptions visuelles des couleurs. "L" est la luminance ; "a" et "b" sont des coordonnées chromatiques correspondant respectivement à l'axe vert/rouge (-a ; +a) et à l'axe bleu/jaune (-b ; +b).

Le système de notation "Munsell" identifie la couleur au moyen de 3 attributs: la teinte ou hue (H), la luminosité ou value (V) et la saturation ou chroma (C). La teinte (H) indique la place d'une couleur dans un cercle chromatique de 100 teintes régulièrement espacées. La luminosité (V) indique le degré de clarté ou

d'assombrissement d'une couleur par rapport à une gamme de gris neutres s'étendant du noir au blanc absolu. La saturation (C) indique la force de la couleur, c'est-à-dire l'écart d'une teinte donnée par rapport au gris neutre de même luminosité.

Ainsi, les échelons "Munsell" de teinte, luminance et saturation peuvent être visualisés sous la forme d'un espace coloré euclidien, tridimensionnel, appelé solide des couleurs. Il est aisé de convertir le système "Lab" en système "Munsell" en utilisant l'équation $C = \sqrt{a^2 + b^2}$.

La couleur est mesurée sur un poisson séché mis en équilibre avec une solution saturée de NaCl ($a_w = 0,75$) à 30°C, afin d'assurer une teneur en eau homogène pour tous les échantillons. Le résultat est la moyenne de 8 à 10 mesures effectuées en différents points du poisson, côté peau et côté chair.

IV.4.4. Analyses biochimiques

Les analyses biochimiques décrites ci-dessous sont toutes effectuées dans la phase de travail réalisée en France. Une indication (entre parenthèses) est donnée pour celles effectuées également au Mali.

- Mesure de la couleur des composés solubles dans l'acide acétique (acetic acid soluble colour AASC) (phases France et Mali)

Cette méthode consiste en la solubilisation dans l'acide acétique glacial, de pigments héminiques (myoglobine et dérivés) résultant de l'oxydation des lipides. Elle a été appliquée sur du poisson salé-séché en Indonésie (Smith *et al.*, 1990) ; sa simplicité en fait un test facilement applicable sur le terrain au Mali.

1,5 g de broyat de poisson (frais ou séché) sont mis en contact avec 50 ml d'acide acétique glacial, pendant 2 heures, puis l'ensemble est filtré sur papier Whatman, et l'absorbance du filtrat est mesurée à 400 nanomètres contre un blanc ne contenant que de l'acide acétique glacial.

$$\text{AASC} = \text{absorbance à 400nm} \times \frac{50 \text{ ml CH}_3\text{COOH glacial}}{1,5 \text{ g broyat de poisson}}$$

- Analyse des acides organiques par chromatographie liquide à haute pression (HPLC)

Cette analyse a été effectuée en France sur des échantillons de poisson traditionnellement fermenté et séché au Mali, ainsi que sur un témoin séché en France, sans fermentation préalable (cf. V.2.8.).

- Protocole de préparation de l'échantillon avant HPLC

5 g de broyat de poisson (séché au Mali) sont mélangés à 20 ml d'eau distillée puis soumis à une agitation magnétique pendant 1 heure à température ambiante (20 à 25°C). Le mélange est ensuite laissé à 4°C pendant 24 heures afin d'assurer une extraction maximale ; (le bécher contenant le mélange est bouché pendant l'extraction avec du papier aluminium afin d'éviter des pertes éventuelles d'acides organiques volatils). Puis le mélange est filtré successivement sur papier Whatman et sur filtre Millipore de 0,45 µm avant analyse par HPLC. L'intégration du chromatogramme obtenu donne la concentration des acides organiques (en g% MS).

Un autre protocole d'extraction a été également essayé. Ce dernier consiste à mélanger 5 g de broyat de poisson avec 45 ml d'eau distillée, sous agitation magnétique pendant 30 minutes. Le tout est filtré sur papier Whatman puis additionné d'acide perchlorique HClO_4 0,5N, à raison d'1 volume de filtrat pour 2 volumes de HClO_4 (Nassos *et al.*, 1984). Ce nouveau mélange est agité et homogénéisé pendant 10 minutes puis doublement filtré sur papier Whatman et sur filtre Millipore 0,45 µm avant injection. L'addition de HClO_4 a pour but de précipiter les protéines, ce qui pourrait favoriser l'extraction aqueuse des acides organiques; mais ce protocole n'a pas donné de résultats satisfaisants par rapport au premier. En fait, il a conduit à des quantités sous-estimées d'acides organiques détectés et à la sortie d'un grand pic à faible temps de rétention. Ceci est probablement dû à l'interférence du HClO_4 , soit avec l'éluant, soit avec les insecticides utilisés lors du séchage du poisson au Mali. Nous avons donc adopté le premier protocole décrit ci-haut pour le dosage des acides organiques du poisson traditionnellement transformé au Mali.

- Protocole opératoire de l'analyse HPLC

Le dosage des acides organiques du poisson séché au Mali a été effectué selon une méthode analytique par HPLC permettant la séparation et la quantification simultanée des

acides organiques et alcools. Les différents composés recherchés ont été séparés sur une colonne Aminex HPX 87H (Biorad) appropriée pour le dosage des acides organiques. Il s'agit d'un copolymère de styrène et de divinylbenzène fonctionnalisé par des groupements NH_2 . Le dosage est effectué au moyen d'un appareillage modulaire, constitué d'une pompe LDC Constametric 3200, d'une enceinte thermostatée Jones Chromatography (Touzart Matignon) et d'un détecteur réfractométrique Philips PU 4026 en sortie de colonne. La chaîne HPLC est équipée d'un système d'intégration informatisé Chroma (Société Biosystème). Les conditions opératoires de la chromatographie sont les suivantes :

- * solvant/éluant : acide sulfurique 6 mM
- * débit de l'éluant : $0,8 \text{ ml} \times \text{min}^{-1}$
- * pression : 800 à 900 psi ou mégapascal
- * volume injecté : 20 microlitres
- * géométrie de la colonne : $300 \times 7,8 \text{ mm}$
- * température de la colonne : 65°C

• Test à l'acide trinitrobenzène sulfonique (TNBS)

Ce test est un indice de protéolyse par réaction du TNBS (ou acide 2,4,6, trinitrobenzène sulfonique) avec les groupements aminés ($-\text{NH}_2$) libres et formation d'un complexe coloré dont l'absorbance est lue par spectrophotométrie. Il est effectué sur le NPN ou azote non protéique. L'indice TNBS est proportionnel au degré de protéolyse ; ce protocole a été utilisé dans le cas du lait (Mc Kellar, 1981).

Réactifs:

- * solution tampon de borate de potassium 1 M (pH 9,2) préparée comme suit:

une solution 1 M d'acide borique est ajustée à pH 9,2 par addition d'hydroxyde de potassium 20% (m/v). Un léger chauffage permet la dissolution complète avant d'ajuster le volume désiré,

- * solution aqueuse 5 mM de TNBS (à préparer extemporanément)
- * solution aqueuse 18 mM de sulfite de sodium et 2 M de dihydrogénophosphate de sodium (à préparer extemporanément)
- * gamme étalon de glycine (la glycine étant prise comme le composé aminé de référence), préparée à partir d'une solution-mère aqueuse de glycine 1 M, en prélevant respectivement 0,02 - 0,04 - 0,08 et 0,12 ml et en les complétant à 100 ml avec de l'eau distillée. Cette gamme étalon contiendra alors respectivement 0,2-0,4-0,8 et 1,2 micromoles de glycine par ml de solution.

Mode opératoire:

Le NPN (ou extrait trichloracétique du poisson) est préalablement dilué 25 fois dans une solution d'acide trichloracétique 5% (m/v) ; (pour les échantillons de poisson séchés au Mali, le NPN a été dilué 100 fois). A 0,2 ml de cet extrait NPN dilué, ajouter 2 ml de la solution tampon 1 M de borate de potassium, puis 0,8 ml de la solution 5 mM de TNBS. Mélanger et garder à 25°C pendant exactement 30 minutes, à l'abri de la lumière.

Ajouter ensuite 0,8 ml de la solution mixte 18 mM de sulfite de sodium + 2 M de dihydrogénophosphate de sodium. L'absorbance est mesurée à 420 nm contre un blanc contenant du TCA 5% (m/v) et préparé dans les mêmes conditions. L'absorbance relative à l'échantillon de poisson est comparée à celles de la gamme étalon de glycine ayant subi le même protocole opératoire.

Le résultat est exprimé en micromoles de glycine/ ml de NPN dilué puis converti en micromoles de glycine/ g de broyat de poisson (MB et MS).

Dosage de l'azote basique volatil total (ABVT) (France et Mali)

Ce dosage (Conway, 1968) est basé sur l'extraction des bases azotées volatiles par une solution d'acide trichloracétique, puis le déplacement de ces bases par du carbonate de potassium, leur absorption par de l'acide borique et enfin leur dosage par de l'acide chlorhydrique. Le matériel utilisé pour ce test est la cellule standard de Conway, constituée d'une cellule circulaire en verre, de diamètre extérieur de 67 mm et de hauteur de 10 mm, et renfermant en son centre une petite cellule circulaire de diamètre extérieur de 40 mm et de hauteur de 5 mm.

Réactifs:

- la solution d'acide borique avec indicateur coloré est préparée par dissolution de 10 g d'acide borique dans 200 ml d'alcool éthylique à 95% et 700 ml d'eau puis addition de 10 ml d'indicateur "mixte" contenant 33 mg de vert de bromocrésol et 66 mg de rouge de méthyle dans 100 ml d'alcool éthylique à 95%. Le volume est ajusté à 1 litre par addition d'eau distillée
- solution saturée de carbonate de potassium (environ 112 g/100 ml)
- solution d'acide chlorhydrique 0,01N
- vaseline (pour graisser le couvercle de la cellule de Conway).

Mode opératoire:

Introduire dans la partie centrale de la cellule de Conway 1 ml de la solution d'acide borique. Introduire ensuite dans la couronne de la cellule 1 ml de l'extrait trichloracétique NPN (cf. IV.4.2.) puis 1,5 ml d'eau distillée.

Faire glisser doucement sur la cellule, la partie rodée du couvercle, préalablement enduite de vaseline, et laisser un petit espace ouvert par lequel est rapidement introduit dans la couronne de la cellule, 1 ml d'une solution saturée de carbonate de potassium. Le couvercle est vite fermé et de façon étanche. Par un mouvement de rotation, mélanger le contenu de la couronne en prenant soin de ne pas le laisser déborder dans la partie centrale de la cellule.

Incuber 2 heures à 37°C ou laisser 12 heures à température ambiante (20 à 25°C). Le contenu de la partie centrale de la cellule, rose au départ, vire au vert et il est alors titré par une solution d'acide chlorhydrique 0,01N jusqu'au retour à la coloration rose.

Sachant que 1 ml de HCl 0,01N correspond à 0,14 mg d'azote, le volume versé de HCl permet de déterminer l'ABVT du poisson. Celui-ci est exprimé en mg d'azote/100 g de broyat de poisson (MB et MS).

Notons que l'ABVT est un critère très utilisé dans de nombreux pays tropicaux (Inde, pays d'Asie) pour l'évaluation de la qualité du poisson.

- Indice de peroxyde

L'indice de peroxyde est une mesure de l'oxydation des lipides. Il est exprimé en milliéquivalents d'oxygène actif par kg de matière grasse, pouvant oxyder l'iodure de potassium, en présence d'acide acétique et de chloroforme. L'iode libérée est titrée en retour par une solution aqueuse de thiosulfate de sodium (Paquot, 1979).

Réactifs:

- chloroforme de qualité analytique
- acide acétique cristallisable (ou glacial) de qualité analytique. Ces deux réactifs subissent au préalable un barbotage d'azote afin de les débarrasser de l'oxygène dissous.
- solution aqueuse saturée d'iodure de potassium, préparée extemporanément (3 g de KI dans 2 ml d'eau distillée)
- solution aqueuse de thiosulfate de sodium 0,01N
- thiodène (indicateur d'iodométrie)

Mode opératoire:

L'analyse se fait sur la matière grasse extraite à laquelle sont ajoutés 10 ml de chloroforme ; l'ensemble est agité rapidement. Ensuite, on ajoute respectivement 15 ml d'acide acétique cristallisable (glacial) puis 1 ml d'une solution aqueuse saturée d'iodure de potassium. Le flacon contenant le mélange est rebouché aussitôt et agité pendant 1 minute puis gardé à l'obscurité et à température ambiante (20 à 25°C) pendant exactement 5 minutes.

75 ml d'eau distillée sont enfin ajoutés et le tout est agité vigoureusement, pour bien homogénéiser l'émulsion constituée par les particules grasses et l'eau. On ajoute alors du thiodène (indicateur qui colore l'émulsion en bleu) puis on titre l'iode libérée avec une solution aqueuse 0,01N de thiosulfate de sodium (virage de la couleur du bleu au blanc). Un essai à blanc est effectué pour chaque détermination.

L'indice de peroxyde est exprimé par :
$$IP = \frac{(V - V_0) \times N \times 1000}{PE}$$

où : V et V_0 sont les volumes de thiosulfate de sodium utilisés respectivement pour le titrage de l'échantillon et du blanc ; PE est la prise d'essai (matière grasse) et N est la normalité de la solution de thiosulfate de sodium.

- Indice d'acide thiobarbiturique (TBA) (phases France et Mali)

Ce test est un indice de rancidité basé sur la réaction de l'acide thiobarbiturique avec l'aldéhyde malonique (l'un des produits ultimes de l'oxydation de la matière grasse) pour former un complexe rose mesurable par spectrophotométrie (protocole IFREMER légèrement modifié).

Réactifs:

- solution d'acide trichloracétique 7,5% (m/v) contenant 0,1% de propylgallate (PG) et 0,1% d'EDTA (sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique). Le propylgallate est préalablement dissous dans de l'alcool éthylique à 95%)
- solution aqueuse d'acide thiobarbiturique 0,02 M
- solution 2×10^{-5} M de malondialdéhyde bis diéthylacétal préparée de la façon suivante : peser 2,271 g de malondialdéhyde que l'on dissout d'abord dans 25 ml d'éthanol à 95% avant de compléter à 100 ml avec la solution d'acide trichloracétique TCA (contenant du PG et de l'EDTA). Faire une dilution au 1/100 ème de cette solution puis une seconde au 1/50 ème, toujours dans la solution TCA+PG+EDTA, afin d'obtenir une solution finale à 2×10^{-5} M qui sera utilisée pour la gamme étalon.

Remarque: Le propylgallate joue le rôle d'un anti-oxydant qui diminue le nombre de radicaux libres produits lors de l'oxydation des acides gras insaturés. L'EDTA est un agent complexant des métaux qui catalysent la phase d'initiation de l'oxydation des lipides. Ainsi, l'addition de ces 2 composés à la solution trichloracétique permet d'éviter des interférences dues à une oxydation supplémentaire pouvant avoir lieu en cours de réalisation du test TBA.

Mode opératoire:

La prise d'essai ou broyat de poisson (10 g pour le frais et 5 g pour le séché) est homogénéisée avec 100 ml de la solution trichloracétique TCA+PG+EDTA pendant 1 heure puis le tout est filtré.

5 ml de ce filtrat sont alors ajoutés à 5 ml d'une solution d'acide thiobarbiturique 0,02 M ; l'ensemble (contenu dans un tube bouché hermétiquement) est porté au bain-marie bouillant pendant 40 minutes puis refroidi immédiatement. Au cours du chauffage, le contenu du tube devient trouble en raison de la formation de chloroforme qui se forme dans le milieu réactionnel. Un tube clair indique un mauvais bouchage du tube, suite à l'évaporation du chloroforme.

Après un refroidissement de 10 minutes (Boles et Parrish Jr., 1990), ajouter 4 ml de méthanol et agiter, d'abord doucement afin d'éviter une surpression dans le tube, puis vigoureusement pour dissoudre le chloroforme. En cas d'apparition massive de bulles, le tube est dégazé aux ultrasons.

Enfin, l'absorbance est mesurée à 532 nm contre un blanc contenant un mélange de 5 ml de la solution TCA+PG+EDTA et 5 ml de la solution d'acide thiobarbiturique 0,02 M, et traité dans les mêmes conditions que les échantillons. L'absorbance de l'échantillon est alors comparée à celle d'une gamme étalon préparée à partir de la solution 2×10^{-5} M de malondialdéhyde (tableau IV.4.)

La droite d'étalonnage donne la concentration en malondialdéhyde contenue dans l'échantillon analysé de poisson. On peut alors exprimer l'indice thiobarbiturique en micromoles ou en milligrammes de malondialdéhyde par kg de broyat de poisson.

Tableau IV.4. Gamme étalon de malondialdéhyde (test TBA)

Micromole de malondialdéhyde $\times 10^{-2}$	0	1	2	4	6	8	10
Solution 2×10^{-5} M (ml)	0	0,5	1	2	3	4	5
Solution TCA+PG+EDTA (ml)	5	4,5	4	3	2	1	0
Solution TBA 0,02 M (ml)	5	5	5	5	5	5	5
Bain-marie bouillant 40 min. Refroidir							
Méthanol (ml)	4	4	4	4	4	4	4
Agiter. Lecture à 532 nm							

• Dosage de l'hypoxanthine

Le dosage de l'hypoxanthine (produit du catabolisme des nucléotides du poisson) est un indice de fraîcheur du poisson. Il est basé sur l'oxydation de l'hypoxanthine par la

xanthine oxydase et sa transformation en acide urique qui décolore le 2,6 dichlorophénol indophénol (DIP) bleu. Cette réaction enzymatique est suivie colorimétriquement par mesure de la diminution de l'absorbance du mélange hypoxanthine/enzyme en fonction du temps (Jahns *et al.* , 1976)

Réactifs:

- * solution d'acide perchlorique HClO_4 0,6 N froid (conservée au frigo et utilisée froide)
- * solution d'hydroxyde de potassium à 20% (m/v)
- * solution tampon phosphate 0,17 M (pH 7,6) préparée en mélangeant deux solutions 0,17 M d'hydrogénophosphate de potassium (K_2HPO_4) et de dihydrogénophosphate de potassium (KH_2PO_4)
- * 2,6 dichlorophénol indophénol (DIP), à raison de 23 microgrammes/ ml de solution tampon phosphate 0,17 M - pH 7,6
- * xanthine oxydase (Sigma X-1875 ou EC 1.1.3.22), à 0,05 U/ml de solution tampon phosphate 0,17 M - pH 7,6
- * solution-mère d'hypoxanthine à 25 microgrammes/ ml d'eau distillée

Mode opératoire:

Mélanger la prise d'essai ou broyat de poisson (10 g pour le frais et 2,5 g pour le séché) avec 40 ml d'acide perchlorique HClO_4 0,6 N froid, sous agitation magnétique, pendant 30 minutes, puis filtrer le tout sur papier Whatman. Ajuster le volume du filtrat à 50 ml avec du HClO_4 0,6 N froid.

Prélever 25 ml de ce filtrat et ajuster leur pH à 7,6 par addition d'hydroxyde de potassium 20% (m/v). Filtrer de nouveau pour éliminer le perchlorate de potassium KClO_3 qui précipite.

Ajouter au nouveau filtrat 3 ml de tampon phosphate 0,17 M - pH 7,6 et compléter le volume à 50 ml avec de l'eau distillée.

0,1 ml de cette solution contient 10 mg de poisson frais et 2,5 mg de poisson séché.

A 0,1 ml de cet extrait de poisson, ajouter 1 ml de DIP, puis 0,9 ml d'eau distillée. Mélanger le tout et le placer dans une cuve de spectrophotomètre. La mesure est initiée

par addition de 0,5 ml d'une solution de xanthine oxydase (0,05 U/ ml de tampon phosphate 0,17 M - pH 7,6). Mélanger rapidement et noter l'absorbance de départ (10 secondes environ après le mélange), puis suivre la diminution de l'absorbance (décoloration progressive de la solution bleue de départ), à des intervalles de 30 secondes, pendant 1,5 minutes. Les absorbances sont mesurées contre un blanc contenant uniquement de l'eau distillée.

Suivre également la diminution de l'absorbance d'une gamme étalon préparée à partir d'une solution-mère d'hypoxanthine à 25 microgrammes/ ml d'eau distillée (tableau IV.5.). Pour chaque concentration en hypoxanthine de la gamme étalon, tracer la droite de la diminution de l'absorbance en fonction du temps. La pente de cette droite représente la vitesse initiale de la réaction et est donc proportionnelle à la quantité d'hypoxanthine contenue dans cette solution. La comparaison de la pente (vitesse de réaction) de l'échantillon de poisson à celles de la gamme étalon permet de calculer la quantité d'hypoxanthine contenue dans le poisson et de l'exprimer en microgrammes ou en micromoles de Hx/ g de broyat de poisson (MB et MS).

Tableau IV.5. Gamme étalon d'hypoxanthine

Tube	1	2	3	4	5
Quantité d'hypoxanthine (microgrammes)	1,56	3,125	6,25	12,5	25
Solution-mère d'hypoxanthine (ml)	0,0625	0,125	0,25	0,5	1
DIP (ml)	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	0,9375	0,875	0,75	0,5	0
Mélanger. Au temps 0, addition de					
Xanthine oxydase 0,05 U (ml)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

- Taux d'extraction et de solubilité des protéines

Le taux d'extraction et de solubilité des protéines est évalué par leur dosages selon les méthodes de Bradford et de Gornall (Biuret modifié).

- Méthode de Bradford (Bradford, 1976)

Cette méthode est basée sur la formation, en milieu acide, d'un complexe protéine/colorant dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en protéines. Elle a l'avantage d'être rapide, de manipulation aisée et d'éviter les interférences souvent rencontrées dans d'autres dosages. L'extraction des protéines est réalisée en mélangeant 0,2 g de broyat de poisson (frais ou séché) avec 25 ml de tampon Tris 0,1 M, pH 7,8 à 8. Le mélange est gardé sous agitation pendant 4 heures à température ambiante, puis centrifugé à 3000 g, pendant 15 minutes, à température ambiante. Le surnageant est ensuite filtré sur papier Whatman n° 1 et analysé le même jour.

Réactifs:

- tampon Tris 0,1 M tamponné dans HCl 1 N jusqu'à pH 7,8 - 8
- colorant Bio-Rad (bleu de Coomassie) concentré (contenant 55% d'acide phosphorique et 15% de méthanol), à diluer 5 fois dans l'eau distillée et à filtrer avant utilisation
- solution-mère de sérum albumine bovine (SAB) à 1 g/l dans du tampon Tris. La SAB, considérée comme la protéine de référence, est utilisée dans la gamme étalon.

Mode opératoire:

L'extrait de poisson est dilué dans le tampon Tris (milieu d'extraction) à raison de 2 fois pour le frais et 10 fois pour le séché. En prélever alors 0,1 ml, y ajouter 5 ml du colorant Bio-Rad (préalablement dilué 5 fois dans de l'eau distillée et filtré). Mélanger et laisser reposer 5 minutes, puis mesurer l'absorbance à 595 nm contre un blanc contenant 0,1 ml de tampon Tris et 5 ml de colorant. La coloration est stable pendant 1 heure.

Le même test est effectué sur une gamme étalon constituée de dilutions (dans le tampon Tris) à partir d'une solution-mère de sérum albumine bovine à 1 g/l dissoute dans le tampon Tris (tableau IV.6.)

A 0,1 ml de chaque dilution, ajouter 5 ml du colorant Bio-Rad (dilué 5 fois et filtré). Attendre 5 minutes puis mesurer l'absorbance à 595 nm. L'absorbance de l'échantillon de poisson, comparée à celles de la gamme étalon, permet de calculer la teneur en protéines (en g% MS) du broyat de poisson .

Tableau IV.6. Gamme étalon de sérum albumine (test de Bradford)

Tube	1	2	3	4	5	6
Sérum albumine à 1g/l dans le tampon Tris (ml)	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tampon Tris (ml)	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0

- Méthode de Gornall (ou micro-biuret) (Gornall *et al.*, 1949)

Ce dosage est basé sur la formation de chélates entre le cuivre et les liaisons peptidiques, s'accompagnant du développement d'une coloration bleue mesurable à 540 nm. Pour cette méthode, l'extraction des protéines se fait dans 3 milieux différents:

- NaCl 8 g/l (~ 0,14 M) (solution à faible force ionique qui, tout comme l'eau distillée, extrait les protéines sarcoplasmiques non dénaturées)
- NaCl 35 g/l (~ 0,6 M) (solution à force ionique élevée pouvant extraire les protéines sarcoplasmiques et myofibrillaires non dénaturées)
- NaOH 0,5 N, milieu d'extraction pouvant extraire le maximum de protéines, en désagréant et dénaturant les protéines sarcoplasmiques et les myofibrillaires (Hashimoto *et al.*, 1979).

L'extraction des protéines consiste à mélanger 2 g de broyat de poisson (frais ou séché) et 40 ml du milieu d'extraction. Le mélange est gardé sous agitation, pendant 1 heure, à température ambiante, puis il est centrifugé à 250 g, pendant 15 minutes, à 4°C. Le surnageant est ensuite filtré sur papier Whatman n° 1 et gardé à 4°C pendant 12 heures avant analyse (Roussel, 1988).

Réactifs:

- solution aqueuse de sérum albumine bovine (SAB) à 1% (m/v)
- solution aqueuse de chlorure de sodium 8 g/l (~ 0,14 M)
- solution aqueuse de chlorure de sodium 35 g/l (~ 0,6 M)

- * solution aqueuse d'hydroxyde de sodium 0,5 N

- * réactif de Gornall préparé comme suit:

sulfate de cuivre	1,5 g
eau distillée	q.s.p. 200 ml. Mélanger puis ajouter
tartrate double de potassium et de sodium	6 g
pastilles de soude	30 g
eau distillée	q.s.p. 1 litre

Mode opératoire:

Dans le cas de l'extraction par NaOH 0,5 N, l'extrait de poisson est préalablement dilué 5 fois dans le milieu d'extraction. Les extraits de poisson dans les solutions salines (NaCl 8g/l et 35 g/l) ne subissent pas de dilution. A 1 ml d'extrait dilué de poisson, ajouter 4 ml de réactif de Gornall. Mélanger, garder à l'obscurité pendant 30 minutes, puis mesurer l'absorbance à 540 nm contre un blanc contenant 1 ml du milieu d'extraction et 4 ml du réactif de Gornall, et traité dans les mêmes conditions opératoires.

Tableau IV.7. Gamme étalon de sérum albumine (test de Gornall)

Tube	Blanc	1	2	3	4	5
Solution aqueuse de sérum albumine 1% (m/v) (ml)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Milieu d'extraction (NaCl 8 g/l ou NaCl 35 g/l ou NaOH 0,5 N) (ml)	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Réactif de Gornall (ml)	4	4	4	4	4	4

Effectuer le même test sur des dilutions obtenues à partir de la solution-mère aqueuse de sérum albumine SAB (1% m/v) (tableau IV.7.)

La comparaison de la gamme étalon et des échantillons de poisson permet de déterminer la teneur en protéines en g% (MB et MS) du broyat de poisson.

RESULTATS ET DISCUSSION

Rapport-Gratuit.com

V. RESULTATS ET DISCUSSION

V.1. ETUDES PRELIMINAIRES

V.1.1. Etude comparative microbiologique

• L'étude comparative des méthodes classiques et des "kits" rapides en microbiologie nous a permis de sélectionner certains tests utilisés par la suite (en France et/ou au Mali) (tableau V.1.). Les résultats sont les moyennes de 3 répétitions. Seuls les cas les plus intéressants sont exploités statistiquement selon la méthode de Darmais (comparaison de moyennes pour les petits échantillons).

- La détection des salmonelles nécessite toujours plusieurs étapes d'enrichissement qui durent en moyenne 48 heures. Ensuite, suivant les tests rapides utilisés, le résultat est donné en 24 h (test AES), en 2 h (test Tecra) ou en 5 minutes (test Spectate).

- L'identification des salmonelles sur milieu SS (*Salmonella* / *Shigella*) n'est pas directe ; en effet, la reconnaissance des colonies observées (à centre noir ou coloré) exige des tests supplémentaires. A ce sujet, l'utilisation d'une référence positive (*Salmonella* pure) nous a beaucoup aidés. L'identification des colonies de salmonelles sur un milieu d'isolement sélectif est largement corrélée à l'habitude de l'utilisateur. L'appréciation de l'aspect "caractéristique" des colonies a en fait une part non négligeable de subjectivité (Humbert *et al.*, 1989).

Le milieu Rambach utilisé pour l'isolement de *Salmonella* n'a pas fait l'objet de l'étude comparative entre méthodes classiques et nouvelles car il n'était pas encore commercialisé lors de la réalisation de cette étude. Vu son rapport qualité/prix, il semble intéressant pour du travail de terrain ; il permet de différencier *Salmonella* des autres colonies pouvant interférer sur les milieux d'isolement classiques (Hektoën, Vert Brillant, Mac Conkey, SS, XDL). En effet, sur la gélose Rambach, les colonies de *Salmonella* sont colorées en rouge fuschia, suite à la métabolisation d'un marqueur spécifique, le propylène glycol. De plus, l'addition de bétagalactosidase à la gélose permet de déceler l'interférence de *Proteus*, d'*Escherichia coli* et de *Citrobacter*. En effet, les

Tableau V.1. Comparaison de tests microbiologiques classiques et "rapides"

Germes recherchés	Méthodes classiques	"Kits" rapides	Tests sélectionnés
Flore aérobie mésophile totale	Plate Count Agar (PCA)	Millipore Pétrifilm Microtest A	Millipore Pétrifilm
Coliformes	Gélose lactosée au désoxycholate (DCL) Gélose lactosée bilée au cristal violet (VRBL)	Millipore Pétrifilm	Millipore Pétrifilm
Levures et Moisissures	Potato dextrose agar (PDA)	Millipore Microtest A	Millipore Pétrifilm (non testé dans cette étude mais utilisé par la suite)
Anaérobies sulfito-réducteurs	Gélose viande-foie (VF) (tubes Pasteur prêts à l'emploi)	Microtest SR	Tubes (VF) Pasteur prêts à l'emploi
<i>Salmonella</i>	pré-enrichissement (eau peptonée tamponnée) enrichissement (bouillon sélénite-cystine) isolement (gélose <i>Salmonella-Shigella</i> SS)	Tecra Spectate Biocontrol 1-2	Tecra méthode classique avec isolement sur milieu Rambach (testé ultérieurement)



colonies de *Proteus* sont incolores, celles d'*Escherichia coli* sont bleues et celles de *Citrobacter* sont violettes.

- La mise en oeuvre du Biocontrol 1-2 test n'a pas présenté de problèmes particuliers. Par contre, sa lecture s'est révélée souvent ambiguë. En effet, l'"immuno-bande" liée à la présence de salmonelles ne présentait pas toujours la forme caractéristique préconisée par le protocole.

- Le test Tecra est simple d'emploi et fiable dans ses résultats. La lecture se fait à l'oeil nu, l'utilisation d'un témoin positif élimine toute erreur. De plus, les échantillons à tester sont thermisés au préalable, leur manipulation ne présente pas les risques rencontrés dans les autres techniques. Ce test est facilement applicable sur le terrain et a été adopté par la suite pour le travail réalisé au Mali. Notons que ce test a reçu l'approbation de l'AOAC (Association of Official Analytical Chemists) pour son utilisation tous produits.

- Le test Spectate est simple d'emploi et sa réponse est la plus rapide, mais il donne beaucoup de réponses faussement positives. Son application aux diverses souches prises individuellement a montré que *Saccharomyces cerevisiae* et *Escherichia coli* interfèrent dans ce test en conduisant à des agglutinations et des colorations faussement positives.

- Pour les anaérobies sulfito-réducteurs (ASR), l'utilisation des tubes prêts à l'emploi (gélose viande-foie VF) est très simple. La lecture du résultat est facile et quantitative. Ce test a été utilisé ultérieurement. Le microtest ASR présente deux inconvénients : d'une part, sa manipulation risquée (inoculation au moyen de capillaires préalablement égouttés sur du papier absorbant, ce qui favorise les contaminations) et d'autre part, son résultat en tout ou rien (la présence d'ASR est visualisée par une coloration noire sans possibilité de quantification).

- La numération des coliformes est aisée quelle que soit la méthode utilisée. Les tests rapides Millipore et Pétrifilm sont comparables aux méthodes classiques. Le Pétrifilm/coliformes a également été comparé par la société 3M Santé avec la méthode traditionnelle au désoxycholate lactose (DCL). Les résultats sont répétables et présentent un coefficient de corrélation supérieur à 0,80. Une légère sous-estimation des résultats par le Pétrifilm semble due à la présence de bactéries non coliformes (*Enterobacter*, *Serratia*) qui acidifient le lactose sans production de gaz ; elles sont cependant comptabilisées par la méthode classique (Dorey et Denis, 1989). Le Pétrifilm étant plus simple d'emploi et moins volumineux que le Millipore, il a été adopté pour la suite de nos

travaux (France et Mali), avec une énumération de toutes les colonies rouges apparaissant sur le film (celles entourées de bulles étant spécifiquement des coliformes et celles ne présentant pas de bulles étant des entérobactéries).

- Pour le dénombrement de la flore aérobie mésophile totale, le test Millipore est comparable à la méthode classique au PCA (Plate Count Agar). Pour le Pétrifilm, nous n'avons pas atteint des dilutions suffisamment élevées pour donner des résultats comptables ; d'autre part, nous disposions d'une quantité limitée de "kits", ce qui ne nous a pas permis de répéter les essais incomptables. Nous avons cependant adopté le test Pétrifilm / flore totale (en France et au Mali) pour sa simplicité d'emploi et en nous appuyant sur une étude comparative entre ce test et la méthode classique au PCA (Poumeyrol, 1987).

Le Microtest A n'est pas un test de numération mais d'évaluation globale. Il présente deux inconvénients : le premier dû à l'estimation de la charge microbienne par rapport à une table de référence, ce qui est assez subjectif et ne permet pas de comptage précis. Le second inconvénient est lié à l'hétérogénéité et au contraste de la couleur des colonies formées. En effet, les bactéries ne réduisent pas toutes le colorant utilisé (chlorure de triphényltétrazolium) de la même façon ; certaines sont fortement rouges (conformément à la notice du fournisseur) alors que d'autres sont roses ou même incolores. Il est alors nécessaire de compter toutes les colonies présentes, ce qui peut échapper à un utilisateur non habitué. Ces remarques sont également soulevées par Genner (1976).

- Concernant la numération des levures, le Microtest A ne semble pas du tout adapté (lecture difficile, faux résultats négatifs). Il nécessite sans doute l'incorporation d'un additif sélectif. Les résultats donnés par Millipore et par la méthode classique au PDA (Potato Dextrose Agar) ne sont pas tout à fait comparables. Ceci montre que le Millipore est un moyen d'évaluation globale de la charge en levures plutôt qu'un test de numération. D'autre part, l'utilisation du PDA acidifié (pH 3,5) est de plus en plus remise en question. En effet, ce pH bas permettrait la croissance de bactéries acido-tolérantes et pourrait inhiber le développement de moisissures éventuellement stressées par des traitements. Il semble plus avantageux d'utiliser des milieux à pH plus élevé mais contenant des antibiotiques (au moins deux composés anti-bactériens pour assurer un large spectre d'activité (Venkatasubbaiah et Dwarakanath, 1988). Un tel milieu (OGA avec chlorotétracycline et chloramphénicol) est la base du Pétrifilm / levures-moisissures. Ce test n'était pas commercialisé au moment de la réalisation de notre étude comparative, mais il a été adopté par la suite pour ses avantages (facilité d'emploi et constitution de son milieu gélosé) et d'après les essais concluants sur Pétrifilm / flore totale et coliformes. L'utilisation du Pétrifilm / levures-moisissures sur du poisson

séché a montré que l'incubation de ces films à 30°C (et non à 20°C selon la notice du fabricant) accélère le développement de ces germes et rend leur numération plus aisée. Ceci est probablement dû à leur "stress" suite au traitement thermique.

Nous avons également remarqué que dans le cas du poisson, le Pétrifilm / levures-moisissures peut présenter de minuscules points bleus qu'il ne faut pas compter comme des colonies. Pour éviter toute erreur, il suffit de contrôler leur grosseur en fonction du temps d'incubation (les colonies grossissent alors que les points bleus gardent la même taille). Après vérification sur notre produit, les laboratoires 3M-Santé expliquent ce phénomène par l'interférence de composés phosphorés du poisson avec les constituants du film. Notons que ces petits points bleus sont observés uniquement sur du poisson peu contaminé en levures et en moisissures (poisson frais ou en fin de séchage par exemple), alors que sur un poisson fortement contaminé (après stockage par exemple), aucune interférence n'apparaît et les colonies de levures/moisissures sont bien nettes.

Cette étude comparative n'est ni exhaustive ni statistiquement poussée ; elle nous a permis, en un premier temps, d'écarter les tests non adéquats (manque de spécificité ou mise en oeuvre trop complexe) et ensuite de sélectionner des tests facilement applicables sur le terrain, dans un contexte non équipé pour des analyses microbiologiques (tableau V.1.).

V.1.2. Analyses de qualité testées mais non retenues

- Mesure de la texture

La texture est mesurée par pénétrométrie, au moyen de l'analyseur de texture Stevens LFRA 1000. Cet appareil est constitué d'un plateau porte-échantillon et d'un porte-outil fixé à un capteur de force bi-directionnel. Au déclenchement de la mesure, l'ensemble porte-outil/capteur descend jusqu'à ce que le plongeur (aiguille en acier inox) entre en contact avec l'échantillon, avec une vitesse pré-sélectionnée de 1 mm/sec. La mesure est effectuée en différents points étalés sur l'ensemble du poisson (des deux côtés), et la force de résistance du poisson à la pénétration de l'aiguille est enregistrée en kgf, par rapport à un étalonnage préalable de l'appareil avec des poids connus.

Cette mesure est relativement simple sur le poisson frais, malgré la disparité des épaisseurs "musculaires" dues à la forme en fuseau du poisson. Afin de s'affranchir de cette contrainte, la mesure peut être effectuée, soit en mesurant la texture dans une

région du poisson présentant la même épaisseur, mais ceci réduirait le cadre de mesure à la partie centrale du poisson, soit en choisissant la plus faible épaisseur du poisson (généralement vers la queue) comme distance de pénétration de l'aiguille. Néanmoins, cette mesure de texture est très difficile, voire impossible, sur l'ensemble du poisson séché. En effet, après séchage, le poisson se recroqueville et de ce fait, ne peut plus être fixé en position plane (condition indispensable pour la bonne pénétration de la sonde dans le poisson), et ceci, même après équilibration du poisson à un a_w de 0,75 (en le gardant au-dessus d'une solution saturée en NaCl). Notons que les mesures de texture préliminaires (Marc, 1989 ; Moustaid, 1989) ont été effectuées sur des morceaux de poisson découpés et qui présentaient donc des surfaces relativement planes ; mais, comme dans notre méthodologie de travail, nous avons voulu conserver l'homogénéité de l'échantillon de mesure et des valeurs représentatives de l'ensemble du poisson, nous avons donc abandonné cette mesure faute de comparaison entre poisson frais et séché.

- Analyses diverses testées mais non retenues

L'indice K, critère de dégradation catabolique de l'adénosine triphosphate (ATP) a été déterminé au moyen du "Fresh Tester" (test rapide développé au Japon et commercialisé par la société Transia, Lyon, France). Malgré sa performance, ce test n'a pas été retenu car spécifique de la qualité du poisson frais, d'où son utilisation sur les navires de pêche et les ports de débarquement. Les quantités formées de catabolites sont reportées sur une abaque qui permet de déduire l'indice K. Etant sensible à des variations très infimes, le "Fresh Tester" ne donne pas de réponse significative pour le poisson séché.

La méthode réfractométrique de détermination des lipides a été essayée. Cette méthode simple est basée sur la lecture (au réfractomètre Abbe) de l'indice de réfraction d'un mélange (poisson / sulfate de sodium / bromonaphtalène) filtré (Paquot, 1979 ; Meloan et Pomeranz, 1980). Ce test donne de bons résultats en comparaison avec les méthodes courantes d'extraction de lipides; il serait applicable au Mali dans la mesure où le réfractomètre est disponible.

Nous avons également testé deux autres méthodes d'extraction de la matière grasse, la méthode de Wolff et Castera-Rossignol (1987) (extraction dans une colonne avec un mélange hexane-isopropanol) et celle de Bligh et Dyer (1959) (extraction dans un mélange chloroforme-méthanol). Notons que la méthode de Wolff-Castera est actuellement testée en vue de sa standardisation par l'AFNOR. Les deux méthodes sont satisfaisantes

mais n'ont pas été retenues car exigeant un temps de travail long et de grandes quantités de solvant par rapport à la quantité de matière grasse récupérée.

V.2. TRAVAUX EFFECTUES AU MALI

V.2.1. Contexte de l'étude

L'étude de terrain a été menée simultanément dans des campements de pêcheurs (suivi de capture, mesures météorologiques) et au Laboratoire d'Hydrobiologie de Mopti LHM (analyses de qualité). Le choix des campements de pêcheurs a été décidé en fonction de l'éloignement du campement par rapport à Mopti, après concertation et accord entre les responsables du LHM et le chef du campement.

Nous avons effectué trois campagnes de pêche (notées A, B et C) en trois saisons différentes :

- début de la crue (campagne A), saison caractérisée par la raréfaction du poisson, (Juin-Juillet 1990) ;
- début de la décrue (campagne B), saison d'abondance des captures, (Décembre 1990) ;
- fin de la décrue ou étiage (campagne C), fin de la pêche intensive, (Avril-Mai 1992).

Deux sorties de pêche ont été effectuées lors des campagnes A et B, et trois sorties lors de la campagne C. Chaque sortie de pêche correspond donc à un ensemble cycle de transformation/cycle de séchage. Dans ce chapitre, nous utiliserons les codes A₁, A₂, B₁, B₂, C₁, C₂ et C₃ pour désigner l'ordre des sorties de pêche, respectivement dans les campagnes A, B et C. Il est également important de nuancer la terminologie adoptée ; ainsi, le terme "cycle de transformation" inclut toutes les opérations, depuis la capture jusqu'à la fin du séchage, alors que le terme "cycle de séchage" désigne uniquement l'opération de séchage (depuis la mise au soleil des poissons fermentés jusqu'au moment où la transformatrice les retire).

