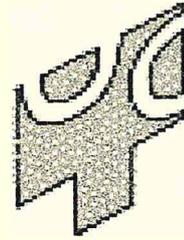




**Centre de coopération  
Internationale en  
Recherche  
Agronomique pour le  
Développement**

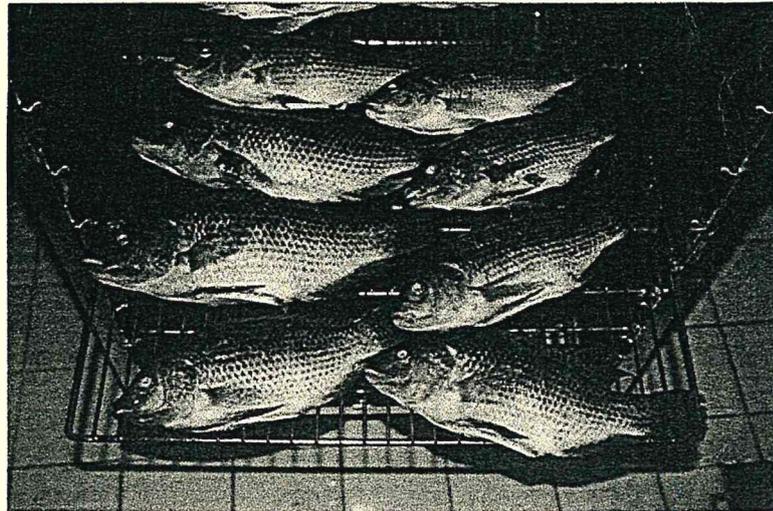


**Département AMIS - Réunion  
BP 20  
97408 SAINT DENIS CEDEX 9**

**Université de Technologie de Compiègne  
BP 60649  
60200 COMPIEGNE CEDEX**

# **VALIDATION TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN EQUIPEMENT ARTISANAL DE SALAGE- SECHAGE-FUMAGE A LA REUNION**

**Application aux  
poissons locaux**



**Emmanuel BERNARD  
CIRAD-AMIS n°08/2000  
Février 2000**

**PROJET DE FIN D'ETUDES  
Génie Biologique - Agro-Industrie**



# REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Vincent DOLLE, Directeur du CIRAD-AMIS, Jean-Michel MEOT, Responsable du service GPE, et Thierry GOLI, Ingénieur de recherche, qui m'ont donné l'opportunité de réaliser mon stage au sein du CIRAD.

Je remercie vivement mon maître de stage, Antoine COLLIGNAN, Chercheur au CIRAD-AMIS à La Réunion, pour tous les conseils, le soutien et le temps qu'il m'a consacrés, ainsi que Michel RIVIER, Ingénieur projeteur, pour son aide précieuse et sa disponibilité tout au long de la mise au point de l'équipement.

J'adresse également mes remerciements au personnel du CIRAD des sites de Montpellier et de Saint Denis pour son accueil et plus particulièrement aux personnes du programme agroalimentaire et du service GPE pour leur sympathie, leur disponibilité et toute l'aide apportée au cours de mon travail. Je citerai spécialement Denis GOUNELLE, Jean-Paul FLEURIOT et Pierre PRUVOST pour le travail réalisé sur l'équipement à Montpellier, Véronique LEFEVRE, Responsable du CRITT agroalimentaire de La Réunion, pour tous ses conseils, Florent TSANG, Technicien du CRITT agroalimentaire, pour ses prestations au laboratoire d'analyse, sans oublier Isabelle POLIGNE, Grégory DECAGNY et Maï QUERE pour leur soutien quotidien dans mes travaux.

Enfin, je remercie Monsieur NONUS, enseignant à l'U.T.C. et suiveur de mon stage, pour ses renseignements et ses conseils.



## SIGLES ET ABREVIATIONS

AMIS :	Amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique
PED :	Pays en développement
CRITT :	Centre régional d'innovation et de transfert de technologie
GPE :	Génie des procédés et équipement
HACCP :	Hazard Analysis Critical Control Point (analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise)
CEE :	Communauté économique européenne
GMS :	Grande et moyenne surface
DLC :	Délai limite de conservation
HAP :	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HPLC :	High Performance Liquid Chromatography (Chromatographie liquide haute performance)
UFC :	Unité formant colonie
FHT :	Franc hors taxe
TTC :	Toute taxe comprise
kW :	Kilowatt
°C :	Degré Celsius
µm :	Micromètre
mm :	Millimètre
HR :	Humidité relative
DE :	Dextrose équivalent

# GLOSSAIRE

<b>Eviscération</b>	Action d'ôter les viscères du poisson par ouverture du péritoine.
<b>Filetage</b>	Action de séparer les filets du poisson par découpe manuelle ou électrique.
<b>SPG20</b>	Sirop de glucose atomisé obtenu à partir d'hydrolysats d'amidon de maïs et dont le poids moléculaire est compris entre 22 et 30 équivalent dextrose.
<b>Glucidex DE21</b>	Sirop de glucose déshydraté obtenu à partir d'hydrolysats d'amidon de maïs et dont le poids moléculaire est de 21 équivalent dextrose.
<b>Engrillage (dégrillage)</b>	Action de disposer des produits sur une grille ou une claie (Action d'ôter des produits d'une grille).

# SOMMAIRE

**Remerciements**

**Sigles et abréviations**

**Glossaire**

**Sommaire**

**INTRODUCTION..... 1**

## **PARTIE A : Présentation du CIRAD**

1. Historique et statut.....	2
2. Ses missions.....	2
3. Organisation décisionnelle.....	3
4. Organisation structurelle.....	4
5. Le département AMIS et le programme agroalimentaire .....	5
6. Le pôle agroalimentaire du CIRAD à La Réunion .....	7

## **PARTIE B : Transformation du poisson par salage-séchage-fumage à froid**

1. Procédé traditionnel.....	8
1.1. La technologie de conservation par salage-séchage-fumage .....	8
1.1.1. Principe.....	8
1.1.2. Le salage.....	8
1.1.3. Le séchage .....	9
1.1.4. Le fumage.....	10
1.2. Les phases de la fabrication .....	11
2. Procédé innovant .....	15
2.1. La Déshydratation Imprégnation par Douchage (DID).....	16
2.1.1. Principe.....	16
2.1.2. Mise en œuvre .....	18
2.1.3. Solution concentrée utilisée en DID.....	19
2.2. Pilote de fumage à froid .....	20
2.3. Valorisation des procédés innovants.....	20
2.4. Points techniques sensibles lors de la mise en œuvre du procédé.....	21

## **PARTIE C : Etude et amélioration du fonctionnement du prototype CIRAD**

1. Conception et mise en œuvre du prototype artisanal.....	23
1.1. Description et choix techniques retenus.....	23
1.1.1. Le pilote de DID artisanal .....	23
1.1.2. Le système de régénération combinant filtration frontale et acidification.....	24
1.1.3. Le système de maintien de la saturation en chlorure de sodium.....	25
1.1.4. Le système de réajustement de la teneur en sirop de glucose .....	26
1.1.5. Le pilote artisanal de fumage à froid.....	26
1.2. Fonctionnement et mise en œuvre .....	28
1.2.1. DID et gestion de la solution ternaire.....	28
1.2.2. Fumoir à froid.....	28
2. Observations sur le fonctionnement de l'équipement .....	29
2.1. Bilan des problèmes rencontrés .....	29
2.2. Améliorations proposées.....	31

## **PARTIE D : Etude et optimisation des conditions de traitement sur des poissons locaux**

1. Matériels et méthodes.....	32
1.1. Caractéristiques de la matière première utilisée.....	32
1.2. Les analyses .....	33
1.2.1. Echantillonnage.....	33
1.2.2. Mesure de la teneur en eau .....	33
1.2.3. Mesure de la teneur en sel .....	34
1.2.4. Mesure de la masse volumique de la solution.....	34
1.2.5. Mesure du pH de la solution.....	34
1.2.6. Mesure de la turbidité de la solution .....	34
1.2.7. Analyses microbiologiques .....	35
1.3. Traitement et expressions des résultats.....	35
1.4. Déroulement et description des essais .....	37
1.4.1. Essais préliminaires réalisés à Montpellier .....	37
1.4.2. Essais réalisés sur l'équipement complet de saurissage à Saint Denis.....	38
2. Résultats - discussions.....	42
2.1. Essais préliminaires sur le comportement de la solution ternaire.....	42
2.2. Traitements réalisés sur les filets de tilapia .....	42

2.2.1.	Définition et optimisation des conditions de douchage.....	42
2.2.2.	Détermination de la durée de fumage optimale.....	43
2.2.3.	Modélisation de la durée de traitement pour le sirop de glucose Glucidex DE2144	
2.2.4.	Production en présérie.....	45
2.2.5.	Optimisation du saurissage par fumage dit « très froid ».....	47
2.3.	Traitements réalisés sur le tilapia entier.....	48
2.3.1.	Définition et optimisation des conditions de saurissage .....	48
2.3.2.	Impact de trois types d'incision sur le douchage du poisson entier .....	49
2.3.3.	Essai de formulation sur le tilapia rouge dit « Gueule rouge » .....	50
2.4.	Validation de la gestion de la solution ternaire (systèmes et procédures de réajustement/régénération) .....	51
2.5.	Résumé des paramètres de traitement établis.....	53

## **PARTIE E : Bilan technico-économique du procédé CIRAD**

1.	Evaluation du coût de production par le procédé CIRAD .....	54
1.1.	Détermination du coût de la gestion de la solution.....	54
1.2.	Détermination du coût matière première par kilogramme de produit fini .....	55
1.3.	Détermination de la charge salariale par kilogramme de produit fini.....	56
1.4.	Détail du prix de revient estimé pour chaque type de produit .....	57
2.	Perspectives de commercialisation.....	58

<b>CONCLUSION .....</b>	<b>59</b>
-------------------------	-----------

## **Bibliographie**

## **Annexes**



# INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, le CIRAD en collaboration avec plusieurs partenaires a engagé des recherches sur le salage-séchage-fumage et marinage de produits carnés. L'objectif finalisé est de proposer des techniques de conservation simples, rapides et économes permettant de maîtriser et d'améliorer les qualités sanitaires et nutritionnelles des produits finis. Les recherches portent à la fois sur l'étude et l'optimisation des procédés traditionnels et sur la mise au point de procédés et de produits nouveaux.

Les innovations récentes initiées par le CIRAD ont débouché notamment sur un nouveau procédé de salage-séchage-fumage tels que la Déshydratation Imprégnation par Immersion (DII) ou par Douchage (DID). Le procédé breveté a été développé au niveau industriel dans la filière poisson en France et en Espagne où il a fait l'objet de licences d'exploitation..