Les campagnes A et B se sont déroulées au campement "Boumama Daga" situé à 15 kms de Mopti, et la campagne C au campement "Namara Daga" (8 kms de Mopti). Ce dernier est un campement permanent alors que le premier est temporaire. De retour dans

leur village initial (au sud de Mopti), les pêcheurs ont des activités agricoles ; certains restent à Boumama Daga jusqu'à la saison de pêche suivante. Les pêcheurs des deux campements appartiennent à l'ethnie Bozo et parlent le dialecte Bambara.

Les échantillons de poisson, prélevés depuis la pêche jusqu'à la fin du séchage et conservés à 4°C (dans une glacière), sont ensuite transportés du campement au laboratoire en pirogue ou à moto (durée du trajet : 1 heure).

Les engins de pêche utilisés sont le filet maillant dérivant (A₁, A₂ en partie et B₂), l'épervier (A₂ en partie et B₁), le dulankoro (C₁) et la senne (C₂ et C₃). Le filet maillant dérivant est un filet muni de flotteurs en polystyrène expansé, il est lancé dans l'eau au fur et à mesure que la pirogue avance. L'épervier est un filet muni de plomb, il est retenu à un poignet du pêcheur puis lancé dans l'eau, il va alors en profondeur et emprisonne le poisson. Le dulankoro est une nasse appâtée restant en permanence dans l'eau et vidée régulièrement. La senne est un grand filet étendu dans la largeur de l'eau. La pêche a eu lieu dans les bras du fleuve (campagne A), dans le fleuve même (campagne B) et dans des points d'eau (lacs, mares)(campagne C).

Le poisson capturé au Mali appartient au genre *Tilapia* (n'tébé en dialecte bambara local) (*monodi* dans la campagne A, *nilotica* et *monodi* lors de la campagne B, *nilotica* et *zillii* pour la campagne C).

Après capture, un échantillon de 3 poissons est mis directement sur glace afin de servir de référence en termes de qualité initiale du poisson au Mali. Le lot restant de poisson est traditionnellement manutentionné par les pêcheurs, à savoir déposé à même le sol de la pirogue, éparpillé dans des flaques d'eau. Le poisson n'est protégé ni du soleil ni du vent. Traditionnellement, le poisson n'est pas mis sur glace dans la pirogue, mais en saison de pêche abondante, le poisson peut traîner de 10 à 12 heures avant le débarquement ; par conséquent, les pêcheurs creusent des trous sur les berges du fleuve et y déposent le poisson au fur et à mesure de sa capture. Ils le récupèrent ensuite en rentrant au campement. Le poisson n'est jamais trié à bord mais au débarquement final.

Le délai entre la capture et le débarquement est de 2 heures (A₁), 4 heures (A₂ et B₁), 3 heures (B₂) et 1 heure (C₁, C₂ et C₃). Un délai de 1 à 2 heures s'écoule encore entre le débarquement et le parage (sauf pour B₂ où les poissons sont mis directement à fermenter, étant donné l'heure tardive de retour des pêcheurs et sont parés après fermentation). A la demande du Chef du campement, une transformatrice prépare le poisson de façon traditionnelle. Le poisson est paré sans lavage préalable, il est d'abord écaillé puis éviscéré. Pour les poissons de taille moyenne ou grande, la transformatrice pratique deux sortes d'incision, l'une en demi-cercle, de l'ouïe jusqu'à la partie ventrale,

avec rabattement de la chair incisée vers l'extérieur ; l'autre tout le long de l'arête dorsale avec ouverture du poisson en deux. Elle dégage ensuite les viscères. Pour les poissons de petite taille, une incision ventrale simple est pratiquée et les viscères sont libérés par simple pression sur le ventre du poisson. Ainsi, la découpe du poisson varie en fonction de la transformatrice et de sa maîtrise de l'opération. Les viscères s'accumulent progressivement sur le poisson en attente de parage. La tête, la queue et les nageoires ne sont pas éliminées.

Après éviscération, les poissons sont lavés à deux reprises dans de l'eau du fleuve. D'après la transformatrice, ces rinçages répétés influent favorablement sur la qualité du produit fini et sur son degré de gonflement. Les eaux de rinçage chargées des viscères sont rejetées dans le fleuve. Les poissons éviscérés et lavés sont ensuite déposés dans un récipient rempli d'eau du fleuve et recouvert d'une bassine en guise de couvercle. Ce récipient est un canari pour les campagnes A et C, une marmite en aluminium pour la campagne B. L'étape d'immersion (ou fermentation) dure 12 heures (A₂), 16 heures (B₂), 17 heures (A₁), 22 heures (C₁, C₂, C₃) et 23 heures (B₁).

Après fermentation, les poissons sont de nouveau rincés dans l'eau du fleuve et mis à sécher au soleil. Ils sont étalés, soit sur le toit de la hutte (A₁, A₂, B₂), soit sur un râtelier en paille tressée (secko) reposant sur des piquets en bois (C). Pour le cycle B₁, les poissons sont étalés sur une litière en secko reposant d'une part sur un muret et d'autre part sur de vieux canaris. Cette aire de séchage, peu élevée par rapport au sol, était assez ombragée car entourée de huttes. Les poissons sont retournés en fin de journée et recouverts d'une bâche en plastique pendant la nuit (pour éviter leur attaque par les chats) ou lors de variations climatiques brusques (tempête, vent fort). Recouvrir le poisson n'est pas une pratique courante chez tous les pêcheurs ; nous avons cependant jugé prudent de le faire afin de pouvoir assurer le suivi de notre étude. Ce fut l'unique intervention de notre part, le reste du cycle de transformation étant mené par la transformatrice.

Aucun insecticide n'a été utilisé au cours des campagnes A et C, ni sur le poisson ni dans l'eau de fermentation. Ceci est sans doute lié à la pénurie d'insecticide en fin de saison de pêche intensive. Lors de la campagne B, les poissons ont été traités en fin de fermentation, soit par aspersion (B₁), soit par trempage pendant 5 minutes (B₂), avec une solution de K-othrine (5 g de poudre dans 10 litres d'eau du fleuve). La K-othrine est une poudre cristalline à base de deltaméthrine, distribuée par la firme Roussel-Uclaf, division Agrovét.

Tableau V.2. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne A, cycle de séchage A1 : du 23/06/90 (10h10) (début séchage) au 24/06/90 (18h00) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative %	Vitesse air (m/s)	Puissance solaire (W/m ²)	Energie solaire journalière (kWh/m ²)	Température cœur <i>Tilapia</i> (°C)	Evolution teneur en eau <i>Tilapia</i> (%bh)
23/06/90	0hr séchage	10h10	34,6	45	2,0	569	2,6 (premier jour)	33,1	77
23/06/90	-	12h10	37,8	46	2,9	659		39,1	65
23/06/90	-	14h10	40,1	46	2,2	560		42,3	56
23/06/90	-	16h10	39,1	32	3,8	330		41,6	47
23/06/90	8hrs séchage	18h10	34,1	58	2,4	46	1,9 (deuxième jour)	32,5	44
23/06/90	-	20h10	31,3	74	1,0	0		28,3	42
Nuit du 23 au 24/06/90			22h à 4h	≥ 24	50 à 55	5 à 9	-	-	-
24/06/90	-	5h00	27,4	56	1,1	0	1,9 (deuxième jour)	25,1	31
24/06/90	20hrs séchage	6h30	27,3	65	2,4	47		26,2	33
24/06/90	-	8h00	32,3	52	1,0	220		34,1	25
24/06/90	-	8h à 12h	28,0	-	9 à 13	-		-	-
24/06/90	-	12h00	29,8	93	8,3	462	1,9 (deuxième jour)	38,1	14
24/06/90	-	14h00	33,2	93	4,0	224		35,8	22
24/06/90	-	16h00	33,1	77	1,1	124		34,2	22
24/06/90	32hrs séchage	18h00	28,8	63	4,3	55		29,5	18

V.2.2. Métrologie et paramétrage du procédé traditionnel

Les conditions climatiques relevées au cours des trois campagnes de notre étude sont présentées respectivement dans les tableaux V.2. à V.8.

Au cours de la campagne A (Juin-Juillet), les relevés climatiques montrent bien que cette période est une transition entre la saison sèche et la saison des pluies. En fait, la température de l'air ambiant de séchage varie entre 26°C (minimum) et 40°C (maximum). L'hygrométrie subit diverses fluctuations (des minima de 32 à 39% sont notés et des maxima de 93 à 97% sont observés même dans la journée). Des vents assez violents soufflent par intermittence (vitesse de l'air pouvant atteindre 9 à 13 m/s). Notons que dans le deuxième cycle de séchage (A₂) de cette campagne, nous n'avons d'enregistrement ni sur la vitesse de l'air ambiant ni sur le rayonnement solaire, suite à la non-disponibilité des appareils de mesure.

La durée totale de séchage est de 32 heures pour A₁ et de 58 heures pour A₂. Ces différentes durées sont décidées, intuitivement et par expérience, par les transformatrices du poisson. Les mesures métrologiques effectuées confirment ces différentes durées. En effet, dans le cycle A₂, la température de l'air ambiant de séchage est en moyenne plus basse et son hygrométrie plus élevée que celles notées dans le cycle A₁, notamment en début de séchage. Ceci explique les durées de séchage plus longues dans A₂ afin d'obtenir le degré de dessiccation voulu.

La diminution du poids du poisson dans le temps permet de déduire l'évolution de la teneur en eau du produit en fonction de la durée du séchage. Dans A₁, nous remarquons qu'en 26 heures de séchage, la teneur en eau du poisson a chuté de 77% à 14% (bh). Celle-ci correspond à des activités de l'eau allant de 0,6 (à 20°C) à 0,72 (à 40°C) (Marc, 1989 ; Moustaid, 1989). Cette gamme d' a_w inhibe le développement microbien. Comme les températures de l'air ambiant au cours de cette campagne vont de 28 à 40°C, il s'ensuit qu'une teneur en eau de 14% (bh) est adéquate pour une bonne conservation du *Tilapia* séché au Mali. Cependant, suite aux variations climatiques (forte tempête avec pluie, augmentation de l'hygrométrie de l'air jusqu'à 93%), cette teneur en eau est remontée de 14% à 22% (bh) après 30 heures de séchage, puis elle a chuté jusqu'à 18% (bh) après 32 heures de séchage. Cette teneur en eau finale de 22% (bh) correspond à un a_w de 0,82 qui permet le développement de certains micro-organismes. Il a donc suffi de 4 heures supplémentaires (entre 26 et 30 heures de séchage) pour accroître le risque de détérioration du poisson séché lors de son stockage ultérieur.

Tableau V.3. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne A, cycle de séchage A2 : du 3/07/90 (8h00) (début séchage) au 5/07/90 (18h30) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative (%)	Evolution teneur en eau <i>Tilapia</i> (% bh)	Température coeur <i>Tilapia</i> (°C)
------	---	---------------	-------------------------	-----------------------------	--	---

3/07/90	0hr séchage	8h00	28,8	61	79,5	26,4
3/07/90	-	10h00	32,0	61	75,9	31,5
3/07/90	-	12h00	34,3	85	70,8	38,2
3/07/90	-	14h00	38,1	97	65,4	39,2
3/07/90	-	16h00	35,0	78	59,7	37,2
3/07/90	10hrs séchage	18h00	35,6	71	56,7	32,9

Nuit du 3 au 4/07/90

Nuit orageuse; vent fort

4/07/90	24hrs séchage	7h45	26,9	71	51,7	26,2
4/07/90	-	9h45	31,4	80	45,5	36,0
4/07/90	-	11h45	30,8	97	42,3	42,8
4/07/90	-	13h45	33,0	57	34,6	44,2
4/07/90	-	15h45	34,0	77	31,5	42,7
4/07/90	34hrs séchage	17h45	33,1	47	29,9	36,7

Nuit du 4 au 5/07/90

5/07/90	46hrs séchage	6h30	25,8	74	28,2	25,7
5/07/90	-	8h30	29,0	66	26,4	31,8
5/07/90	-	10h30	33,5	51	22,5	39,3
5/07/90	-	12h30	36,4	39	20,4	48,6
5/07/90	-	14h30	40,0	44	15,9	51,3
5/07/90	-	16h30	32,8	45	15,9	35,0
5/07/90	58hrs séchage	18h30	30,7	51	15,9	30,3



Tableau V.4. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne B, cycle de séchage B1 : du 21/12/90 (9h30) (début séchage) au 23/12/90 (7h00) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative %	Vitesse air (m/s)	Puissance solaire (W/m ²)	Energie solaire journalière (kWh/m ²)	Température cœur <i>Tilapia</i> (°C)	Evolution teneur en eau <i>Tilapia</i> (%bh)
21/12/90	0hr séchage	9h30	22,2	96	4,2	420	3,13 (premier jour)	19,6	76,4
21/12/90	-	11h30	25,4	70	2,6	657		32,3	71,1
21/12/90	-	13h30	26,6	46	1,5	611		36,6	66,4
21/12/90	-	15h30	26,8	89	2,2	152		28,8	62,0
21/12/90	8hrs séchage	17h30	24,3	37	0,4	15		21,4	59,4
22/12/90	21hrs séchage	7h00	16,4	65	2,0	52	4,17 (deuxième jour)	14,2	54,6
22/12/90		9h00	20,1	41	4,5	170		22,7	51,8
22/12/90		11h00	23,4	36	0,8	678		29,6	48,6
22/12/90		13h00	25,8	26	1,0	672		35,1	44,9
22/12/90		15h00	26,1	27	0,6	630		31,3	42,1
22/12/90	33hrs séchage	17h00	25,6	26	0,8	38		24,4	40,6
22/12/90		18h00	23,3	52	0,1	2		21,5	40,6
23/12/90	46hrs séchage	7h00	16,0	54	1,0	33	3,27 (troisième jour)	14,7	35,7
23/12/90		9h00	19,8	41	4,5	330		25,5	35,7
23/12/90		11h00	23,1	33	5,0	543		33	33,9
23/12/90		13h00	24,7	27	2,1	568		36,3	31,9
23/12/90	-	15h00	25,5	28	2,0	127		29,9	31,9
23/12/90	56hrs séchage	17h00	24,0	37	0,6	41		23,9	29,8

Le séchage est très marqué par la fluctuation de l'hygrométrie. Ainsi, l'humidité relative élevée en début du cycle de séchage A₂ le ralentit considérablement par rapport à A₁. Ainsi, nous avons une évaporation de 21% d'eau en 4 heures de séchage pour A₁ et de 9% pour A₂.

La campagne B est caractérisée par des températures basses de séchage : de 16 à 27°C pour B₁ et de 14 à 29°C pour B₂. Du brouillard a été systématiquement observé le matin ; ce qui est confirmé par l'hygrométrie élevée (minimum de 44% et maximum de 96%) le matin et qui diminue dans la journée (allant de 15 à 37%). Là également, ces fluctuations (jour/nuit) de l'hygrométrie augmentent les risques de dégradation microbienne du poisson (reprise d'eau observée dans la nuit du 26 au 27/12/90).

La forte hygrométrie en début de séchage ralentit l'évaporation de l'eau (10% d'eau éliminée en 4 heures de séchage pour B₂ en comparaison avec 21% dans la campagne A). La teneur en eau (29,8% bh) notée en fin du cycle B₁ est relativement élevée par rapport à celles traditionnellement observées au Mali (15 à 18% bh). Cette teneur en eau (29,8% bh) correspond à un a_w qui favorise le développement microbien. L'arrêt du cycle de séchage à une teneur en eau aussi élevée tient à deux raisons ; d'une part au fait que le cycle B₁ a été écourté par nécessité de libérer l'aire de séchage (saison d'abondance des captures) et d'autre part, à la disposition relativement basse et ombragée de la litière de séchage, ce qui a limité l'évaporation de l'eau.

Notons enfin qu'en 7 heures de séchage, nous avons observé une évaporation de 17% d'eau dans le cycle B₁ et 10% dans le cycle B₂, en dépit de l'hygrométrie moyenne plus élevée au début du cycle B₁. Ceci peut s'expliquer par le faible ensoleillement observé au début du cycle B₂.

La campagne C est caractérisée par une saison chaude et sèche avec des températures de l'air élevées (35 à 42°C) et des hygrométries basses (entre 12 et 24%) dans la journée. Les nuits sont fraîches et l'hygrométrie augmente dans la deuxième partie de la nuit (75% le matin). La vitesse de l'air varie de 1 à 3 m/s avec quelques rafales ponctuelles (7 à 9 m/s). Le séchage est rapide (30 à 32 heures). Notons que pour cette campagne, la diminution du poids du poisson au cours du séchage n'est pas exploitable, étant donné la grande imprécision de la balance dont nous disposions.

Les températures mesurées au cœur du poisson (lors du séchage) sont directement influencées par les conditions climatiques ambiantes. Elles présentent un minimum de 25°C et un maximum de 51,3°C au cours de la campagne A. Dans la campagne B, elles varient de 13 à 36°C et pour la campagne C, elles affichent un minimum de 20°C et un

Tableau V.5. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne B, cycle de séchage B2 : du 26/12/90 (12h50) (début séchage) au 29/12/90 (17h00) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative %	Vitesse air (m/s)	Puissance solaire (W/m ²)	Energie solaire journalière (kWh/m ²)	Température cœur <i>Tilapia</i> (°C)	Evolution teneur en eau <i>Tilapia</i> (%bh)
26/12/90	0hr séchage	12h50	24,1	60	4,0	621	0,7 (premier jour)	26,5	75,2
26/12/90	-	14h50	23,6	43	3,5	244		24,7	68,8
26/12/90	-	16h50	22,4	24	5,0	80		21,5	64,4
26/12/90	6hrs séchage	18h50	20,3	31	5,0	0		18,5	64,4
27/12/90	18hrs séchage	7h00	15,5	44	2,5	40	3,51 (deuxième jour)	15,0	64,9
27/12/90		9h00	18,5	34	3,2	230		19,7	53,2
27/12/90		11h00	20,5	30	4,0	570		23,3	52,4
27/12/90		13h00	23,2	24	3,5	438		28,0	48,9
27/12/90		15h00	24,0	23	3,7	315		27,0	48,0
27/12/90		17h00	22,6	27	2,3	88		22,4	48,0
27/12/90	29hrs séchage	19h00	21,3	31	0,6	0		19,0	41,5
28/12/90	41hrs séchage	7h00	14,5	53	3,3	67	4,71 (deuxième jour)	13,3	37,6
28/12/90		9h00	16,7	95	4,2	366		18,4	34,7
28/12/90		11h00	22,1	27	4,8	676		25,1	29,8
28/12/90		13h00	25,4	37	4,0	694		29,0	29,8
28/12/90		15h00	26,2	21	2,5	466		32,8	27,9
28/12/90		17h00	24,8	21	1,3	90		23,6	26,1
28/12/90	53hrs séchage	19h00	20,9	36	0,1	0		17,0	24,1
29/12/90	65hrs séchage	7h00	14,3	51	1,4	63	4,28 (troisième jour)	13,7	21,9
29/12/90		9h00	20,4	36	2,0	362		24,0	21,9
29/12/90		11h00	26,4	23	2,1	640		36,0	21,9
29/12/90		13h00	27,8	31	3,6	627		35,2	19,7
29/12/90	75hrs séchage	15h00	29,3	15	1,4	415		34,2	17,3
29/12/90		17h00	27,5	29	1,0	95		27,0	17,3

Tableau V.6. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne C, cycle de séchage C1: du 5/05/92 (12h00) (début séchage) au 6/05/92 (18h00) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative %	Vitesse air (m/s)	Puissance solaire (W/m ²)	Energie solaire journalière (kWh/m ²)	Température cœur <i>Tilapia</i> /eau (°C)	Température cœur <i>Tilapia</i> /sel (°C)
5/05/92	0hr séchage	12h00	40,5	15	4,3	795	2,74 (premier jour)	-	-
5/05/92	-	14h00	40,9	12	5,8	690		46,6	45,0
5/05/92	-	16h00	40,7	11	3,6	367		43,8	42,4
5/05/92	4hrs séchage	18h00	39,1	11	4,3	54		36,1	36,4
6/05/92	18hrs séchage	6h00	27,6	50	0,8	30	3,67 (deuxième jour)	23,2	24,0
6/05/92		8h00	32,4	37	1,0	281		39,5	33,2
6/05/92		10h00	34,3	39	1,0	697		49	47,7
6/05/92		12h00	36,2	32	0,8	490		47	44,1
6/05/92		14h00	37,3	30	1,0	300		42,7	40,6
6/05/92		16h00	37,5	27	4,6	262		42,2	42,0
6/05/92	30hrs séchage	18h00	36,4	22	1,8	43		35,7	34,1

Tableau V.7. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne C, cycle de séchage C2: du 6/05/92 (10h00) (début séchage) au 7/05/92 (18h00) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative %	Vitesse air (m/s)	Puissance solaire (W/m ²)	Energie solaire journalière (kWh/m ²)	Température cœur <i>Tilapia</i> /vinaigre (°C)	Température cœur <i>Tilapia</i> /sel+vinaigre (°C)
6/05/92	0hr séchage	10h00	34,3	39	1,0	697	2,46 (premier jour)	28,3	28,4
6/05/92	-	12h00	36,2	32	0,8	490		29,2	30,2
6/05/92	-	14h00	37,3	30	1,0	300		33,3	32,0
6/05/92	-	16h00	37,5	27	4,6	262		36,6	37,0
6/05/92	8hrs séchage	18h00	36,4	22	1,8	43		31,0	31,0
7/05/92	-	6h00	27,5	78	3,6	18	5,68 (deuxième jour)	25,2	25,2
7/05/92	22hrs séchage	8h00	31,8	47	8,6	263		33,4	33,5
7/05/92	-	10h00	37,2	11	9,6	609		41,3	43,1
7/05/92	-	12h00	39,8	14	8,7	781		47,6	49,8
7/05/92	-	14h00	40,9	12	4,0	710		49,4	51,5
7/05/92	-	16h00	40,5	12	5,1	386		44,5	45,0
7/05/92	32hrs séchage	18h00	37,1	16	5,8	42		35,7	35,5

maximum de 50°C. Notons que, pour les trois campagnes, la température au coeur du poisson est toujours inférieure à celle de l'air ambiant, puis elle augmente progressivement avec cette dernière jusqu'à la dépasser aux heures les plus chaudes de la journée (entre 10h et 16h en général). Ceci montre que la chair du poisson accumule de la chaleur et qu'un phénomène de conduction semble se superposer aux transferts de matière et de chaleur. Ceci est valable quel que soit le pré-traitement subi lors de la fermentation (avec ou sans additif).

De même, la température moyenne de l'eau de fermentation est en relation avec les conditions ambiantes. Elle est de 27°C (campagne A), 18°C (campagne B) ou 35°C (campagne C). Quant à l'intensité de l'ensoleillement, elle est la plus importante dans la campagne C (maximum de 5,8 kWh/m²).

Le parage du poisson (écaillage et éviscération) avant transformation induit des pertes moyennes de 12 à 20% en poids frais. Quant au rendement de l'opération de séchage (poids du poisson séché final rapporté au poids du poisson frais initial), il varie entre 24 et 33%.

Il est clair que le séchage traditionnel du poisson repose essentiellement sur l'intuition et l'expérience des transformatrices, il reste cependant très dépendant des fluctuations climatiques, surtout nocturnes. Ainsi, il serait intéressant de combiner un séchage artificiel au séchage naturel pendant les saisons critiques (froide comme celle de la campagne B, transitoire entre sèche et humide telle que celle de la campagne A). Ce séchage d'appoint serait bénéfique, notamment en début du séchage (où la perte en poids du poisson est importante) et en fin de séchage (où la réhumidification du produit est préjudiciable à sa stabilité bactériologique lors du stockage ultérieur). La combinaison de ces deux techniques de séchage assurerait une qualité régulière et maîtrisée du poisson séché, indépendamment des variations climatiques.

V.2.3. Suivi de la qualité du poisson au cours de la transformation

- Qualité sanitaire

Les analyses microbiologiques (par méthodes classiques) menées au cours de la campagne A n'ont pas pu être exploitées, suite aux problèmes de contamination rencontrés (stérilisation insuffisante des milieux de culture à la cocotte-minute ; contamination du

Tableau V.8. Paramètres du séchage traditionnel de poisson au Mali lors de la campagne C, cycle de séchage C3: du 10/05/92 (9h20) (début séchage) au 11/05/92 (18h00) (fin séchage)

Date	Temps cumulé (prélèvement échantillons)	Heure Mali	Température air (°C)	Humidité relative %	Vitesse air (m/s)	Puissance solaire (W/m ²)	Energie solaire journalière (kWh/m ²)	Température coeur <i>Tilapia</i> /bicarbonate (°C)	Température coeur <i>Tilapia</i> /acide lactique (°C)
10/05/92	0hr séchage	9h20	35,1	17	9,0	558	5,05 (premier jour)	22,5	21,8
10/05/92	-	11h20	40,5	12	2,7	810		40,0	43,0
10/05/92	-	13h20	42,0	17	4,2	767		49,7	48,9
10/05/92	-	15h20	41,9	24	1,9	538		50,2	47,2
10/05/92	8hrs séchage	17h20	40,3	14	7,0	175		40,7	38,6
11/05/92	-	6h00	26,5	75	1,0	30	5,78 (deuxième jour)	20,3	20,3
11/05/92	-	8h00	34,2	40	4,0	305		32,0	36,1
11/05/92	-	10h00	38,0	35	1,0	640		40,2	45,0
11/05/92	-	12h00	40,7	22	3,5	809		43,8	51,4
11/05/92	-	14h00	42,9	23	7,2	697		49,5	54,8
11/05/92	-	16h00	40,7	16	5,1	370		48,3	44,3
11/05/92	33hrs séchage	18h00	37,3	21	4,2	48		37,3	37,0

local par des moisissures ; incubation à température ambiante (par manque d'étuve), ce qui a induit des chocs thermiques dus aux fluctuations climatiques). Nous avons donc refait en France les dénombrements bactériologiques sur des échantillons prélevés (simultanément à ceux analysés à Mopti) lors du cycle de transformation A₁, congelés sur place et transportés en glacière jusqu'en France. Ces échantillons ont certainement subi quelques fluctuations de température lors de leur transport avant analyse mais ils ont été constamment gardés au froid. Leur analyse rend ainsi compte de l'évolution de la qualité bactériologique du poisson depuis sa pêche jusqu'à la fin de sa transformation.

Les échantillons sont notés (F) (frais après capture) ; (Db) (après débarquement); (FR) (après fermentation) et (S_x) (séché, "x" représentant l'ordre chronologique de prélèvement).

Le tableau V.9. regroupe les différentes charges microbiennes (en UFC/g MS) au cours du cycle A₁. La (FAMT) après capture (échantillon F) est de $3,7 \times 10^4$ UFC/g MS, elle dépend de la contamination initiale de l'eau du fleuve Niger. La charge microbienne augmente progressivement après débarquement (Db) (5×10^5 UFC/g MS) puis après fermentation (FR) ($4,3 \times 10^6$ UFC/g MS). Ceci s'explique par la diversité des flores responsables de cette dernière opération (cf. V.2.5.). La flore aérobie mésophile totale (FAMT) diminue ensuite au cours du séchage ($7,7 \times 10^5$ UFC/g MS en 20 hrs de séchage et $1,8 \times 10^5$ UFC/g MS en 32 hrs), ce qui est compatible avec le but recherché par l'utilisation de ce procédé. Haruenkit *et al.* (1988) cite une (FAMT) après capture de $6,1 \times 10^4$ UFC/g MB sur de la chair de *Tilapia* élevé en aquaculture en Thaïlande. Thampuran et Mahadeva Iyer (1989) dénombrent une (FAMT) de $8,4 \times 10^4$ à $8,8 \times 10^7$ UFC/g MB dans du poisson de mer débarqué à Cochín, en Inde.

La (FAMT) en fin de séchage ($1,8 \times 10^5$ UFC/g MS) rejoint celle mentionnée dans des travaux réalisés sur du poisson tropical séché ou fumé (Magnusson et Traustadottir, 1982 ; Ito et Yusop Abu, 1985 ; Sindayigaya et Debevere, 1989).

Nous remarquons la même tendance pour l'évolution des coliformes totaux (COL). La charge initiale (F) de $4,5 \times 10^2$ UFC/g MS augmente après fermentation jusqu'à $6,4 \times 10^4$ UFC/g MS puis décroît au cours du séchage (3×10^3 en 20 hrs et $2,5 \times 10^2$ en 32 hrs de séchage).

Les levures et moisissures (LM) suivent la même évolution. Leur charge dans l'échantillon (F) (environ 4×10^2 UFC/g MS) augmente au cours de la fermentation ($8,5 \times 10^4$ UFC/g MS) puis diminue au cours du séchage en tendant à une stabilisation ($7,7 \times 10^2$ en 20 hrs et $9,8 \times 10^2$ en 32 hrs de séchage).

Tableau V.9. Charges microbiennes des échantillons de *Tilapia monodi* prélevés au cours du cycle A1 :
du 22/06/90 (12h) (capture) au 24/06/90 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau (% bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS	Anaérobies sulfito- réducteurs (ASR) UFC/g MS
(F)	73%	$3,7 \times 10^4 \pm 5,2 \times 10^3$	$4,5 \times 10^2 \pm 1,8 \times 10^2$	$\approx 3,7 \times 10^2$	≥ 37
(Db)	74%	$5 \times 10^5 \pm 1,2 \times 10^4$	$3 \times 10^3 \pm 1,8 \times 10^2$	$\approx 3,9 \times 10^2$	≥ 39
(FR)	76,5%	$4,3 \times 10^6 \pm 6 \times 10^5$	$6,4 \times 10^4 \pm 7,2 \times 10^3$	$8,5 \times 10^4 \pm 8,5 \times 10^3$	≥ 43
(S ₁ /8hrs)	50%	-	-	-	$\geq 2 \times 10^3$
(S ₂ /20hrs)	35,3%	$7,7 \times 10^5 \pm 1,5 \times 10^5$	$3 \times 10^3 \pm 9,3 \times 10^2$	$7,7 \times 10^2 \pm 3 \times 10^2$	$\geq 1,5 \times 10^5$
(S ₃ /32hrs)	18,4%	$1,8 \times 10^5 \pm 2 \times 10^4$	$2,5 \times 10^2 \pm 74$	$9,8 \times 10^2 \pm 4,9 \times 10^2$	$1,6 \times 10^6$

Quelques colonies noires ont été observées sur milieu SS pour les échantillons (F) et (FR), ce qui laisse supposer la présence de salmonelles. L'identification plus poussée de ces colonies n'a pas pu être réalisée au Mali.

Les échantillons (F), (Db) et (FR) présentent une charge en anaérobies sulfito-réducteurs (ASR) supérieure à 40 UFC/g MS. Cette charge croît progressivement avec le séchage, allant jusqu'à 2×10^3 puis $1,6 \times 10^5$ et enfin $1,6 \times 10^6$ UFC/g MS. Cette augmentation, initiée au cours de la fermentation à laquelle participent les (ASR) (cf. V.2.5.), dépend probablement par la suite de contaminations provenant de l'aire de séchage. La présence d'(ASR) dans du poisson frais est citée dans la littérature (Gorczyca *et al.*, 1985 ; Thampuran et Mahadeva Iyer, 1989 ; Saluan-Abduhasan, 1990).

Comme nous l'avons signalé en V.2.2., les conditions ambiantes de séchage au cours de la campagne A ne sont pas les meilleures pour optimiser la qualité du poisson séché. Les fluctuations climatiques (tempête, vent, pluie), notamment entre le jour et la nuit, ont conduit à une température moyenne de 33°C et une hygrométrie moyenne de 64% pour l'air de séchage. Ces conditions ne sont pas très favorables à une bonne qualité sanitaire du produit qui peut être assurée par un séchage à température plus élevée. Ainsi, Marc (1989) et Moustaid (1989) démontrent que du *Tilapia monodi* séché à 60°C présente une meilleure qualité bactériologique que celui séché à 40°C. Ceci prouve l'utilité d'un séchage artificiel dans cette saison transitoire, afin de standardiser et de réguler la qualité du poisson séché. Il est vrai que le séchage à température plus élevée risque de brunir la couleur du poisson séché ; ceci n'est cependant pas préjudiciable car les habitudes alimentaires maliennes apprécient un produit de teinte foncée.

Pour les cycles B₁ et B₂, nous remarquons les mêmes tendances que précédemment pour l'évolution des charges microbiennes (FAMT, COL et LM), à savoir une augmentation avec la fermentation puis une diminution progressive en cours de séchage. Notons que cette diminution est moins spectaculaire que pour les campagnes A et C, ceci s'explique d'une part par le climat plus froid et plus brumeux de la saison B et d'autre part, par les fluctuations climatiques jour/nuit. Ce dernier effet est très visible en comparant les charges microbiennes des différents échantillons (S_x) prélevés au cours des cycles B₁ et B₂.

Notons que l'échantillon (FR) de B₂ a une charge plus élevée que celui de B₁, bien qu'ayant fermenté moins longtemps, ceci est dû à sa non éviscération avant fermentation. De plus, la (FAMT) en fin de séchage pour le cycle B₁ est plus élevée que pour B₂ ; ceci confirme la teneur en eau finale plus élevée en fin du cycle B₁ (cycle écourté

Tableau V.10. Charges microbiennes des échantillons de *Tilapia* prélevés au cours du cycle B1 : du 20/12/90 (6h00) (capture) au 23/12/90 (17h00) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau (% bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS
(F)	74,4%	$9,8 \times 10^6$	$1,8 \times 10^4$	195
(FR)	75,9%	$1,8 \times 10^7$	$5,8 \times 10^5$	$8,3 \times 10^2$
(S ₁ /8hrs)	56,5%	$1,2 \times 10^7$	$9,4 \times 10^4$	$9,7 \times 10^3$
(S ₂ /21hrs)	52,3%	$1,9 \times 10^8$	-	$3,1 \times 10^3$
(S ₃ /33hrs)	39,7%	$8,1 \times 10^7$	$2,8 \times 10^3$	-
(S ₄ /46hrs)	34,4%	$7,2 \times 10^7$	-	$1,1 \times 10^3$
(S ₅ /56hrs)	29,8%	$1,6 \times 10^8$	$3,4 \times 10^4$	$3,6 \times 10^2$

volontairement par la transformatrice par nécessité d'utilisation de l'aire de séchage). Nous n'avons pas recherché de salmonelles ni dénombré d'(ASR) dans la campagne B.

Les conditions climatiques de la campagne B (ensoleillement faible, température basse et hygrométrie élevée de l'air) ne permettent pas d'avoir un séchage rapide et régulier, ce qui est préjudiciable à la conservation ultérieure du poisson séché. Là également, un séchage artificiel d'appoint serait utile.

Pour la campagne C, nous ne commenterons ici que le traitement traditionnel (fermentation à l'eau) du cycle C₁ ; les autres traitements (avec additifs) (cycles C₂ et C₃) sont traités dans la partie V.2.6. Lors de la campagne C, nous avons uniquement prélevé (en plus de F, Db et FR) deux échantillons (S), l'un à mi-séchage (S₁) et l'autre en fin de séchage (S₂). Dans cette campagne, l'évolution des charges microbiennes suit la même tendance que pour les campagnes A et B. Seule la (FAMT) de l'échantillon (S₁) du cycle C₁ présente une exception, elle est en effet plus élevée que celle de (FR) ; ceci est lié à une activité poussée des flores de fermentation pendant le début du séchage, activité probablement liée au climat plus chaud caractérisant cette campagne.

Notons que pour la campagne B (caractérisée par des températures ambiantes basses et des hygrométries élevées), les charges (FAMT et COL) initiales du poisson (F) sont plus élevées que pour les campagnes A et C, alors que pour la campagne C (chaude et sèche), c'est la charge (LM) qui est la plus élevée. Ceci est sûrement lié au régime hydrologique du fleuve et à la concentration en micro-organismes avec la baisse d'eau en période de décrue. Valdimarsson et Gudbjörnsdottir (1984) notent également des charges (FAMT) plus élevées en saison froide et des charges (LM) plus élevées en saison chaude et sèche.

Dans C₁, la présence de salmonelles est décelée dans le poisson après débarquement (Db). Comme l'échantillon (F) (après capture) n'en contenait pas (malgré le fait que la capture ait eu lieu dans un bras du fleuve où l'eau est plus stagnante que dans le fleuve même), la contamination est sûrement due à la manutention à bord ou au triage à l'arrivée. Quant aux (ASR), leur charge croît progressivement, allant de 2×10^3 UFC/g MS à la capture (F) jusqu'à 1×10^6 après fermentation (FR). Elle décroît faiblement au cours du séchage et reste relativement élevée (2×10^5 UFC/g MS) en fin de séchage. Ceci confirme la participation de ces germes à la fermentation du poisson (cf. V.2.5.).

Les charges microbiennes du poisson relevées au cours de sa transformation pendant les trois campagnes confirment la nécessité d'élaborer des normes de qualité bactériologiques propres au contexte malien et tenant compte des différents facteurs locaux, à savoir la

Tableau V.11. Charges microbiennes des échantillons de *Tilapia* prélevés au cours du cycle B2 : du 25/12/90 (17h30) (capture) au 29/12/90 (17h00) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau (% bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS
(F)	74,1%	$1,2 \times 10^7$	$2,1 \times 10^3$	$1,5 \times 10^3$
(Db)	75,9%	$1,1 \times 10^6$	$2,3 \times 10^4$	$4,1 \times 10^2$
(FR)	75,2%	$8,5 \times 10^8$	$6,0 \times 10^5$	$1,4 \times 10^3$
(S2/18hrs)	56,7%	$7,7 \times 10^7$	$1,3 \times 10^5$	$2,3 \times 10^2$
(S3/29hrs)	48,2%	$1,1 \times 10^8$	$2,7 \times 10^6$	$7,7 \times 10^2$
(S4/41hrs)	35,0%	$1,0 \times 10^7$	$2,2 \times 10^5$	$4,6 \times 10^2$
(S6/65hrs)	26,2%	$4,3 \times 10^7$	$6,3 \times 10^5$	$1,4 \times 10^2$
(S7/75hrs)	17,3%	$1,8 \times 10^7$	$1,6 \times 10^4$	61

Tableau V.12. Charges microbiennes des échantillons de *Tilapia* (traditionnellement fermentés dans l'eau, sans additif) prélevés au cours du cycle C1 : du 4/05/92 (12h) (capture) au 6/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau (%bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS	Anaérobies sulfito-réducteurs (ASR) UFC/g MS	Salmonelles
(F)	76,6	$3,3 \times 10^3$ $\pm 5,3 \times 10^2$	$6,8 \times 10^2$ $\pm 2,4 \times 10^2$	$1,3 \times 10^4$ $\pm 1 \times 10^3$	2×10^3	absence
(Db)	74,8	$4,6 \times 10^3$ $\pm 6 \times 10^2$	1×10^3 $\pm 2,9 \times 10^2$	$5,8 \times 10^4$ $\pm 6,7 \times 10^3$	$1,2 \times 10^4$	présence
FR/eau	81,1	$3,7 \times 10^5$ $\pm 6,3 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$ $\pm 4,9 \times 10^3$	$1,6 \times 10^4$ $\pm 1,3 \times 10^3$	1×10^6	absence
S1/eau (18hrs)	39,6	2×10^6 $\pm 2,6 \times 10^5$	0	$1,7 \times 10^3$ $\pm 2,3 \times 10^2$	$> 5 \times 10^5$	absence
S2/eau (30hrs)	14,1	$4,5 \times 10^3$ $\pm 1 \times 10^3$	0	$1,4 \times 10^2$ ± 57	2×10^5	absence

charge initiale de l'eau du fleuve Niger, les contaminations dues aux diverses manipulations et l'exposition du produit aux aléas environnants. Ainsi, la charge initiale du poisson au Mali doit être comparée avec prudence à la norme française limite pour du poisson tranché ou en filets, congelé ou surgelé (10^4 UFC/g MB), d'autant plus que le parage et les pré-traitements ne sont pas identiques. Pour le poisson transformé, les seules normes françaises disponibles concernent les crustacés cuits (10^3 à 10^5 UFC/g MB selon la technique de réfrigération utilisée) (Sainclivier, 1983) et le saumon fumé (seuil limite de 10^6 UFC/g MB) (Knockaert, 1986).

- Qualité biochimique

Les analyses biochimiques effectuées lors des trois campagnes A, B et C sont regroupées dans les tableaux V.13. à V.17. Les valeurs sont les moyennes de 3 déterminations.

La teneur en eau initiale du poisson après capture (F) est de 73 à 75% (bh) pour la campagne A, de 74% et 76% (bh) respectivement pour les campagnes B et C. Elle reste pratiquement constante jusqu'au débarquement (avec parfois une augmentation légère probablement due au dépôt des poissons dans des flaques d'eau de la pirogue) puis elle augmente après fermentation (suite à l'immersion des poissons dans l'eau pendant la nuit). Enfin, elle diminue progressivement au cours du séchage jusqu'à des teneurs finales de 18%, 16%, 30%, 17% et 14% (bh) , respectivement pour les cycles A₁ (32 hrs), A₂ (58 hrs), B₁ (56 hrs), B₂ (75 hrs) et C₁ (30 hrs).