Actuellement, un projet de recherche présenté en annexe A porte sur la mise en œuvre à petite échelle du procédé de DID. L'objectif de ce projet est de valider en milieu tropical un équipement artisanal de salage-séchage-fumage à froid de produits carnés conçu par le CIRAD, combinant une opération de salage-séchage par douchage à un fumage conventionnel par pyrolyse de sciure de bois. Le Tilapia, poisson tropical d'eau douce, sert de support aux essais de validation et en parallèle des tests de mise au point de produits sont réalisés sur différents poissons.

Les enjeux du projet sont à la fois d'ordre technique :

- ⇒ optimiser et valider le fonctionnement du prototype CIRAD,
- ⇒ maîtriser la gestion de la solution ternaire au cours du temps,
- ⇒ maîtriser les conditions de traitement lors des opérations de DID et de fumage à froid,
- ⇒ établir les conditions de traitement optimales pour chaque espèce de poisson et chaque type de produit,

et d'ordre économique :

- ⇒ minimiser les coûts d'investissement et de fonctionnement,
- ⇒ établir le prix de revient des produits obtenus par le procédé CIRAD,
- ⇒ tester la commercialisation des produits sur l'île de La Réunion.

Après une première partie consacrée à la présentation de l'entreprise et de ses activités, la transformation du poisson au moyen des procédés traditionnel et CIRAD sera abordée. Un chapitre sera ensuite consacré à l'étude et à l'amélioration du fonctionnement du prototype, suivi de l'étude et de l'optimisation des conditions de traitement sur des poissons locaux. Enfin, une dernière partie dresse le bilan technico économique des essais réalisés.



# **PARTIE A**

**Présentation du**

**CIRAD**



## 1. Historique et statut

Le CIRAD, Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, est un organisme français spécialisé en agriculture des régions tropicales et subtropicales. Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), sous tutelle des ministères chargés de la recherche et de la coopération, il est né en 1984 de la fusion d'instituts de recherche en sciences agronomiques, vétérinaires, forestiers et agroalimentaires des régions chaudes.

## 2. Ses missions

Le CIRAD est un organisme scientifique dont les missions principales sont :

- de contribuer au développement des régions chaudes par des recherches et des réalisations expérimentales, par la formation de chercheurs nationaux et internationaux, par la conduite d'une politique dans le domaine de l'information scientifique et technique,
- d'apporter son concours aux institutions nationales de recherche agronomique, à la demande de gouvernements étrangers,
- de contribuer par une analyse de la conjoncture scientifique, à l'élaboration de politique dans ses domaines de compétence.

Les missions sont détaillées dans un contrat d'objectif signé avec l'état, où sont précisés les objectifs à longs, moyens et courts termes. Le dernier contrat d'objectifs signé en 1996 entre l'état et le CIRAD s'inscrit dans la perspective d'une croissance de la production agricole et forestière des PED plus respectueuse de l'environnement. Il définit des axes prioritaires comme l'amélioration des filières de production et des techniques de transformation des produits, la gestion économe et durable de l'espace et des ressources naturelles, la prise en compte de la stratégie des acteurs dans les politiques de développement agricole.

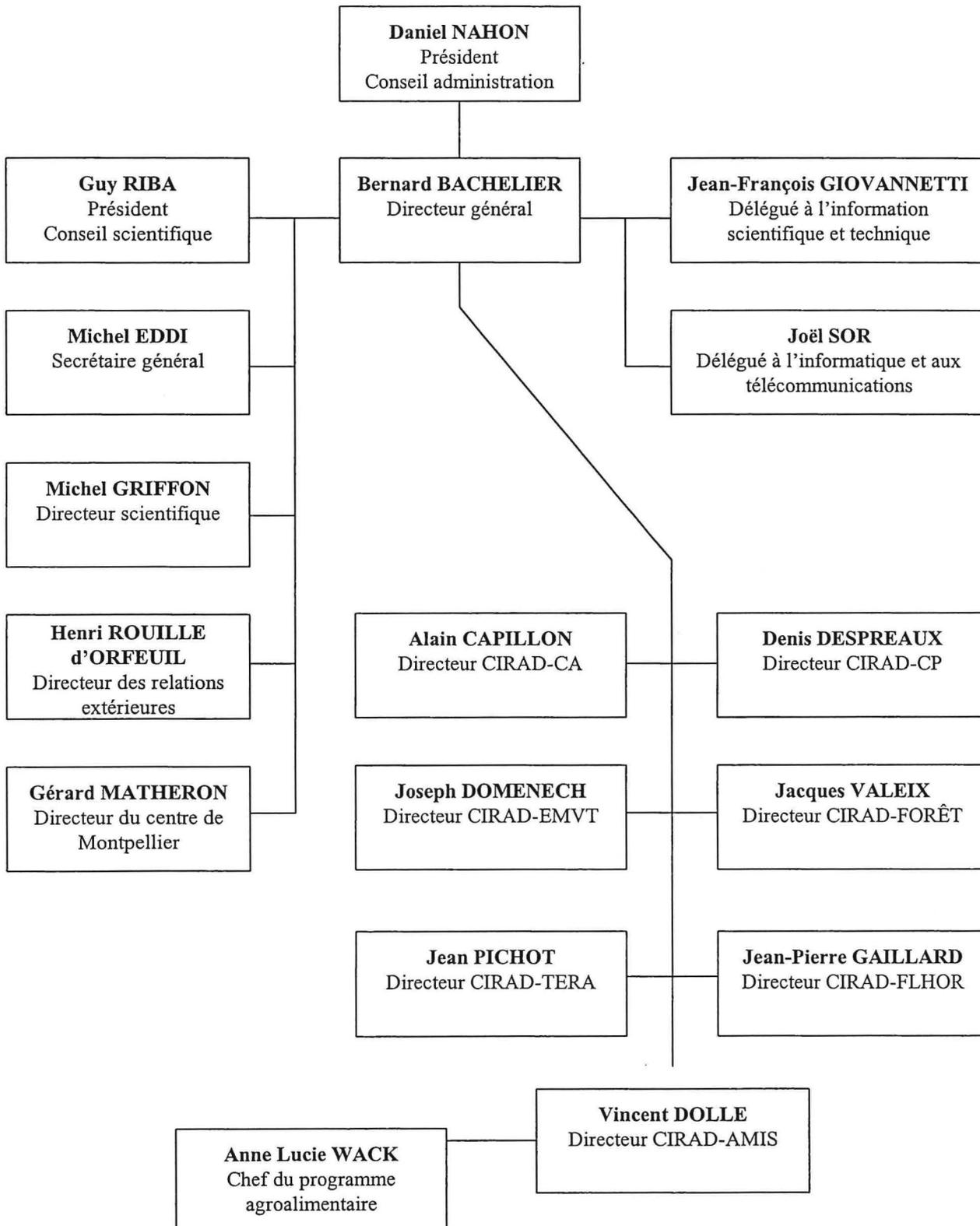
Le contrat fixe également des objectifs de partenariat :