L'évolution du pH au cours de la transformation du poisson présente la même tendance dans les trois campagnes. Le pH du poisson après capture (F) est de 6,45 en moyenne pour A et C₁. Nous n'avons pas pu effectuer cette mesure lors de la campagne B faute de disponibilité du pHmètre. Après débarquement (Db), le pH diminue suite aux changements biochimiques survenus après la mort du poisson ("*rigor mortis* ") (cf. I.2.1.). Cette diminution du pH après capture est notée par Damodaran Nambudiri et Gopakumar (1988). Après fermentation (FR), le pH augmente de nouveau jusqu'aux environs de 7, étant donné que la dégradation bactérienne de certains acides aminés conduit à la formation d'amines. En début de séchage, le pH augmente encore très légèrement puis il diminue progressivement au cours du séchage jusqu'à atteindre, en fin de séchage, une valeur légèrement supérieure à sa valeur initiale. Ceci montre que l'opération de séchage stabilise l'évolution du pH dans le produit. Les valeurs de pH mesurées au cours de nos campagnes concordent avec celles mentionnées dans la littérature pour des produits

Tableau V.13. Analyses biochimiques de *Tilapia monodi* prélevés lors de la campagne A, cycle de transformation A₁ : du 22/06/90 (12h)(capture) au 24/06/90 (18h) (fin séchage)

Echantillon	Teneur en eau g H ₂ O/100g MB	pH	ABVT mg N/100g MB	ABVT mg N/100g MS
Frais (F)	73,0±1,4	6,85	13,2±0,4	48,7±1,5
Débarquement (Db)	74,0±0,0	6,67	5,6±0,7	21,5±2,8
Fermenté (FR)	76,5	7,24	74,2±2,0	315,8±8,0
Séché (S ₁ /8hrs)	50,0	-	327,4±0,6	654,8±1,3
Séché (S ₂ /20hrs)	35,3	6,85	394,8±2,4	610,2±3,7
Séché (S ₃ /32hrs)	18,4	-	375,6±2,8	460,3±3,5

Tableau V.14. Analyses biochimiques de *Tilapia monodi* prélevés lors de la campagne A, cycle de transformation A₂ : du 2/07/90 (11h)(capture) au 5/07/90 (18h30)(fin séchage)

Echantillon	Teneur en eau g H ₂ O/100g MB	pH	ABVT mg N/100g MB	ABVT mg N/100g MS
Frais (F)	74,6±0,5	6,44	10,5±0,2	41,2±0,6
Débarquement (Db)	75,1±1,6	6,16	11,5±0,3	46,1±1,1
Fermenté (FR)	79,3±0,1	7,11	70,7±0,9	341,3±4,1
Séché (S ₁ /10hrs)	56,6±0,2	7,39	335,7±1,3	732,8±2,8
Séché (S ₂ /24hrs)	51,0±0,6	7,07	310,2±1,6	631,9±3,2
Séché (S ₃ /34hrs)	29,9±0,3	6,73	385,3±0,0	549,6±0,0
Séché (S ₄ /46hrs)	28,2±0,5	6,70	430,6±2,4	599,8±3,3
Séché (S ₅ /58hrs)	15,9±0,1	6,67	451,4±3,2	536,7±3,8

similaires. Ainsi, des filets de hareng fraîchement fumés ont un pH de 6,6 (Magnusson et Traustadottir, 1982). Un pH de 6,18 a été noté sur du *Tilapia nilotica* frais provenant de bassins d'aquaculture en Thaïlande (Haruenkit *et al.*, 1988).

Le test AASC a été uniquement effectué au cours de la campagne C. L'évolution de cet indice montre bien sa corrélation avec le séchage. En effet, l'AASC de (F) (0,84 unités d'absorbance/g MB) chute au cours de la fermentation (FR) (0,34 unités) puis elle augmente progressivement au cours du séchage jusqu'à atteindre 4 unités en fin de séchage. La baisse d'AASC pendant la fermentation est liée à l'immersion des poissons dans l'eau, ce qui les abrite de la lumière et de l'oxygène et diminue le risque d'altération des lipides et des pigments. Par contre, le séchage (poissons étalés au soleil et à l'air) favorise ces altérations et augmente l'AASC. Maruf *et al.* (1990) citent des AASC de 2,9 à 6,6 sur du poisson séché. Notons que l'AASC de (F) rejoint celle mentionnée par Smith *et al.* (1990).

Le test TBA a été uniquement effectué au cours de la campagne B. Cependant, l'état du spectrophotomètre disponible n'a pas permis des mesures correctes d'absorbance. Nous avons alors comparé visuellement la coloration de l'échantillon analysé avec celle d'une gamme étalon de malonaldéhyde. Les valeurs données dans les tableaux V.15. et V.16. ne sont donc pas ponctuelles mais délimitent une fourchette d'estimation, elles permettent uniquement de dégager une tendance générale. L'évolution du TBA est corrélée avec celle de l'AASC, en ce sens qu'il diminue avec la fermentation puis augmente au cours du séchage jusqu'à un maximum. La valeur finale du TBA se stabilise sur un pseudo-palier correspondant à l'accumulation de composés d'oxydation des lipides. Haruenkit *et al.* (1988) citent des valeurs de TBA entre 4 et 8 mg MA/kg de poisson sur du poisson pré-séché puis fumé. Maruf *et al.* (1990) notent des TBA de 3,8 à 5,4 sur du poisson séché.

L'évolution de l'ABVT suit la même tendance que celles du pH et du développement microbien. L'ABVT moyen de (F) est respectivement de 12 ; 23 et 6 mg N% MB pour A, B et C₁. Ces valeurs sont bien en-dessous de la norme (30 mg N% MB) couramment employée pour le poisson frais en France (Sainclivier, 1983). Saluan-Abduhasan (1990) cite un ABVT de 5 mg N% MB sur du *Tilapia* frais aux Philippines, sans précision sur la saison de capture. Notons que l'interprétation des résultats d'ABVT (comme pour les autres indices microbiologiques et biochimiques) rapportés à la matière sèche est plus judicieuse car elle rend compte de l'évolution du produit, alors que le résultat rapporté à la matière brute ne donne qu'une image ponctuelle de la qualité.

Ainsi, l'ABVT moyen de (F) (45 mg N% MS pour A, 94 pour B et 24 pour C₁) augmente après fermentation (autour de 300 mg N% MS pour A₁, A₂ et C₁, 200 pour B₁). Ceci est

Tableau V.15. Analyses biochimiques de *Tilapia* prélevés lors de la campagne B, cycle de transformation B1 : du 20/12/90 (6h00) (capture) au 23/12/90 (17h00) (fin séchage)

Echantillon	Teneur en eau g H ₂ O %MB	TBA mg MA/kg MB	TBA mg MA/kg MS	ABVT mg N %MB	ABVT mg N %MS
Frais (F)	74,4	< 0,9	< 3,4	22,4	87,5
Fermenté (FR)	75,9	< 0,9	3,6	49,3	204,5
Séché (S ₁ /8hrs)	56,5	4,5	10,5	109,8	252,3
Séché (S ₂ /21hrs)	52,3	9,1	19,1	114,2	239,5
Séché (S ₃ /33hrs)	39,7	9,1	15,0	180,3	299,0
Séché (S ₄ /46hrs)	34,4	9,1	13,1	224,0	341,5
Séché (S ₅ /56hrs)	29,8	12,1	17,2	280,0	399,0

Tableau V.16. Analyses biochimiques de *Tilapia* prélevés lors de la campagne B, cycle de transformation B2 : du 25/12/90 (17h30) (capture) au 29/12/90 (17h00) (fin séchage)

Echantillon	Teneur en eau g H ₂ O %MB	TBA mg MA/kg MB	TBA mg MA/kg MS	ABVT mg N %MB	ABVT mg N %MS
Frais (F)	74,1	< 0,9	< 3,4	25,8	99,5
Débarquement (Db)	75,9	< 0,9	< 3,6	12,3	51,1
Fermenté (FR)	75,2	< 0,9	< 3,6	19,0	76,8
Séché (S ₁ /6hrs)	-	-	-	-	-
Séché (S ₂ /18hrs)	56,7	9,1	21,0	16,8	38,8
Séché (S ₃ /29hrs)	48,2	9,1	17,5	40,3	77,8
Séché (S ₄ /41hrs)	35,0	12,1	18,5	44,8	68,9
Séché (S ₆ /65hrs)	26,2	12,1	16,4	78,4	106,2
Séché (S ₇ /75hrs)	17,3	> 12,1	> 14,6	190,4	230,2

Tableau V.17. Analyses biochimiques des échantillons de *Tilapia* (traditionnellement fermentés dans l'eau, sans additif) prélevés lors du cycle C₁ : du 4/05/92 (12h) (capture) au 6/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau g H ₂ O % MB	pH	ABVT mg N % MB	ABVT mg N % MS	AASC (unité absorbance /g MB)
(F)	76,6±0,6	6,27	5,5±0,2	23,3±0,9	0,84±0,2
(Db)	74,8±0,1	6,14	6,2±0,0	24,4±0,0	1,00±0,0
(FR/eau)	81,1±1,4	7,14	59,6	316,1	0,34±0,01
S ₁ /eau (18hrs)	39,6±1,0	7,19	318,1±1,6	526,3±2,6	2,66±0,0
S ₂ /eau (30hrs)	14,1±0,3	6,42	282,8±2,4	329,2±2,8	3,99±0,01

dû à l'hydrolyse des protéines et à la production d'ammoniac. Notons que la faible valeur d'ABVT (la moins élevée de tous les cycles) pour l'échantillon (FR) de B₂ peut s'expliquer par la durée de fermentation plus courte de cet échantillon, ce qui a limité la dissociation des protéines. L'ABVT augmente ensuite fortement au cours du séchage (qui favorise la protéolyse et donc la formation d'acides aminés libres) jusqu'à un palier puis chute progressivement dans les dernières phases du séchage, suite à la volatilité de l'ammoniac. Sarnianto *et al.* (1985) citent des valeurs de 130 à 260 mg N% sur des produits de pêche salés fermentés en Indonésie mais ils ne précisent pas si ces chiffres sont rapportés à la matière brute ou sèche.

Notons que lors de la campagne B, l'ABVT augmente de façon continue pendant le séchage, ceci pourrait s'expliquer par la forte hygrométrie et les fluctuations climatiques répétées de cette saison, ce qui favorise la croissance microbienne et augmente l'ABVT. Remarquons également que les valeurs initiales d'ABVT (pour l'échantillon F) sont plus élevées dans la campagne B que dans A et C. Ceci est corrélé avec les charges microbiennes de (F) plus élevées pour cette saison et confirme l'influence du régime hydrologique du fleuve sur la qualité initiale du poisson.

V.2.4. Critères maliens d'appréciation sensorielle du poisson séché

Le poisson séché est utilisé de différentes façons:

- dans les plats en sauce, à défaut de viande ou de poisson frais ; notamment dans le "Tiordi" (recette peul) ou le "Koucam" (recette bozo);
- comme condiment, pilé et ajouté à presque tous les plats à base de viande ou de poisson, pour en relever le goût;
- comme médicament (en bouillon ou en soupe).

Les différentes enquêtes menées auprès de pêcheurs, transformatrices, consommateurs et revendeuses ont permis de dégager les tendances générales de l'appréciation sensorielle malienne du poisson séché.

Les femmes revendeuses sur le port de Mopti (essentiellement Bozo et Somono), jugent la qualité du poisson séché à vue d'oeil. Elles reconnaissent le poisson fermenté à sa forte odeur et à son aspect (un poisson fermenté gonfle alors qu'un poisson non fermenté s'affaisse). Elles affirment que le poisson fermenté avant séchage est le plus

demandé. De plus, elles signalent qu'une couleur foncée (rougeâtre) est plus appréciée qu'une couleur claire et qu'un aspect brillant est recherché.

Les revendeuses estiment que le prix du poisson n'a aucune influence sur le choix de l'acheteur, étant donné que ce prix n'est jamais fixe mais suit la loi du marché (chute de prix en cas d'abondance du poisson et hausse de prix dans le cas contraire). Par contre, ce qui guide surtout l'acheteur de poisson transformé est l'usage qu'il veut en faire. Il choisit l'espèce de poisson en fonction du plat (ou sauce) auquel il la réserve. Ainsi, le *Lates niloticus* (capitaine) et l'*Hydrocynus brevis* (hydrocyon) séchés sont destinés au même type de sauce accompagnant le "tô" ou gâteau de mil. Le *Tilapia* (*monodi*, *niloticus*) séché accompagne souvent des sauces à base de pâte d'arachide. L'*Alestes dentex* (petit poisson gras appelé couramment "sardine" au Mali) séché est très apprécié pour son aspect brillant rappelant le poisson frit. Le poisson "brûlé" est surtout destiné au pays Dogon (région au Nord de Mopti) où il est pilé et mis dans toutes les sauces.

Les enquêtes aux campements (Boumama Daga à 15 km de Mopti et Namara Daga à 8 km de Mopti) ainsi qu'auprès des consommateurs de Mopti ont permis de dégager les principaux critères communs demandés par les différents acteurs de la filière "poisson séché" au Mali (à savoir pêcheurs, transformatrices, consommateurs et revendeuses). Ainsi, le poisson marchand idéal doit avoir :

- une odeur très forte, piquante, odeur de "pourriture" qui indique une fermentation poussée. Cette odeur est souvent comparée par les consommateurs à l'odeur de feuille de baobab cuite ;

- une chair argentée, luisante et brillante. La notion de couleur n'est pas très évidente en termes de nuance ou de ton. Les couleurs jaune, rouge, marron ont été mentionnées; il semble que la couleur marron soit la plus appréciée. Certaines consommatrices soulignent que la couleur n'est pas un critère fiable, étant donné que les transformatrices ou les revendeuses peuvent enduire le poisson séché d'huile d'arachide avant sa mise en vente. Notons cependant que l'aspect brillant et luisant est important pour les maliens; ils attribuent cela au degré de rinçage du poisson avant et après fermentation ;

- un goût piquant assez prononcé et une saveur lourde. Ce piquant est toujours comparé avec celui très fort du *Lates niloticus* (capitaine) et de l'*Hydrocynus brevis* (hydrocyon) séchés.

- enfin, le poisson séché doit être bien sec, mais ni cassant ni friable. Les consommateurs et transformatrices préfèrent une chair ferme, sans fissure, de texture

légèrement souple (ce qui permet de le conserver longtemps). Par contre, les revendeurs demandent parfois du poisson cassant (pour une question de prix au poids).

Notons enfin qu'avant commercialisation (et surtout après un stockage prolongé), les femmes (transformatrices ou revendeuses) frottent le poisson séché avec un peu d'eau puis l'enduisent d'huile, afin de le rendre plus brillant et d'augmenter sa valeur marchande.

V.2.5. Opération traditionnelle de fermentation

Le terme "fermentation" du poisson doit être pris au sens large et défini comme étant la transformation de substances organiques, sous l'action de micro-organismes et/ou d'enzymes endogènes (protéases). L'action des enzymes est importante au niveau du changement de texture alors que l'activité microbienne est prépondérante dans le développement des saveurs spécifiques (Van Veen, 1965 ; Beddows, 1985). La fermentation des produits de la pêche est très répandue. Elle répond à deux objectifs : la stabilisation du produit et l'amélioration de ses qualités organoleptiques.

Les dénombrements effectués sur le *Tilapia* en fin de fermentation (noté FR/eau, tableau V.21.) montrent la présence d'une flore acétique 9×10^5 UFC/g MS sur milieu de Carr) légèrement supérieure à une flore lactique ($1,2 \times 10^5$ UFC/g MS sur milieu MRS). En fin de séchage (échantillon S2/eau, tableau V.21.), ces deux flores diminuent mais coexistent toujours avec prédominance de la flore acétique (7×10^3 UFC/g MS) par rapport à la lactique ($3,5 \times 10^3$ UFC/g MS). Nous n'avons pas pu isoler des germes appartenant à ces flores, étant donné le manque de structure adéquate au Mali.

Le dosage des acides organiques (tableau V.25.) produits au cours de la fermentation montre l'absence d'acide lactique et la prédominance d'acide acétique. La teneur de celui-ci croît au cours du séchage malgré sa volatilité. D'autres acides organiques sont également formés, butyrique et propionique (par ordre décroissant d'importance) et des traces d'isovalérique. Ces mêmes acides sont retrouvés dans des salamis fermentés (Lücke, 1985). Des résultats analogues ont été trouvés sur du *Tilapia* traditionnellement fermenté et séché à Mopti, mais analysé après un stockage prolongé. Sa teneur en acide acétique demeure prédominante malgré la volatilité de celui-ci au cours du stockage (cf. V.2.8.).

La littérature mentionne peu de travaux concernant les produits de pêche fermentés en Afrique ; citons le "bomone" au Ghana (Nerquaye-Tetteh *et al.*, 1978) et le "guedj" au

Sénégal (Odunfa, 1985). A notre connaissance, aucune étude sur la fermentation du poisson au Mali n'existe jusqu'ici.

Les résultats de notre étude sur la fermentation permettent d'interpréter ce phénomène comme suit : après capture et suite au délai écoulé avant la fermentation, une autolyse se déclenche dans le poisson sous l'action de protéases endogènes. Les produits de cette autolyse constituent alors des substrats pour des bactéries, ce qui entraîne la production d'acides organiques. D'autre part, l'immersion des poissons dans l'eau et le recouvrement du "canari" de fermentation créent des conditions aéro-anaérobies qui favorisent une fermentation spontanée due au développement d'une flore lactique et d'une flore acétique. Notons que *Lactobacillus* fait partie de la flore de surface des poissons d'eau douce. Comme la fermentation n'est pas excessivement longue, (contrairement à celle des produits de la pêche fermentés en Asie), et que le poisson ne contient pas beaucoup d'hydrates de carbone, les bactéries lactiques ne peuvent produire qu'une faible quantité d'acide lactique. Cette quantité, ajoutée à celle initialement présente dans le poisson (par glycogénolyse *post mortem*), constitue un substrat potentiel pour les bactéries acétiques qui oxydent cet acide lactique en acide acétique (Divies, 1989). De plus, le séchage après fermentation permet une aérobiose qui favorise le développement des bactéries acétiques.

Les pH relativement élevés (autour de 7), mesurés dans l'eau de fermentation et dans le poisson fermenté, confirment que la fermentation lactique n'est pas prédominante, étant donné que les bactéries lactiques acidifient le milieu. Il semble que la faible teneur du poisson en hydrates de carbone soit un facteur limitant pour la fermentation lactique. Les bactéries lactiques impliquées au début de la fermentation du poisson au Mali pourraient être des *Lactobacillus*, du sous-groupe *Streptobacterium* et *Betabacterium*. En effet, ces deux espèces sont hétérofermentaires, elles peuvent transformer les pyruvates en acétates (en présence d'oxygène) et elles peuvent fermenter des pentoses (tels que le ribose) en acides lactique et acétique (Lücke, 1985). Notons également que les bactéries lactiques peuvent hydrolyser certain nombre d'acides aminés et participer à la saveur du produit (Desmazeaud, 1991 ; Montel et Talon, 1991).

Enfin et parallèlement aux phénomènes d'autolyse et à la croissance de flores lactique et acétique, il semble que la présence d'anaérobies sulfito-réducteurs protéolytiques, type *Clostridium*, soit impliquée dans la fermentation du poisson et dans le développement de son arôme typique. Ceci est relevé dans des sauces et des pâtes de poisson fermentées en Asie (Van Veen, 1965 ; Beddows, 1985 ; In, 1989) et dans des végétaux ensilés (Gouet, 1989). Ces bactéries anaérobies peuvent contaminer le poisson lors de son rinçage (après éviscération) dans l'eau du fleuve. Shewan (1970) note que

l'espèce la plus couramment rencontrée dans la vase des rivières appartient au groupe *Clostridium perfringens-bifermentans*. Le dénombrement d'anaérobies sulfite-réducteurs (tableau V.18.) sur le poisson en fin de fermentation (FR/eau : 1×10^6 UFC/g MS) et en fin de séchage (S_2 /eau : 2×10^5 UFC/g MS) confirment la présence de ces germes et leur action potentielle lors de la fermentation traditionnelle du poisson au Mali.

Magno-Orejana (1983) et Beddows (1985) citent deux cas pouvant appuyer notre interprétation de la fermentation traditionnelle du poisson au Mali. Il s'agit du "pra-hoc" (Cambodge) et du "budu" (Malaisie). Ces deux produits sont obtenus par fermentation du poisson gardé au préalable pendant 24 h à température ambiante (dans une jarre) avant salage. La production d'acides organiques dans ces produits, essentiellement acétique et butyrique (en moindre quantité), est due à une activité microbienne amorcée avant l'étape du salage. Une souche unique a été isolée dans le cas du "budu" mais elle n'a pas pu être identifiée selon la classification de Bergey. Van Veen (1965) souligne que dans le cas du "pra-hoc", l'autolyse déclenchée avant salage participe au goût apprécié du produit.

Notons que les produits de la pêche fermentés en Asie ("fish sauces", "fish pastes") subissent un salage généralement poussé avant la fermentation. Dans ce cas, les processus autolytiques priment (par activité enzymatique et/ou action microbienne) (Adams *et al.*, 1987). Le sel amorce ainsi l'hydrolyse et donc la fermentation. De plus, le sel réduit l'activité de l'eau du produit, il perturbe l'équilibre osmotique des cellules bactériennes, d'où son effet bactériostatique, notamment sur les germes pathogènes.

Ainsi, la fermentation traditionnelle du poisson au Mali se résume en un procédé complexe basé sur plusieurs phénomènes simultanés et interactifs. Ces phénomènes consistent en une autolyse enzymatique, une activité microbienne (anaérobie) protéolytique et l'action de flores spécifiques de fermentation (lactique et acétique). Les acides acétique et butyrique semblent participer majoritairement à l'odeur typique du poisson traditionnellement fermenté et séché au Mali. Jeay (1977) souligne que c'est la phase de fermentation qui donne son goût particulier au poisson séché de Mopti, notamment au *Tilapia*.

Il est clair que la maîtrise des processus de fermentation peut apporter des solutions intéressantes aux problèmes actuels de la transformation des produits de la pêche. Ces solutions concernent la valorisation d'espèces non commercialisables, la prolongation de la durée de vie des produits et l'amélioration de leur saveur. La recherche dans ces domaines reste cependant embryonnaire (Beddows, 1985 ; In, 1989). Il serait intéressant de tester l'addition de bactéries lactiques "LAB" comme "starter" de la fermentation, ainsi que des hydrates de carbone fermentescibles (riz, mélasse, céréales

ou légumineuses locales). Cette double addition (largement utilisée en Asie) favorise d'une part, la diminution du pH et d'autre part, la production de substances naturellement bactériostatiques (bactériocines). De plus, les bactéries lactiques (homo ou hétérofermentaires) produisent des acides organiques (notamment lactique et acétique) dont les propriétés anti-microbiennes sont reconnues, notamment pour l'inhibition de germes pathogènes (*Listeria*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Aeromonas*) véhiculés par l'eau et pouvant contaminer le poisson (Lücke, 1985 ; Béliard et Thuault, 1989 ; Daeschel, 1989 ; Béliard *et al.*, 1991 ; Dickson, 1992 ; Palumbo et Williams, 1992 ; Siragusa et Dickson, 1992).

Le choix des espèces "LAB" comme "starter" peut être orienté par ce qui est déjà appliqué pour améliorer la fermentation du saucisson sec et de la viande hachée de boeuf (Lücke, 1985 ; Darmadji *et al.*, 1990 ; Roca et Incze, 1990 ; Montel et Talon, 1991) ou sur les substrats poisson/amylacés fermentés (Twiddy *et al.*, 1987). Il est évident que ces essais doivent être menés et adaptés au contexte et aux goûts maliens. Ceux-ci pourraient en fait ne pas accepter un produit plus acide et/ou moins aromatique, même si sa qualité microbiologique est meilleure.

V.2.6. Utilisation d'additifs alimentaires

Les additifs alimentaires testés sont incorporés dans l'eau de fermentation. Leur impact est suivi par l'évolution de la qualité sanitaire et biochimique du poisson ainsi traité, ainsi que par son évaluation organoleptique en comparaison avec le témoin traditionnel.

- Qualité sanitaire

La qualité sanitaire est suivie par les dénombrements de flore aérobie mésophile totale (FAMT), de coliformes (COL), de levures et moisissures (LM), d'anaérobies sulfito-réducteurs (ASR) et de salmonelles. Les charges microbiennes (tableaux V.18. à V.20.) sont la moyenne de deux déterminations. Afin de faciliter la lecture des résultats, les échantillons sont notés (F) (après capture), (Db) après débarquement, (FR) après fermentation et (S_x) au cours du séchage, "x" étant l'ordre de prélèvement. Ces codes sont suivis de l'additif utilisé.

La charge de (F) est de $3,6 \times 10^3$ UFC/g MS en moyenne. L'addition de vinaigre, de bicarbonate de sodium et d'acide lactique, donne le même ordre de grandeur (10^5) pour

Tableau V.18. Charges microbiennes des échantillons de *Tilapia* prélevés au cours du cycle C₁ : du 4/05/92 (12h) (capture) au 6/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau (%bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS	Anaérobies sulfito-réducteurs (ASR) UFC/g MS	Salmonelles
(F)	76,6	$3,3 \times 10^3 \pm 5,3 \times 10^2$	$6,8 \times 10^2 \pm 2,4 \times 10^2$	$1,3 \times 10^4 \pm 1 \times 10^3$	2×10^3	absence
(Db)	74,8	$4,6 \times 10^3 \pm 6 \times 10^2$	$1 \times 10^3 \pm 2,9 \times 10^2$	$5,8 \times 10^4 \pm 6,7 \times 10^3$	$1,2 \times 10^4$	présence
(FR/eau)	81,1	$3,7 \times 10^5 \pm 6,3 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4 \pm 4,9 \times 10^3$	$1,6 \times 10^4 \pm 1,3 \times 10^3$	1×10^6	absence
S ₁ /eau (18hrs)	39,6	$2 \times 10^6 \pm 2,6 \times 10^5$	0	$1,7 \times 10^3 \pm 2,3 \times 10^2$	$> 5 \times 10^5$	absence
S ₂ /eau (30hrs)	14,1	$4,5 \times 10^3 \pm 1 \times 10^3$	0	$1,4 \times 10^2 \pm 57$	2×10^5	absence
(FR/sel)	68,4	$2,8 \times 10^4 \pm 4,2 \times 10^3$	0	$9,5 \times 10^3 \pm 7,8 \times 10^2$	$5,5 \times 10^4$	présence
S ₁ /sel (18hrs)	27,7	$2,5 \times 10^3 \pm 2,6 \times 10^2$	0	$2 \times 10^3 \pm 2,4 \times 10^2$	$4,1 \times 10^4$	absence
S ₂ /sel (30hrs)	23,3	$1,3 \times 10^3 \pm 1,8 \times 10^2$	0	$2 \times 10^2 \pm 70$	$1,3 \times 10^2$	absence

(FAMT) que la fermentation traditionnelle (dans l'eau). La (FAMT) du (FR/vinaigre) (9×10^5) et du (FR/lactique) ($8,4 \times 10^5$) confirment notre interprétation de la fermentation traditionnelle au Mali, à savoir la compétitivité de flores lactique et acétique. L'addition de sel semble ralentir la fermentation (FAMT la plus faible de $2,8 \times 10^4$ UFC/g MS), ce qui s'explique par la concentration saturée de la saumure. La diminution de la (FAMT) au cours du séchage rejoint celle observée dans le procédé traditionnel (cf. V.2.3.). Nous n'avons pas dénombré les charges microbiennes de (F) et (Db) pour le cycle C₃ (traitements au bicarbonate et à l'acide lactique) par manque d'échantillons. Nous estimons qu'elles sont analogues à celles relevées dans C₁ et C₂, étant donné l'homogénéité dans la saison et les lieux de capture.

La (FAMT) du poisson en fin de séchage (S₂/vinaigre) et (S₂/lactique) est relativement "élevée" par rapport à celle du traditionnel (S₂/eau) ou de (S₂/sel). Ceci est corrélé avec la présence de bactéries lactiques et acétiques plus nombreuses (fermentation plus poussée en présence de vinaigre ou d'acide lactique) et n'indique pas une détérioration du produit. Lu *et al.* (1988) citent 3×10^3 UFC/g MB sur du *Tilapia* salé-séché au Ghana.

La présence de coliformes (COL) dans (FR) peut être due à une contamination par l'eau de fermentation ou par le "canari". Notons cependant l'absence de (COL) dans tous les échantillons en fin de séchage (S₂) (même pour S₂/eau). Ceci semble lié aux conditions climatiques de la campagne C (climat chaud et sec) qui ne favorisent pas leur développement. Le sel inhibe les coliformes (charge nulle dans FR/sel, S₁/sel et S₂/sel), ceci rejoint les travaux de Sorinmade *et al.* (1986) sur du poisson salé-séché au Nigéria.

Notons que les charges microbiennes de (S₂/bicarbonate) sont légèrement plus élevées que celles de (S₂/eau). Ceci rejoint l'appréciation organoleptique de cet échantillon et son classement similaire au témoin traditionnel. Notons que les bicarbonates présentent une activité anti microbienne contre certaines bactéries et levures, mais l'élévation de pH qu'ils provoquent risque de favoriser le développement de bactéries insensibles aux bicarbonates. Par ailleurs, si le pH est abaissé, les bicarbonates sont décomposés avec libération de CO₂. Leur seule possibilité d'utilisation semble concerner les produits à pH élevé (saucisses, farines). Le trempage de filets de morue dans des solutions saturées de bicarbonate de sodium et/ou d'ammonium a démontré leur efficacité à réduire la charge microbienne totale, les anaérobies sulfito-réducteurs et les bactéries protéolytiques. Le bicarbonate d'ammonium est plus efficace que celui de sodium mais il entraîne des odeurs désagréables rémanentes dans le poisson (Curran *et al.*, 1990).

Tableau V.19. Charges microbiennes des échantillons de *Tilapia* prélevés au cours du cycle C₂ : du 5/05/92 (4h) (capture) au 7/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau (%bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS	Anaérobies sulfito- réducteurs (ASR) UFC/g MS	Salmonelles
(Db)	77,2	$2,5 \times 10^3 \pm 4,7 \times 10^2$	0	$1,3 \times 10^4 \pm 1,1 \times 10^3$	44	absence
FR/vinaigre	78,0	$9 \times 10^5 \pm 9 \times 10^4$	4×10^2	$4,5 \times 10^3 \pm 6,4 \times 10^2$	1×10^6	absence
S ₁ /vinaigre (22hrs)	36,7	$4,4 \times 10^4 \pm 3,7 \times 10^3$	0	$7,9 \times 10^2 \pm 1,6 \times 10^2$	$7,9 \times 10^3$	absence
S ₂ /vinaigre (32hrs)	9,4	$7,5 \times 10^3 \pm 1,3 \times 10^3$	0	< 80	$3,3 \times 10^5$	absence
FR/sel+vinaigre	72,8	$1,2 \times 10^4 \pm 2,9 \times 10^3$	1×10^2	$1,1 \times 10^4 \pm 9 \times 10^2$	$3,7 \times 10^3$	absence
S ₁ /sel+vinaigre (22hrs)	29,0	$7,9 \times 10^2 \pm 1,5 \times 10^2$	0	$2,1 \times 10^3 \pm 2,4 \times 10^2$	0	absence
S ₂ /sel+vinaigre (32hrs)	15,6	$4,6 \times 10^2 \pm 85$	0	< 50	0	absence

Seuls les échantillons (Db) et (FR/sel) de C₁, ainsi que (FR/lactique) de C₃ contiennent des salmonelles. Ces cas positifs doivent être ponctuellement liés à une contamination possible des récipients utilisés au débarquement et pour la fermentation. L'absence de salmonelles dans les autres échantillons dénote la faible contamination d'origine fécale (ou humaine) du poisson. La présence de salmonelles pour (Db) (cycle C₁) et (FR/lactique) (cycle C₃) est corrélée à celle de coliformes. Notons que l'utilisation d'acides organiques (lactique et acétique) pour inhiber des germes pathogènes est liée à leur concentration en acide non dissocié. L'acide acétique a un effet bactéricide contre *Salmonella typhimurium* sur des carcasses de boeuf (Dickson, 1992). De même, un traitement à 0,5% d'acide lactique a démontré son efficacité sur la diminution de salmonelles dans des poulets (Izat *et al.*, 1990).

Les (ASR) sont inhibés par le traitement au sel et complètement détruits par le mélange sel+vinaigre. Les charges (ASR) les plus élevées sont rencontrées dans (FR) et (S₂) traités au vinaigre ou à l'acide lactique. Ceci semble confirmer la participation de ces germes à la fermentation traditionnelle du poisson au Mali, ainsi que leur cohabitation spontanée avec les autres flores spécifiques de la fermentation. Quant aux charges (LM), elles sont pratiquement du même ordre de grandeur pour les différents traitements (de 50 à 2×10^2 UFC/g MS). Notons que le mélange sel+vinaigre a retardé l'apparition de moisissures sur du poisson séché et a augmenté sa durée de stockage de 2 à 6 mois (Ikomé, 1986).

Le tableau V.21. montre bien la coexistence des flores lactique et acétique, avec prédominance de la flore acétique. Ces données ne sont pas disponibles pour tous les échantillons. La diminution de ces flores au cours du séchage rejoint les tendances observées sur les autres flores. Notons que le salage diminue les flores lactique et acétique par rapport à celles du traitement traditionnel (dans l'eau). Adams *et al.* (1987) note que le sel à forte concentration ralentit le degré de fermentation. De même, l'action inhibitrice du sel sur les micro-organismes en général est liée à plusieurs facteurs dont la diminution de l'activité de l'eau dans la chair, la réduction de la solubilité de l'oxygène et la déshydratation des germes. L'addition de vinaigre augmente à la fois les flores lactique et acétique, et le traitement à l'acide lactique augmente la flore lactique.

Les teneurs en acides organiques en fonction des différents additifs sont données dans le tableau V.25. (moyennes de deux déterminations). Le vinaigre et l'acide lactique produisent des teneurs en acide acétique similaires à celle du traitement traditionnel, ceci est corrélé avec les dénombrements de leurs flores lactique et acétique. Seul le traitement au bicarbonate de sodium favorise la formation d'acide butyrique, en quantité

Tableau V.20. Charges microbiennes de *Tilapia* prélevés au cours du cycle C3 de séchage : du 9/05/92 (4h) (capture) au 11/05/92 (18h) (fin séchage).

Echantillon prélevé	Teneur en eau (%bh)	Flore aérobie mésophile totale (FAMT) UFC/g MS	Coliformes totaux (COL) UFC/g MS	Levures et Moisissures (LM) UFC/g MS	Anaérobies sulfito-réducteurs (ASR) UFC/g MS	Salmonelles
FR/ bicarbonate	78,5	$4,6 \times 10^5 \pm 6,6 \times 10^4$	$8,8 \times 10^3$	$4,6 \times 10^3 \pm 6,6 \times 10^2$	14×10^5	absence
S2/ bicarbonate (33hrs)	16,6	$5,6 \times 10^3 \pm 1,2 \times 10^3$	0	$1,7 \times 10^2 \pm 62$	$3,6 \times 10^5$	absence
FR/acide lactique	78,9	$8,4 \times 10^5 \pm 8,9 \times 10^4$	$1 \times 10^3 \pm 3,1 \times 10^2$	$4,7 \times 10^3 \pm 6,7 \times 10^2$	$14,2 \times 10^5$	présence
S2/acide lactique (33hrs)	14,0	$1 \times 10^4 \pm 1,5 \times 10^3$	0	$1,2 \times 10^2 \pm 55$	$3,5 \times 10^5$	absence

Tableau V.21. Flore lactique (sur milieu MRS) et flore acétique (sur milieu de Carr) en fin de fermentation (FR) et en fin de séchage (S2) (campagne C ; cycles C1, C2 et C3)

Echantillon	Flore lactique UFC/g MS	Flore acétique UFC/g MS
FR/eau	$1,2 \times 10^5$	9×10^5
S2/eau	$3,5 \times 10^3$	7×10^3
FR/sel	22×10^3	$9,5 \times 10^4$
S2/sel	0	$2,8 \times 10^3$
FR/vinaigre	$8,2 \times 10^5$	$1,4 \times 10^6$
FR/sel+vinaigre	$1,8 \times 10^3$	-
FR/bicarbonate	$4,7 \times 10^4$	-
FR/acide lactique	$7,6 \times 10^5$	-

comparable à celle de (S₂/eau), ce qui corrobore la similitude notée par les dégustateurs maliens dans l'appréciation de ce traitement avec le traditionnel.

La faible teneur d'acide lactique (0,3 g%MS) dans (S₂/sel) confirme que l'acide lactique dosé ne provient pas uniquement des bactéries lactiques (inexistantes dans cet échantillon) mais également de l'acide lactique produit par glycogénolyse *post-mortem* et jouant le rôle de substrat pour les bactéries acétiques (moins nombreuses dans cet échantillon que dans le traditionnel). Aucun des additifs testés ne produit de l'acide isobutyrique ; de faibles teneurs en acide isovalérique sont décelées dans (S₂/eau) et (FR/vinaigre).

• Qualité organoleptique

Les échantillons traités aux additifs sont dégustés en fin de séchage par un jury composé de 8 à 15 personnes (le nombre est variable en fonction de la disponibilité des dégustateurs). Le témoin est l'échantillon traditionnellement fermenté (dans l'eau). Les différents produits sont classés en fonction de critères (couleur, flaveur, texture) selon une échelle de 4 points allant de 0 (mauvais) à 3 (très bon). La note attribuée à chaque critère est pondérée par le nombre de dégustateurs, la note globale du produit est la somme des notes des trois critères. Notons que cette dégustation n'est pas une analyse sensorielle élaborée mais elle rend compte des goûts et appréciations subjectives des consommateurs maliens. De plus, elle est bien corrélée avec les analyses microbiologiques et biochimiques.

Le témoin traditionnel a un aspect brillant, gonflé, une texture ferme et non cassante, une forte odeur de fermentation (mélange aigre, acide et butyrique) et un goût prononcé. Le poisson traité par salage est apprécié pour sa texture ferme (rappelant celle de la viande) et par son rendement au poids (sa teneur en eau finale étant plus élevée, sa vente au poids est plus avantageuse). Cependant, il est rejeté pour son goût (trop salé), sa couleur (trop claire et terne) et son odeur (presque inexistante). Ceci est également noté par Berhimpon *et al.* (1990). Ces appréciations sensorielles confirment les analyses de qualité effectuées sur cet échantillon (teneur en eau plus élevée, AASC plus faible et flores lactique et acétique moins nombreuses que pour les autres traitements). Notons que la fermeté de la texture après salage provient de la solubilisation de certaines protéines et de leur perte dans la saumure.

Tableau V.22. Analyses biochimiques des échantillons de *Tilapia* prélevés lors du cycle C₁ : du 4/05/92 (12h) (capture) au 6/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau g H ₂ O% MB	pH	ABVT mg N% MB	ABVT mg N% MS	AASC (unité absorbance /g MB)
(F)	76,6±0,6	6,27	5,5±0,2	23,3±0,9	0,84±0,2
(Db)	74,8±0,1	6,14	6,2±0,0	24,4±0,0	1,00±0,0
FR/eau	81,1±1,4	7,14	59,6	316,1	0,34±0,01
S ₁ /eau (18hrs)	39,6±1,0	7,19	318,1±1,6	526,3±2,6	2,66±0,0
S ₂ /eau (30hrs)	14,1±0,3	6,42	282,8±2,4	329,2±2,8	3,99±0,01
FR/sel	68,4±0,6	6,49	12,5±0,2	39,4±0,6	0,50±0,2
S ₁ /sel (18hrs)	27,7±0,4	6,36	34,2±0,8	47,3±1,1	1,17±0,2
S ₂ /sel (30hrs)	23,3±0,5	6,59	68,3±3,2	89,1±4,1	1,50±0,2

Tableau V.23. Analyses biochimiques des échantillons de *Tilapia* prélevés lors du cycle C₂ : du 5/05/92 (4h) (capture) au 7/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau g H ₂ O% MB	pH	ABVT mg N% MB	ABVT mg N% MS	AASC (unité absorbance /g MB)
(Db)	77,2±0,5	6,69	6,9±0,2	30,1±0,9	0,67±0,0
FR/vinaigre	78,0±0,01	6,88	51,8±0,0	235,1±0,0	0,67±0,0
S ₁ /vinaigre (22hrs)	36,7±0,2	6,84	26904±2,4	425,7±3,8	2,67
S ₂ /vinaigre (32hrs)	9,4±0,2	6,24	206,1±1,6	227,4±1,8	3,00
FR/sel+vinaigre	72,8±0,6	5,30	9,9±0,2	36,5±0,7	0,50±0,2
S ₁ /sel+vinaigre (22hrs)	29,0±0,4	5,18	38,1±1,6	53,7±2,2	1,66
S ₂ /sel+vinaigre (32hrs)	15,6±0,7	5,61	57,1±1,6	67,7±1,9	2,00

Le produit traité au mélange sel+vinaigre a une texture consistante et appréciée ressemblant à celle du témoin traditionnel. Les ménagères la déclarent idéale pour la préparation des soupes. Par contre, la couleur de ce produit est claire et son odeur est très différente de celle du témoin. Knockaert (1989) note que l'addition de sel facilite la pénétration du vinaigre dans le poisson et tend à raffermir la chair.

Le traitement au vinaigre donne un produit assez mou ; ceci rejoint les travaux d'Oreskovich *et al.* (1992) qui notent une augmentation de la tendreté de la viande après marinage dans une solution d'acide acétique. La couleur de ce produit est acceptable mais son odeur est franchement rejetée car rappelant le vinaigre et les marinades (elle présente plus d'aigreur et moins de "pourriture" que celle du témoin).

Le traitement à l'acide lactique donne un produit plaisant par son aspect, sa couleur et surtout par son odeur très forte de fermentation. Sa texture légèrement cassante n'est pas très appréciée. Izat *et al.* (1990) ont démontré que l'acide lactique entraîne un brunissement de la peau de poulet mais ceci ne peut que convenir aux goûts maliens. Enfin, le traitement au bicarbonate de sodium donne un produit très similaire au produit traditionnel et aussi apprécié, tant par sa couleur, son aspect, sa texture et sa flaveur.

Ainsi, les divers additifs testés sont classés par ordre décroissant d'acceptation : bicarbonate de sodium, acide lactique, mélange sel+vinaigre, vinaigre, sel.

- Qualité biochimique

Les analyses biochimiques des poissons traités aux additifs sont énoncées dans les tableaux V.22. à V.24. Le pH de (FR) chute avec l'addition d'acide lactique, de vinaigre ou de sel, mais surtout avec le mélange sel+vinaigre. Ce mélange semble rehausser les effets individuels de chacun de ses constituants, ceci est également constaté sur l'évolution des charges microbiennes.

Le témoin traditionnel (S₂/eau) présente l'AASC la plus élevée (3,99) et (S₂/sel) la plus faible (1,5). Ceci rejoint l'appréciation sensorielle des dégustateurs au sujet de l'aspect terne et clair de l'échantillon salé. De même, l'AASC de (S₂/vinaigre) et de (S₂/lactique) se rapproche de celle de (S₂/eau), ce qui est confirmé par l'appréciation visuelle de leur couleur.