- renouveler la coopération avec le Sud, notamment en diversifiant les modalités de présence du CIRAD sur le terrain, améliorer l'intégration du Nord,
- poursuivre l'adaptation de l'établissement à ses missions par la mise en place de projets regroupant les compétences de plusieurs départements, d'instruments de pilotage budgétaire et comptable, de procédures d'évaluation du personnel.

Le CIRAD conduit ses activités à partir de ses propres centres de recherche et stations expérimentales en France métropolitaine, dans les départements et territoires français d'outre-mer, et aussi dans plus de 45 pays répartis sur les cinq continents, en coopération avec des structures nationales de recherche-développement, les centres internationaux (CGIAR) en appui à des projets publics ou privés. Pour l'ensemble de ses activités, le CIRAD est doté d'un budget annuel de l'ordre d'un milliard de francs.

### 3. Organisation décisionnelle

L'organigramme suivant présente brièvement la structure décisionnelle du CIRAD.



## 4. Organisation structurelle

Sur un effectif total de 1800 personnes, 900 cadres scientifiques et techniques, dont 400 sont en régions chaudes, sont susceptibles d'investir sur des projets de recherche-développement. Le CIRAD collabore avec environ 90 pays d'Afrique, d'Asie, du Pacifique, d'Amérique latine et d'Europe.

En France, le siège social se situe en région parisienne, le dispositif de recherche est essentiellement localisé au Nord de Montpellier sur le parc technologique AGROPOLIS réunissant des établissements scientifiques spécialisés en agronomie, mais aussi en Corse (CIRAD-INRA) et dans les DOM-TOM : Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française, La Réunion, ainsi que dans les 90 pays collaborant avec le CIRAD.

Depuis le 1er janvier 1998, le CIRAD a entamé une réforme afin de rénover et moderniser sa gestion, de simplifier son organisation et d'assouplir son mode de fonctionnement. Les départements sont au nombre de 7 englobant 28 programmes de recherche.

### **Cultures Annuelles (CIRAD-CA)**

- Canne à sucre
- Coton
- Cultures alimentaires
- Ecosystèmes cultivés

### **Cultures pérennes (CIRAD-CP)**

- Cacao
- Café
- Cocotier
- Hévéa
- Palmier à huile

### **Productions fruitières et horticoles (CIRAD-FLHOR)**

- Arboriculture fruitière
- Bananiers et plantains
- Productions horticoles

### **Elevage et médecine vétérinaire (CIRAD-EMVT)**

- Ecosystèmes naturels et pastoraux
- Productions animales
- Santé animale

### **Forêt (CIRAD-FORET)**

- Arbres et Plantations
- Bois
- Forêts naturelles

## **Territoires, environnement et acteurs (CIRAD-TERA)**

- Agricultures familiales
- Espaces et ressources
- Savanes et Systèmes irrigués
- Tropiques humides

## **Amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique (CIRAD-AMIS)**

- Agroalimentaire
- Agronomie
- Biotechnologies et ressources génétiques végétales (Biotrop)
- Economie, politiques et marchés (Ecopol)
- Modélisation des plantes (Amap)
- Protection des cultures

Le produit des travaux réalisés au CIRAD donne naissance à :

- des publications, des logiciels, des brevets, des équipements et procédés (développés dans le cadre de filiales, cession de licence, vente de plans, brevets...),
- des formations (statistiques, informatiques, gestion...),
- des études, des expertises,
- des ouvrages (papiers ou multimédia).

## **5. Le département AMIS et le programme agroalimentaire**

Le développement du secteur agroalimentaire — transformation, conservation, commercialisation des produits agricoles — est un enjeu majeur pour les pays du Sud. Ce secteur doit s'adapter à une demande alimentaire croissante, à une urbanisation rapide et à l'internationalisation des échanges. La prise en charge locale de ce développement est un élément clé dans le contexte actuel d'accroissement des disparités.