Le salage entraîne une chute moins rapide de la teneur en eau du poisson, tant après fermentation (FR) qu'en fin de séchage (S₂/sel). Ceci est observé par Berhimpon *et al.*

Tableau V.24. Analyses biochimiques des échantillons de *Tilapia* prélevés lors du cycle C3 : du 9/05/92 (4h) (capture) au 11/05/92 (18h) (fin séchage)

Echantillon prélevé	Teneur en eau g H ₂ O% MB	pH	ABVT mg N% MB	ABVT mg N% MS	AASC (unité absorbance/g MB)
FR/bicarbonate	78,5±0,3	7,32	55,2±0,8	256,8±3,7	0,33
S ₁ /bicarbonate (10hrs)	46,1±0,4	7,66	194,9±1,6	361,6±2,9	1,67
S ₂ /bicarbonate (32hrs)	16,6±0,1	7,06	303,0±0,8	363,3±1,0	2,67
FR/acide lactique	78,9±0,7	6,79	50,1±0,4	237,7±1,9	0,33
S ₁ /acide lactique(10hrs)	41,2±0,8	7,01	220,1±0,8	374,0±1,3	2,10
S ₂ /acide lactique(32hrs)	14,0±0,4	6,27	235,2±1,6	273,5±1,9	3,00

Tableau V.25. Teneurs moyennes en acides organiques (g% MS) en fin de fermentation (FR) et en fin de séchage S₂ (campagne C, cycles C₁, C₂ et C₃)

Echantillon	Lactique	Acétique	Propionique	Butyrique	Iso- valérique
FR/eau	absence	1,9±0,04	0,1±0,004	0,5±0,02	absence
S ₂ /eau	absence	4,0±0,1	0,1±0,002	0,5±0,04	0,2±0,06
FR/sel	0,3±0,04	0,2±0,004	0,5±0,01	absence	absence
S ₂ /sel	0,3±0,1	0,1±0,01	0,2±0,01	0,04±0,003	absence
FR/vinaigre	0,1±0,01	2,8±0,07	0,2±0,04	0,3±0,1	0,1
S ₂ /vinaigre	0,1±0,01	4,0±0,2	0,3±0,05	0,3±0,01	absence
FR/sel+vinaigre	0,1±0,02	1,5±0,03	0,6±0,1	absence	absence
S ₂ /sel+vinaigre	0,2±0,01	0,8±0,02	0,3±0,004	0,04±0,007	absence
FR/bicarbonate	absence	1,5±0,02	1,3±0,1	0,6±0,02	absence
S ₂ /bicarbonate	0,3±0,01	2,5±0,1	1,4 ±0,05	0,5±0,03	absence
FR/acide lactique	0,5±0,01	3,2±0,04	1,1±0,3	1,6±0,04	absence
S ₂ /acide lactique	1,3±0,05	3,6±0,1	1,1±0,01	1,2±0,04	absence

(1990) et s'explique par la liaison des molécules d'eau avec celles du sel. Le mélange sel+vinaigre donne des teneurs en eau finales plus faibles qu'avec le sel seul.

L'ABVT de (S₂/bicarbonate) est du même ordre de grandeur que celui de S₂/eau (300 mg N% MS environ). Le traitement au sel et celui au mélange sel+vinaigre donnent les ABVT les plus bas, respectivement 89,1 et 67,7 mg N% MS. Ceci est corrélé avec leurs charges microbiennes plus faibles. Là aussi, le mélange sel+vinaigre accentue les effets de ses constituants individuels. Suryanarayana Rao *et al.* (1962) ont relevé un ABVT de 58,2 mg N% MB et une teneur en eau de 36,8% (bh) sur du maquereau salé-séché en Inde. Doe et Heruwati (1988) notent des ABVT de 39 à 86 mg N% MB sur du poisson salé en Indonésie.

V.2.7. La filière "poisson séché" au Mali

Au Mali, le poisson n'est pas salé avant traitement. On distingue différentes transformations pour chaque espèce selon le goût des consommateurs potentiels. Ainsi, le *Tilapia* (*monodi*, *galilea* ou *niloticus*) peut être séché, fumé ou encore brûlé (notamment le goût de la région Dogon). Le brûlage du poisson (ou braisage) consiste à étaler une couche de poisson entre deux lits de paille et à mettre le feu à l'ensemble ; les poissons deviennent tout noirs et ont un aspect brûlé. Le *Ciarias lamottei* (silure ou poisson-chat) est soit séché, soit fumé (consommateurs des régions de Koutiala et Bamako). Le *Lates* (ou capitaine) est surtout fumé à chaud mais peut être séché.

Quant à la répartition de la transformation du poisson au Mali, elle était de 50-50% (respectivement fumage-séchage) en 1966-1973 ; elle est ensuite passée à 60-40% en 1974-1978 ; et depuis 1979, elle oscille entre 65 à 75% pour le fumage et 25 à 35% pour le séchage (Stomal, 1991). Ceci est sûrement dû à la baisse des captures dans le fleuve Niger, problème actuellement fondamental dans le secteur de la pêche au Mali (cf. II.). La quantité pêchée étant plus faible, le pêcheur est contraint de choisir un seul mode de transformation. A cet égard, le fumage est plus attirant car il dure moins longtemps que le séchage ; de plus, le poisson fumé est écoulé plus rapidement et il est plus avantageux à la vente au poids (du fait de sa teneur en eau plus élevée que celle du poisson séché). Le fumage du poisson est une technique relativement récente au Mali, introduite par des pêcheurs nigériens depuis une vingtaine d'années et progressant en fonction de l'évolution du marché. Il semble que le fumage soit pratiqué surtout en saison d'hivernage, les conditions climatiques rendant alors le séchage du poisson difficile. Des

enquêtes récentes montrent cependant que le séchage reste le procédé dominant dans les régions de Mopti et du Niger Aval (Stomal, 1991).

Ainsi, la quantité de captures a un impact direct sur les modalités de transformation. Des facteurs supplémentaires déterminent également le choix entre les procédés de séchage et de fumage. Ces facteurs sont dans l'ordre décroissant d'importance (Stomal, 1991) : la *facilité d'écoulement* (liée au prix sur le marché et aux usages du poisson transformé), le *coût de la transformation* (le séchage est moins "coûteux" que le fumage), la *tradition* (associée aux goûts des différentes régions du Mali), la *durée de conservation* (plus longue pour le poisson séché donc intéressante en période de pénurie ou de saison morte de pêche) et la *saison*.

Pour le pêcheur, la transformation du poisson a deux avantages : d'une part, la meilleure conservation du produit et d'autre part, une source appréciable de revenus. Afin d'atteindre ces deux objectifs, le pêcheur est obligé de transformer le poisson le plus tôt possible après la capture. Il arrive cependant très souvent que le pêcheur transforme du poisson avarié, ou du poisson qu'il n'a pas pu liquider en frais et qu'il ne voudrait pas perdre totalement.

En général, le séchage traditionnel du poisson est assez poussé, ce qui permet un stockage acceptable, à condition que le problème d'attaque par les insectes soit écarté par l'usage d'un insecticide. Ceci semble être le souci majeur des pêcheurs, transformatrices et commerçants. Le poisson fumé par contre est stocké moins longtemps que le poisson séché. En fait, sa teneur en eau étant plus élevée que celle du poisson séché, il présente d'une part, des risques de contamination par les moisissures, et d'autre part, une vente au poids plus rentable.

En fin de séchage, le poisson est ramassé puis stocké dans les cases (généralement non traitées aux insecticides), soit empilé en vrac, soit dans des sacs ou des paniers. Il peut également être emballé dans des filets ou encore stocké sur des claies surélevées, quelquefois recouvert de bâches en plastique. De temps en temps, le poisson est remis au soleil afin d'en évacuer l'humidité accumulée lors du stockage. Il est stocké au moins six mois avant sa commercialisation. C'est surtout en saison sèche que le poisson séché est stocké plus longtemps avant commercialisation car cette saison correspond à l'abondance de poisson, d'où l'intérêt de le stocker pour la saison d'hivernage où il devient rare et coûte cher.

Sur le port de Mopti, le débarquement du poisson transformé (séché, fumé ou brûlé) est contrôlé par des agents de l'OPM. Ceux-ci jugent visuellement la qualité du poisson et le trient. Les poissons jugés encore humides (mal séchés ou réhumidifiés lors

du transport) sont écartés et peuvent être reséchés dans un four de fumage. De plus, l'OPM traite au Malathion les nattes servant au conditionnement du poisson transformé, ceci sur commande des commerçants qui vont s'approvisionner directement dans les campements. Ces nattes sont auparavant achetées par les commerçants à des artisans installés autour de l'OPM et qui tressent les nattes avec de la paille de "doume" (palmier à grandes feuilles).

Avant la mise en vente, le poisson transformé est toujours trié par les revendeuses. Les résidus (brisures, poissons fissurés ou découpés en morceaux) sont emballés dans des sacs en jute et envoyés à Bamako où ils sont broyés et vendus comme aliment pour volaille. La présentation du poisson transformé sur les marchés (Bamako, Mopti) varie légèrement. Le poisson fumé est bien rangé dans des paniers ou sur des nattes. Le poisson séché est exposé soit en vrac, soit bien empilé en tas, ou encore sur des nattes ou sur des claies en bois.

Enfin, rappelons que les pêcheurs et transformatrices sont conscients du fait que la dégradation du poisson séché dans le temps est principalement due à la mauvaise hygiène des aires de séchage et de stockage (présence d'insectes, contaminations diverses dues aux dépôts répétés de matière grasse et de poussière sur les litières de séchage et dans les paniers et sacs d'emballage). Les pêcheurs et transformatrices sont de plus en plus sensibilisés à l'usage d'insecticides pour protéger le poisson. L'insecticide le plus utilisé jusqu'ici était le Gardona (insecticide organo-phosphoré agissant par contact, distribué par Shell Chimie). Il est dilué (5g pour 10 litres d'eau) et ajouté à l'eau de fermentation ou pulvérisé sur le poisson séché avant stockage. L'OPM (Opération Pêche Mopti) initie actuellement l'emploi de la K-othrine qui donne des résultats satisfaisants mais pose des problèmes de conditionnement et d'approvisionnement. En fait, son emballage en carton se mouille facilement lors du transport sur la pirogue.

V.2.8. Aperçu ponctuel de la qualité de *Tilapia* séché prélevé sur les marchés de Mopti

Les échantillons de *Tilapia* séché sont prélevés dans des campements et sur le marchés de Mopti puis analysés en France (cf. IV.1.), l'ensemble des analyses effectuées ne pouvant être assuré au Mali. Notons que ce volet de l'étude permet d'avoir un aperçu ponctuel de la qualité du *Tilapia* séché commercialisé à Mopti, étant donné que l'histoire en amont des poissons analysés (date et saison de capture, détails relatifs à la transformation) n'est pas maîtrisée, contrairement à notre travail de terrain

Tableau V.26. Teneurs moyennes en acides organiques (g/100g MS) (échantillons marché Mopti)

Echantillon	Lactique	Acétique	Propionique	Butyrique	Isobutyrique	Isovalérique
PSA	1,14±0,08	2,40±0,31	0,38±0,22	0,27±0,09	0,40	0,06±0,001
PSB	1,11±0,03	2,54±0,04	0,56±0,02	0,29±0,05	0,20	0,08±0,01
PSC	0,36	0,84±0,01	1,33	0,07	-	-
PSD	0,75	1,48	1,58	0,18	0,30	-
PSE	-	3,31±0,04	-	0,14±0,01	-	0,10±0,007
TS	2,17±0,03	0,02	0,10	-	-	-

Tableau V.27. Composition chimique (teneurs en g/100g MS) (échantillons marché Mopti)

Echantillon	Lipides	Cendres	Azote total	Azote NPN
PSA	28,2	10,7±0,2	9,6	1,8
PSB	32,1	9,5±0,2	8,9	1,9
PSC	12,0±1,6	12,2±0,4	12,5	1,6
PSD	9,1±0,05	9,9±0,2	12,3	1,7
PSE	11,5	-	-	-
TS	7,9±0,2	10,7±1,0	12,6	0,6
TF	7,6±0,7	16,9±0,3	12,0	0,7

Tableau V.28. Critères physico-chimiques (échantillons marché Mopti)

Echantillon	Teneur en eau	pH	a _w
PSA	13,2±0,06	6,49±0,0	0,67
PSB	14,0±0,2	6,62±0,03	0,66
PSC	9,7±0,2	5,92±0,02	0,50
PSD	13,1±0,2	6,38±0,0	0,62
PSE	17,6±0,3	-	-
TS	7,0±0,2	6,33	0,31
TF	79,9±0,2	6,79	0,98

proprement dit, où le poisson est suivi depuis sa capture jusqu'à la fin de sa transformation.

Les teneurs moyennes en acides organiques sont exprimées en g/100g de matière sèche (MS) (tableau V.26.). Les teneurs en acide acétique montrent bien que la fermentation du *Tilapia* au Mali est une fermentation acétique et non lactique, contrairement à celle des aliments fermentés asiatiques. En effet, la teneur en acide lactique est faible pour les échantillons (PSA), (PSB), (PSC), (PSD), inexistante pour (PSE), alors qu'elle est forte dans le témoin (TS) non fermenté. Ainsi, la teneur en acide lactique initiale du poisson (en relation avec la *rigor mortis*) semble diminuer avec la fermentation pour produire de l'acide acétique, de l'acide propionique en moindre quantité et des traces d'acides butyrique, isobutyrique et isovalérique.

Notons que le stockage prolongé avant analyse a pu réduire les teneurs en acides volatils (acétique, propionique, butyrique, isobutyrique et isovalérique) responsables des arômes. Ainsi, la forte teneur de l'échantillon (PSE) en acide acétique (3,31 g%MS) est due au fait que cet échantillon a été congelé jusqu'à l'analyse et a donc conservé sa teneur initiale en cet acide, alors que la faible teneur de l'échantillon (PSC) en acide acétique est sûrement liée aux pertes dues à son long stockage.

Le tableau V.27. donne la composition chimique (en g/100g MS) des *Tilapia* analysés et montre bien leur hétérogénéité, notamment au niveau de la teneur en lipides plus élevée pour (PSA) et (PSB) (ces deux échantillons montraient des traces visibles de gras sur leurs sachets d'emballage). Cette hétérogénéité peut être due au sexe du poisson ou à la saison de pêche. La teneur en azote total de (PSA) et (PSB) est plus faible que celle des autres échantillons, étant donné qu'ils contiennent plus de lipides, et donc, moins de matières azotées. La composition chimique des témoins (TF) et (TS) est similaire, elle n'est donc pas modifiée par le séchage.

Le tableau V.28. montre que les échantillons (PSA), (PSB), (PSC) et (PSD) ont été séchés jusqu'à des teneurs en eau (9,7-14,0%) et des activités de l'eau a_w (0,50-0,67) favorables à une bonne conservation microbiologique au cours du stockage. Cependant, ces a_w faibles sont propices à des phénomènes d'oxydation des lipides (odeur et goût de rance, brunissement de la couleur). Ainsi, l'indice de dégradation des lipides TBA est plus élevé pour les échantillons (PSA), (PSB), (PSC) et (PSD) que pour le témoin (TS), lui-même un peu plus élevé que le témoin frais (TF). Mais, nous n'avons observé aucune odeur rance sur ces échantillons et leur couleur brune ne peut que convenir aux goûts et habitudes alimentaires des consommateurs maliens. La teneur en eau et l' a_w du témoin (TS) sont plus faibles que celles des échantillons du Mali et sont obtenues après 48

Tableau V.29. Couleur exprimée en systèmes Lab et Munsell (échantillons marché Mopti)

mesures effectuées côté peau

Echan- tillon	L moyenne [min / max]	a moyen [min / max]	b moyen [min / max]	Munsell [min / max]
PSA	53,5 [42,6 / 62,5]	1,0 [-0,7 / 2,4]	6,3 [1,7 / 14,6]	[6,2 Y / 2,8 YR]
PSB	51,1 [43,6 / 59,0]	2,0 [0,2 / 6,4]	5,9 [1,9 / 12,7]	[1,6 Y / 5,6 YR]
PSC	48,7 [41,9 / 55,0]	4,4 [2,7 / 5,6]	13,6 [7,2 / 18,6]	[0,1 Y / 6,1 YR]
PSD	54,9 [45,0 / 66,9]	1,8 [0,5 / 2,6]	5,0 [-0,9 / 12,4]	[1,8 Y / 0,1 RP]
TS	43,0 [35,5 / 49,9]	3,2 [2,2 / 4,6]	6,1 [3,4 / 9,0]	[6,0 Y / 7,7 YR]
TF	48,1 [40,9 / 59,6]	0,8 [-0,6 / 2,7]	-6,6 [-9,0 / -5,0]	[9,9 PB / 2,9 PB]

mesures effectuées côté chair

Echan- tillon	L moyenne [min / max]	a moyen [min / max]	b moyen [min / max]	Munsell [min / max]
PSA	43,2 [30,8 / 52,3]	4,1 [0,9 / 8,0]	9,8 [-0,2 / 22,8]	[0,1 Y / 4,0 RP]
PSB	46,1 [38,1 / 63,3]	3,5 [1,2 / 6,5]	8,9 [0,2 / 15,4]	[1,1 Y / 7,6 RP]
PSC	42,5 [34,7 / 51,5]	8,9 [3,4 / 11,6]	15,2 [10,3 / 23,5]	[9,1 YR / 2,3 YR]
PSD	46,7 [36,5 / 57,4]	6,5 [3,1 / 8,3]	18,4 [10,1 / 23,9]	[9,9 YR / 3,0 YR]
TS	61,5 [51,8 / 70,0]	1,2 [-0,9 / 7,7]	22,2 [15,2 / 28,7]	[7,5 Y / 0,1 Y]
TF	54,8 [51,3 / 60,3]	1,3 [-0,6 / 3,6]	-5,1 [-6,1 / -2,7]	[7,2 P / 3,3 PB]

heures de séchage dans des conditions maîtrisées et régulières (avec une hygrométrie de 15% alors qu'au Mali, elle est généralement plus élevée et subit des fluctuations jour/nuit considérables selon les saisons).

Le pH des échantillons du Mali (6,33-6,62) se trouve dans la gamme usuelle des pH du poisson transformé (Watanabé, 1972 ; Maruf *et al.*, 1990), à l'exception de l'échantillon (PSC) qui est plus acide (5,91). Ceci pourrait être dû à des acides non identifiés ou à une protéolyse plus faible, comme le montrent les teneurs plus faibles de (PSC) en ABVT et TNBS (tableau V.30.). Le pH du témoin (TF) (6,79) concorde avec les pH trouvés pour le poisson cru ou frais (Paredes et Baker, 1987). La diminution du pH de (TS) (6,33) par rapport à (TF) (6,79) est en relation avec la *rigor mortis* qui acidifie le milieu.

Le tableau V.29. regroupe les analyses de couleur. Les mesures sont effectuées en différents points situés sur la totalité du poisson, côté "peau" et côté "chair". Il ressort que le brunissement est plus accentué autour de la tête du poisson et moins prononcé sur sa partie ventrale, avec une répétition de cette tendance sur le côté "chair" et sur le côté "peau".

L'échantillon (PSC) présente des indices "a" et "b" plus élevés que ceux de (PSA) et (PSB), tant du côté "peau" que du côté "chair". Ceci est corrélé avec sa valeur d'AASC plus élevée (13,0 unités d'absorbance/g MB) et peut s'expliquer par la durée de stockage plus prolongée de (PSC).

Les mesures de couleur effectuées côté "peau" montrent que les échantillons (PSA), (PSB) et (PSC) sont classés dans le même espace réduit de couleur Y-YR (jaune-jaune rouge), alors que (PSD) couvre une zone de couleur plus étalée Y-RP allant du jaune au rouge violet. Ceci est corroboré par la valeur TBA plus élevée pour (PSD). Quant aux mesures effectuées côté "chair", elles classent (PSA) et (PSB) dans l'espace de couleur Y-RP (jaune-rouge violet); ceci est confirmé visuellement par leur apparence plus foncée. L'aspect gras de (PSA) et (PSB) semble être en relation avec l'indice "rouge" de leur couleur. Les échantillons (PSC) et (PSD) sont situés dans l'espace plus réduit YR (jaune rouge).

La luminance "L" côté chair du témoin (TS) montre des zones plus claires ("L" plus élevée) que celles de (PSA), (PSB), (PSC) et (PSD) ; en effet, les échantillons du Mali sont généralement plus colorés et plus foncés que TS. Ceci résulte essentiellement des conditions de séchage différentes, mais aussi de la composition du poisson et des phénomènes liés à la fermentation en milieu immergé, au cours de laquelle un gonflement

Tableau V.30. Analyses biochimiques (échantillons marché Mopti)

Echantillon	ABVT mg N/100g MS	TNBS μ mole glycine /g MS	Hx μ mole Hx /g MS	protéines solubles (Bradford) (Tris) g /100g MS	protéines solubles (Biuret) (NaCl 0,14M) g /100g MS
PSA	356,1 \pm 1,3	500,5 \pm 15,6	5,9 \pm 0,03	5,9 \pm 0,2	6,2 \pm 0,02
PSB	356,0 \pm 2,8	457,5 \pm 14,5	8,6 \pm 0,6	5,2 \pm 0,1	7,2 \pm 0,1
PSC	76,9 \pm 3,3	344,6 \pm 1,3	18,3 \pm 0,5	4,6 \pm 0,01	6,7 \pm 0,1
PSD	216,6 \pm 3,6	396,0 \pm 19,5	15,4 \pm 3,2	7,4 \pm 0,3	10,4 \pm 0,2
PSE	460,0 \pm 3,4	-	-	-	15,8 \pm 0,5
TS	33,7 \pm 1,2	82,3 \pm 0,2	2,9	6,9 \pm 0,0	10,3 \pm 0,3
TF	36,9 \pm 1,0	100,4 \pm 1,9	7,4	13,4 \pm 0,3	18,9 \pm 0,0

Tableau V.31. Indices de dégradation des lipides (échantillons marché Mopti)

Echantillon	IP meq O ₂ / kg lipides	TBA mg MA / kg MS	AASC unité absorbance/g MB
PSA	-	5,1 \pm 0,06	10,6
PSB	-	4,9 \pm 0,05	7,7
PSC	-	5,8 \pm 0,2	13,0
PSD	-	6,8 \pm 0,0	10,3
PSE	17,6	-	6,5
TS	18,4 \pm 0,3	2,7 \pm 0,02	8,7
TF	10,2 \pm 1,9	1,5 \pm 0,4	2,5 \pm 0,05

du produit est observé. Notons que ces critères (gonflement, brunissement) sont très demandés par les consommateurs maliens.

Le témoin (TF) se situe dans la zone P-PB (violet-bleu violet), ce qui s'explique par le fait que la peau du *Tilapia* frais est très brillante et présente des reflets bleutés. Côté chair, ceci pourrait être dû au contraste entre la chair blanche et les arêtes (centrale et latérales), ainsi que les marbrures naturelles de la chair du *Tilapia*. Notons que la zone de couleur change totalement entre (TF) et (TS) puisque le brunissement de la couleur peut être dû à plusieurs facteurs, tels que la synthèse de composés colorés (brunissement non enzymatique), la modification éventuelle d'un pigment présent (transformation de la myoglobine en ferri-myoglobine par exemple) ou encore la concentration de la couleur par séchage.

Le tableau V.30. montre que les échantillons du Mali présentent des indices ABVT et TNBS (indices de dégradation des matières azotées) assez élevés, à l'exception de (PSC) qui est moins protéolysé. Ces teneurs élevées sont dues à des phénomènes d'autolyse et à des attaques bactériennes. Ces teneurs initiales ont sûrement diminué avec le temps de stockage prolongé, suite à la perte d'ammoniac. Elles sont cependant du même ordre de grandeur que celles trouvées sur du *Tilapia* suivi pendant le séchage au Mali (cf. V.2.3.). Notons que les faibles valeurs d'ABVT et de TNBS pour les témoins (TF) et (TS) témoignent de leur bonne qualité et du délai court entre le séchage et l'analyse. La diminution de ces indices pour (TS) est due à la perte d'ammoniac lors du séchage.

La solution NaCl 0,14 M, de faible force ionique, extrait les protéines sarcoplasmiques. Les taux de protéines extraites sont similaires pour le témoin (TS) et pour les échantillons du Mali. La diminution de la teneur en protéines de (TS) par rapport à celle de (TF) s'explique par une dénaturation des protéines pendant le séchage avec perte de solubilité. Les méthodes de Biuret et de Bradford donnent des résultats similaires, malgré la différence des milieux d'extraction utilisés.

Les taux d'hypoxanthine Hx (tableau V.30) sont similairement élevés pour (PSC) et (PSD), malgré leur temps de stockage différent. Ceci est sans doute lié au fait que l'hypoxanthine dépend de l'autolyse et de l'attaque bactérienne, ainsi que de l'état du poisson à la phase de *rigor mortis* ; elle s'accumule au cours du temps de stockage jusqu'à atteindre un palier puis peut diminuer (Jones *et al.*, 1964). Les résultats obtenus avec les échantillons du Mali montrent bien leur hétérogénéité et leur histoire non contrôlée avant transformation. En effet, les teneurs faibles de Hx peuvent révéler le début ou la fin de la dégradation. La teneur plus faible de (TS) (2,9) par rapport à celle de (TF) (7,4)

est due à sa charge bactérienne moins élevée (500 UFC/g MS pour (TS) et 24×10^3 UFC/g MS pour (TF)).

Pour les échantillons (PSA), (PSB), (PSC) et (PSD), le test de l'indice de peroxyde (tableau V.31.) n'a donné aucun virage de la couleur lors du titrage (pour (PSD), le virage a été léger mais non suffisant pour l'interprétation). Comme ce test a bien réussi avec les échantillons (PSE), (TF) et (TS) qui n'ont subi aucun traitement d'insecticide, il n'est pas exclu que le Gardona ait pu interférer avec les réactifs de ce test. L'échantillon (PSD) pourrait être moins traité ou conserverait un taux plus faible en résidus d'insecticides.

Pour les indices TBA et AASC (tableau V.31.), leur corrélation n'est pas évidente bien qu'indiquant tous deux un degré de rancidité des lipides. En fait, le TBA dose l'aldéhyde malonique (produit final de l'oxydation) alors que l'AASC mesure la couleur des composés solubles dans l'acide acétique glacial, ces composés étant des pigments ou dérivés hémiques produits lors de la phase d'initiation de l'oxydation des lipides. Le TBA étant plus long à mettre en oeuvre, l'AASC semble être un bon test de terrain. Nous avons choisi d'exprimer la valeur AASC par rapport à la matière brute et non sèche car elle reflète mieux la différence de couleur observée visuellement entre (TF) et (TS). L'augmentation de IP et TBA entre (TF) et (TS) est due à la diminution de l'activité de l'eau a_w , ce qui permet l'oxydation des lipides.

V.3. TRAVAUX EFFECTUES EN FRANCE

V.3.1. Etude de l'opération de séchage

V.3.1.1. Description des courbes expérimentales

Les allures de séchage sont schématisées par les courbes d'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau (fig. V.1 à V.4.). Ces courbes représentent uniquement la période de séchage à régime décroissant, ce qui est souvent observé pour les produits biologiques et alimentaires (absence de la période de séchage à vitesse constante ou séchage isenthalpique).

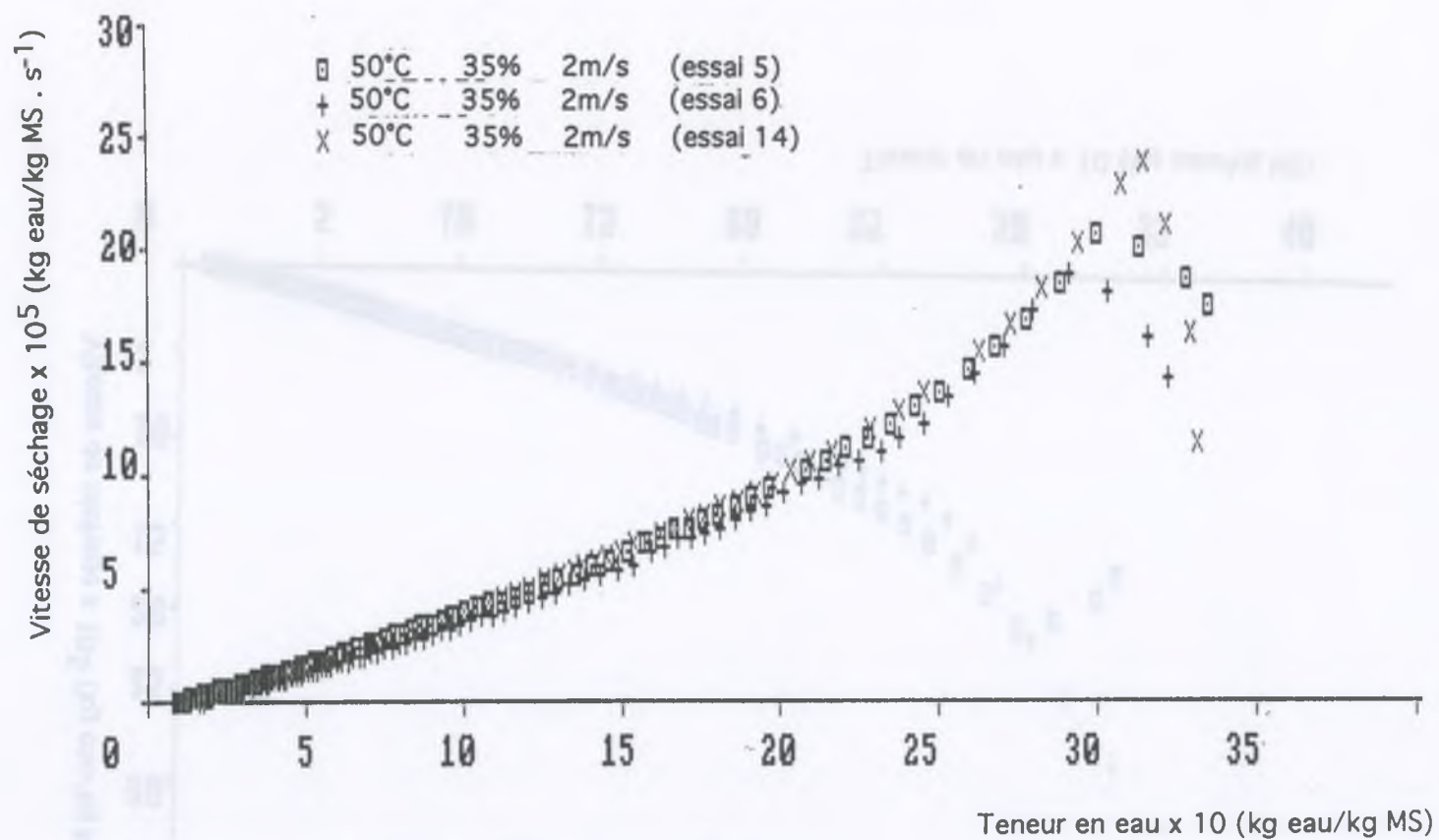


Figure V.1. Allures de séchage correspondant aux essais 5, 6 et 14 (répétitions du point central)

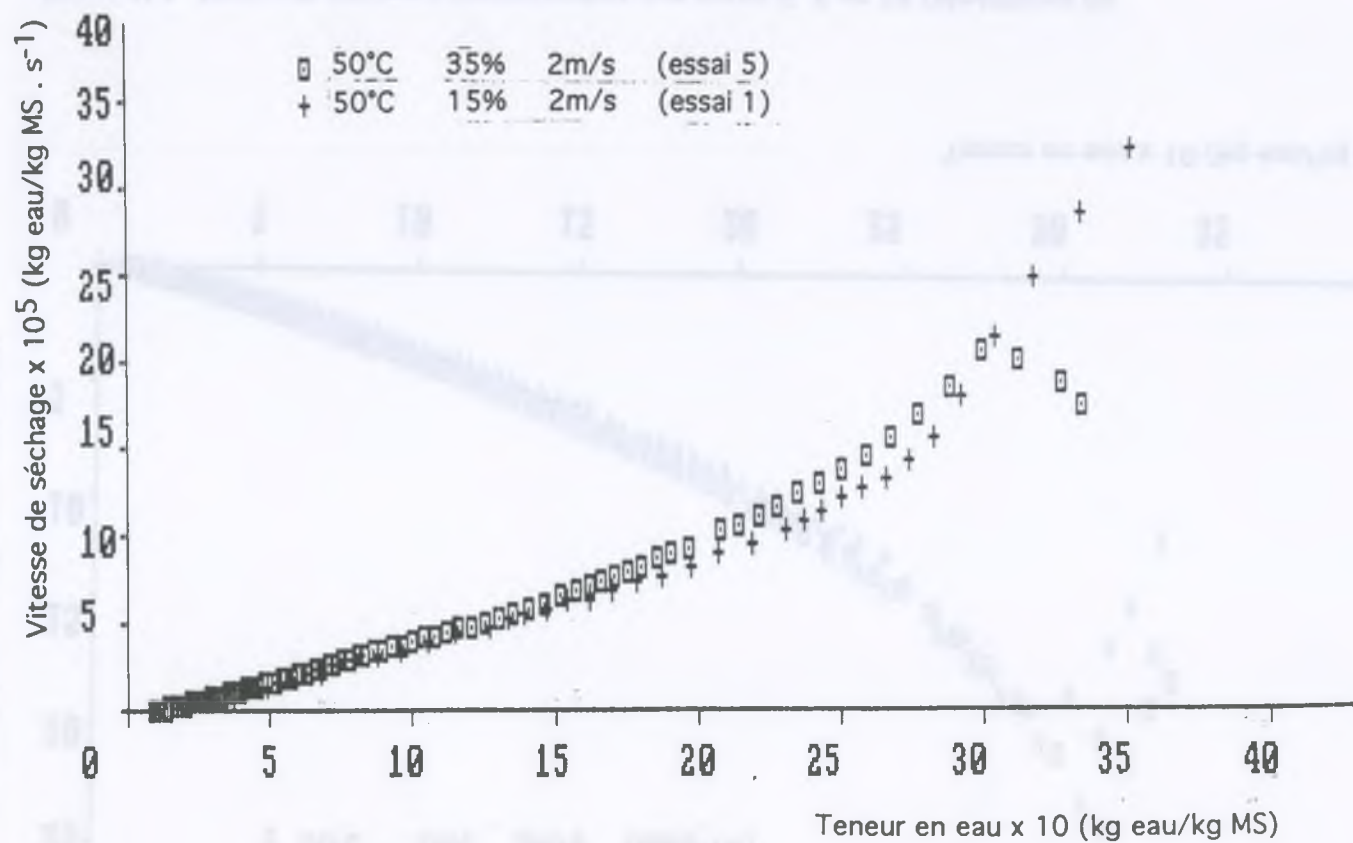


Figure V.2. Allures de séchage correspondant aux essais 1 et 5

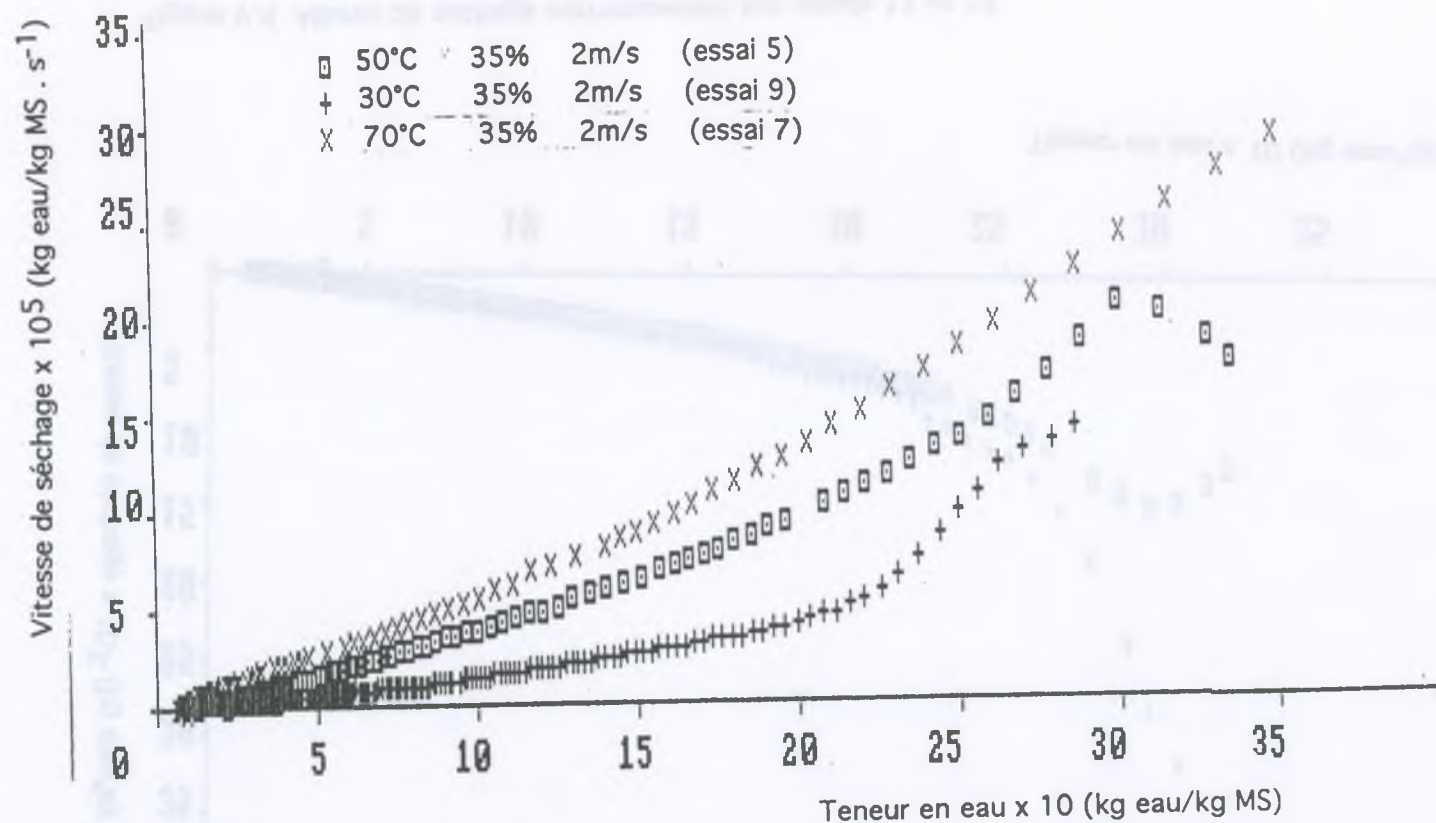


Figure V.3. Allures de séchage correspondant aux essais 5, 7 et 9

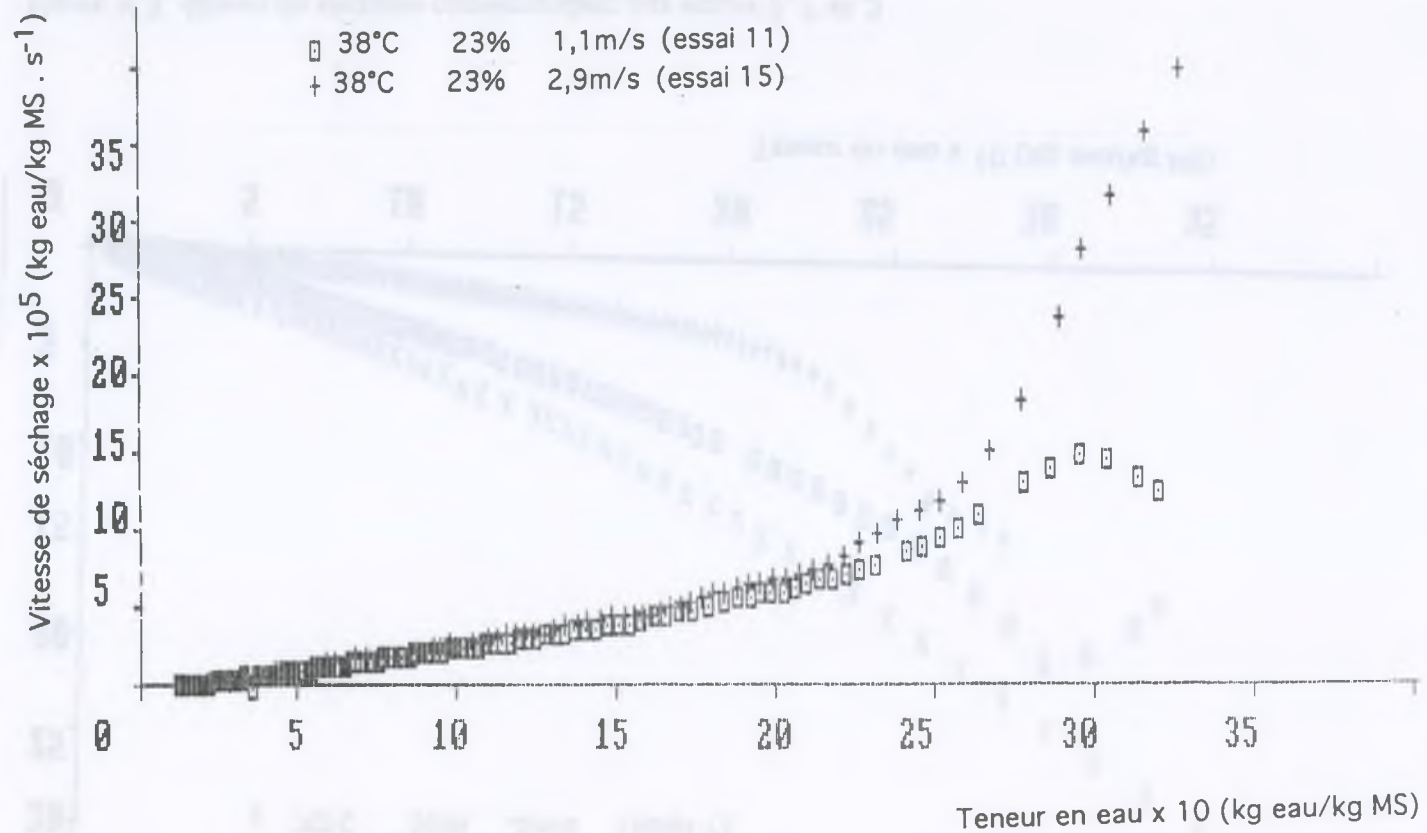


Figure V.4. Allures de séchage correspondant aux essais 11 et 15

La figure V.1. montre une bonne répétabilité des trois cinétiques de séchage au point central du plan d'expérience (50°C, 50% et 2 m/s). Le début de ces courbes indique une phase de mise en température (ce qui n'est pas systématiquement observé dans tous les essais de séchage).

La figure V.2. illustre l'effet classique de l'hygrométrie. La vitesse de séchage est d'autant plus élevée que l'hygrométrie est faible. En effet, la cinétique 1 (50°C, 15% et 2 m/s) est supérieure à la cinétique 5 (50°C, 35% et 2 m/s) jusqu'à une teneur en eau du produit d'environ 2,9 kg eau/kg MS. Ensuite, les deux courbes s'inversent, pour des teneurs en eau comprises entre 1,9 et 2,8 kg eau/kg MS. Ceci peut s'expliquer par un croûtage provoqué par la faible hygrométrie de l'air de séchage de l'essai 1 et fortifié par l'accumulation à la surface du produit, de substances solubles véhiculées par l'eau.

La figure V.3. représente l'influence de la température sur la vitesse de séchage. La cinétique 7 (70°C, 35% et 2 m/s) est supérieure à la cinétique 5 (50°C, 35% et 2 m/s), elle-même supérieure à la cinétique 9 (30°C, 35% et 2 m/s). Par contre, la cinétique 9 affiche une double inflexion (bi-exponentielle) explicable par deux périodes de ralentissement du séchage. Ce phénomène a été observé sur des cossettes de betterave (Vaccarezza *et al.*, 1974) et des oignons (Mazza et Lemaguer, 1980) et peut s'interpréter comme suit : lors de la première inflexion, la surface du produit est progressivement désaturée en eau mais il reste de l'eau libre dans le produit. Dans la deuxième exponentielle, il n'existe plus d'eau libre dans le produit et comme la température est faible (30°C), l'énergie d'activation nécessaire pour évacuer ces molécules d'eau n'est plus suffisante, d'où la cassure observée dans l'allure de séchage. En revanche, pour les cinétiques 5 (50°C) et 7 (70°C), la température de séchage étant élevée, le coefficient de diffusion interne de l'eau est élevé, la surface du produit est alors facilement alimentée en eau à évaporer, d'où l'allure continue de la courbe. Ce point confirme la dépendance du coefficient de diffusion de l'eau "D" vis-à-vis de la température (cf. V.3.1.2.3.).

Enfin, la figure V.4. dégage l'influence de la vitesse de l'air en début de séchage, malgré l'absence de séchage isenthalpique. Ainsi, la cinétique 15 (38°C, 23% et 2,9 m/s) est supérieure à la cinétique 11 (38°C, 23% et 1,1 m/s) dans la première étape du séchage, puis elles se superposent (vers une teneur en eau du produit égale 2 kg eau/kg MS). Ceci peut être lié à plusieurs facteurs tels que l'hétérogénéité du produit, la répartition différente de la matière grasse dans le poisson (les régions sous-cutanées et ventrales étant plus grasses), l'épaisseur non uniforme due à la forme géométrique du

Tableau V.32. Coefficients de la régression linéaire multiple et de l'analyse de variance pour la durée du séchage (t) et le coefficient de diffusion apparent (D) (réponses de l'opération de séchage)

Coefficients	durée du séchage (t)	coefficient de diffusion apparent (D)
constante	23,281	$6,696 \times 10^{-10}$
linéaires		
T	-11,053 ***	$2,243 \times 10^{-10}$ ***
HR	4,088 **	$-2,249 \times 10^{-11}$
V	-3,476 **	$8,239 \times 10^{-11}$ **
quadratiques		
T ²	2,472	$2,159 \times 10^{-11}$
HR ²	3,135 *	$-2,860 \times 10^{-11}$
V ²	0,631	$-3,320 \times 10^{-11}$
interactions		
T x HR	-0,976	$-3,925 \times 10^{-12}$
T x V	1,206	$5,783 \times 10^{-11}$
HR x V	-2,566	$4,825 \times 10^{-12}$
coefficient de détermination R²	0,93	0,90

Les niveaux de signification des facteurs expérimentaux sont déterminés selon une loi de Student. Un coefficient a de l'effet si son niveau de signification est $\leq 10\%$

* niveau de signification $\leq 10\%$

** niveau de signification $\leq 5\%$

*** niveau de signification $\leq 1\%$

sans * coefficient non significatif

Le coefficient de détermination R² est obtenu par une analyse de variance. Seules les réponses ayant des R² $\geq 0,80$ sont présentées.

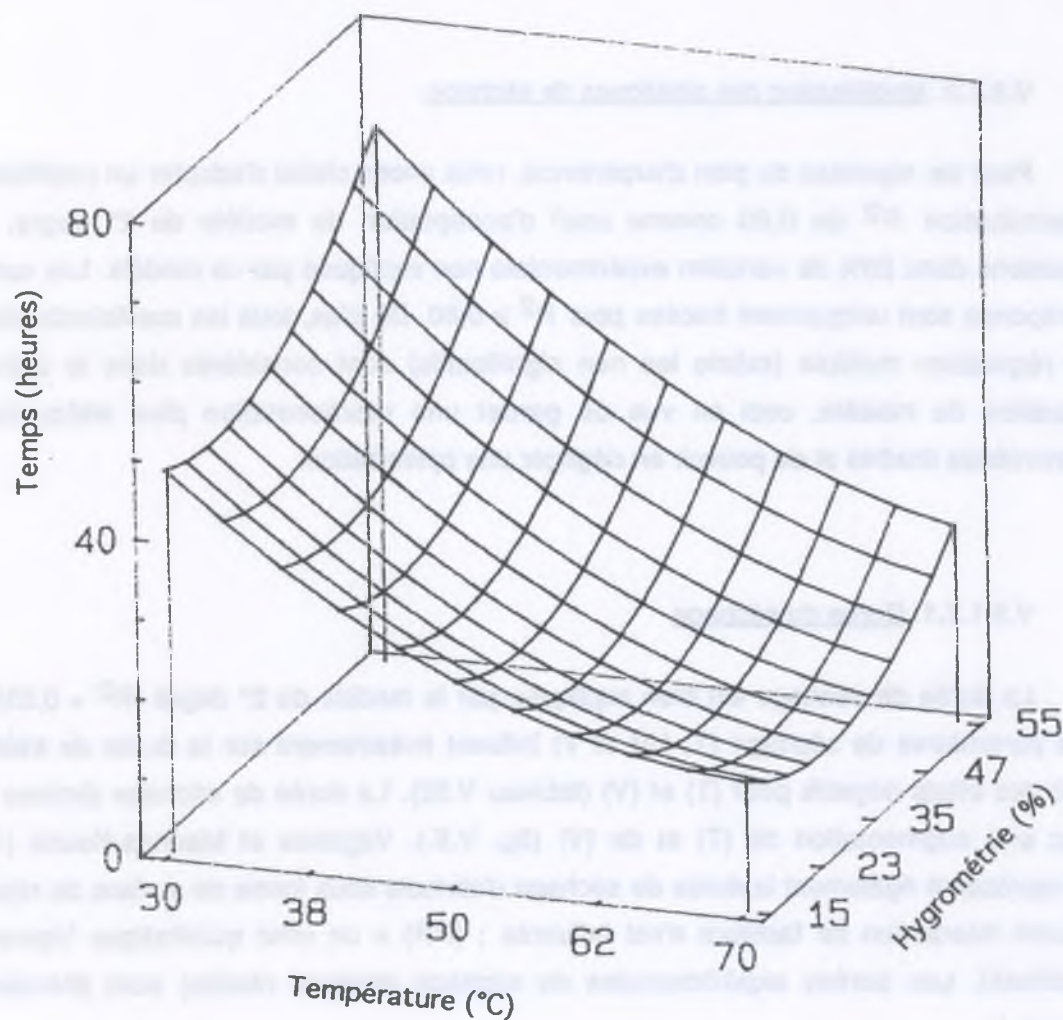


Figure V.5. Durée du séchage (pour une teneur en eau finale de 15,8% bh) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant à 2 m/s)

poisson. L'ensemble de ces facteurs conduit à la formation d'îlots plus ou moins saturés en eau, au fur et à mesure du séchage (Prat, 1991).

V.3.1.2. Modélisation des cinétiques de séchage

Pour les réponses du plan d'expérience, nous avons choisi d'adopter un coefficient de détermination R^2 de 0,80 comme seuil d'acceptation du modèle du 2° degré, nous admettons donc 20% de variation expérimentale non expliquée par ce modèle. Les surfaces de réponse sont uniquement tracées pour $R^2 \geq 0,80$. De plus, tous les coefficients obtenus par régression multiple (même les non significatifs) sont considérés dans le calcul de l'équation du modèle, ceci en vue de garder une représentation plus adéquate des phénomènes étudiés et de pouvoir en dégager une optimisation.

V.3.1.2.1. Durée du séchage

La durée de séchage est bien expliquée par le modèle du 2° degré ($R^2 = 0,93$). Les trois paramètres de séchage (T, HR et V) influent linéairement sur la durée de séchage, avec des effets négatifs pour (T) et (V) (tableau V.32). La durée de séchage diminue donc avec une augmentation de (T) et de (V) (fig. V.5.). Vagenas et Marinos-Kouris (1991) ont représenté également la durée de séchage d'abricots sous forme de surface de réponse. Aucune interaction de facteurs n'est influente ; (HR) a un effet quadratique légèrement significatif. Les durées expérimentales de séchage (valeurs réelles) sont données en annexe 1.

V.3.1.2.2. Courbe caractéristique de séchage

La (CCS) vise à synthétiser toutes les courbes expérimentales en une courbe unique. Dans notre cas et pour les deux transformations utilisées, les cinétiques se regroupent en un faisceau plus ou moins homogène (fig. V.6. et V.7.). La transformation de Fornell (" dX/dt " corrigée par $(T_a - T_e)(v_a)^{0,5}$ et tracée en fonction de "X") semble donner un faisceau plus homogène que celui obtenu avec la transformation classique (en fonction de " X_{Cr} " et " $(dX/dt)_{cte}$ "). Ceci provient sûrement de la localisation difficile de " X_{Cr} " et " $(dX/dt)_{cte}$ " sur les courbes expérimentales, suite à l'inexistence d'une phase de séchage isenthalpique.

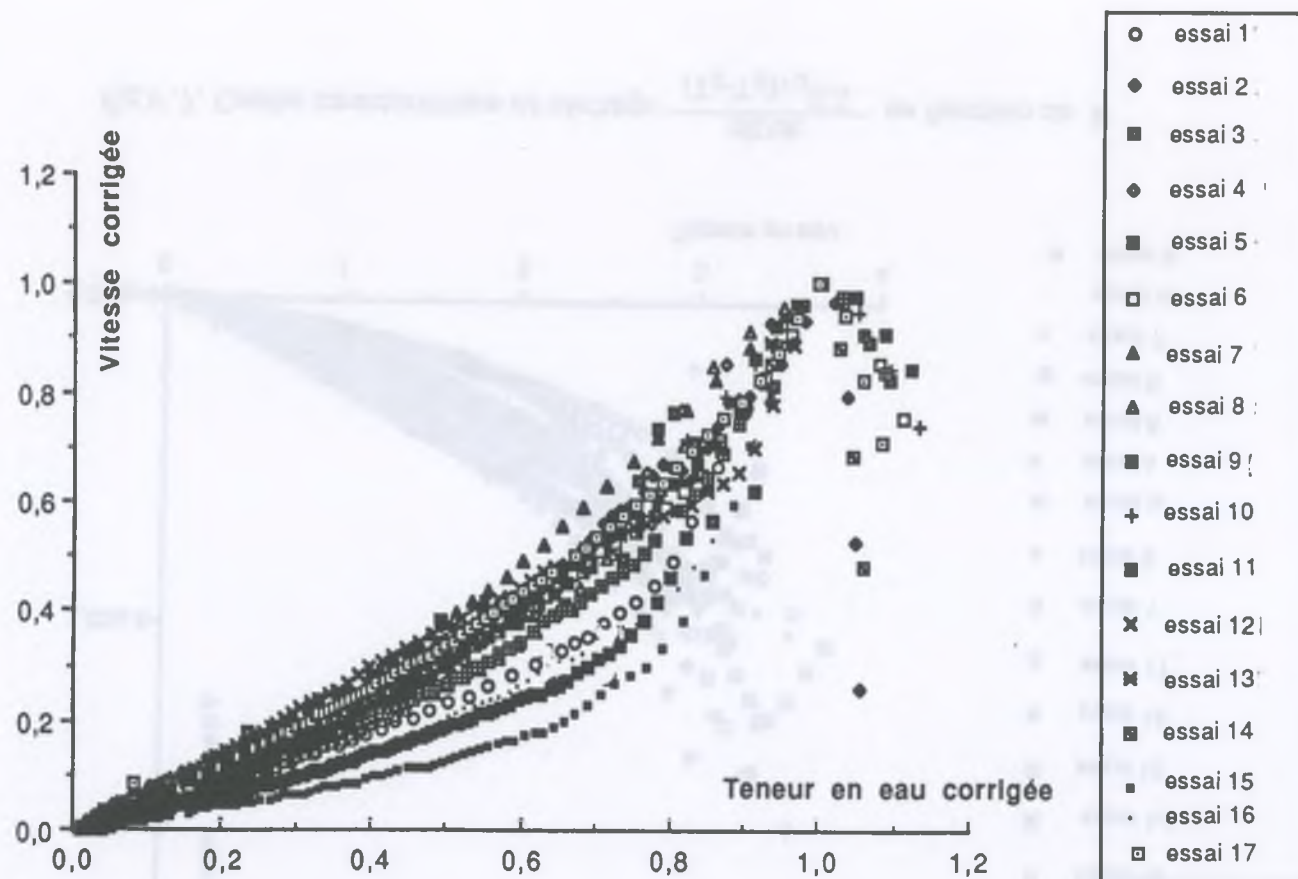


Fig.V .6. Courbe caractéristique de séchage $\frac{dX/dt}{dX/dt_{cte}}$ en fonction de $(X-X_{eq}/X_{cr}-X_{eq})$

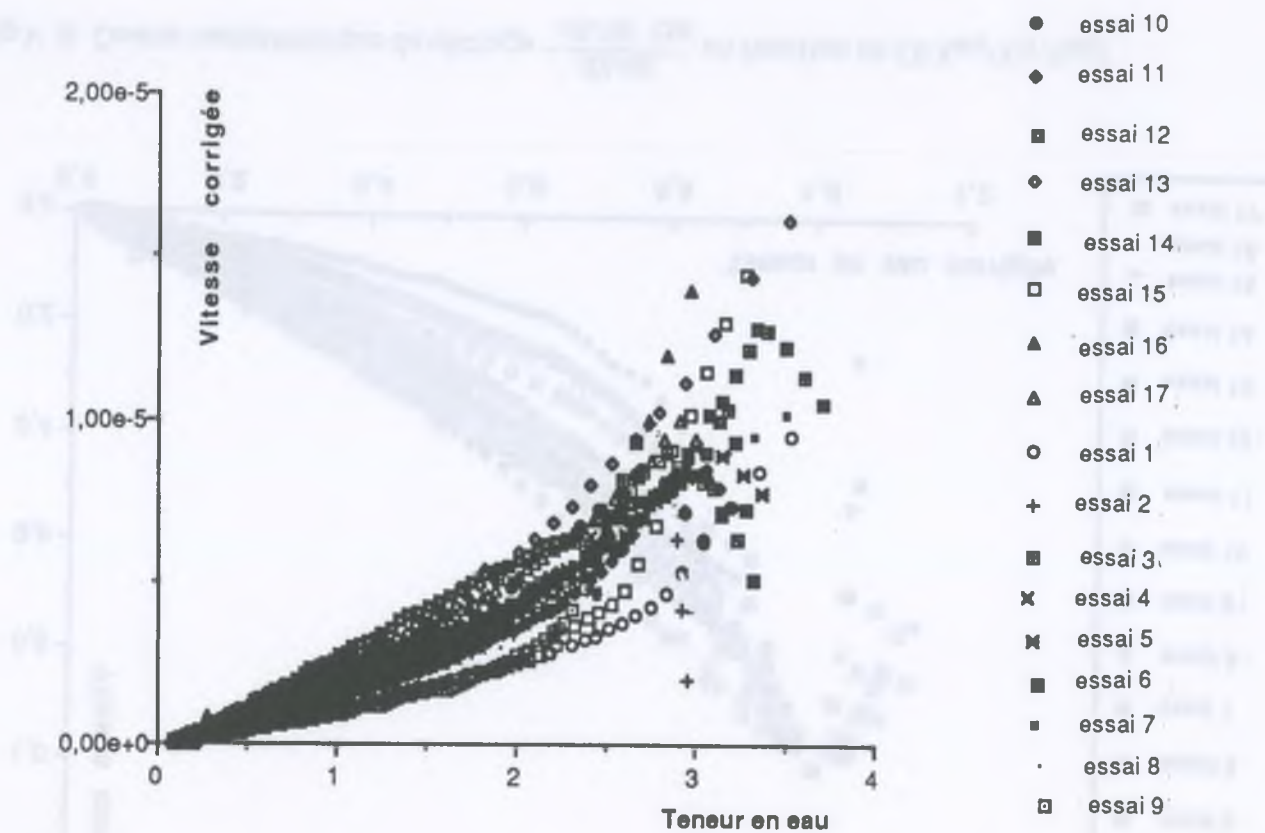


Fig.V.7. Courbe caractéristique de séchage $\frac{dX/dt}{(T_a - T_e)v_a^{0,5}}$ en fonction de X

Trois courbes se détachent systématiquement du faisceau (ceci est noté pour les deux transformations mais moins accentué avec celle de Fornell). Ces cinétiques correspondent aux essais 1 (50°C, 15% et 2 m/s), 9 (30°C, 35% et 2 m/s) et 15 (38°C, 23% et 2,9 m/s) qui reflètent des conditions particulières et/ou extrêmes de séchage (croûtage provoqué par la faible (HR) (15%) de l'essai 1, biexponentielle de ralentissement due à la faible (T) (30°C) de l'essai 9). Pour ces conditions extrêmes, le comportement du produit est différent et n'obéit plus à la courbe caractéristique de séchage. Ce cas est mentionné sur de la pomme de terre et du maïs (Fornell *et al.*, 1980). Daudin (1983) cite que pour certains produits difficiles à prévoir, les différentes transformations mathématiques ne permettent pas d'obtenir un regroupement significatif des courbes, même pour de faibles variations des propriétés de l'air.

V.3.1.2.3. Modèle diffusif

La figure V.8. montre la variation du coefficient de diffusion apparent "D" en fonction de (T) et (V). Ces deux facteurs ont un effet linéaire positif sur "D" (tableau V.32.), avec prédominance de (T) (en valeur et en niveau de signification). L'effet de (T) est logique et souvent cité dans la littérature mais celui de (V) paraît surprenant au premier abord. Il peut s'expliquer par le maintien, au fur et à mesure du séchage, d'îlots plus ou moins saturés en eau à la surface du produit (cf. V.3.1.1.), ce qui ne découple pas parfaitement les transferts internes et à l'interface. En général, le coefficient de transfert à l'interface "k" est identifié sur la période de séchage isenthalpique. Celle-ci étant inexistante dans notre cas, "k" a peu d'incidence sur les cinétiques de séchage et peut être facilement déterminé à partir de l'ensemble des courbes expérimentales. Pour cela, nous l'avons fixé selon une relation classique qui le relie à "k₀", lui-même identifié au point central (répété 3 fois) ($k = k_0 \cdot v_a^{0,5}$).

Les valeurs expérimentales de "D" sont présentées en annexe 1. Elles vont de $3,03 \times 10^{-10}$ à $1,12 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces ordres de grandeur sont supérieurs à ceux cités par Jason (1965) sur du cabillaud salé-séché, étant donné que le salage réduit la diffusion interne de l'eau. En appliquant l'équation du modèle associé au plan d'expérience aux conditions du point central (HR=0, V=0), nous pouvons exprimer "D" en fonction de (T), selon une loi de type Arrhénius. La pente de la droite $\log_e "D" = f(1/T)$ donne une énergie d'activation E_a égale à $24,7 \text{ kJ} \cdot \text{mole}^{-1}$ dans notre cas. Cette valeur est inférieure à celles citées par Jason (1965) par suite du salage du produit, ce qui exige une énergie supérieure pour activer les transferts d'eau.

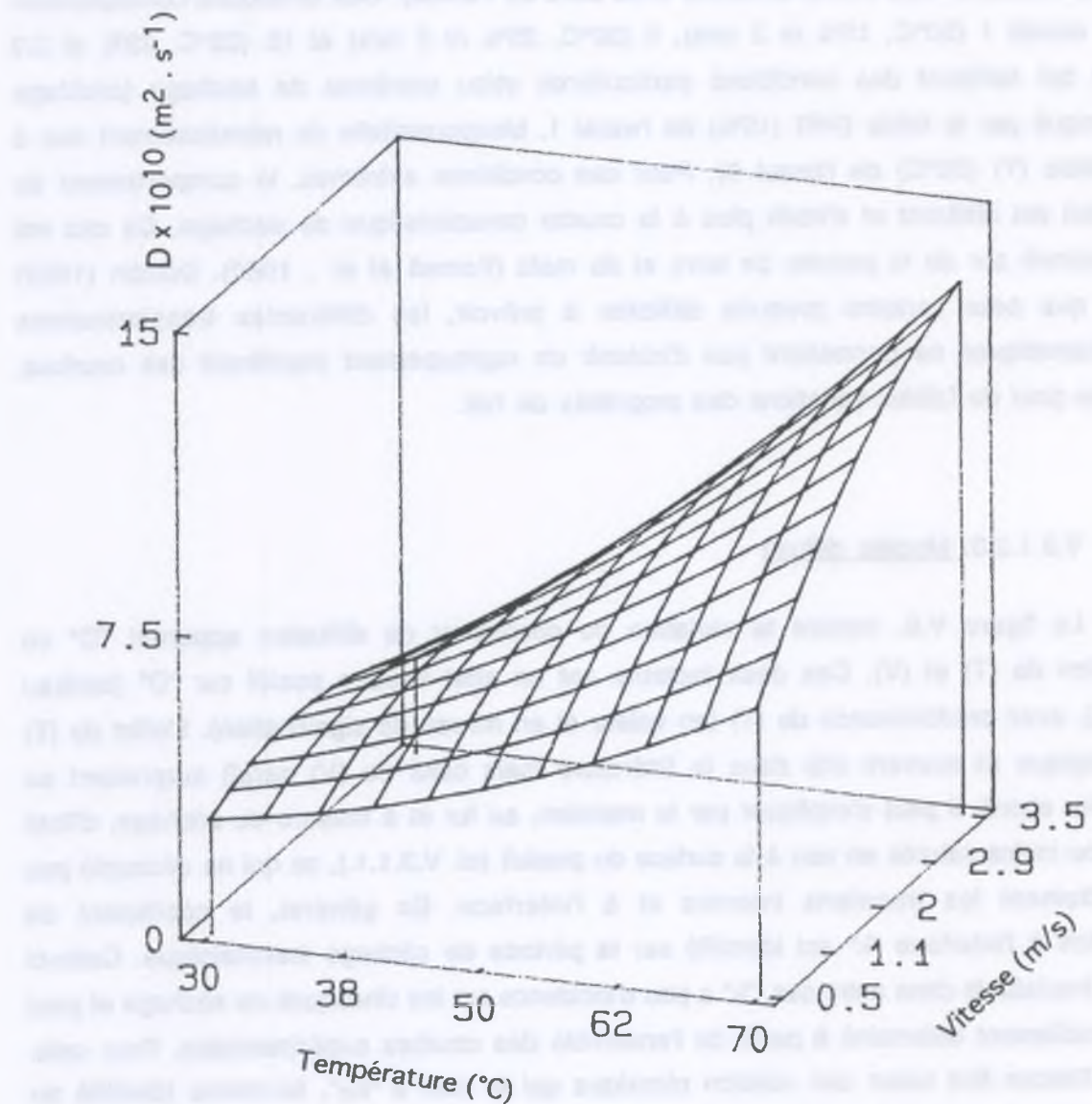


Figure V.8. Coefficient de diffusion apparent "D" en fonction de la température et de la vitesse de l'air de séchage (l'hygrométrie de l'air étant à 35%)

V.3.1.3. Synthèse du volet séchage

Les cinétiques de séchage sont représentées de trois façons différentes mais complémentaires. Ainsi, le modèle associé au plan d'expérience relie (par une équation directe) la durée du séchage "t" et le coefficient de diffusion apparent "D" aux facteurs expérimentaux. Ce modèle empirique étant limité, un autre modèle empirique (CCS) est utilisé. La (CCS) présente l'avantage de prédire l'ensemble de la cinétique mais elle se heurte à un problème d'imprécision, du fait de l'inexistence de la période de séchage isenthalpique, ce qui rend difficile la localisation de la teneur en eau critique " X_{Cr} ". Cette progression a conduit à adopter un modèle diffusif permettant une meilleure interprétation physique du phénomène. Ce modèle assure une bonne prédictibilité dans le domaine expérimental, il permet de dégager les coefficients "D" et "k" (à l'interface), ainsi que l'énergie d'activation ; enfin, il donne accès aux profils de teneurs en eau.

V.3.2. **Elements de composition du *Tilapia***

Des éléments de composition chimique du *Tilapia* séché aux différentes conditions opératoires sont donnés en annexe 2. Le *Tilapia* frais a une teneur en eau moyenne de $77,1 \pm 1,0$ g% MB et une matière sèche répartie comme suit : $12,8 \pm 0,9$ g% MS d'azote total (dont $0,8 \pm 0,3$ g% MS d'azote non protéique NPN) ; $7,6 \pm 1,8$ g% MS de lipides et 13,0 g% MS de cendres. Le bilan de ces teneurs couvre 93% de la matière sèche, la différence avec 100% provenant des constituants non dosés (glucides, vitamines,...). Nous considérons un facteur moyen de 6 pour la conversion azote total/protéines. Le facteur 6,25 est de plus en plus controversé pour le poisson ; Sosulski et Imafidon (1990) proposent un facteur de conversion de 5,70. Nous rappelons que la prise d'essai utilisée pour ces analyses est un broyat de l'ensemble peau+muscles+petites arêtes, ce qui explique la teneur apparemment élevée en cendres.

Ces éléments de composition du *Tilapia* sont pratiquement similaires avant et après séchage (cf. annexe 2). Ils ne sont donc pas affectés par le séchage.

V.3.3. **Impact du séchage sur la qualité du poisson**

L'impact du séchage est évalué en termes de qualité microbiologique, physico-chimique et biochimique du poisson. L'aspect nutritionnel, bien que très important, dépasse le cadre de cette étude.

Tableau V.33. Coefficients de la régression linéaire multiple et de l'analyse de variance pour les indices de qualité microbiologique (taux de survie τ de la flore aérobique mésophile totale (FAMT) après séchage et taux de survie τ des levures et moisissures (LM) après stockage)

Coefficients	τ (FAMT) après séchage	τ (LM) après stockage
constante	-0,0285	0,840
linéaires		
T	-0,043 ***	-0,314 ***
HR	0,018 *	0,223 **
V	-0,013	-0,127
quadratiques		
T ²	0,005	-0,125
HR ²	-0,011	0,115
V ²	-0,005	-0,062
interactions		
T x HR	0,019	-0,249 *
T x V	-0,026 *	0,009
HR x V	0,008	-0,099
coefficient de détermination R²	0,84	0,80

Les niveaux de signification des facteurs expérimentaux sont déterminés selon une loi de Student. Un coefficient a de l'effet si son niveau de signification est $\leq 10\%$

* niveau de signification $\leq 10\%$

** niveau de signification $\leq 5\%$

*** niveau de signification $\leq 1\%$

sans * coefficient non significatif

Le coefficient de détermination R² est obtenu par une analyse de variance. Seules les réponses ayant des R² $\geq 0,80$ sont présentées.

Comme pour le volet "séchage", tous les coefficients (même les non significatifs) de la régression linéaire multiple sont utilisés pour le calcul du modèle du 2^o degré. Nous ne traitons ici que les critères de qualité (réponses) ayant un coefficient de détermination $R^2 \geq 0,80$. Nous discutons l'influence de leurs coefficients significatifs et les tracés de leurs surfaces de réponse afin de dégager une zone d'optimalité du procédé. Pour les réponses ayant un $R^2 < 0,80$; nous commentons brièvement les tendances qui s'en dégagent bien que certains auteurs (Henika, 1982) interprètent des $R^2 \geq 0,75$.

V.3.3.1. Qualité microbiologique

La charge de coliformes totaux (COL) du *Tilapia* (avant et après séchage) est nulle dans tous les essais, ceci indique une bonne hygiène de travail, tant sur la matière première et sa manutention que sur la manipulation de séchage. Pour le *Tilapia* avant séchage, la flore aérobie mésophile totale (FAMT) s'étend de 4×10^2 à $8,6 \times 10^4$ UFC/g MS et la charge en levures et moisissures (LM) varie entre $3,2 \times 10^2$ et 4×10^3 UFC/g MS. Ces charges initiales confirment la bonne qualité sanitaire de la matière première, de son environnement et de sa manutention, elles concordent avec les normes appliquées en France (cf. tableau VI.1.).

A partir des dénombrements microbiens de (FAMT) et (LM), nous avons calculé le taux de survie (τ séchage) de chaque flore, en la pondérant par la flore initiale et par la durée de séchage. Ceci suppose que la croissance des germes est en phase exponentielle. Ce taux est considéré comme une réponse du plan d'expérience utilisé. De même, après mesure de la couleur sur des poissons stockés (2,5 à 3 mois) après séchage dans une enceinte (à 30°C) contenant une solution aqueuse saturée de NaCl ($a_w = 0,75$) (simulation de conditions tropicales), nous y avons dénombré les flores (FAMT) et (LM). Là également, le taux de survie (τ stockage) est considéré comme une réponse du plan d'expérience.

$$\tau_{\text{séchage}} = (1/\text{durée séchage}) \times \log_{10} (\text{flore après séchage}/\text{flore avant séchage})$$

$$\tau_{\text{stockage}} = (1/\text{durée stockage}) \times \log_{10} (\text{flore après stockage}/\text{flore après séchage})$$

Le modèle du 2^o degré rend compte de la variation du taux τ séchage (FAMT) avec un R^2 de 0,84. Le tableau V.33. montre un effet linéaire négatif fortement significatif de (T) sur τ séchage (FAMT), celui-ci diminue donc avec une augmentation de (T). Cet effet est logique et recherché dans la destruction thermique des micro-organismes. (HR) a un effet linéaire positif d'autant plus marqué que (T) est élevée (fig. V.9.). Ainsi, à 30°C,

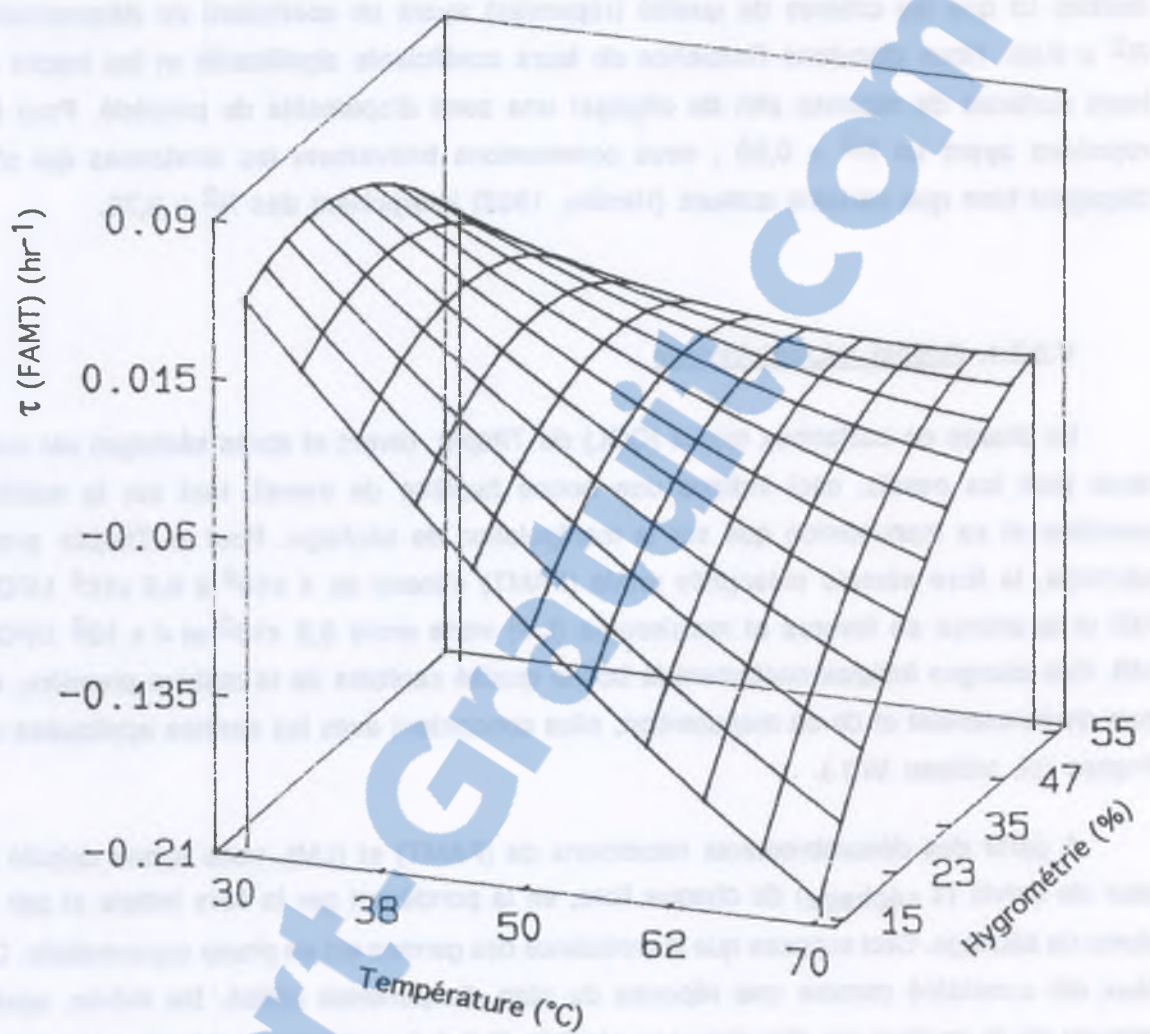


Figure V.9. Evolution du taux de survie (τ) de la flore aérobie mésophile totale (FAMT) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant à 2 m/s)

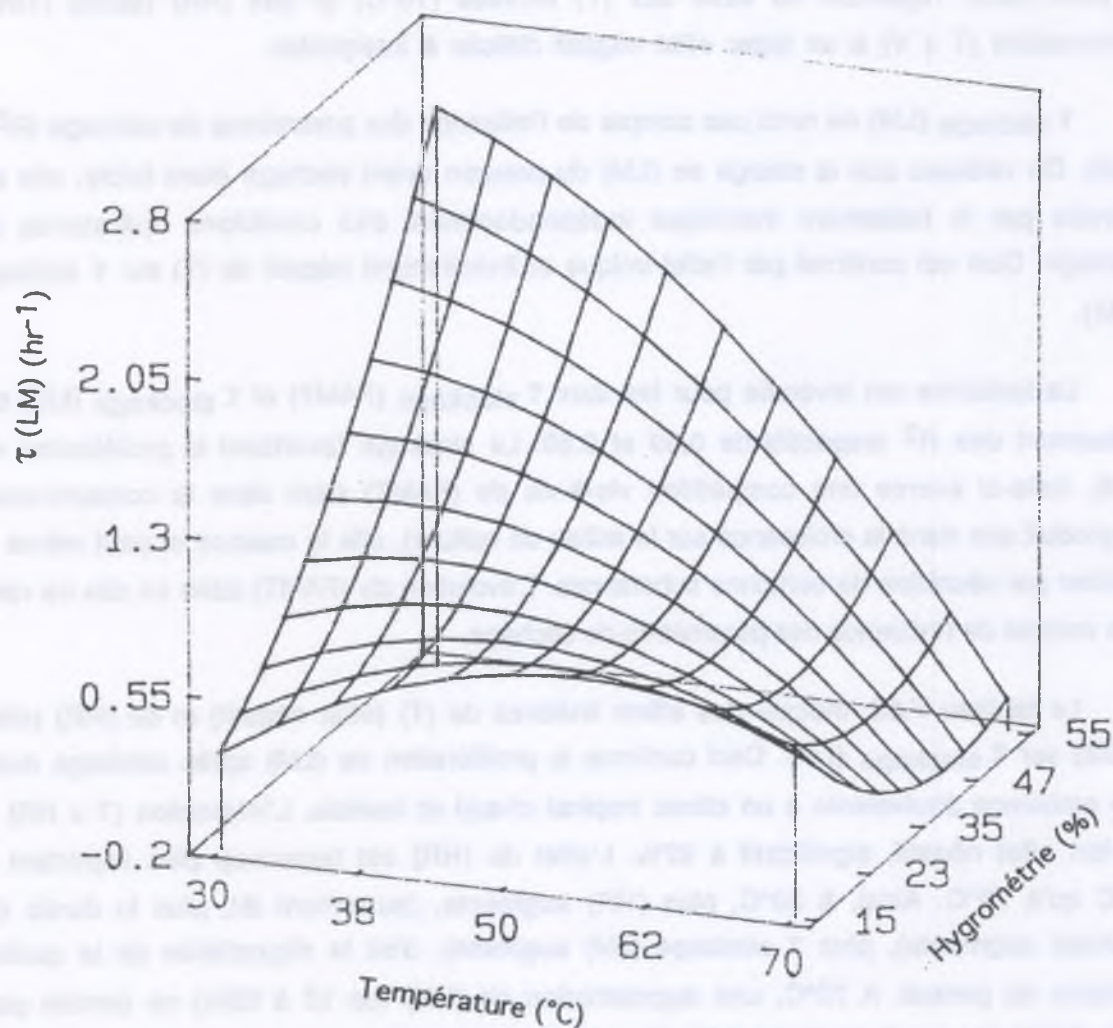


Figure V.10. Evolution du taux de survie (τ) des levures et moisissures (LM)(après stockage à 30°C et 75% HR) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant à 2 m/s)

τ séchage est indépendant de (HR) alors qu'à 70°C, il augmente fortement en fonction de (HR). Pour obtenir la meilleure qualité bactériologique, c'est-à-dire τ séchage (FAMT) le plus faible, l'optimum se situe aux (T) élevées (70°C) et aux (HR) faibles (15%). L'interaction (T x V) a un léger effet négatif difficile à interpréter.

τ séchage (LM) ne rend pas compte de l'influence des paramètres de séchage ($R^2 = 0,68$). On relèvera que la charge en (LM) du poisson avant séchage étant faible, elle est détruite par le traitement thermique indépendamment des conditions opératoires de séchage. Ceci est confirmé par l'effet unique et linéairement négatif de (T) sur τ séchage (LM).

La tendance est inversée pour les taux τ stockage (FAMT) et τ stockage (LM) qui présentent des R^2 respectifs de 0,59 et 0,80. Le stockage favorisant la prolifération de (LM), celle-ci exerce une compétition vis-à-vis de (FAMT) (tant dans la contamination du produit que dans la croissance sur le milieu de culture), elle la masque et peut même l'inhiber par sécrétion de certaines substances. L'évolution de (FAMT) dans ce cas ne rend plus compte de l'influence des paramètres de séchage.

Le tableau V.33. indique des effets linéaires de (T) (effet négatif) et de (HR) (effet positif) sur τ stockage (LM). Ceci confirme la prolifération de (LM) après stockage dans une ambiance équivalente à un climat tropical chaud et humide. L'interaction (T x HR) a un fort effet négatif, significatif à 92%. L'effet de (HR) est beaucoup plus important à 30°C qu'à 70°C. Ainsi, à 30°C, plus (HR) augmente, (autrement dit, plus la durée de séchage augmente), plus τ stockage (LM) augmente, d'où la dégradation de la qualité sanitaire du produit. A 70°C, une augmentation de (HR) (de 15 à 55%) ne semble pas avoir d'effet net sur τ stockage (LM) (fig. V.10.). Ceci précise qu'à conditions de stockage égales, un produit séché à 70°C et à une (HR) quelconque, aura toujours une charge potentielle (LM) faible, alors que pour un produit séché à 30°C, le risque de prolifération de (LM) sera d'autant plus élevé que son (HR) de séchage était élevée. Ceci confirme une fois de plus, que la qualité sanitaire optimale du poisson est obtenue par séchage à (T) élevée et (HR) faible.

Notons que des R^2 de 0,80 sont satisfaisants pour expliquer les variations de réponses aussi complexes que les flores microbiennes, étant donné que le développement microbien dépend de plusieurs facteurs environnants, du stress des germes et de leur temps de latence.

Tableau V.34. Coefficients de la régression linéaire multiple et de l'analyse de variance pour les indices de qualité physico-chimique (pH, luminance côté chair "L_c" et indice de rouge côté chair "a_c")

Coefficients	pH	L _c	a _c
constante	6,266	52,199	5,987
linéaires			
T	0,163 ***	-2,775 ***	1,147 *
HR	-0,026	-1,887 ***	1,079 *
V	-0,024	0,366	-0,788
quadratiques			
T ²	0,028	-0,389	0,587
HR ²	0,009	1,431 **	-0,580
V ²	-0,011	0,035	0,375
interactions			
T x HR	0,001	2,038 **	-2,463 ***
T x V	-0,051 *	-2,313 **	0,763
HR x V	-0,014	1,238	-0,463
coefficient de détermination R²	0,92	0,91	0,82

Les niveaux de signification des facteurs expérimentaux sont déterminés selon une loi de Student. Un coefficient a de l'effet si son niveau de signification est $\leq 10\%$

* niveau de signification $\leq 10\%$
 ** niveau de signification $\leq 5\%$
 *** niveau de signification $\leq 1\%$
 sans * coefficient non significatif

Le coefficient de détermination R² est obtenu par une analyse de variance. Seules les réponses ayant des R² $\geq 0,80$ sont présentées.