Le département AMIS, et en l'occurrence le programme agroalimentaire (PAA) en relation avec la communauté scientifique nationale et internationale, conçoit et adapte les méthodes et les outils nécessaires aux recherches appliquées et les met à la disposition des chercheurs qu'il accueille dans ses laboratoires.

Les missions du PAA sont les suivantes :

- une meilleure connaissance des produits alimentaires : caractérisation des propriétés physico-chimiques, microbiologiques, organoleptiques et nutritionnelles des produits. Elaboration de nouveaux produits,
- une meilleure connaissance des marchés agroalimentaires : tendances de la consommation alimentaire (enquêtes, diagnostics socio-économiques),
- des produits compétitifs sur les marchés locaux et à l'exportation : identification des attentes de qualité des utilisateurs (consommateurs, commerçants, entreprises de transformation). Amélioration de la compétitivité, de la qualité et de la sécurité des produits traditionnels,
- une réduction des pertes après la récolte : valorisation des coproduits, sous-produits et déchets pour la production de bioénergie (biogaz, biocarburants) et de bioemballages,
- une industrie propre et économe : diagnostic énergétique des procédés de transformation. Optimisation de la consommation d'énergie,
- une professionnalisation du secteur agroalimentaire : participation à la programmation stratégique de la recherche agroalimentaire. Diagnostic d'entreprises ou de secteurs. Formation d'opérateurs techniques ou professionnels,
- des techniques et des équipements de transformation améliorés : caractérisation des procédés traditionnels (mise en œuvre, équipements, produits avant et après transformation, consommations d'énergie). Outils et méthodes pour la maîtrise des différentes opérations, à l'échelle artisanale ou industrielle. Conception locale d'équipements.

Le PAA du CIRAD-AMIS englobe 50 agents à Montpellier, dont 45 chercheurs et techniciens. Des agents sont également en poste au Maroc, en Thaïlande, au Brésil, en Colombie et à La Réunion. Les compétences du PAA sont à la fois technologique (génie des procédés, énergétique, science des aliments, chimie, physico-chimie, lipotechnie) et socio-économique (science de la consommation, marketing agroalimentaire). La mission d'amélioration des techniques et des équipements de transformation est confiée à l'équipe GPE, Génie des Procédés et conception d'Equipements, regroupant environ 25 personnes.

En terme d'équipements, le PAA est doté de 2 halles de technologie de 1400 m<sup>2</sup>, 12 laboratoires d'analyse, d'un laboratoire de conception assistée par ordinateur, d'un atelier de construction mécanique et d'une plate forme énergie. Les services fournis par le PAA sont essentiellement fondés sur l'exécution de projets en coopération, les expertises, la formation et l'assistance technique aux entreprises.

Les projets en cours du PAA font référence à :

- la conception d'équipements agro-industriels (huileries, salaisons, céréales),
- l'amélioration des procédés de salage-séchage-fumage, marinage, confisage, filtration, refroidissement, congélation, friture, ceci à l'échelle artisanale ou industrielle avec des applications aux fruits, légumes, racines et tubercules, viandes et poissons, oléagineux.

## 6. Le pôle agroalimentaire du CIRAD à La Réunion

Le CIRAD est représenté officiellement à La Réunion par une délégation. Les activités, regroupant 151 agents dont 32 chercheurs, sont structurées en 5 pôles. En phase de construction, le pôle agroalimentaire a pour objectif de contribuer au renforcement des capacités scientifiques et techniques au niveau local et régional dans les domaines des produits carnés et des produits végétaux.

L'activité agroalimentaire du CIRAD à la Réunion se structure autour de deux projets :

- ⇒ la transformation des produits animaux,
- ⇒ la caractérisation et le traitement post-récolte des productions végétales.

Pour mener à bien ces travaux, le pôle agroalimentaire s'appuie sur les compétences des départements du CIRAD tels que AMIS et FLHOR. Des partenariats et collaborations existent avec les acteurs impliqués en recherche et développement agroalimentaire et les différents acteurs des filières fruits, viande et poisson.

Petite structure en phase de croissance, l'équipe agroalimentaire à La Réunion traite particulièrement de la transformation de produits animaux en régions chaudes. En collaboration avec le CRITT Agroalimentaire et l'Université, l'équipe structurée autour d'Antoine COLLIGNAN et d'Isabelle POLIGNE a engagé des recherches sur l'étude et l'optimisation des procédés traditionnels et sur la mise au point de procédés et de produits nouveaux.

Les travaux portent principalement sur l'étude du fumage du porc boucané et sur les innovations en matière de salage-séchage-fumage à froid du poisson, l'objectif actuel étant la réalisation d'une unité artisanale de fumage du poisson en réponse à la demande locale. Dans ce cadre, le travail de développement de nouveaux équipements destinés à l'artisanat est réalisé en collaboration avec l'équipe GPE de Montpellier.

# **PARTIE B**

## **Transformation du poisson par salage-séchage-fumage à froid**



Les opérations combinées de salage-séchage-fumage constituent l'un des plus anciens procédés utilisés pour la conservation des produits carnés. Aujourd'hui et du moins dans les pays industrialisés, le but du fumage n'est pas tant d'assurer une longue conservation du produit que de donner une couleur et un goût particulier au poisson traité (KNOCKAERT, 1990). En effet, l'utilisation de l'emballage sous vide et de la conservation en froid positif, couplés au saurissage, permet de conserver le produit pendant 3 à 4 semaines. Les traitements de conservation sont alors beaucoup plus doux et correspondent plus au goût des consommateurs qui demandent des produits faiblement transformés.