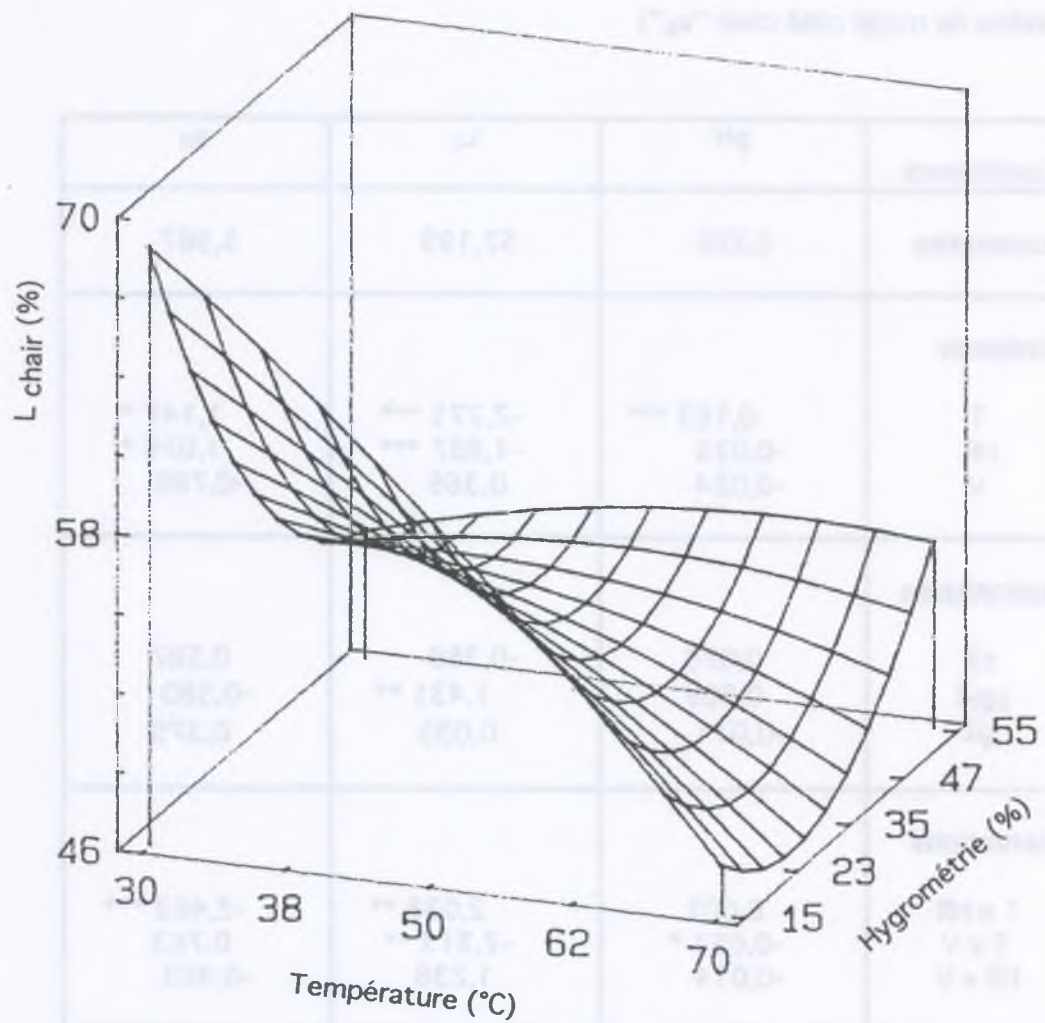


Figure V.11. Indice de luminance de la chair du poisson (L_{chair}) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant de 2 m/s)

V.3.3.2. Qualité physico-chimique

L' a_w n'est pas considéré comme une réponse à modéliser mais uniquement comme indicateur de la fin de séchage et de l'aptitude du poisson séché à une bonne conservation ultérieure. L' a_w du *Tilapia* frais varie entre 0,985 et 0,991. Celui du poisson en fin de séchage (pour tous nos essais) s'étage de 0,313 à 0,725 (cf. annexe 5) ; cette gamme est adéquate pour la stabilité du produit.

Le pH du *Tilapia* avant séchage va de 6,5 à 6,9 ; cette variation dépend sûrement de l'état physiologique du poisson et de son stress avant capture. L'évolution du pH en fonction des paramètres de séchage est en bonne adéquation avec le modèle ($R^2 = 0,92$).

Le tableau V.34. montre un léger effet positif et fortement significatif de (T) sur le pH ; celui-ci augmente quand (T) s'élève. Ceci s'explique par l'accumulation de groupements aminés suite à la protéolyse favorisée aux hautes températures. Le léger effet négatif de l'interaction (T x V) est difficile à interpréter, ce qui montre que l'outil mathématique et statistique (modèle) ne peut à lui seul expliquer des mécanismes biochimiques et/ou physiques internes au produit.

Notons que le pH est un bon indice de l'acidité libre (lors du suivi de la fermentation du poisson par exemple) mais il serait plus judicieux de le remplacer par l'acidité totale (ou titrable) comme indice de qualité en fin de séchage.

Les mesures de couleur (valeurs expérimentales) sont représentées en annexe 5. Le tableau V.34. indique que " L_c " et " a_c " sont des réponses correctement modélisées (R^2 respectifs de 0,91 et 0,82). (T) et (HR) ont des effets linéaires négatifs sur " L_c ", ces effets sont renforcés par les interactions (T x HR) et (T x V) et par un effet quadratique (HR^2) positif. L'interaction (T x HR) a un effet d'autant plus fort qu'elle inverse l'influence des facteurs.

Le maximum de " L_c " (produit clair) se situe à 30°C et son minimum à 70°C (produit foncé). Ceci confirme l'influence des températures élevées sur le brunissement non enzymatique d'un produit. Cependant à 30°C, plus (HR) augmente, plus " L_c " diminue, autrement dit le produit devient plus foncé. En effet, de telles conditions de séchage (faible T et fortes HR) équivalent à des durées de séchage plus longues qui favorisent les dégradations protéolytiques et l'oxydation des lipides, ce qui augmente le taux des précurseurs des réactions de Maillard. A 70°C, plus (HR) augmente, plus " L_c " augmente, conduisant à un produit plus clair (fig. V.11.).

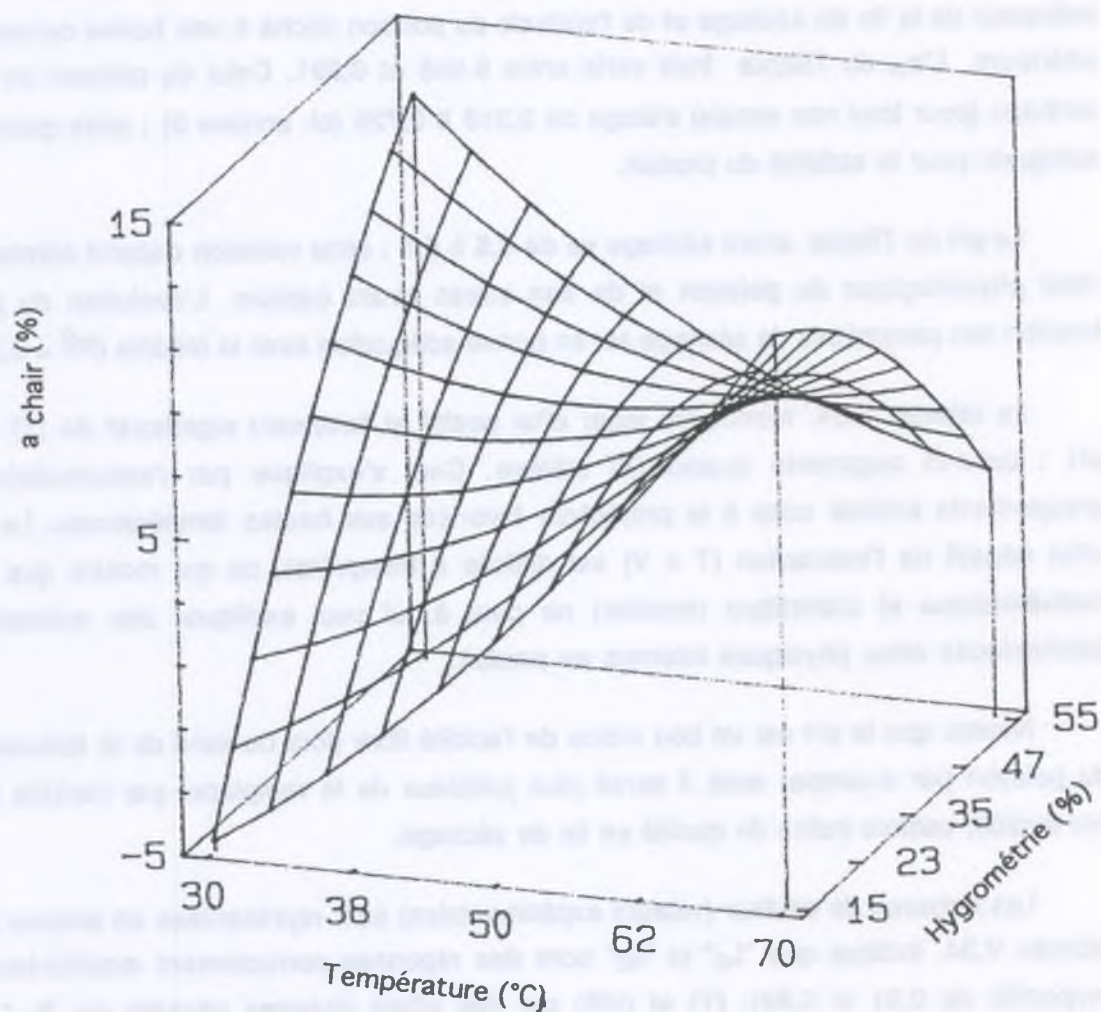


Figure V.12. Indice de rouge de la chair du poisson (a chair) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant à 2 m/s)

Ainsi, des (T) élevées et des (HR) faibles conduisent d'une part, à une excellente qualité sanitaire du poisson et d'autre part, elles favorisent le brunissement de sa couleur, ce qui correspond parfaitement aux goûts des consommateurs maliens.

(T) et (HR) exercent également des effets linéaires mais positifs sur l'indice " a_c ", ainsi qu'une interaction négative. Ceci corrobore l'influence des facteurs sur " L_c " puisque " L_c " et " a_c " sont inversement corrélés (un produit foncé correspond à " L " faible et " a " élevé). Là aussi, l'effet de la température est prépondérant. A hygrométrie égale, " a_c " augmente fortement en passant de 30 à 70°C (fig. V.12.). Par contre, l'effet de (HR) est plus marqué aux faibles qu'aux (T) élevées. Ainsi, à 70°C, le passage de (HR) de 15 à 55% diminue légèrement " a_c ", alors qu'à 30°C, cette même élévation de (HR) entraîne une forte augmentation de " a_c ". En effet, ces dernières conditions se traduisent par une durée de séchage plus longue qui augmente les produits d'oxydation des lipides et leur participation au brunissement non enzymatique. Ce point corrobore les résultats trouvés pour " L_c " (fig. V.11.) et pour TNBS (fig. V.13.).

Notons que la durée de séchage (directement liée aux conditions de séchage) intervient de façon implicite dans l'interprétation de certains mécanismes biochimiques, surtout dans le cas d'un séchage doux où une durée plus longue de séchage favorise des modifications internes et des réactions intermédiaires.

L'indice " b_c " est moins bien expliqué par le modèle ($R^2 = 0,76$). Nous relevons l'effet linéaire négatif de (T) sur " b_c ", ce qui corrobore les travaux cités dans la littérature (Singh *et al.*, 1991) et concorde avec les variations de " L_c " et " a_c " pour les (T) élevées (un produit foncé correspondant à " L " faible, " a " élevé et " b " faible).

Les critères " L_p ", " a_p " et " b_p " mesurés sur la peau du poisson ne rendent pas compte de l'évolution de la couleur de la peau en fonction de (T), (HR) et (V) (R^2 respectifs de 0,61 ; 0,72 et 0,46). On peut penser que les pigments propres de la peau et le pouvoir réflecteur des arêtes sous-jacentes interviennent à ce niveau.

V.3.3.3. Qualité biochimique

Les valeurs expérimentales des critères de matières azotées (TNBS, ABVT, solubilités des protéines) sont données en annexe 6.

La variation de l'indice TNBS est prédite par le modèle avec un R^2 de 0,80. Le tableau V.35. montre des effets linéaires de (T) (effet négatif) et de (HR) (effet positif)

Tableau V.35. Coefficients de la régression linéaire multiple et de l'analyse de variance pour les indices de qualité biochimique (TNBS, TBA, AASC, solubilité des protéines dans le tampon Tris et dans NaCl 0,6 M)

Coefficients	Indice TNBS	Indice TBA	Indice AASC	Protéines solubles/Tris	Protéines solubles/NaCl 0,6 M
constante	133,362	3,301	7,606	7,869	11,806
linéaires					
T	-15,318 **	-0,736 ***	-0,664 **	-3,188 ***	-3,424 **
HR	13,504 *	0,046	-1,152 ***	0,215	-2,991 **
V	-10,728	-0,177	0,680 **	0,515	0,141
quadratiques					
T ²	-9,037	-0,072	-0,289	0,425	0,665
HR ²	-7,624	-0,337 *	-0,342	-0,600	2,697 *
V ²	9,131	-0,002	0,030	-0,247	0,276
interactions					
T x HR	5,9	0,15	-0,175	-0,988 **	3,188 *
T x V	11,875	0,15	0,95 **	-0,788	-1,838
HR x V	10,35	0,125	-0,15	0,538	0,188
coefficient de détermination R²	0,80	0,84	0,85	0,94	0,80

Les niveaux de signification des facteurs expérimentaux sont déterminés selon une loi de Student. Un coefficient a de l'effet si son niveau de signification est $\leq 10\%$

* niveau de signification $\leq 10\%$

** niveau de signification $\leq 5\%$

*** niveau de signification $\leq 1\%$

sans * coefficient non significatif

Le coefficient de détermination R² est obtenu par une analyse de variance. Seules les réponses ayant des R² $\geq 0,80$ sont présentées.

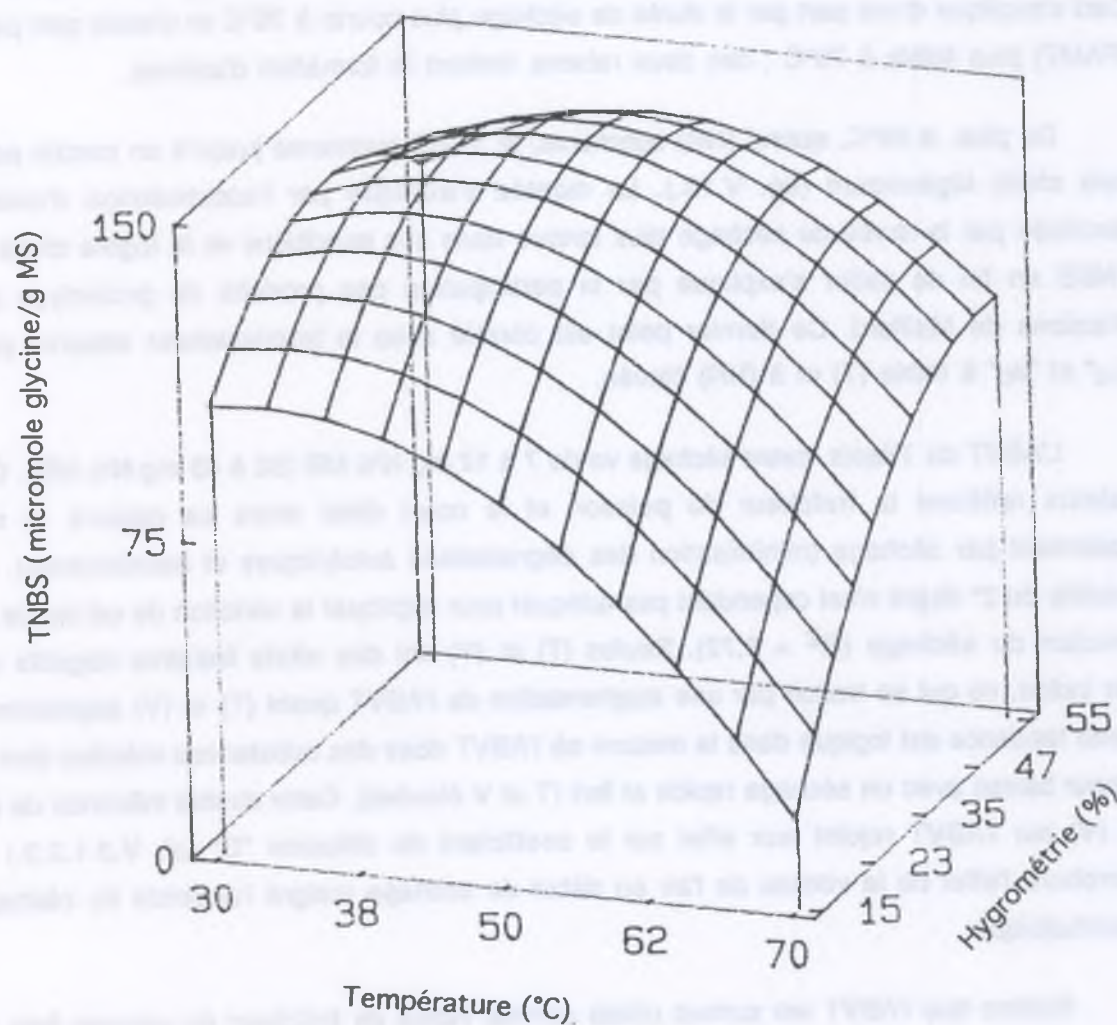


Figure V.13. Indice d'acide trinitrobenzène sulfonique (TNBS) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant de 2 m/s)

sur le TNBS. Il est plus judicieux de discuter ces effets en termes de durée de séchage. En effet, à (HR) égale (15% par exemple), le TNBS est plus important à 30 qu'à 70°C, ce qui paraît surprenant étant donné que les températures élevées favorisent la protéolyse. Ceci s'explique d'une part par la durée de séchage plus courte à 70°C et d'autre part par la (FAMT) plus faible à 70°C ; ces deux raisons limitent la formation d'amines.

De plus, à 30°C, quand (HR) augmente, le TNBS augmente jusqu'à un certain palier puis chute légèrement (fig. V.13.). La montée s'explique par l'accumulation d'amines favorisée par la durée de séchage plus longue dans ces conditions et la légère chute du TNBS en fin de palier s'explique par la participation des produits de protéolyse aux réactions de Maillard. Ce dernier point est corrélé avec le brunissement observé pour "L_C" et "a_C" à faible (T) et à (HR) élevée.

L'ABVT du *Tilapia* avant séchage va de 7 à 12 mg N% MB (30 à 45 mg N% MS). Ces valeurs reflètent la fraîcheur du poisson et le court délai entre sa capture et son traitement par séchage (minimisation des dégradations autolytiques et bactériennes). Le modèle du 2° degré n'est cependant pas adéquat pour expliquer la variation de cet indice en fonction du séchage ($R^2 = 0,72$). Seules (T) et (V) ont des effets linéaires négatifs sur cet indice, ce qui se traduit par une augmentation de l'ABVT quand (T) et (V) augmentent. Cette tendance est logique dans la mesure où l'ABVT dose des substances volatiles dont la teneur baisse avec un séchage rapide et fort (T et V élevées). Cette double influence de (T) et (V) sur l'ABVT rejoint leur effet sur le coefficient de diffusion "D" (cf. V.3.1.2.3.) et corrobore l'effet de la vitesse de l'air en début de séchage malgré l'absence de séchage isenthalpique.

Notons que l'ABVT est surtout utilisé comme indice de fraîcheur du poisson frais et même comme degré ultime d'altération avant rejet (Antonacopoulos et Vyncke, 1989). Son application au poisson transformé est discutable. Ce critère est fortement lié à l'espèce de poisson et à son environnement avant capture.

L'évolution de l'ABVT en fonction du séchage rappelle la prudence qu'il faut accorder à l'outil mathématique et statistique dans l'interprétation d'un concept aussi complexe que la qualité d'un produit. En effet, le coefficient de détermination ($R^2 = 0,72$) de ce critère n'indique pas une bonne adéquation au modèle du 2° degré, pourtant, l'effet visible des facteurs est explicable par des mécanismes biochimiques ; alors que pour le pH, le modèle est bien adapté à la réponse ($R^2 = 0,92$) mais l'effet des facteurs est difficile à interpréter.

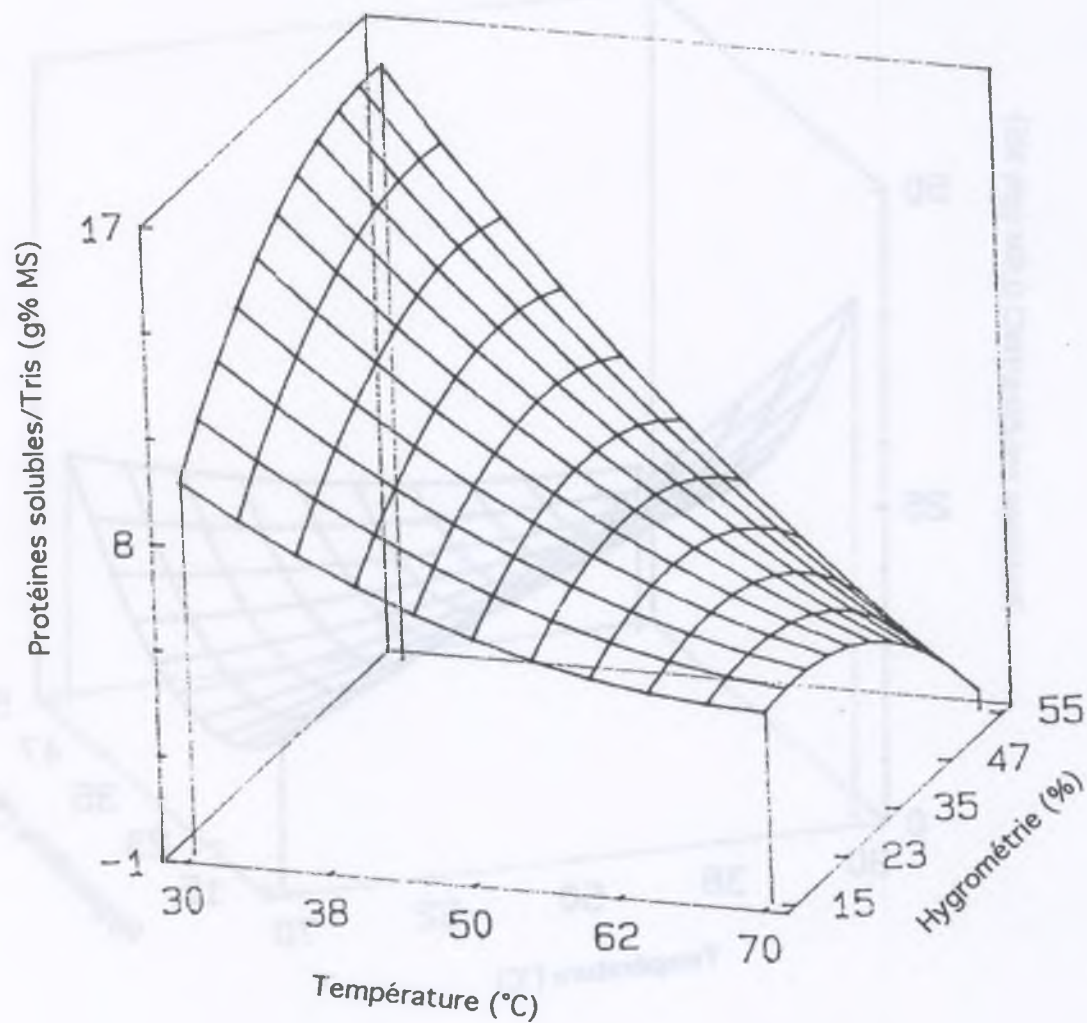


Figure V.14. Taux de solubilité des protéines dans le tampon Tris en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant de 2 m/s)

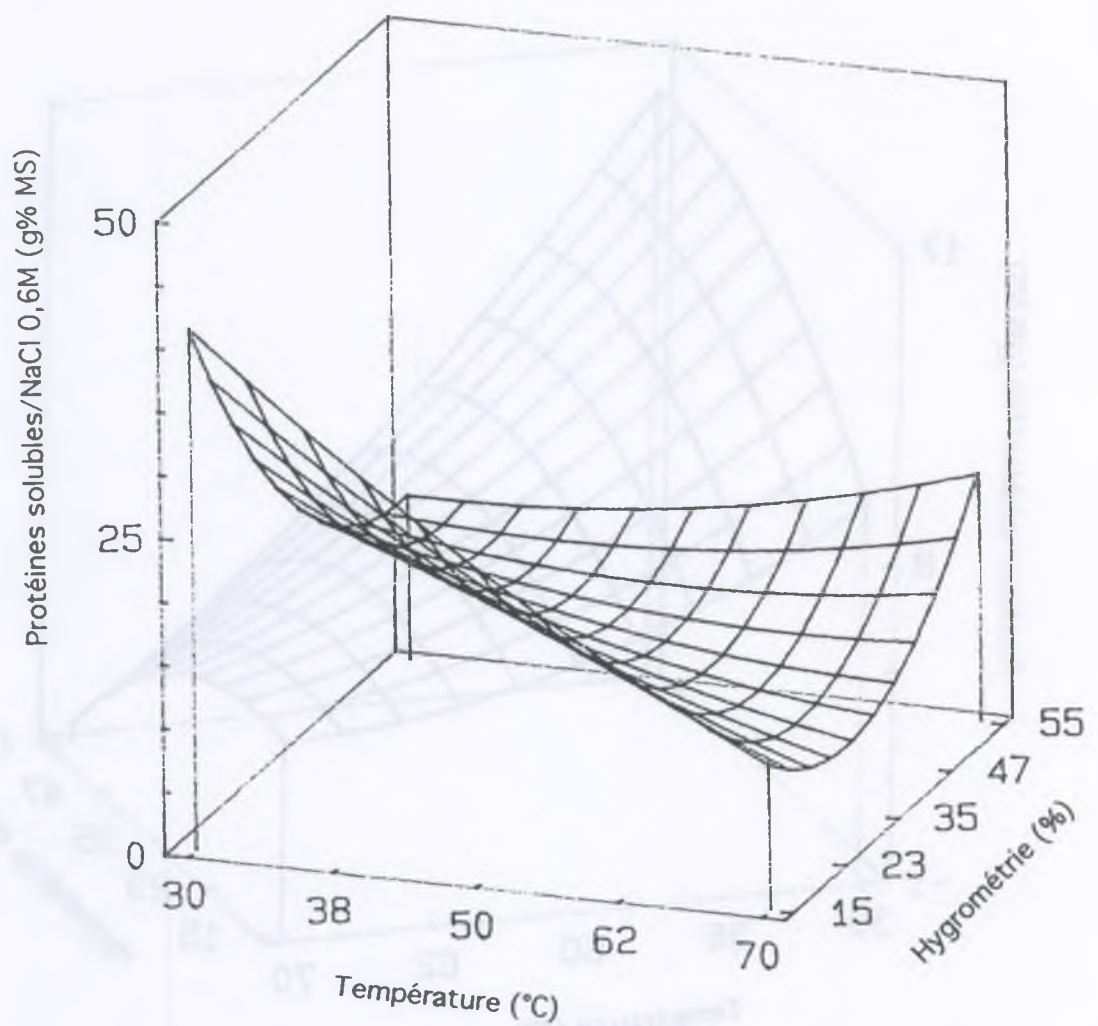


Figure V.15. Taux de solubilité des protéines dans une solution de NaCl 0,6M en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant de 2 m/s)



La solubilité des protéines dans le tampon Tris est expliquée avec un R^2 de 0,94 (tableau V.35). Le Tris, solution de faible force ionique, solubilise uniquement les protéines sarcoplasmiques (myoglobine, albumines, globulines). Le taux de protéines solubles diminue quand (T) augmente. Ceci est dû à la dénaturation des protéines (coagulation et changement de leur conformation) et le démasquage de groupements hydrophobes qui apparaissent à la surface (Cheftel *et al.*, 1985 ; Sainclivier, 1988 ; Singh *et al.*, 1991). L'interaction (T x HR) a un effet négatif d'autant plus marqué que (T) est faible. Ainsi, à 30°C, plus (HR) augmente, plus la solubilité des protéines augmente, alors qu'à 70°C, une augmentation de (HR) induit peu de variations sur le taux de protéines solubles dans le Tris (fig. V.14.). Plusieurs explications peuvent être avancées. Ainsi, la durée de séchage plus longue (30°C, 55% par exemple) peut favoriser la solubilisation de protéines extracellulaires (collagène), ou encore l'augmentation de la charge microbienne à ces conditions de séchage peut activer la protéolyse.

Quant au taux de protéines solubles dans NaCl 0,6 M, il dépend de (T) et de (HR) (effets linéaires négatifs renforcés par un effet quadratique (HR²) positif et par une interaction positive (T x HR) ($R^2 = 0,80$) (tableau V.35.). Nous retrouvons la diminution de la solubilité avec l'augmentation de (T) mais uniquement pour les faibles (HR) (fig. V.15.). Aux (HR) élevées, l'effet de (T) est moins marqué et le taux de protéines solubles varie peu. De plus, l'augmentation de (HR) entraîne une diminution des protéines solubles à 30°C et une augmentation de solubilité à 70°C. Cette inversion par rapport à la solubilité dans le Tris s'explique par la nature des protéines extraites dans les deux milieux. En effet, NaCl 0,6 M, solution à force ionique élevée, extrait les protéines myofibrillaires (actine, myosine) alors que le Tris extrait des protéines sarcoplasmiques. Ainsi, à faible (T) et forte (HR), la durée de séchage plus longue peut entraîner des pontages interpeptidiques et des liaisons interprotéiques qui limitent leur solubilisation.

Le faible R^2 (0,63) du taux de protéines solubles dans NaCl 0,14 M ne permet pas de modéliser cette réponse par une équation du 2^e degré. De plus, il est difficile d'interpréter le seul effet linéaire et négatif de la vitesse de l'air de séchage sur ce critère. Notons que le taux d'extraction des protéines dans NaOH 0,5 N sert de référence, étant donné que la soude solubilise toutes les protéines du produit. Ce taux est de 55 à 60%, ce qui est bien corrélé avec le bilan de la composition chimique du *Tilapia*.

Les indices de dégradation (valeurs réelles) de la matière grasse et de l'hypoxanthine sont présentés en annexe 7.

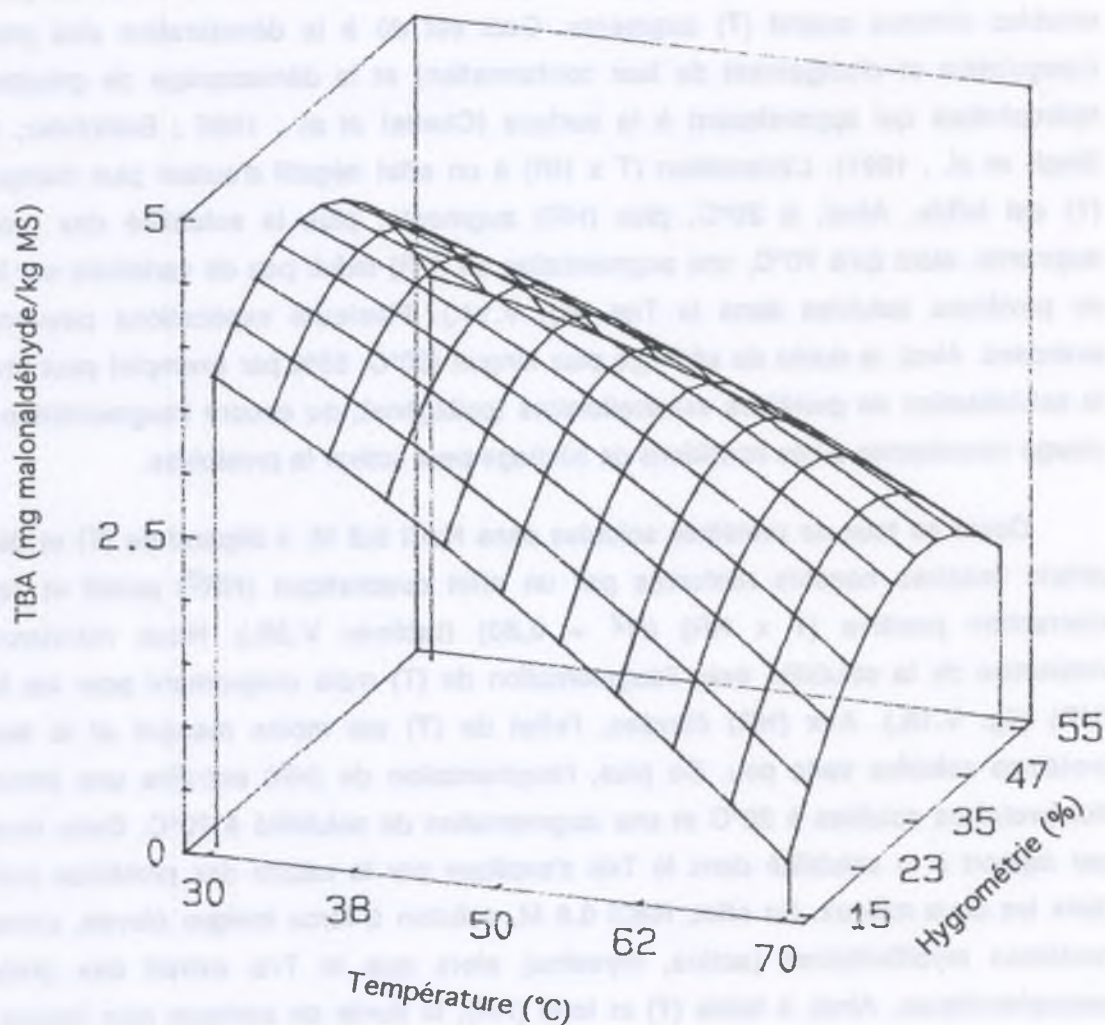


Figure V.16. Indice d'acide thiobarbiturique (TBA) en fonction de la température et de l'hygrométrie de l'air de séchage (la vitesse de l'air étant de 2 m/s)

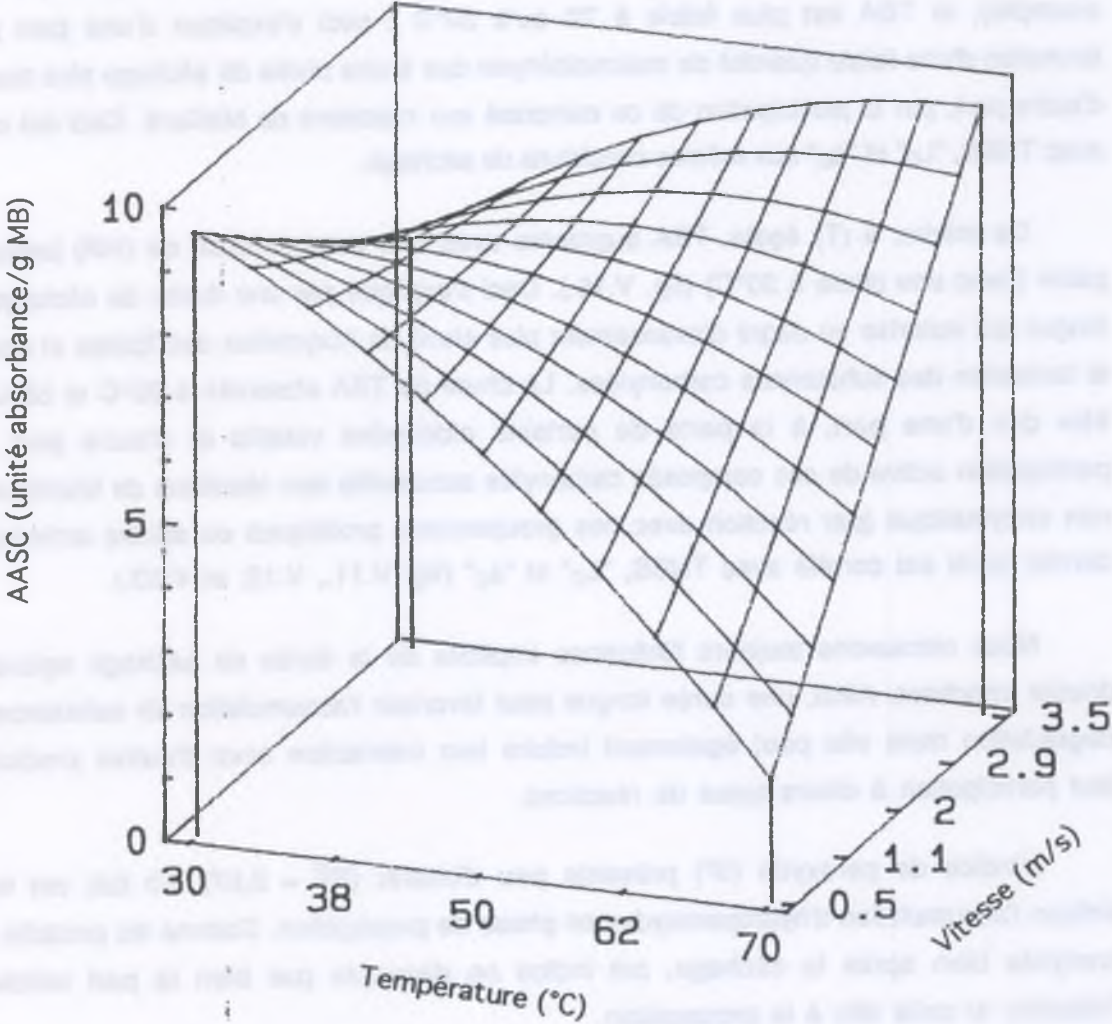


Figure V.17. Indice AASC (acetic acid soluble colour) en fonction de la température et de la vitesse de l'air de séchage (l'hygrométrie étant de 35%)

La variation du TBA en fonction du séchage est prédite avec un R^2 de 0,84. Le tableau V.35. montre un effet linéaire négatif de (T) et un effet quadratique négatif de (HR^2) (ce dernier se traduit par le maximum observé). A (HR) égale (15% par exemple), le TBA est plus faible à 70 qu'à 30°C ; ceci s'explique d'une part par la formation d'une faible quantité de malonaldéhyde due à une durée de séchage plus courte et d'autre part, par la participation de ce composé aux réactions de Maillard. Ceci est corrélé avec TNBS, "L_C" et "a_C" aux mêmes conditions de séchage.

De même, à (T) égale, TBA augmente avec une augmentation de (HR) jusqu'à un palier (avec une chute à 30°C) (fig. V.16.). Ceci s'explique par une durée de séchage plus longue qui autorise un degré d'avancement plus élevé de l'oxydation des lipides et donc de la formation des substances carbonylées. La chute de TBA observée à 30°C et 55% peut être due d'une part, à la perte de certains aldéhydes volatils et d'autre part, à la participation active de ces composés carbonylés accumulés aux réactions de brunissement non enzymatique (par réaction avec des groupements protéiques ou acides aminés). Ce dernier point est corrélé avec TNBS, "L_C" et "a_C" (fig. V.11., V.12. et V.13.).

Nous retrouvons toujours l'influence implicite de la durée de séchage agissant à double tranchant. Ainsi, une durée longue peut favoriser l'accumulation de substances de dégradation mais elle peut également induire leur interaction avec d'autres produits et leur participation à divers types de réactions.

L'indice de peroxyde (IP) présente peu d'intérêt ($R^2 = 0,67$). En fait, cet indice indique l'accumulation d'hydroperoxydes en phase de propagation. Comme les produits sont analysés bien après le séchage, cet indice ne découple pas bien la part relative à l'initiation et celle liée à la propagation.

L'indice AASC correspond à la dégradation des pigments héminiques (oxydation de la myoglobine) avec formation de mélanoïdines. Il est corrélé (avec un R^2 de 0,85) à (T), (HR) et (V) et à une interaction (T x V) (tableau V.35.). La forte valeur AASC à 30°C s'explique par la durée de séchage plus longue qui favorise la formation de composés héminiques (fig. V.17.). Par contre, à 70°C, la forte augmentation de l'AASC en fonction de (V) corrobore de nouveau l'effet de la vitesse de l'air en début de séchage. En effet, un air à 70°C et 3,5 m/s évapore très rapidement l'eau libre du produit et favorise donc les réactions de brunissement qui sont plus intenses en milieu peu hydraté. Notons que cet indice est un bon indicateur de l'oxydation des lipides au cours du stockage de poisson séché (Smith *et al.* , 1990).

Enfin, l'indice Hx ne semble pas du tout approprié au suivi de la qualité du poisson après séchage (R^2 de 0,67) ; les effets de (T) et (T^2) sont difficiles à expliquer. En fait, cet indice est utilisé pour l'estimation de la fraîcheur du poisson, surtout après stockage sous glace ; il dépend également de l'espèce considérée (Greene *et al.* , 1990).

V.3.4. Relation procédé-qualité et optimisation

L'optimisation du procédé de séchage passe par un compromis entre les différents critères de qualité expliqués par le modèle ($R^2 \geq 0,80$) dont les coefficients sont en relation directe avec les modifications de la qualité du produit. Ainsi, la température est le paramètre prépondérant de séchage. Des températures élevées favorisent la réduction du temps de séchage, une meilleure diffusion d'eau dans le produit, une excellente qualité sanitaire et une couleur plus foncée. Tous ces aspects sont considérés comme des avantages pour la qualité du poisson séché au Mali. Cependant, les températures élevées augmentent l'oxydation des lipides et diminuent la solubilité des protéines, ce qui peut être gênant du point de vue nutritionnel. Néanmoins, il a été démontré que le séchage à des températures inférieures à 80-100°C n'est pas exagérément nuisible à la qualité protéique du poisson et ne réduit ni la quantité ni la disponibilité des acides aminés (excepté pour la lysine qui réagit avec des produits d'oxydation) (Opstvedt, 1988 ; Moustaid, 1989).