## **1. Procédé traditionnel**

### ***1.1. La technologie de conservation par salage-séchage-fumage***

#### **1.1.1. Principe**

Le poisson s'altère si vite que des formes élémentaires de conservation se sont naturellement imposées : le séchage au soleil, le boucanage au feu de bois, le salage, le saurissage. A ce savoir-faire ancestral, progressivement d'autres techniques ont contribué à l'essor de l'industrie halieutique : déshydratation en séchoir, congélation-surgélation. En raison de sa forte teneur en eau, le poisson fut donc traditionnellement préservé et conservé par des méthodes réduisant cette activité (les caractéristiques biochimiques du poisson sont présentées dans l'annexe B). L'eau sert de solvant aux éléments solubles constituant la chair de poisson ; tout procédé destiné à éliminer l'eau, tel le séchage, concentre les éléments solubles dans la phase aqueuse restante. Plutôt que d'éliminer l'eau, il est possible aussi d'ajouter des solutés qui immobiliseront une partie de l'eau, c'est le cas du salage et, salage et séchage sont souvent combinés pour à la fois réduire teneur en eau et disponibilité de l'eau dans l'aliment. Le salage classique effectué au sel sec provoque une migration de l'eau du poisson vers l'extérieur et la saumure qui en résulte pénètre et diffuse dans la chair. Une partie de l'eau peut être éliminée par un séchage consécutif soit à l'air libre, soit en séchoir. Le salage peut aussi être suivi du fumage à froid (20-35°C) ou à chaud (65-90°C) ; les deux opérations combinées s'appellent saurissage (LINDEN & LORIENT, 1994).

#### **1.1.2. Le salage**

Le salage commence au moment du contact entre le poisson et le sel, il se termine lorsque la salinité du poisson est suffisante pour devenir impropre à la prolifération bactérienne contaminante ou lorsqu'il a acquis le goût, l'odeur et la consistance spécifiques et caractéristiques des produits salés prêts à la consommation. Entre ces deux moments, le sel a pénétré dans la chair sous l'influence d'un certain nombre de facteurs physiques et physico-chimiques tels que la capillarité, la diffusion, la force ionique, l'osmose, associés aux évolutions chimiques des divers constituants, notamment des protéines, du poisson (LINDEN & LORIENT, 1994).

Il existe des techniques mixtes qui combinent le salage au séchage et au fumage. Le terme anglo-saxon « CURING » s'applique aux différents types de salage, séchage ou fumage utilisés seuls ou combinés. Le produit salé est tantôt un produit fini, tantôt une matière première destinée à un traitement complémentaire : séchage, fumage, semi-conserve.

Pendant le début du salage, l'eau liée aux protéines ne peut prendre part aux mécanismes d'échange. Tant que la teneur en sel est entre 2 et 5%, l'eau reste liée aux protéines qui gonflent, c'est la turgescence. A cette faible concentration, ce phénomène est dû à l'absorption d'ions  $\text{Cl}^-$  à la surface des protéines augmentant ainsi leur nombre de charges négatives à pH neutre et, en conséquence, provoquant une augmentation des forces de répulsion à l'intérieur et entre les chaînes polypeptidiques. Il en résulte dans l'espace crée une augmentation de l'eau d'hydratation des protéines puisqu'une quantité d'eau supplémentaire est nécessaire pour hydrater les nouvelles charges négatives. A mesure que la concentration de  $\text{NaCl}$  augmente dans les chairs, les protéines myofibrillaires deviennent peu à peu solubles jusqu'à un maximum de solubilité qui se situe entre 3 et 12% selon la température et l'espèce du poisson. Pour les forts taux de sel ( $>12\%$ ), les protéines précipitent dans les tissus (coagulation des albumines notamment).

Enfin, les teneurs élevées du poisson en matières grasses retardent la pénétration du sel et sont susceptibles de rancidité oxydative. Cette oxydation est surtout due au pouvoir oxydant des ions  $\text{Cl}^-$  mais aussi à l'effet catalytique du pigment hème des protéines telles que l'hémoglobine, la myoglobine, le cytochrome C (LINDEN & LORIENT, 1994).

### 1.1.3. Le séchage

Le séchage doit être mené rapidement pour éviter une altération du poisson, mais pas trop vite afin d'éviter que la chair ne durcisse et ainsi éviter le phénomène de « croûtage ». La technique la plus employée est le séchage par entraînement dans lequel un courant d'air chaud, le plus sec possible, établit spontanément un écart de température et de pression partielle de vapeur d'eau, entre la chair de poisson et l'air environnant. Il s'ensuit un transfert de chaleur de l'air vers le poisson et un transfert d'eau en sens inverse, l'air servant à la fois de fluide chauffant et de vecteur pour l'eau enlevée. Un équilibre se crée entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la phase liquide du poisson. En milieu industriel, les séchoirs sont équipés de ventilation permettant le renouvellement de l'air, ainsi l'air n'est jamais saturé en humidité et l'évaporation se poursuit jusqu'à la limite souhaitée.

Le séchage, en modifiant la composition du poisson par réduction de la teneur en eau, ne permet pas de conserver les qualités initiales du poisson. Bien conduit, il aboutit à l'élaboration d'un produit final différent, de longue conservation surtout s'il a été préalablement salé. Les effets du séchage sur les propriétés biologiques et organoleptiques sont essentiellement dus à l'abaissement de la disponibilité de l'eau, mais aussi à l'action directe de la chaleur : oxydation des lipides et des pigments, dénaturation partielle des protéines, réaction de Maillard, destruction de vitamines (surtout B1). Il peut en résulter des défauts de saveurs : rance, savon, amertume, aigreur, âpreté... (LINDEN & LORIENT, 1994).

#### 1.1.4. Le fumage

Le principe du fumage consiste, après un salage préalable et dans la plupart des cas un léger séchage, à imprégner la chair de poisson avec de la fumée issue de la combustion lente du bois en copeaux ou en sciure. Pendant la phase de fumage, le poisson continue à se déshydrater tout en s'imprégnant des composés volatils de la fumée (SAINCLIVIER, 1985). Le fumage, au goût actuel, est très léger et n'assure que faiblement les fonctions antioxydante et bactériostatique. Dans la pratique, le fumage est surtout utilisé à des fins organoleptiques plus que comme moyen de conservation, tout au moins dans les pays industrialisés. Les modifications les plus importantes subies par la chair de poisson ont lieu pendant le salage et le séchage, l'action de la fumée n'intervenant qu'ensuite. C'est avant tout un goût et une couleur que l'on donne au produit, la conservation étant assurée principalement par les opérations précédentes (salage, séchage) et le maintien du produit fini à + 2 °C, emballé sous vide. Du fait de l'utilisation combinée de salage (ou saumurage), séchage et fumage, le terme saurissage est la désignation correcte du traitement appliqué. Les techniques de fumages sont décrites dans l'annexe C.

## 1.2. Les phases de la fabrication

Classiquement, le séquençage des opérations de saurissage s'effectue de la façon suivante :

- ⇒ Réception et stockage de la matière première
- ⇒ Décongélation
- ⇒ Préparation : écaillage, éviscération, étêtage, filetage
- ⇒ Transformation : salage puis séchage et fumage combinés
- ⇒ Surgélation, tranchage
- ⇒ Conditionnement, emballage
- ⇒ Stockage et distribution du produit fini

A chaque étape du procédé, la lutte contre l'altération des qualités nutritionnelles, organoleptiques et sanitaires de la matière première consiste d'une part, à limiter les possibilités de contamination par le contrôle des foyers d'infection (air, eau, matériel, personnel...), et d'autre part, à réduire le développement microbiologique par l'utilisation de moyens bactériostatiques. Dans ce sens, la démarche HACCP vise par l'analyse du procédé à déterminer les points susceptibles de représenter un danger pour la sécurité du consommateur et à proposer des actions permettant de prévenir ou de maîtriser les risques identifiés.

### Réception et stockage de la matière première

La matière première peut être réceptionnée soit fraîche (+2°C), soit congelée (-18°C). La durée de stockage à +2°C du poisson éviscéré ne doit pas dépasser une semaine et peut être réduite suivant la qualité initiale de la matière première. Un barème de cotation CEE permet d'apprécier l'état de fraîcheur. Une température proche de zéro a un effet bactériostatique ; la phase de latence augmente et la vitesse de croissance des bactéries diminue. Le stockage à +2°C ralentit donc la multiplication de la flore initiale (KNOCKAERT, 1990).

Concernant le stockage à -18°C, la multiplication des microorganismes est quasi nulle à cette température. Seules les réactions physico-chimiques d'altération limitent la durée de conservation. Par exemple, les poissons gras seront sensibles à l'oxydation des lipides et ceci d'autant plus que la protection vis à vis de l'air sera faible. Les protéines du poisson sont également très sensibles à l'entreposage à l'état congelé.

Afin d'éviter les contaminations, il est recommandé à la réception de contrôler l'état de la matière première (état de fraîcheur, intégrité de l'emballage, température à cœur...). Lors du stockage, il faudra veiller à ce que les chambres froides soient régulièrement nettoyées et que leurs températures soient suivies via un enregistreur par exemple afin de mettre en évidence d'éventuelles fluctuations de température.

## Décongélation

Pour les produits congelés, la phase de décongélation est souvent un point critique. L'arrêté du Journal Officiel du 31 juin 1984 régleme d'ailleurs les conditions hygiéniques de décongélation. Il stipule que la décongélation de denrées animales doit être effectuée à l'abri des souillures, dans une enceinte à une température comprise entre 0 et +4°C. Le plus souvent, les produits congelés sont déballés et placés dans des bacs propres hermétiquement fermés dans une chambre froide à +2°C. Dans ces conditions, la multiplication des germes est ralenti et les contaminations par l'imprégnation d'exsudat sur le conditionnement éliminé. Enfin, le poisson doit être traité le plus rapidement possible après la fin de la décongélation d'où la nécessité de bien programmer les différentes phases de la fabrication. Le rinçage à l'eau glacée des produits décongelés permet également d'éliminer l'exsudat, milieu très riche en substrat et donc propice au développement des microorganismes.

Le traitement de saurissage permettant uniquement de stabiliser le produit et non de le stériliser, la qualité du produit fini dépend directement de la qualité de la matière première. Il est donc important qu'à ce stade, la qualité du poisson soit la meilleure possible.