D'autre part, une hygrométrie faible ou une vitesse trop forte peut provoquer un croûtage qui ralentit l'évaporation de l'eau. En complément de l'information qualitative fournie par l'exploitation directe du modèle (effets des facteurs), ce dernier permet, par interpolation, de prédire les conditions opératoires optimales. Ainsi, chaque variable réponse (critère de qualité) permet de définir graphiquement (surfaces de réponse, courbes d'isoréponse) un domaine idéal de fonctionnement.

Le recoupement de ces différents domaines révèle une zone de compromis entre les divers critères utilisés pour évaluer la qualité du produit. Cette zone de compromis (ou zone optimale de séchage) couvre la gamme suivante des paramètres de l'air : température de 55-60°C, hygrométrie de 25 à 30% et vitesse de 2 m/s.

AMELIORATION DE LA QUALITE DU POISSON SECHE AU MALI

Rapport-Gratuit.com

VI. AMELIORATION DE LA QUALITE DU POISSON SECHE AU MALI

VI.1. DIFFUSION DES CONNAISSANCES ACQUISES SUR LE TERRAIN

Les travaux menés dans le cadre de ce projet ont permis de :

- comprendre le procédé traditionnel de séchage et ses divers points critiques, ce qui permet de proposer des améliorations (utilité d'un séchage artificiel d'appoint en saison humide et/ou en saison froide par exemple, ...) ;
- définir la "qualité standard" du *Tilapia* traditionnellement séché au Mali, en fonction du contexte local et des différentes saisons de pêche ;
- cerner les critères maliens d'appréciation du poisson séché (goûts et habitudes alimentaires) et recueillir des informations sur les usages du produit, les circuits de commercialisation et le rôle des femmes ;
- sélectionner des critères de qualité et adapter leurs méthodes de mesure au poisson séché du Mali ;
- transférer un savoir-faire en termes de contrôle et d'analyse de la qualité du poisson séché, notamment en matière de tests facilement applicables sur le terrain ;
- proposer des recommandations et la vulgarisation de mesures simples d'hygiène pouvant améliorer sensiblement la qualité du poisson séché au Mali ;
- proposer des normes de qualité pour le poisson séché (normes inexistantes jusqu'ici) adaptées au contexte malien (et pouvant s'étendre au contexte africain régional). Ces normes pourraient être appliquées par les offices de contrôle du poisson sur les marchés, en vue de réguler les circuits de distribution et les échanges commerciaux.

L'usage de conteneurs améliore de façon notoire la manutention du poisson après capture. Le conteneur idéal semble être la glacière en matière plastique, mais son coût assez élevé empêche son utilisation par les pêcheurs des pays en voie de développement. Dans certains pays d'Asie et d'Afrique, les pêcheurs utilisent des paniers ou des conteneurs à base de matériaux locaux (bois, osier, roseaux, bambou). Ceci est préférable au stockage en vrac qui entraîne la contamination du poisson par les micro-organismes et par l'eau stagnante dans la pirogue. Néanmoins, l'usage de matériaux locaux présente deux inconvénients, d'une part, la difficulté de leur nettoyage et désinfection à cause de leur fort pouvoir d'absorption d'eau, et d'autre part, leur faible capacité d'isolation thermique. Ces deux facteurs ne réduisent pas suffisamment la contamination et la dégradation du poisson avant son débarquement. L'isolation de ces paniers locaux, associée à l'utilisation de glace, serait la solution idéale pour réduire les pertes dues à la manutention du poisson frais (TDRI, 1986 b ; Johnson et Clucas, 1990).

Des matériaux locaux à faible conductivité thermique peuvent assurer une isolation partielle des conteneurs à poisson. Dans la région Indo-Pacifique, plusieurs types de matériaux isolants sont utilisés (feuilles de bananier ou de palmier, bois de balsa, fibres naturelles de cocotier ou de cotonnier, algues ou végétation aquatique, sciure de bois, papier journal). Notons que l'utilisation de ces isolants nécessite un contrôle préalable de leur qualité hygiénique. En Corée, les conteneurs de poisson sont tapissés avec des bandes de caoutchouc naturel, matériau souple et facile à nettoyer. Son emploi ne peut cependant se généraliser que dans les pays où sa disponibilité le rend peu coûteux.

D'autres techniques consistent à vernir le bois des paniers (vernis plastique protecteur), ou à isoler les conteneurs avec des planches de polystyrène expansé (Indonésie), ou encore à tapisser l'intérieur des conteneurs traditionnels de poisson avec des bâches de polyéthylène (Thaïlande, Malaisie, Indonésie) (TDRI, 1986 b ; Wood et Cole, 1989).

Certes, ces matériaux ne peuvent pas servir de matériau de construction du conteneur "idéal" pour la manutention du poisson frais, ils ne pourraient qu'assurer l'isolation des conteneurs traditionnels existants et économiseraient l'utilisation de la glace en ralentissant sa fonte. La vulgarisation de l'usage de conteneurs et de leur isolation est souhaitable au Mali, elle peut être menée par des offices de contrôle du poisson tels que l'OPM (Opération Pêche Mopti).

- Au cours de l'éviscération du poisson, il est souhaitable de séparer les viscères afin d'éviter la contamination de la chair du poisson. Ces viscères ne doivent pas traîner



près des aires de séchage car ils attirent les insectes. Ils pourraient être utilisés comme engrais ou comme aliment de bétail.

- Le nettoyage régulier et la désinfection des ustensiles de parage et de dépôt des captures est indispensable pour éviter l'accumulation des mouches sur le plan de travail. De même, le nettoyage du fond des pirogues (débris de poisson, eau sale) doit être effectué périodiquement, d'autant plus qu'au Mali, le poisson est souvent déposé en vrac, sur le sol de la pirogue. Le renouvellement systématique des litières de séchage (paille tressée ou secko) est important afin d'éliminer tout dépôt de poussière, de matière grasse et d'insectes ou larves (morts ou vivants).

- L'addition de conservateurs alimentaires permet de réguler et d'améliorer la qualité du poisson séché. Notre étude a montré que le bicarbonate de sodium, incorporé à l'eau de fermentation, conduit à un produit analogue et aussi apprécié que le produit traditionnel. De plus, l'usage du sorbate de potassium en fin de séchage, retarde le développement des moisissures et améliore ainsi le stockage ultérieur du poisson séché. Notons que cette démarche relève, une fois de plus, des pouvoirs publics maliens et que sa réussite dépend à la fois d'un approvisionnement régulier en additifs, de leur coût et du contrôle sérieux de leur mode d'utilisation.

- Le salage du poisson avant séchage permet d'une part, d'inhiber bon nombre de bactéries et d'autre part, de réduire l'infestation par les insectes. Le poisson salé est généralement peu populaire parmi les consommateurs africains, surtout dans les pays non côtiers. Ceci est sûrement vrai dans les pays où le sel est une denrée rare. Mais, même au Ghana et au Sénégal où le sel est disponible, le poisson destiné au marché intérieur est faiblement salé. Il semble que la fabrication de produits fortement salés soit relativement limitée car les consommateurs ignorent comment dessaler le poisson par trempage avant la cuisson (Watanabé, 1974). Ainsi, le Nigéria et le Congo sont fortement demandeurs de poisson salé, de par leur longue expérience d'importation du "klipfish" de Norvège. Au Mali, le sel est assez facilement disponible (arrivant par la région de Tombouctou), il serait donc judicieux de mener des essais complémentaires de salage du poisson et de vulgariser la pratique de dessalage du produit avant cuisson auprès des ménagères.

- La pose de moustiquaires autour des aires de séchage, l'utilisation de sacs de jute propres et désinsectisés pour le transport, ainsi que le traitement des nattes et des locaux d'entreposage réduisent les risques d'infestation par les insectes (FAO, 1989).

- Il est également important de surélever les aires de séchage afin d'éviter toute contamination par le sol (sable, poussière, animaux) et de favoriser le passage de l'air à

travers le produit. Au Mali, cette amélioration s'implante de plus en plus dans les campements de pêcheurs. En vue de pallier le manque d'aires de séchage en saison abondante de pêche, des claies de séchage peuvent être fabriquées avec des matériaux locaux. Des travaux réalisés par le Natural Resources Institute (NRI, Chatham, Royaume-Uni) proposent des claies horizontales ou inclinées, ainsi que la technique de suspension des poissons entre deux piquets (Clucas et Johnson, 1990 ; Johnson et Clucas, 1990 ; King et Johnson, 1990). L'usage de râteliers inclinés permet de mieux drainer l'eau excédentaire à la surface du poisson. Notons que les râteliers doivent être disposés loin des terrains marécageux, des forêts ou de bâtiments élevés qui réduisent le mouvement de l'air ou projettent de l'ombre sur le poisson (TDRI, 1986 b).

- Etant donné les fluctuations climatiques importantes, notamment en saison froide et en saison de transition sèche/humide, un séchage artificiel d'appoint serait utile et efficace. Ceci ne peut pas être mené par des pêcheurs individuels mais plutôt par des groupements de pêcheurs qui seraient dirigés par des techniciens et des vulgarisateurs initiés à cette technique.

- Des efforts de formation et de vulgarisation sont nécessaires auprès des transformatrices en vue de réduire au mieux les risques de dégradation de la qualité du poisson. Ainsi, il serait judicieux qu'elles recouvrent systématiquement le poisson pendant la nuit, au moyen d'une bâche en plastique (facilement disponible au Mali). Ceci éviterait à la fois la réhumidification du produit et l'attaque par des prédateurs (chats, chiens, rats et oiseaux). Ce dernier problème ne se pose pas dans la journée, étant donné la surveillance quasi constante de l'un des membres du campement.

- Enfin, il serait intéressant de promouvoir l'utilisation de produits locaux à pouvoir répulsif contre les insectes (piment, végétaux, sel). A ce sujet, l'expérience des pays asiatiques est fort intéressante (cf. III.2.).

Ainsi, l'amélioration de la qualité du poisson séché au Mali se situe-t-elle à différents niveaux. Les démarches prioritaires semblent liées, d'une part à la vulgarisation de mesures simples d'hygiène et d'autre part, au suivi régulier et effectif de la transformation artisanale par des agents agréés (Opération Pêche Mopti par exemple). Toutefois, il est évident que la généralisation de telles mesures ou l'introduction de nouvelles directives tient à une volonté des autorités nationales pour dynamiser la filière de la pêche au Mali.

VI.3. NORMES PROPOSEES POUR LA QUALITE DU POISSON SECHE AU MALI

L'étude de terrain nous a permis de caractériser le procédé traditionnel et le produit local au Mali. Ceci nous a conduits à proposer des "normes" de qualité qui pourraient être appliquées par des offices de contrôle des produits de la pêche (tels que l'Opération Pêche Mopti), en vue de réguler les circuits de commercialisation locaux et régionaux du poisson séché.

En fonction de l'environnement local et des critères maliens d'appréciation du poisson séché, il ressort que ce produit devrait répondre aux critères sensoriels suivants. Ces critères rejoignent des résultats d'enquêtes effectués au Mali (Stomal, 1991).

- le poisson séché doit avoir un aspect brillant, légèrement gonflé, une couleur marron foncé tirant vers le rouge, une odeur forte de fermentation (aigreur prédominante avec une note butyrique) ainsi qu'un goût piquant et lourd ;
- un produit sec mais non cassant, ne s'effritant pas rapidement est demandé ;
- il ne doit pas présenter d'infestation visible par des insectes ou des larves ;

- le poisson séché du Mali devrait satisfaire les critères chimiques suivants :

- une teneur en eau moyenne de 12 à 18% (bh)
- un taux d'azote basique volatil total (ABVT) entre 300 et 350 mg N% MS. Ce taux est une moyenne observée pendant les trois campagnes et correspondant au produit traditionnel en fin de séchage (qualité non encore dégradée). L'ABVT ne pourrait donc être inférieur à cette limite ;

Tableau VI.1. Normes bactériologiques appliquées en France pour les produits aquatiques (normes reprises dans le Journal Officiel de la République Française du 19 Janvier 1980). *In* : Sainclivier, 1983.

	micro-organismes aérobies à 30°C (par gramme)	coliformes fécaux (par gramme)	staphylocoques aureus (par gramme)	anaérobies sulfito réducteurs à 46°C (par gramme)	salmonella
crustacés cuits réfrigérés autres que crevettes	10^5	1	-	2	absence dans 25g
crevettes cuites dé- cortiquées réfrigérées ou surgelées	10^5	10	10^2	10	absence dans 25 g
poissons tranchés panés ou non; filets de poisson réfrigérés	10^5	10	10^2	10	absence dans 25 g
préparation à base de chair de poisson hachée crue	5.10^5	10^2	10^2	10	absence dans 25 g
coquilles St Jacques moules précuites	10^5	10	10^2	30	absence dans 25 g
tous crustacés y com- pris crevettes entières cuites ou crues, con- gelés ou surgelés	10^3	1	-	2	absence dans 25g
cuisse de grenouilles escargots congelés ou surgelés	-	-	-	10^3	absence dans 25g
poissons tranchés panés ou non; filets congelés ou surgelés	10^4	1	10^2	2	absence dans 25g

- la qualité sanitaire du poisson séché au Mali obéirait aux critères suivants :

- une flore aérobie mésophile totale allant de 10^3 UFC/g MS (en saison sèche) à 10^7 UFC/g MS (en saison humide), cette flore n'est pas excessive étant donné que le produit est fermenté ;

- un taux de coliformes allant de 10^2 à 10^3 UFC/g MS

- une charge en levures et moisissures ne dépassant pas 10^5 UFC/g MS et absence de moisissures visibles à l'oeil nu ;

- un taux d'anaérobies sulfito-réducteurs de 10^3 à 10^5 UFC/g MS ;

- absence de salmonelles dans 25 g

Ces normes bactériologiques peuvent paraître exagérées ou choquantes, en comparaison avec celles courantes en France (ou en Europe) (tableau VI.1.). Elles se situent cependant dans une gamme qui tient compte du contexte malien, en différentes saisons de pêche, ainsi que de la charge initiale de l'eau du fleuve Niger, des risques de contamination liés aux aléas locaux et des caractéristiques organoleptiques (liées à la fermentation) exigées pour ce produit.

Les indices de qualité proposés sont faciles à contrôler sur le terrain et ne nécessitent pas de matériel élaboré ou de manipulation fastidieuse.

Les normes de qualité du poisson transformé sont très rares dans les PVD. Les standards adoptés en Malaisie concernent le poisson salé-séché (Mat, 1983). Ils donnent des indications sur la taille des poissons, l'hygiène des manipulations de parage et de traitement, la proportion de sel utilisée, ainsi que les teneurs en eau (40% max), en sel (25% min) et en cendres insolubles en milieu acide (1,5% max). Ils précisent également des critères d'emballage, d'étiquetage et de stockage. Ainsi, différentes catégories de poisson salé-séché sont définies en Malaisie selon des critères de taille, de degré d'effritement, de couleur, d'odeur et de texture ; les normes en termes de critères biochimiques sont inexistantes.

En Inde, les normes pratiquées se rapprochent de celles utilisées en Malaisie. Actuellement, des normes sont en cours d'élaboration au Mozambique pour la qualité du poisson séché.

Les normes de qualité que nous proposons pour le poisson séché au Mali tentent d'apporter des éléments de standardisation, en vue d'application lors de contrôles sur les ports de débarquement ou de transactions commerciales régionales. Il est évident que le poisson séché serait difficilement exportable à destination de pays européens. Pour cela, il faudrait contrôler la qualité de l'eau de rinçage et de fermentation (traditionnellement l'eau du fleuve) ; ceci dépasse cependant le cadre de cette étude et dépend d'une politique locale plus générale d'assainissement et d'amélioration des conditions d'hygiène au Mali.

... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...
... (the text is very faint and mostly illegible) ...

CONCLUSION



CONCLUSION

Les travaux réalisés au Mali nous ont permis de comprendre et de quantifier les différentes étapes du procédé traditionnel de séchage du poisson, ainsi que l'influence de l'environnement (climatique et hygiénique) sur la qualité du produit. Ils ont également dégagé les principaux goulots d'étranglement de cette transformation, notamment la nécessité d'un séchage artificiel d'appoint en saisons humide et/ou froide. Des recommandations pour améliorer la qualité du poisson séché et des normes pour sa standardisation sont proposées.

De plus, certains problèmes identifiés ressortent comme thèmes prioritaires et amorcent des perspectives de recherche-développement. Ainsi, l'infestation par les insectes demeure le problème crucial de la filière du poisson séché au Mali. Ce problème est aggravé par l'utilisation anarchique d'insecticides parfois disponibles chez les pêcheurs. Des études sérieuses sont nécessaires pour déterminer la dose maximale d'utilisation de ces traitements, leur quantité résiduelle et toxicité, ainsi que la régularité de leur approvisionnement et le contrôle de leur utilisation. De même, il serait intéressant de mener des travaux sur des produits naturels permettant une lutte biologique contre les insectes.

La qualité du poisson séché est largement dépendante de sa conservation en fin de séchage. Au Mali, les structures de stockage sont rudimentaires, ce qui augmente les pertes de poisson transformé. Il est important de contrôler les conditions locales d'entreposage et d'améliorer le stockage du produit par des moyens et matériaux de conditionnement.

Enfin, la qualité du poisson séché serait améliorée par le contrôle de l'opération de fermentation. A ce sujet, l'usage de bactéries lactiques "starter" associées à des substrats amylacés locaux constitue une piste d'investigation. Ceci nécessite des études préliminaires afin de répondre aux goûts des consommateurs locaux.

La partie de l'étude réalisée en France a permis d'associer divers aspects, tant dans la démarche expérimentale et les protocoles d'analyses de qualité que dans les outils statistiques et modèles utilisés. Cette approche globale du thème a confirmé que la qualité d'un produit est un concept très complexe, dépendant d'une multitude de facteurs externes et de mécanismes internes au produit étudié. Il est donc difficile et délicat de vouloir la résumer ou l'interpréter uniquement par un outil mathématique ou statistique.

Dans la panoplie de critères de qualité utilisés dans cette étude, certains sont bien "modélisables" par la méthodologie des surfaces de réponse. D'autres le sont moins mais ont permis de dégager des tendances sur les mécanismes qui les sous-tendent. La température de l'air de séchage est le paramètre prépondérant, tant par son influence sur le déroulement du séchage que sur les modifications dans le poisson. Des températures élevées donnent une meilleure qualité sanitaire, un brunissement de la couleur (recherché au Mali) et une diminution de la solubilité protéique. Tous ces aspects conduisent à un compromis sur la qualité globale du produit qui permet de dégager une zone d'optimisation du procédé. Cette zone optimale se situe à des températures sèches entre 55 et 60°C, une hygrométrie entre 25 et 30% et une vitesse de l'air de 2 m/s.

Nous précisons cependant que la méthodologie du plan d'expérience a ses limites. De plus, elle n'est valable que dans son domaine expérimental d'application. Il serait donc imprudent de considérer cette "zone optimale" comme une "recette" générale ou systématique pour l'obtention de la meilleure qualité, mais plutôt comme un indicateur de la gamme de paramètres à ne pas dépasser.

Enfin, ce travail a été enrichissant et formateur à plusieurs niveaux, tant dans l'aspect plus fondamental de la recherche réalisée en France que dans l'aspect plus appliqué au Mali, avec adaptation des méthodologies expérimentales au contexte local et collaboration sur le terrain avec des partenaires locaux.

ILLUSTRATIONS DU SECHAGE DE POISSON AU MALI



Pêche au filet maillant dérivant (fleuve Niger)



Parage du poisson après débarquement



Lavage (à l'eau du fleuve) des poissons éviscérés et parés



Fermentation du poisson dans un canari contenant de l'eau du fleuve



Séchage (sur râtelier) des poissons fermentés



Conditionnement du poisson séché avant mise sur le marché

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACTON, J.C. ; RUDD, C.L., 1987. Protein quality methods for seafoods. In : Kramer D.E. & Liston J. (eds), *Seafood Quality Determination* , pp. 453-472, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- ADAMS, M.R. ; COOKE, R.D. ; TWIDDY, D.R., 1987. Fermentation parameters involved in the production of lactic acid preserved fish-glucose substrates. *Int. J. Food Sci. & Technol.*, **22**, 105-114.
- AFOLABI, O.A. ; ARAWOMO, O.A. ; OKE, O.L., 1984. Quality changes of Nigerian traditionally processed freshwater fish species. I. Nutritive and organoleptic changes. *J. Food Technol.*, **19**, 333-340.
- AFOLABI, O.A. ; SALAU, A.M.A. ; OKE, O.L., 1984. Quality changes of Nigerian traditionally processed freshwater fish species. II. Chemical composition. *J. Food Technol.*, **19**, 341-348.
- ANTONACOPOULOS, N. ; VYNCKE, W., 1989. Determination of volatile basic nitrogen in fish : a third collaborative study by the West European Fish Technologists' Association (WEFTA). *Z. Lebensm. Unters. Forsch.* , **189** (4), 309-316.
- ASHWORTH, J.C. ; CARTER, J.W., 1980. Examination of drying behaviour of silica-gel granules by continuous weighing in an airstream. In : Mujumdar A.S. (ed), *Drying 80* , pp. 151-159, Hemisphere, New York.
- BALOGUN, A.M., 1988. Effect of sundrying on the proximate composition and lipid characteristics of two freshwater clupeids. *Food Chem.*, **27** (1), 1-11.
- BATISTUTI, J.P. ; CERDEIRA BARROS, R.M. ; GOMES AREAS, J.A., 1991. Optimization of extrusion cooking process for chickpea (*Cicer arietinum* L.) defatted flour by response surface methodology. *J. Food Sci.*, **56** (6), 1695-1698.
- BEDDOWS, C.G., 1985. Fermented fish and fish products. In : Wood B.J.B. (ed), *Microbiology of Fermented Foods*, vol. 2, pp. 1-39, Elsevier Applied Science, London.
- BELIARD, E. ; THUAULT, D. ; BOURGEOIS, C., 1991. Propriétés inhibitrices des bactéries lactiques. Application à la conservation des produits carnés. In : *Lactic 91, les bactéries lactiques*, 12-13 Septembre, Adria Normandie, Caen.
- BELIARD, E. ; THUAULT, D., 1989. Propriétés antimicrobiennes des bactéries lactiques. In : *Microbiologie alimentaire*, vol.2, partie IV, chapitre 2, pp. 282-297, Collection Technique et Documentation, Lavoisier, Paris.
- BERHIMPON, S. ; SOUNESS, R.A. ; BUCKLE, K.A. ; EDWARDS, R.A., 1990. Salting and drying of yellowtail (*Trachurus mccullochi* Nichols). *Int. J. Food Sci. & Technol.*, **25**, 409-419.
- BIMBENET, J.J., 1978. Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires. *Cahiers du Génie Industriel Alimentaire*, n° 4, 33 p., éditions SEPAIC, Paris.
- BJARNASSON, J. ; CARPENTER, K.J., 1970. Mechanism of heat damage in proteins. 2. Chemical changes in pure protein. *Br. J. Nutr.*, **24**, 313-329.
- BLIGH, E.G. ; DYER, W.J., 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, **37** (8), 911-917.

- BOLES, J.A. ; PARRISH Jr., F.C., 1990. Sensory and chemical characteristics of precooked microwave-reheatable pork roasts. *J. Food Sci.*, **55** (3), 618-620.
- BORDERIAS, A.J. ; LAMUA, M. ; TEJADA, M., 1983. Texture analysis of fish fillets and minced fish by both sensory and instrumental methods. *J. Food Technol.*, **18**, 85-95.
- BRADFORD, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, **72**, 248-254.
- BREMNER, A.H., 1988. Frozen storage trials on three species of Scampi. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, **21**, 284-287.
- BURT, J.R., 1977. Hypoxanthine : a biochemical index of fish quality. *Process Biochem.*, January-February, 32-35.
- CHEFTEL, J.C. ; CHEFTEL, H. ; BESANCON, P., 1986. *Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments*, volumes 1 et 2, Collection Technique et Documentation, 800 p., Lavoisier, Paris.
- CHEFTEL, J.C. ; CUQ, J.L. ; LORIENT, D., 1985. *Protéines alimentaires*. Collection Technique et Documentation, 309 p., Lavoisier, Paris.
- CHERRUAULT, Y. ; GUILLEZ, A., 1987. Algorithmes originaux pour la simulation numérique et l'optimisation. *IAA*, **10**, 879-888.
- CLUCAS, I.J. ; JOHNSON, S.E., 1990. Use of ice by artisanal fisherfolk. *Technical leaflet* n° 2, 7 p., Natural Resources Institute, United Kingdom.
- CONWAY, E.J., 1968. In : *Microdiffusion analysis and volumetric error*, 465 p., Lockwood and Sons Ltd, London.
- CORLETT Jr., D.A., 1989. Refrigerated foods and use of hazard analysis and critical control point principles. *Food Technol.*, February, 91-94.
- CRANK, J., 1975. *The mathematics of diffusion*. Oxford Science Publications, second edition, 414 p., Clarendon Press, Oxford.
- CTA ; TDRI ; CEASM, 1986. In : *Valorisation des produits de la pêche et développement des pêches artisanales en Afrique de l'Ouest*, Dakar, Sénégal, 3-21 Novembre 1986, 57 p., éditions du CTA, Wageningen, Pays-Bas.
- CURRAN, C.A. ; N'JAI, A.E. ; NERQUAYE-TETTEH, G. ; DIOUF, N., 1986. Testing a solar dome fish dryer in the Gambia. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 329 Supplément, pp. 173-184, FAO, Rome.
- CURRAN, D.M. ; TEPPER, B.J. ; MONTVILLE, T.J., 1990. Use of bicarbonates for microbial control and improved water-binding capacity in cod fillets. *J. Food Sci.*, **55** (6), 1564-1566.
- DAESCHEL, M.A., 1989. Antimicrobial substances from lactic acid bacteria for use as food preservatives. *Food Technol.*, January, 164-167.
- DAMODARAN NAMBU DIRI, D. ; GOPAKUMAR, K., 1988. Cold shock reactions in tropical fishes. *J. Food Sci. Technol.*, **25** (2), 89-91.

DANIEL, D.J.E. ; ETOH, S., 1983. Insect infestation of dry fish in Sri Lanka. *In : FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 162-171, FAO, Rome.

DARMADJI, P. ; IZUMIMOTO, M. ; MIYAMOTO, T. ; KATOAKA, K., 1990. Lactic fermentation effects on preservative qualities of dendeng giling. *J. Food Sci.*, 55 (6), 1523-1527.

DAUDIN, J.D., 1982. Modélisation d'un séchoir à partir des cinétiques expérimentales de séchage. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Option Sciences et techniques de l'industrie alimentaire, 119 p., Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, Massy.

DAUDIN, J.D., 1983. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Sci. Aliments*, 3, 1-36.

DEBRY, G. ; PELLETIER, X., 1991. Physiological importance of w-3/w-6 polyunsaturated fatty acids in man. An overview of still unresolved and controversial questions. *Experientia*, 47, 172-177.

DESMAZEAUD, M.J., 1991. Maîtrise des bactéries lactiques par la connaissance de leurs métabolismes. *In : Lactic 91, les bactéries lactiques*, 12-13 Septembre, Adria Normandie, Caen.

DESMORIEUX, H., 1992. Le séchage en zone subsaharienne : une analyse technique à partir des réalités géographiques et humaines. *Thèse de doctorat*, option Génie des Procédés, 234 p., Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.

DICKSON, J.S., 1992. Acetic acid action on beef tissue surfaces contaminated with *Salmonella typhimurium*. *J. Food Sci.*, 57 (2), 297-301.

DILLON, J.C., 1992. Les méthodes d'évaluation de la valeur nutritive des protéines en alimentation humaine. *Cah. Nutr. Diét.*, 27 (1), 54-58.

DIPTEE, R. ; SMITH, J.P. ; ALLI, I. ; KHANIZADEH, S., 1989. Application of response surface methodology in protein extraction studies from brewer's spent grain. *J. Food Process. Preserv.*, 13, 457-474.

DIVIES, C., 1989. Le vinaigre. *In : Microbiologie alimentaire*, vol.2, partie II, chapitre 6, pp. 121-136, Collection Technique et Documentation, Lavoisier, Paris.

DOE, P.E. ; HERUWATI, E.S., 1988. A model for the prediction of the microbial spoilage of sun-dried tropical fish. *J. Food Eng.*, 8, 47-72.

DOREY, F. ; DENIS, C., 1989. Evaluation des Pétrifilm VRB et *E. coli* pour le contrôle des légumes 4ème gamme. *I A A*, 11, 1011-1013.

DUGUET, J.S. ; BROU BLEOU, C. ; TAMBOURA ; DJENEPO, 1985. Evaluation of the efficacy of deltamethrin compared with pirimiphos-methyl and tetrachlorvinphos against *Dermestes maculatus* Deg. and *Necrobia rufipes* Deg. on *Sarotherodon niloticus* at Mopti (Mali). *Int. Pest Control*, July-August, 92-96,99.

EMBERLEY, B.J. ; MILLS, R.E., 1987. The development of grade standards for atlantic groundfish. *In : Kramer D.E. & Liston J. (eds), Seafood Quality Determination*, pp. 591-603, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

ESSER, J.R. ; WIRYANTE, S. ; WIRYANTE, J., 1990. Assessment and reduction of insect infestation and losses of cured fish in Indonesia, a case study. *In : Post-harvest*

technology, preservation and quality of fish in Southeast Asia, November 13-17, 1989, Bangkok, pp. 149-157, International Foundation for Science, Stockholm.

FAO, 1984. Prévention des pertes de poisson traité. *Document technique sur les pêches*, n° 219, 84 p., FAO, Rome.

FAO, 1989. Guide pratique des types d'insectes et d'acariens qui s'attaquent au poisson traité. *Document technique sur les pêches*, n° 303, 33 p., FAO, Rome.

FEINBERG, M.H., 1990. *Mise au point et optimisation des méthodes*. Ecole Européenne de Chimie Analytique, 56 p., Paris.

FERENCZI, M., 1985. *Séchage des produits alimentaires dans les pays en développement*. Commission des Communautés Européennes, Direction Générale du Développement, 116 p., Bruxelles-Paris.

FLOROS, J.D. ; CHINNAN, M.S., 1988 a. Computer graphics-assisted optimization for product and process development. *Food Technol.*, February, 72-78, 84.

FLOROS, J.D. ; CHINNAN, M.S., 1988 b. Seven factor response surface optimization of a double-stage lye (NaOH) peeling process for pimienta peppers. *J. Food Sci.*, **53** (2), 631-638.

FORNELL, A. ; BIMBENET, J.J. ; ALMIN, Y., 1980. Experimental study and modelization for air drying of vegetable products. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, **14**, 96-100.

FRIENDSHIP, R., 1990. The fumigation of dried fish. *Trop. Sci.*, **30** (2), 185-193.

FUNG, D.Y.C. ; HART, R.A. ; CHAIN, V., 1987. Rapid methods and automated procedures for microbiological evaluation of seafood. In : Kramer D.E. & Liston J. (eds), *Seafood Quality Determination*, pp. 247-253, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

GACULA Jr., M.C. ; SINGH, J., 1984. *Statistical methods in food and consumer research*. Food Science and Technology Series, 505 p., Academic Press Inc., USA.

GENNER, C., 1976. Evaluation of the "dipslide" technique for microbiological testing of industrial fluids. *Process Biochem.*, July-August, 39-41.

GIBSON, D.M. ; OGDEN, I.D. ; HOBBS, G., 1984. Estimation of the bacteriological quality of fish by automated conductance measurements. *Int. J. Food Microbiol.*, **1**, 127-134.

GIOVANNI, M., 1983. Response surface methodology and product optimization. *Food Technol.*, November, 41-45, 83.

GOLOB, P. ; COX, J.R. ; KILMINSTER, K., 1987. Evaluation of insecticide dips as protectants of stored dried fish from dermestid beetle infestation. *J. Stored Prod. Res.*, **23** (1), 47-56.

GORCZYCA, E.M. ; ANGGAWATI, A. ; PUTRO, S., 1985. Microbiological quality of retail "wet" fish in Jakarta. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 317 Supplément, pp. 191-196, FAO, Rome.

GORNALL, A.G. ; BARDAWILL, C.J. ; DAVID, M.M., 1949. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. *J. Biol. Chem.*, **177**, 751-766.

GOUET, P., 1989. L'ensilage des végétaux. In : *Microbiologie alimentaire*, vol.2, partie II, chapitre 8, pp. 150-159, Collection Technique et Documentation, Lavoisier, Paris.

GOUPY, J., 1988. *La méthode des plans d'expérience*, éditions Dunod, 303 p., Paris.

GOUPY, J.L., 1990. Etude comparative de divers plans d'expériences. *Rev. Statistique Appl.*, **38** (4), 5-44.

GREENE, D.H. ; BABBITT, J.K. ; REPPOND, K.D., 1990. Patterns of nucleotide catabolism as freshness indicators in flatfish from the Gulf of Alaska. *J. Food Sci.*, **55** (5), 1236-1238.

GUIRAUD, J. ; GALZY, P., 1980. Analyse des poissons et produits de la mer. *In : L'analyse microbiologique dans les industries alimentaires*, chapitre VII , pp. 159-163, Collection Génie Alimentaire, Editions de l'Usine Nouvelle, Paris.

HACHIGIAN, J., 1989. An experimental design for determination of D-values describing inactivation kinetics of bacterial spores; design parameters selected using computer simulation. *J. Food Sci.*, **54** (3), 720-726.

HARUENKIT, R. ; SEANGNOREE, A. ; KAEWCHA, A. ; LIEWKASEMSARN, W. ; RATANOPAS, S., 1988. Preservation of freshwater fish *Tilapia nilotica* . Final Report submitted to Commission of the European Communities, 187 p., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

HASHIMOTO, K. ; WATABE, S. ; KONO, M. ; SHIRO, K., 1979. Muscle protein composition of sardine and mackerel. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **45** (11), 1435-1441.

HENIKA, R.G., 1982. Use of response-surface methodology in sensory evaluation. *Food Technol.*, November, 96-101.

HOLBROOK, R. ; ANDERSON, J.M. ; BAIRD-PARKER, A.C. ; STUCHBURY, S.H., 1989. Comparative evaluation of the oxid *salmonella* rapid test with three other rapid *salmonella* methods. *Lett. Appl. Microbiol.*, **9**, 161-164.

HUISIN'T VELD, J. ; HARTOG, B. ; HOFSTRA, H., 1988. Changing perspectives in food microbiology : implementation of rapid microbiological analyses in modern food processing. *Food Rev. Int.*, **4** (3), 271-329.

HUMBERT, F. ; CORBION, B. ; LAHELLEC, C., 1989. Salmonelles : les techniques d'investigation. *R / A*, **422**, 44-47.

HURREL, R.F. ; CARPENTER, K.J. ; SINCLAIR, W.J. ; OTTERBURN, M.S. ; ASQUITH, R.S., 1976. Mechanism of heat damage in proteins. 7. The significance of lysine containing isopeptides and of lanthionine in heated proteins. *Br. J. Nutr.*, **35**, 383-395.

IKOME, R.L., 1986. Use of vinegar as a preservative in cured fish in Cameroon : a preliminary study. *Rev. Sci. Technique*, **2** (3), 55-61.

IN, T., 1989. Les produits de la pêche fermentés. *In : Microbiologie alimentaire*, vol.2, partie III , chapitre 5, pp. 256-262, Collection Technique et Documentation, Lavoisier, Paris.

ISMAIL, M.S., 1983. Solar dryers for fish. *In : FAO Fish. Rep.*, n° 279 supplément , pp. 81-84 , FAO, Rome.

ISONO, Y., 1990. A new colorimetric measurement of fish freshness using nucleoside oxidase. *Agric. Biol. Chem.*, **54** (11), 2827-2832.

- ITO, H. ; YUSOP ABU, M., 1985. Study of microflora in Malaysian dried fishes and their decontamination by gamma-irradiation. *Agric. Biol. Chem.*, **49** (4), 1047-1051.
- IZAT, A.L. ; HIERHOLZER, R.E. ; KOPEK, J.M. ; ADAMS, M.H. ; MCGINNIS, J.P. ; REIBER, M.A., 1990. The use of propylene glycol and/or lactic acid in chill water for reducing *Salmonellae* on broilers. *J. Food Process. Preserv.*, **14** (5), 369-374.
- JAHNS, F.D. ; HOWE, J.L. ; CODURI Jr., R.J. ; RAND Jr., A.G., 1976. A rapid visual enzyme test to assess fish freshness. *Food Technol.*, July, 27-30.
- JAROS, M. ; CENKOWSKI, S. ; JAYAS, D.S. ; PABIS, S., 1992. A method of determination of the diffusion coefficient based on kernel moisture content and its temperature. *Drying Technol.*, **10** (1), 213-222.
- JASON, A.C. ; PETERS, G.R., 1973. Analysis of bimodal diffusion of water in fish muscle. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **6**, 512-521.
- JASON, A.C., 1958. In : *Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs*, pp. 103-135, Society of Chemical Industry, London.
- JASON, A.C., 1965. Effects of fat content on diffusion of water in fish muscle. *J. Sci. Food Agric.*, **16**, 281-288.
- JEAY, A.M., 1977. Rapport préliminaire sur le rôle des femmes dans la préparation et la commercialisation du poisson au Mali, 39 p., FAO, Rome.
- JOHNSON, S.E. ; CLUCAS, I.J., 1990. How to make fish boxes. *Technical leaflet*, n° 3, 7 p., Natural Resources Institute, United Kingdom.
- JONES, N.R. ; MURRAY, J. ; LIVINGSTON, E.I. ; MURRAY, C.K., 1964. Rapid estimations of hypoxanthine concentrations as indices of the freshness of chill-stored fish. *J. Sci. Food Agric.*, **15** (2), 763-774.
- JOSEPHSON, D.B. ; LINDSAY, R.C. ; OLAFSDOTTIR, G., 1987. Measurement of volatile aroma constituents as a means for following sensory deterioration of fresh fish and fishery products. In : Kramer D.E. & Liston J. (eds), *Seafood Quality Determination*, pp. 27-47, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- KAITARANTA, J.K., 1982. Hydrolytic changes in the lipids of fish roe products during storage. *J. Food Technol.*, **17** (1), 87-98.
- KEEY, R.B. ; ASHWORTH, J.C., 1979. The kiln seasoning of softwood timber boards. *Chem. Engineer*, August-September, 593-598, 607.
- KHAYAT, A. ; SCHWALL, D., 1983. Lipid oxidation in seafood. *Food Technol.*, **37** (7), 130-140.
- KING, D.R. ; JOHNSON, S.E., 1990. How to make fish drying racks. *Technical leaflet* n° 1, 7 p., Natural Resources Institute, United Kingdom.
- KITIC, D. ; FAVETTO, G.J. ; CHIRIFE, J. ; RESNIK, S.L., 1986. Measurement of water activity in the intermediate moisture range with the Novasina thermoconstanter humidity meter. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, **19**, 297-301.
- KNIPFEL, J.E. ; BOTTING, H.G. ; McLAUGHLAN, J.M., 1970. Assessment of the nutritive value of heated fish protein concentrates (FPC) by a simple *in vitro* pepsin digestion procedure. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, **53** (5), 964-967.

KNOCKAERT, C., 1986. *Le fumage du poisson; de la théorie à la pratique*, Collection Valorisation des Produits de la Mer, 175 p., Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Nantes.

KNOCKAERT, C., 1989. *Les marinades des produits de la mer*, Collection Valorisation des Produits de la Mer, 78 p., Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Nantes.

LAE, R., 1988. Analyse du système pêche dans le delta central du Niger : les intervenants, leurs modes de regroupement, leur répartition géographique. In : *Etudes halieutiques du delta central du Niger*. Rapport d'enquêtes, 198 p., INRZFH et ORSTOM, Mali.

LAE, R., 1991. L'échantillonnage des pêches artisanales dispersées : nécessité d'opérations préalables. L'exemple du Delta Central du Niger. In : *La recherche face à la pêche artisanale*, tome 1, pp. 395-407, Collection Colloques et Séminaires, éditions de l'ORSTOM, Paris.

LAMPILA, L.E., 1987. Seafood lipids : analysis and health benefits. In : Kramer D.E. & Liston, J. (eds), *Seafood Quality Determination*, pp. 497-515, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

LAZARD, J. ; MORISSENS, P. ; PARREL, P., 1990. La pisciculture artisanale du *Tilapia* en Afrique : analyse de différents systèmes d'élevage et de leur niveau de développement. In : *Méthodes artisanales d'aquaculture du Tilapia en Afrique*, 82 p., Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne.

LEE, C.M. ; TOLEDO, R.T., 1984. Comparison of shelf life and quality of mullet stored at zero and subzero temperature. *J. Food Sci.*, **49**, 317-322, 344.

LEGENDRE, M. ; ECOUTIN, J.M. ; HEM, S. ; CISSE, A., 1990. Recherche sur les *Tilapias* lagunaires de Côte d'Ivoire. In : *L'aquaculture des Tilapias, du développement à la recherche*, 116 p., Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne.

LEVEQUE, C. ; PAUGY, D., 1984. Guide des poissons d'eau douce de la zone du programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest, 393 p., Rapport ORSTOM/OMS.

LHM, 1984. Recherche d'accompagnement. Enquêtes et études de la pêche dans le delta central du Niger. Volet expérimentation d'insecticides. Rapport du Laboratoire d'Hydrobiologie de Mopti, 37 p., Division de la Recherche Forestière et Hydrobiologique, Mali.

LINDSAY, R.C. ; JOSEPHSON, D.B. ; OLAFSDOTTIR, G., 1987. Chemical and biochemical indices for assessing the quality of fish packaged in controlled atmospheres. In : Kramer D.E. & Liston J. (eds), *Seafood Quality Determination*, pp. 221-234, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

LU, J.Y. ; PACE, R.D. ; PLAHAR, W.D., 1988. Survey of the microbial quality of dry fish, cassava and okra in Ghana. *J. Food Prot.*, **51** (8), 660-662.

LÜCKE, F.K., 1985. Fermented sausages. In : Wood B.J.B. (ed), *Microbiology of Fermented Foods*, vol. 2, pp. 41-83, Elsevier Applied Science, London.

LUND, D.B., 1983. Considerations in modeling food processes. *Food Technol.*, January, 92-94.

LUONG, J.H.T. ; MALE, K.B. ; HUYNH, M.D., 1991. Applications of polarography for assessment of fish freshness. *J. Food Sci.*, **56** (2), 335-337, 340.

- LUONG, J.H.T. ; MALE, K.B. ; MASSON, C. ; NGUYEN, A.L., 1992. Hypoxanthine ratio determination in fish extract using capillary electrophoresis and immobilized enzymes. *J. Food Sci.*, **57** (1), 77-81.
- LUONG, J.H.T. ; MALE, K.B. ; NGUYEN, A.L., 1989. Application of polarography for monitoring the fish post mortem metabolite transformation. *Enzyme Microb. Technol.*, **11** (5), 277-282.
- MAGNO-OREJANA, F., 1983. Fermented fish products. In : Dekker M. (ed), *Handbook of Tropical Foods*, vol.9, chapter 6, pp. 255-295, New York.
- MAGNUSSON, H. ; TRAUSTADOTTIR, K., 1982. The microbial flora of vacuum packed smoked herring fillets. *J. Food Technol.*, **17**, 695-702.
- MAKENE, J. ; MGAWA, Y. ; MLAY, M.L., 1989. Fish handling. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 400 Supplément, pp. 1-13, FAO, Rome.
- MALLIKARJUNA REDDY, Y. ; KARUNASAGAR, Ind. ; KARUNASAGAR, I., 1990. Resazurin test for estimating bacteriological quality of fishes. *Fish. Res.*, **9**, 75-79.
- MARC, C., 1989. Influence des variables du procédé de séchage sur l'évolution de certains critères de qualité de trois espèces de poisson du fleuve Niger au Mali. Analyse particulière du comportement des lipides. Rapport de mastère ENSIA/SIARC, 183 p., Montpellier.
- MARUF, F.W. ; LEDWARD, D.A. ; NEALE, R.J. ; POULTER, R.G., 1990. Chemical and nutritional quality of Indonesian dried-salted mackerel (*Rastrelliger kanagurta*). *Int. J. Food Sci. & Technol.*, **25** (1), 66-77.
- MAT, A.A., 1983. Standards for dried fish. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 185-193, FAO, Rome.
- MAZZA, G. ; LEMAGUER, M., 1980. Dehydration of onion : some theoretical and practical considerations. *J. Food Technol.*, **15**, 181-194.
- McKELLAR, R.C., 1981. Development of off-flavors in ultra-high temperature and pasteurized milk as a function of proteolysis. *J. Dairy Sci.*, **64**, 2138-2145.
- MELOAN, C.E. ; POMERANZ, Y., 1980. Refractometry - determination of fat in canned and packaged meats. In : *Food Analysis - Laboratory Experiments*, The Avi Publishing Company, 2d edition, pp. 77-78, Westport, Connecticut.
- MONTEL, M.C. ; TALON, R., 1991. Activités métaboliques des bactéries lactiques des produits carnés. In : *Lactic 91, les bactéries lactiques*, 12-13 Septembre, Adria Normandie, Caen.
- MORISSENS, P. ; ROCHE, P. ; AGLINGLO, C., 1990. La pisciculture intensive en enclos dans les grandes lagunes du Sud-Est Bénin. In : *Méthodes artisanales d'aquaculture du Tilapia en Afrique*, 82 p., Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne.
- MOTOHIRO, T., 1988. Effect of smoking and drying on the nutritive value of fish : a review of Japanese studies. In : Burt J.R. (ed), *Fish Smoking and Drying*, chapter 8, pp. 91-120, Elsevier Applied Science, England.
- MOUSTAID, F., 1989. Influence des variables du procédé de séchage sur l'évolution de certains critères de qualité de trois espèces de poisson du fleuve Niger au Mali. Analyse

- particulière du comportement des protéines constitutives. Rapport de mastère ENSIA/SIARC, 171 p., Montpellier.
- MUDAHAR, G.S. ; TOLEDO, R.T. ; FLOROS, J.D. ; JEN, J.J., 1989. Optimization of carrot dehydration process using response surface methodology. *J. Food Sci.*, **54** (3), 714-719.
- MUDAHAR, G.S. ; TOLEDO, R.T. ; JEN, J.J., 1990. A response surface methodology: approach to optimize potato dehydration process. *J. Food Process. Preserv.*, **14**, 93-106.
- MULET, A. ; BERNA, A. ; ROSSELLO, C. ; CANELLAS, J. ; LOPEZ, N., 1992. Influence of fat content on the drying of meat products. In : Mujumdar A.S. (ed), *Drying 92*, Part A , pp. 844-853, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- NASSOS, P.S. ; SCHADE, J.E. ; DOUGLAS KING Jr., A. ; STAFFORD, A.E., 1984. Comparison of HPLC and GC methods for measuring lactic acid in ground beef. *J. Food Sci.*, **49** (3), 671-674.
- NERQUAYE-TETTEH, G. ; EYESON, K.K. ; TETE-MARMON, 1978. Studies on "bomone" - a ghanaiian fermented fish product. *Ghana J. Agric. Sci.*, **11**, 13 p.
- NOGUEIRA, R.I. ; PARK, K.J., 1992. Drying parameters to obtain "banana-passa". In : Mujumdar A.S. (ed), *Drying 92*, Part A , pp. 874-883, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- NYAGAMBI, J.F.M. ; PERTET, F.M., 1989. Review of progress made on improved handling of fish in Kenya. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 400 Supplément, pp. 14-16, FAO, Rome.
- ODUNFA, S.A., 1985. African fermented foods. In : Wood B.J.B. (ed), *Microbiology of Fermented Foods*, vol. 2, pp. 155-191, Elsevier Applied Science, London.
- OGDEN, I.D., 1986. Use of conductance methods to predict bacterial counts in fish. *J. Appl. Bacteriol.*, **61** (4), 263-268.
- OHASHI, E. ; OKAMOTO, M. ; OZAWA, A. ; FUJITA, T., 1991. Characterization of common squid using several freshness indicators. *J. Food Sci.*, **56** (1), 161-163, 174.
- OPSTVEDT, J., 1988. Influence of drying and smoking on prootein quality. In : Burt J.R. (ed), *Fish Smoking and Drying*, chapter 2, pp. 23-39, Elsevier Applied Science, England.
- OREJANA, F.M. ; EMBUSCADO, M.E., 1983. A new solar-agrowaste smoker-drier for fish and shellfish. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 133-146, FAO, Rome.
- ORESKOVICH, D.C. ; BECHTEL, P.J. ; McKEITH, F.K. ; NOVAKOFSKI, J. ; BASGALL, E.J., 1992. Marinade pH affects textural properties of beef. *J. Food Sci.*, **57** (2), 305-311.
- OSEI - OPARE, F. ; KUKAH, A., 1989. Improving the quality of dried fish through solar drying. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 400 Supplément, pp. 164-168, FAO, Rome.
- OSUJI, F.N.C., 1974 a. Comparative studies on the susceptibilities of different genera of dried fish to infestation by *Dermestes maculatus* and *Necrobia rufipes* . *Nigerian J. Entomol.*, **1** (1), 63-68.
- OSUJI, F.N.C., 1974 b. Beetle infestation in dried fish purchased from a Nigerian market, with special reference to *Dermestes maculatus* Degeer. *Nigerian J. Entomol.*, **1** (1), 69-79.



- PALUMBO, S.A. ; WILLIAMS, A.C., 1992. Growth of *Aeromonas hydrophila* K144 as affected by organic acids. *J. Food Sci.*, 57 (1), 233-235.
- PAQUOT, C., 1979. Détermination de l'indice de réfraction. In : *Méthodes d'analyse des matières grasses et dérivés*, Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée, 1ère partie, éditions ETIG, France.
- PAREDES, M.D.C. ; BAKER, R.C., 1987. A research note : physical, chemical and sensory changes during thermal processing of three species of canned fish. *J. Food Process. Preserv.*, 12, 71-81.
- PARREL, P. ; ALI, I. ; LAZARD, J., 1990. Le développement de l'aquaculture au Niger : un exemple d'élevage de *Tilapia* en zone sahélienne. In : *Méthodes artisanales d'aquaculture du Tilapia en Afrique*, 82 p., Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne.
- PEARSON, D., 1976. Oils and Fats. In : *Chemical Analysis of Foods*, 7th edition, chapter 14, 488 p., Churchill Livingstone Publishers, London.
- PICLET, G., 1987. Le poisson aliment : composition - intérêt nutritionnel. *Cah. Nutr. Diét.*, 22 (4), 317-336.
- POUMEYROL, M., 1987. Dénombrement de la flore aérobie mésophile : étude comparative de la méthode d'inclusion en gélose et du Pétrifilm SM. *Bull. Lab. Vét.*, 27/28, 77-83.
- PRAT, M., 1991. 2D modelling of drying of porous media : influence of edge effects at the interface. *Drying Technol.*, 9 (5), 1181-1208.
- QUENSIERE, J., 1991. L'étude de la pêche dans le Delta Central du Niger : une approche pluridisciplinaire. In : *La recherche face à la pêche artisanale*, tome 2, pp. 1015-1022, Collection Colloques et Séminaires, éditions de l'ORSTOM, Paris.
- RATTAGOOOL, P. ; METHATIP, P. ; ESSER, J.R. ; HANSON, S.W. ; KNOWLES, M.J., 1990. Evaluation of insecticides to protect salted dried marine fish from insect infestation during processing and storage in Thailand. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 401 Supplément, pp. 189-204, FAO, Rome.
- REGENSTEIN, J.M. ; REGENSTEIN, C.E., 1991. In : Van Nostrand Reinhold (ed), *Introduction to fish technology*, 269 p., New York.
- ROCA, M. ; INCZE, K., 1990. Fermented sausages. *Food Rev. Int.*, 6 (1), 91-118.
- ROUSSEL, H., 1988. Préparation et propriétés gélifiantes du surimi de sardine. Influence de la fraîcheur du poisson, du procédé technologique et de divers additifs chimiques sur les caractéristiques du surimi et des gels protéiques. *Thèse de doctorat*, option Sciences alimentaires, 112 p., Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- RUBBI, S.F. ; MUSLEMUDDIN, M. ; SHAMIM JAHAN, S. ; BEGUM, M., 1983. Storage of solar-tent dried pomfret (*Stomateus* spp.). In : *FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 93-100, FAO, Rome.
- RUSTOM, I.Y.S. ; LOPEZ-LEIVA, M.H. ; NAIR, B.M., 1991. Optimization of extraction of peanut proteins with water by response surface methodology. *J. Food Sci.*, 56 (6), 1660-1663.

RYDER, J.M., 1985. Determination of adenosine triphosphate and its breakdown products in fish muscle by high-performance liquid chromatography. *J. Agric. Food Chem.*, **33**, 678-680.

SACHITHANANTHAN, K. ; TRIM, D.S. ; SPEIRS, C.I., 1986. A solar-dome dryer for drying fish. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 329 Supplément, pp. 1-17, FAO, Rome.

SADO, G. ; GOUPY, J., 1986. La méthodologie des plans d'expériences appliquée à l'optimisation du réglage d'un spectrofluorimètre. *Analisis*, **14** (8), 389-400.

SAINCLIVIER, M., 1983. L'industrie alimentaire halieutique. Premier volume: le poisson matière première. *Bulletin Scientifique et Technique*, 297 p., Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Rennes.

SAINCLIVIER, M., 1985. L'industrie alimentaire halieutique. Deuxième volume: des techniques ancestrales à leurs réalisations contemporaines. *Bulletin Scientifique et Technique*, 411 p., Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Rennes.

SAINCLIVIER, M., 1988. L'industrie alimentaire halieutique. Troisième volume: la conservation par des moyens physiques. Première partie: conserverie de poissons. *Bulletin Scientifique et Technique*, 321 p., Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Rennes.

SALUAN-ABDUHASAN, F., 1990. Quality changes in iced *Tilapia* (*Oreochromis niloticus*). In : *Post-harvest technology, preservation and quality of fish in Southeast Asia*, November 13-17, 1989, Bangkok, pp. 103-111, International Foundation for Science, Stockholm.

SARNIANTO, P. ; IRIANTO, H.E. ; PUTRO, S., 1985. Studies on the histamine contents of fermented fishery products. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 317 Supplément, pp. 382-385, FAO, Rome.

SAWYER, F.M., 1987. Sensory methodology for estimating quality attributes of seafoods. In : Kramer D.E. & Liston J. (eds), *Seafood Quality Determination*, pp. 89-97, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

SHEWAN, J.M., 1970. Bacteriological standards for fish and fishery products. *Chem. Ind.*, **6**, 193-199.

SIKORSKI, Z.E., 1980. Structure and proteins of fish and shellfish. Part 2 .. In : Connell J.J. (ed), *Advances in Fish Science and Technology*, pp. 78-85, Fishing News Books Ltd, England.

SIMOPOULOS, A.P., 1991. Omega 3 fatty acids in health and disease and in growth and development. *Am. J. Clin. Nutr.*, **54** (3), 438-463.

SINDAYIGAYA, E. ; DEBEVERE, J.M., 1989. Qualité microbiologique du poisson séché et fumé du lac Tanganika. *Sci. Aliments*, **9** (3), 507-515.

SINGH, R.K. ; NIELSEN, S.S. ; CHAMBERS, J.V. ; MARTINEZ-SERNA, M. ; VILLOTA, R., 1991. Selected characteristics of extruded blends of milk protein raffinade or nonfat dry milk with corn flour. *J. Food Process. Preserv.*, **15** (4), 285-302.

SIRAGUSA, G.R. ; DICKSON, J.S., 1992. Inhibition of *Listeria monocytogenes* on beef tissue by application of organic acids immobilized in a calcium alginate gel. *J. Food Sci.*, **57** (2), 293-296.

SISON, E.C. ; GARCIA, V.V. ; CARPIO, E.V. ; ALCANTARA Jr., P.R. ; MADAMBA, C.S.P, 1983. Adaptation of artificial fish drying technology in the Philippines. *In : FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 109-122, FAO, Rome.

SIU, G.M. ; DRAPER, H.H., 1978. A survey of the malonaldehyde content of retail meats and fish. *J. Food Sci.*, **43**, 1147-1149.

SMITH, G. ; HANSON, S.W. ; HOLE, M., 1990. Lipid oxidation and associated browning in Indonesian salted dried catfish (*Arius thalassinus*). *In : FAO Fish. Rep.*, n° 401 Supplément, pp. 205-213, FAO, Rome.

SORINMADE, S.O. ; TALABI, S.O. ; JOHNSON, A., 1986. Effects of low levels of salt, manual pressing and storage temperature on microbial growth in mince from underutilized fish species in Nigeria. *In : FAO Fish. Rep.*, n° 329 supplément, pp. 333-339, FAO, Rome.

SOSULSKI, F.W. ; IMAFIDON, G.I., 1990. Amino acid composition and nitrogen-to-protein conversion factors for animal and plant foods. *J. Agric. Food Chem.*, **38** (6), 1351-1356.

SOUNESS, R., 1990. Development of a rice husk-fired furnace and its application to fish drying. *In : FAO Fish. Rep.*, n° 401 Supplément, pp. 160-167, FAO, Rome.

SPENCER GARRETT III, E. ; HUDAK-ROOS, M., 1991. Developing an HACCP-based inspection system for the seafood industry. *Food Technol.*, December, 53-57.

STEINBERG, D.M. ; HUNTER, W.G., 1984. Experimental design: review and comment. *Technometrics*, **26** (2), 71-97.

STERNBERG, M. ; KIM, C.Y. ; SCHWENDE, F.J., 1975. Lysinoalanine : presence in food and food ingredients. *Science*, **190**, 992-994.

STOMAL, B., 1991. Communication personnelle.

SUROWKA, K. ; FIK, M., 1992. Studies on the recovery of proteinaceous substances from chicken heads. I. An application of neutrase to the production of protein hydrolysate. *Int. J. Food Sci. & Technol.*, **27** (1), 9-20.

SURYANARAYANA RAO, S.V. ; VALSAN, A.P. ; KANDORAN, M.K. ; NAIR, M.R., 1962. Storage behaviour of salted and dried fish in relation to humidity conditions. *Indian J. Fish.*, **9** (2), 156-161.

TDRI ; CEASM, 1986. Evaluation des pertes de poisson en Afrique de l'Ouest. Rapport du Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale CTA, 92 p., Ede-Wageningen, Pays-Bas.

TDRI, 1986 a. Manutention, conservation et transformation du poisson sous les tropiques: partie I. Tropical Development and Research Institute, G144, 141 p., édition française du CTA, Wageningen, Pays-Bas .

TDRI, 1986 b. Manutention, conservation et transformation du poisson sous les tropiques: partie II. Tropical Development and Research Institute, G 145, 144 p., édition française du CTA, Wageningen, Pays-Bas.

TDRI, 1987. Reduction of losses in cured fish in the tropics - guide for extension workers, G 204, 47 p., Tropical Development and Research Institute, London.

- THAMPURAN, N. ; MAHADEVA IYER, K., 1989. A note on the distribution of *Alteromonas putrefaciens* in marine fishes landed at Cochin. *J. Food Sci. Technol.*, **26** (3), 166-168.
- THEMELIN, A. ; GERBE, A., 1987. Elaboration d'un programme national concerté sur l'amélioration des techniques de conservation du poisson par séchage solaire au Mali. Rapport de mission, Agence de Coopération Culturelle et Technique, 32 p., Montpellier.
- THOMPSON, D., 1982. Response surface experimentation. *J. Food Process. Preserv.*, **6**, 155-188.
- TWIDDY, D.R. ; CROSS, S.J. ; COOKE, R.D. , 1987. Parameters involved in the production of lactic acid preserved fish-starchy substrate combinations. *Int. J. Food Sci. & Technol.*, **22**, 115-121.
- U.S. National Academy of Sciences, 1978. Post harvest food losses in developing countries. National Academy of Sciences, Washington, D.C..
- VACCAREZZA, L.M. ; LOMBARDI, J.L. ; CHIRIFE, J., 1974. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. *J. Food Technol.*, **9**, 317-327.
- VAGENAS, G.K. ; MARINOS-KOURIS, D., 1991. Drying kinetics of apricots. *Drying Technol.*, **9** (3), 735-752.
- VALDIMARSSON, G. ; GUDBJÖRNSDOTTIR, B., 1984. The microbiology of stockfish during the drying process. *J. Appl. Bacteriol.*, **57** (3), 413-421.
- VAN SPREEKENS, K.J.A. ; STEKELENBURG, F.K., 1986. Rapid estimation of the bacteriological quality of fresh fish by impedance measurements. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **24** (1), 95-96.
- VAN VEEN, A.G., 1965. Fermented and dried seafood products in Southeast Asia. In : Borgström G. (ed), *Fish as Food*, vol. 3, pp. 227-250, Academic Press, New York..
- VENKATASUBBAIAH, P. ; DWARAKANATH, C.T., 1988. Evaluation of a new medium for rapid enumeration of yeasts and molds in food. *J. Food Sci. Technol.*, **25** (1), 4-6.
- VILLADSEN, A. ; FLORES, F., 1983. Low cost, agro-waste fish drier development (temperature profiles of different types of fish driers). In : *FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 123-132, FAO, Rome.
- WALKER, D.J., 1987. A review of the use of contact insecticides to control post-harvest insect infestation of fish and fish products. *FAO Fish. Circ.*, n° 804, 19 p., FAO, Rome.
- WATANABE, K., 1972. Chemical, bacteriological and sensory examination of split, dried, smoked bream on the market in Zambia. *Afr. J. Trop. Hydrobiol. Fish.*, **2**, 129-140.
- WATANABE, M.K., 1974. Technologie et hygiène des méthodes de préparation du poisson salé-séché et non salé-séché fabriqué en Afrique, avec référence spéciale au Ghana, au Sénégal et à la Zambie. Rapport interne, 25 p., Institut de Technologie Alimentaire, Dakar.
- WOLFF, R.L. ; CASTERA-ROSSIGNOL, A.F.M., 1987. Mise au point et évaluation d'une méthode d'extraction de la matière grasse de fromage de type emmental. *Rev. Française des Corps Gras*, **3**, 123-132.
- WOOD, C.D. ; COLE, R.C., 1989. Small insulated fish containers. *FAO Fish. Circ.*, n° 824, 80 p., FAO, Rome.

- WOOD, C.D., 1983. Losses of traditionally cured fish : a case study. In : *FAO Fish. Rep.*, n° 279 Supplément, pp. 172-184, FAO, Rome.
- WOOLFE, M.L., 1975. The effect of smoking and drying on the lipids of West African herring (*Sardinella* spp.). *J. Food Technol.*, **10** (5), 515-522.
- YUSOF, S. ; TALIB, Z. ; MOHAMED, S. ; ABU BAKAR, A., 1988. Use of response surface methodology in the development of guava concentrate. *J. Sci. Food Agric.*, **43**, 173-186.

ANNEXES

ANNEXE 1

Valeurs expérimentales des réponses de séchage

ANNEXE 2Éléments de composition du *Tilapia* pour les différents essais de séchage**ANNEXE 3**

Valeurs expérimentales des réponses de la flore aérobie mésophile totale

ANNEXE 4

Valeurs expérimentales des réponses des levures et moisissures

ANNEXE 5

Mesures de couleur (valeurs expérimentales des indices "L", "a" et "b")

ANNEXE 6Valeurs expérimentales des critères physico-chimiques (pH et a_w)**ANNEXE 7**

Valeurs expérimentales des indices de qualité des lipides et de l'indice de l'hypoxanthine

ANNEXE 8

Valeurs expérimentales des indices de qualité des matières azotées

Annexe 1. Valeurs expérimentales des réponses de séchage

N° essai expéri- mental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	D (m ² . s ⁻¹)	durée (t) (heures)	Xcr kg eau/kg MS	(dX/dt)cte kg eau/ kg MS . s ⁻¹
1	50	15	2	5,54x10 ⁻¹⁰	24	3,529	-0,32x10 ⁻³
2	38	47	1,1	3,23x10 ⁻¹⁰	54,17	2,798	-0,83x10 ⁻⁴
3	50	55	2	5,28x10 ⁻¹⁰	44	3,393	-0,18x10 ⁻³
4	62	23	2,9	1,117x10 ⁻⁹	11,75	2,958	-0,34x10 ⁻³
5	50	35	2	7,06x10 ⁻¹⁰	21,88	3,005	-0,21x10 ⁻³
6	50	35	2	5,65x10 ⁻¹⁰	25,5	2,917	-0,19x10 ⁻³
7	70	35	2	1,063x10 ⁻⁹	13,5	3,495	-0,29x10 ⁻³
8	50	35	3,5	5,49x10 ⁻¹⁰	25	3,191	-0,27x10 ⁻³
9	30	35	2	3,03x10 ⁻¹⁰	50,75	2,874	-0,14x10 ⁻³
10	62	23	1,1	7,29x10 ⁻¹⁰	19	2,690	-0,21x10 ⁻³
11	38	23	1,1	4,09x10 ⁻¹⁰	37	2,958	-0,15x10 ⁻³
12	62	47	1,1	6,64x10 ⁻¹⁰	23,19	3,334	0,19x10 ⁻³
13	62	47	2,9	1,035x10 ⁻⁹	14,75	3,521	-0,38x10 ⁻³
14	50	35	2	7,54x10 ⁻¹⁰	21,83	3,149	-0,24x10 ⁻³
15	38	23	2,9	5,29x10 ⁻¹⁰	34	3,275	-0,40x10 ⁻³
16	38	47	2,9	4,99x10 ⁻¹⁰	31,83	2,975	-0,24x10 ⁻³
17	50	35	0,5	5,07x10 ⁻¹⁰	28,83	2,911	-0,14x10 ⁻³

Annexe 2. Eléments de composition du *Tilapia* pour les différents essais de séchage

N° essai expéri- mental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	Teneur en eau (g% MB)	Azote total (g% MS) *	Azote NPN (g% MS)	Lipides (g% MS) **	Cendres (g% MS) ***
1	50	15	2	7,0±0,2	12,6	0,6	7,9±0,2	10,7±1,0
2	38	47	1,1	9,4±0,5	12,6	1,06	16,0	11,5±0,3
3	50	55	2	14,6±0,3	10,9	1,06	6,5±1,1	14,6±0,02
4	62	23	2,9	5,8±0,1	12,7	0,67	9,3	15,2±0,3
5	50	35	2	11,3±0,7	12,4	1,22	5,5±0,8	14,4±1,0
6	50	35	2	7,7±0,5	12,1	0,91	9,8±0,2	10,0±0,3
7	70	35	2	6,5±1,0	11,9	0,99	8,7±0,5	14,4±0,9
8	50	35	3,5	7,6±0,1	12,8	1,0	10,0±0,6	11,8±0,4
9	30	35	2	15,8±0,4	12,3	0,9	8,7	11,8±1,0
10	62	23	1,1	8,6±0,1	13,1	0,8	13,4	10,7±0,6
11	38	23	1,1	11,2±0,2	13,4	1,6	7,5±0,4	12,8±1,5
12	62	47	1,1	12,9±1,0	13,2	1,47	11,4	13,1±1,1
13	62	47	2,9	8,6±0,02	12,6	1,45	13,6	13,2±1,0
14	50	35	2	13,3±0,2	13,5	1,49	10,7	14,9±1,5
15	38	23	2,9	13,9±0,2	11,9	1,48	9,6	11,9±1,0
16	38	47	2,9	10,9±0,2	12,2	1,21	13,1±0,6	13,4±0,9
17	50	35	0,5	8,3±0,5	11,7	1,15	15,4±1,5	9,3±1,8

* Les valeurs d'azote total en g% MS sont en accord avec celles de Sosulski et Imafidon (1990)

** Les poissons utilisés à la fin du travail sont un peu plus gras que les premiers ; ceci vient de l'augmentation de la teneur en lipides avec l'âge du poisson et avec la saison chaude. Les fluctuations de la teneur en lipides soulignent également les limites de l'extraction à l'hexane.

*** Les fluctuations de la teneur en cendres sont probablement dues à des variations dans la proportion (muscle+peau) par rapport aux arêtes, d'autant plus que la calcification du poisson augmente avec son âge.



Annexe 3. Valeurs expérimentales des réponses de la flore aérobie mésophile totale

N° essai expérimental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	FAMT initiale (avant séchage) (UFC/g MS)	FAMT séchage (UFC/g MS)	FAMT stockage (UFC/g MS)	τ (FAMT) séchage (hr ⁻¹)	τ (FAMT) stockage (hr ⁻¹)
1	50	15	2	$24 \times 10^3 \pm 4 \times 10^3$	$5,3 \times 10^2 \pm 87$	$< 1,2 \times 10^2 \pm 31$	-0,07	-0,22
2	38	47	1,1	$1,2 \times 10^3 \pm 2,2 \times 10^2$	$2,4 \times 10^4 \pm 1,8 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3 \pm 1,3 \times 10^2$	0,02	-0,52
3	50	55	2	$5,3 \times 10^4 \pm 4,4 \times 10^3$	$4,3 \times 10^2 \pm 82$	< 106	-0,05	-0,24
4	62	23	2,9	$8,6 \times 10^4 \pm 5,5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^2 \pm 68$	< 55	-0,21	-0,22
5	50	35	2	$1,2 \times 10^4 \pm 8 \times 10^2$	$1,3 \times 10^3 \pm 1,6 \times 10^2$	< 55	-0,05	-0,46
6	50	35	2	$1 \times 10^3 \pm 2,6 \times 10^2$	$3,6 \times 10^2 \pm 85$	< 60	-0,02	-0,26
7	70	35	2	$1 \times 10^3 \pm 2,6 \times 10^2$	1×10^2	< 60	-0,07	-0,07
8	50	35	3,5	$9,2 \times 10^2 \pm 2 \times 10^2$	$1,1 \times 10^2$	< 60	-0,04	-0,09
9	30	35	2	$9,2 \times 10^2 \pm 2 \times 10^2$	$2,6 \times 10^5 \pm 5,2 \times 10^4$	< 60	0,05	-1,21
10	62	23	1,1	$9,2 \times 10^2 \pm 2 \times 10^2$	1×10^2	< 55	-0,05	-0,09
11	38	23	1,1	4×10^2	1×10^2	$\approx 2 \times 10^2$	-0,02	0,10
12	62	47	1,1	4×10^2	$1,2 \times 10^2$	< 60	-0,02	-0,11
13	62	47	2,9	4×10^2	< 55	< 60	-0,06	0,02
14	50	35	2	4×10^2	$1,2 \times 10^2$	< 60	-0,02	-0,12
15	38	23	2,9	4×10^2	$1,5 \times 10^3 \pm 1,5 \times 10^2$	$2 \times 10^3 \pm 175$	0,02	0,05
16	38	47	2,9	4×10^2	$4,6 \times 10^2 \pm 82$	0	0,002	0
17	50	35	0,5	$1,2 \times 10^3 \pm 2,2 \times 10^2$	55	0	-0,05	0

Annexe 4. Valeurs expérimentales des réponses des levures et moisissures

N° essai expéri- mental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	(LM) initiale (avant séchage) (UFC/g MS)	(LM) séchage (UFC/g MS)	(LM) stockage (UFC/g MS)	τ (LM) séchage (hr ⁻¹)	τ (LM) stockage (hr ⁻¹)
1	50	15	2	$< 5 \times 10^2$	< 110	$6,4 \times 10^4 \pm 8,6 \times 10^3$	-0,03	0,92
2	38	47	1,1	$1,2 \times 10^3$	< 55	$8,1 \times 10^5 \pm 1,1 \times 10^5$	-0,02	1,67
3	50	55	2	$2,3 \times 10^3$	< 60	$3,8 \times 10^5 \pm 6,3 \times 10^4$	-0,03	1,52
4	62	23	2,9	$4,2 \times 10^2 \pm 1,2 \times 10^2$	< 50	$1,6 \times 10^3 \pm 1,5 \times 10^2$	-0,08	0,50
5	50	35	2	$8,4 \times 10^2$	< 55	$2,3 \times 10^5 \pm 1,8 \times 10^4$	-0,05	1,21
6	50	35	2	$3,2 \times 10^2$	< 50	$1,5 \times 10^4 \pm 1,5 \times 10^3$	-0,03	0,83
7	70	35	2	$3,2 \times 10^2$	< 55	0	-0,06	0
8	50	35	3,5	$3,5 \times 10^3$	40	$\approx 1 \times 10^2$	-0,08	0,13
9	30	35	2	$3,5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^2 \pm 63$	$4,4 \times 10^5 \pm 8,2 \times 10^4$	-0,02	1,08
10	62	23	1,1	$3,5 \times 10^3$	< 50	$4,8 \times 10^2 \pm 1 \times 10^2$	-0,11	0,33
11	38	23	1,1	4×10^3	1×10^2	$1,2 \times 10^3$	-0,04	0,36
12	62	47	1,1	4×10^3	60	7×10^2	-0,07	0,43
13	62	47	2,9	4×10^3	55	$6,1 \times 10^2 \pm 97$	-0,14	0,42
14	50	35	2	4×10^3	70	$\approx 1 \times 10^3$	-0,08	0,46
15	38	23	2,9	4×10^3	$1,2 \times 10^2$	$7 \times 10^3 \pm 1 \times 10^3$	-0,04	0,71
16	38	47	2,9	4×10^3	< 60	$2 \times 10^5 \pm 1,7 \times 10^4$	-0,05	1,41
17	50	35	0,5	$1,2 \times 10^3$	63	$1,2 \times 10^5 \pm 1,4 \times 10^4$	-0,05	1,31

Annexe 5. Mesures de couleur (valeurs expérimentales des indices "L", "a" et "b")

N° essai expérimental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	L peau	a peau	b peau	L chair	a chair	b chair
1	50	15	2	43,0	3,2	6,1	61,5	1,2	22,2
2	38	47	1,1	48,2	3,3	5,9	49,0	12,5	23,5
3	50	55	2	34,0	5,6	4,0	50,4	6,1	18,4
4	62	23	2,9	50,2	1,6	7,2	46,8	8,6	21,7
5	50	35	2	42,3	5,3	5,2	51,7	6,8	23,7
6	50	35	2	44,5	3,7	3,6	53,5	5,1	23,7
7	70	35	2	43,5	2,3	8,1	46,4	8,9	21,4
8	50	35	3,5	42,1	3,9	3,1	53,1	5,2	24,5
9	30	35	2	49,2	3,0	4,9	55,2	5,0	25,7
10	62	23	1,1	48,2	3,1	6,7	52,1	10,7	26,6
11	38	23	1,1	41,1	3,8	4,4	58,8	2,2	27,3
12	62	47	1,1	41,1	2,1	5,2	53,4	5,5	22,9
13	62	47	2,9	45,5	2,0	4,8	50,1	7,2	25,0
14	50	35	2	46,0	5,4	6,1	51,5	6,3	22,9
15	38	23	2,9	45,7	4,2	7,6	59,8	2,7	27,5
16	38	47	2,9	46,9	4,8	7,7	57,9	5,5	29,5
17	50	35	0,5	45,7	4,5	6,8	50,9	7,5	24,8
F	-	-	-	56,7	0,5	-3,1	51,7	1,5	-4,1

Annexe 6. Valeurs expérimentales des critères physico-chimiques (pH et a_w)

N° essai expéri- mental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	pH	a_w
1	50	15	2	6,33	0,313
2	38	47	1,1	6,12±0,007	0,559
3	50	55	2	6,29±0,02	0,682
4	62	23	2,9	6,36±0,007	0,315
5	50	35	2	6,2±0,007	0,542
6	50	35	2	6,27±0,007	0,368
7	70	35	2	6,62±0,007	0,356
8	50	35	3,5	6,26±0,0	0,400
9	30	35	2	6,11±0,007	0,70
10	62	23	1,1	6,61±0,007	0,488
11	38	23	1,1	6,08±0,0	0,466
12	62	47	1,1	6,48±0,007	0,494
13	62	47	2,9	6,35±0,0	0,422
14	50	35	2	6,32±0,007	0,589
15	38	23	2,9	6,21±0,01	0,628
16	38	47	2,9	6,02±0,007	0,564
17	50	35	0,5	6,25±0,01	0,528
F	-	-	-	6,76±0,2	0,978

Annexe 7. Valeurs expérimentales des indices de qualité des lipides et de l'indice de l'hypoxanthine

N° essai expéri- mental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	AASC (unité absorbance/g MB	IP meq O ₂ /kg lipides	TBA mg MA/kg MS	Hx micromole Hx/g MS
1	50	15	2	8,7±0,1	18,4±0,3	2,7±0,02	2,9
2	38	47	1,1	7,1±0,6	15,0±0,2	3,5±0,02	3,0±0,04
3	50	55	2	4,1±0,5	16,4	2,6±0,1	4,3
4	62	23	2,9	9,8±0,2	11,5	1,6±0,0	2,5±0,2
5	50	35	2	8,3±0,4	12,9±0,5	3,0±0,1	2,2±0,3
6	50	35	2	8,1±0,4	13,4±1,6	3,4±0,1	3,8±0,4
7	70	35	2	5,4±0,4	32,8±2,2	1,9±0,1	19,1±1,8
8	50	35	3,5	9,2±0,4	12,8	3,0±0,1	13,9±0,3
9	30	35	2	7,7±0,7	17,1	4,9±0,1	8,7±0,6
10	62	23	1,1	5,6±0,3	10,0	2,0±0,1	18,9±0,5
11	38	23	1,1	9,6±0,6	14,8±1,6	3,5±0,02	3,8±0,0
12	62	47	1,1	4,7±0,2	29,6	1,9±0,1	9,9±0,9
13	62	47	2,9	6,0±0,2	11,0	2,7±0,1	4,7
14	50	35	2	6,5±0,6	10,3	3,4±0,2	5,6±0,2
15	38	23	2,9	7,7±0,1	16,7	3,2±0,1	9,1±0,7
16	38	47	2,9	6,9±0,3	16,8	3,0±0,1	2,3±0,3
17	50	35	0,5	5,7±0,2	14,5±0,1	4,2±0,1	4,0±0,2
F	-	-	-	2,1±0,6	8,3±1,4	0,5±0,04	5,4

Annexe 8. Valeurs expérimentales des indices de qualité des matières azotées

N° essai expéri- mental	T (°C)	HR (%)	V (m/s)	ABVT mg N% MS	TNBS micromole glycine/g MS	Protéines solubles /Tris (g% MS)	Protéines solubles /NaCl 0,14M (g% MS)	Protéines solubles /NaCl 0,6M (g% MS)
1	50	15	2	33,7±1,2	82,3±0,2	6,9±0,0	10,3±0,3	28,7±0,2
2	38	47	1,1	46,2±0,4	140,5±1,1	10,2±0,2	12,9±0,04	12,4±0,2
3	50	55	2	52,9±0,9	157,0±1,7	4,9±0,3	7,7±0,1	9,7±0,1
4	62	23	2,9	33,3±0,0	91,3±1,7	4,4±0,2	11,2±0,0	8,4±0,1
5	50	35	2	40,2±0,4	161±1,7	7,6±0,2	5,8±1,1	10,6±0,2
6	50	35	2	32,0±1,9	99,1±0,7	8,4±0,1	7,9	10,2±0,0
7	70	35	2	29,3±0,6	89,9±1,3	3,2±0,4	5,2±1,5	10,1±0,2
8	50	35	3,5	40,4±1,4	142,1±1,5	7,0±0,1	4,5±0,2	9,8±0,2
9	30	35	2	36,1±0,4	141,4±1,5	14,4±0,1	10,7±1,3	16,8±0,2
10	62	23	1,1	30,6±0,0	92,1±1,7	5,1±0,1	11,9±0,4	9,8±0,0
11	38	23	1,1	45,0±0,7	170,1±1,6	8,0±0,1	19,0±0,4	21,4±1,0
12	62	47	1,1	34,9±0,4	109,7±0,9	3,9±0,2	30,1±0,5	13,6±0,4
13	62	47	2,9	29,8±0,9	126,7±1,9	4,8±0,1	15,3±0,4	12,9±0,1
14	50	35	2	33,6±0,0	137,3±0,7	7,7±0,2	9,8±0,0	14,7±0,4
15	38	23	2,9	34,7±0,8	98,2±0,7	9,9±0,6	10,2±0,4	27,3±0,5
16	38	47	2,9	32,9±0,4	133,6±1,9	14,8±0,1	10,8±0,1	19,1±0,1
17	50	35	0,5	48,7±0,0	192,0±1,2	6,8±0,1	18,8±0,1	14,9±0,0
F	-	-	-	39,4±1,4	99,2±1,6	17,7±0,4	21,8±0,2	25,6±0,8

PUBLICATIONS RELATIVES A LA THESE

ZAKHIA, N. ; CUQ , J.L. ; THEMELIN, A., 1990. Elaboration of a research methodology for improving the quality control of dried fish in Mali. *In : Post-harvest technology, preservation and quality of fish in Southeast Asia*, November 13-17, 1989, Bangkok, pp. 159-168, International Foundation for Science, Stockholm.

ZAKHIA, N. ; THEMELIN, A. ; CUQ , J.L., 1990. Quality assessment and process controlling of the traditionally dried fish in Mali. *In : Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference and Exhibition*, December 3-6, 1990, Bangkok, vol. 2, pp. 561-569, Asian Institute of Technology, Bangkok.

ZAKHIA, N. ; CUQ , J.L., 1992. Etude de la qualité du *Tilapia nilotica* traditionnellement séché au Mali. *In : FAO Fisheries Report* , n° 467 Supplément, Cinquième consultation d'experts FAO sur la technologie du poisson en Afrique, 22-25 Octobre, 1991, Accra, 10 p., FAO, Rome.

ZAKHIA, N., 1992. Le séchage du poisson (*Tilapia* spp.). Etude de la relation procédé-qualité du produit. Application de terrain au Mali.

Résumé :

Le séchage du poisson est une technologie artisanale couramment utilisée au Mali. Cependant, la qualité du poisson séché n'est ni régulière ni contrôlée, ce qui cause des difficultés de stockage, une baisse de la valeur nutritionnelle du produit, ainsi que des manques d'approvisionnement des centres urbains et des difficultés d'exportations régionales.

Cette étude comporte deux parties complémentaires, l'une fondamentale effectuée en France et l'autre, plus appliquée, réalisée au Mali. Le travail mené au Mali consiste d'une part, à évaluer le procédé traditionnel de séchage (mesures métrologiques des conditions climatiques), et d'autre part, à définir la "qualité standard" du poisson (*Tilapia* spp.) au Mali, depuis sa capture jusqu'à la fin de sa transformation. Par ailleurs, la fermentation traditionnelle (avant séchage) du poisson est exposée. Les critères maliens d'appréciation sensorielle du poisson séché sont énoncés.

L'étude réalisée en France optimise, par la méthodologie du plan d'expérience, le procédé de séchage du poisson en fonction de critères de qualité. L'influence des paramètres de séchage sur la qualité bactériologique, physico-chimique et biochimique du *Tilapia* est définie. Ceci permet de dégager une zone optimale des caractéristiques de l'air de séchage se situant à des températures sèches entre 55 et 60°C, une hygrométrie entre 25 et 30% et une vitesse de 2 m/s.

Mots-clés : Poisson ; *Tilapia* spp. ; Séchage Convectif ; Plan d'Expérience ; Qualité Bactériologique ; Qualité Biochimique ; Optimisation ; Mali.

ZAKHIA, N., 1992. Drying of fish (*Tilapia* spp.). Study of relations between drying process and product quality. Field application to Mali.

Summary :

Traditional fish drying is very common in Mali (West Africa). Nevertheless, the quality of dried fish is not regular nor controlled. This leads to storage problems and nutritional losses of the product, as well as severe incidences on commercial dealings, whether national (supplying of urban areas), regional or for export.

The present study is divided into two complementary parts, the first one is fundamental research carried out in France, the other being a field application to Mali. The work conducted in Mali consists of studying all steps of traditional fish processing. Natural drying parameters (i.e. climatic conditions) are measured. Besides, "standard quality" of fish (*Tilapia* spp.) is followed from the catch to the end of processing. Traditional fish fermentation (prior to drying) is explained and Malian criteria for sensory evaluation of dried fish are stated.

The work carried out in France optimizes drying process according to quality criteria, using response surface methodology. It studies the effect of drying parameters on the evolution of bacteriological, physico-chemical and biochemical quality of fish (*Tilapia* spp.). This allows to point out an optimal area for drying air characteristics, located at the following scale : dry temperature (55 to 60°C), relative humidity (25 to 30%) and velocity of 2 m/s.

Key words : Fish ; *Tilapia* spp. ; Convective Air Drying ; Experimental Design ; Bacteriological Quality ; Biochemical Analysis ; Optimization ; Mali.