## Préparation : écaillage, éviscération, étêtage, filetage

L'ensemble de ces opérations de préparation du poisson s'effectue en chambre climatisée à +10°C afin de limiter les altérations et la multiplication bactérienne. Lors de l'éviscération, il existe un risque important de contamination de la chair du poisson par la flore abondante présente dans les viscères ; la dextérité de l'opérateur sera donc primordiale. Il faut également veiller à la propreté des outils de découpe, des plans de travail et des opérateurs. A tous les stades de la préparation, les pièces de poisson doivent être régulièrement rincées à l'eau glacée. Le filetage est réalisé séparément des autres étapes dans le but de limiter les contaminations au moment de la levée des filets. Le rendement au filetage est très variable d'une espèce à l'autre, par exemple de 32% pour le Tilapia doré à 70% pour la truite de montagne.

## Transformation : salage, séchage, fumage

Dans le procédé traditionnel, les trois opérations unitaires sont en réalité regroupés en deux phases de traitement. Tout d'abord suivant le procédé retenu, l'opération de salage se déroule soit à sec, soit en saumure, soit par boudruchage (KNOCKAERT, 1990). Enfin, le séchage et le fumage sont réalisés avec le même équipement. La matière première préalablement salée est disposée dans une cellule commune : dans un premier temps, le produit est séché sous l'effet d'un brassage d'air (l'air peut être climatisé pour augmenter sa capacité évaporatoire), puis dans un second temps, il est fumé à froid ou à chaud grâce à un foyer (direct ou indirect).

L'opération de salage contribue à l'élimination d'une partie de l'eau de constitution. La déshydratation provoquée diminue la disponibilité de l'eau pour la croissance des germes. Le sel sélectionne la flore en fonction de l'activité de l'eau, inhibe la multiplication de la plupart des bactéries intervenant dans l'altération, mais favorise la croissance des halophiles. A partir d'une concentration de 5%, il inhibe la plupart des bactéries anaérobies et les Pseudomonas et ralentit la croissance des bactéries aérobies (LINDEN & LORIENT, 1994).

Sur le plan purement organoleptique, on considère que 3 à 3,5% de sel et environ 60 à 65% d'eau sont des teneurs acceptables dans le cas d'un produit moyennement gras traité au goût « moderne » actuel. Dans ce cas, le salage n'a que peu d'effet sur les bactéries, l'eau restant liée en quantité trop importante. En conclusion, le salage provoque un raffermissement des chairs, empêche la décoloration et confère un certain goût au poisson. Aux teneurs choisies, il ralentit seulement la croissance bactérienne, sans empêcher l'altération de se produire (HALLE & TAILLEZ, 1981).

Deux méthodes sont le plus souvent utilisées : le salage au sel sec et le salage en saumure. Pour la première méthode, il importe que le sel soit de bonne qualité mais les risques de contamination restent faibles. Le salage et la déshydratation sont rapide, mais l'importance de la concentration en sel à la surface conduit à une coagulation des protéines des tissus et retarde le salage en profondeur. En revanche, le salage en saumure présente l'avantage d'être plus progressif donc plus homogène et plus respectueux des qualités de la chair du poisson. L'utilisation de saumure concentrée pose des problèmes d'hygiène. Le risque de développement et de contamination microbienne est plus important. La saumure doit rester claire, transparente, sans odeur désagréable et doit présenter peu d'écumes, sinon elle est rejetée. A l'issue du salage, les filets doivent être rincés par douchage à l'eau glacée afin de les débarrasser de cristaux de sel ou de traces de saumure (LINDEN & LORIENT, 1994).

L'opération de séchage permet de réduire la teneur en eau du produit dans le but de lui assurer une meilleure conservation en complément du salage. En réduisant la fraction d'eau libre disponible dans le poisson, une partie des réactions de dégradations devient impossible par manque de solvant. Pour réaliser un séchage correct, il faut pouvoir contrôler la température, l'humidité et la ventilation de l'enceinte de séchage. Un séchage se réalise à une température de 22 à 26°C pour éviter la dénaturation des protéines par la chaleur et à une humidité relative de 60% environ pour ne pas croûter la surface du produit et empêcher toute migration ultérieure de l'eau. La ventilation permet ensuite d'ajuster la vitesse de séchage à température et humidité données. Les possibilités de séchage varient beaucoup selon les conditions climatiques. En effet, le séchage n'est réalisable que si l'atmosphère ambiante n'est pas trop chargée en vapeur d'eau à la température choisie. Ainsi en région humide, seule l'utilisation de séchoirs climatisés permet de réaliser de bon séchage. Dans ces conditions, le coût du séchage devient nettement plus élevé comparé à l'utilisation de séchoirs traditionnels en climat tempéré (LINDEN & LORIENT, 1994).

L'opération de fumage permet l'imprégnation des composés volatils de la fumée et la poursuite de la déshydratation du produit. Ayant des effets antioxydant et bactériostatique modérés, la fumée ne joue pas un rôle primordial dans la conservation des produits de sauriserie. Elle permet de stopper la multiplication des germes jusqu'au conditionnement, et son rôle principal est de modifier les qualités organoleptiques du produit (LINDEN & LORIENT, 1994).

### Surgélation, tranchage

A l'issue de la transformation par saurissage, les pièces peuvent être surgelées dans le but d'une conservation longue ou simplement « durcies » par passage dans un tunnel à  $-40^{\circ}\text{C}$ . Ce durcissement de la surface du produit permet un tranchage plus franc et générant moins de déchets. Les outils de découpe doivent être particulièrement propres car ils peuvent être une source de contamination du produit fini.

### Conditionnement, emballage

Que le produit soit frais ou congelé, le conditionnement met fin aux différents risques de contaminations microbiologiques. Le conditionnement s'effectue généralement dans des sachets plastiques étanches mis sous vide en salle de conditionnement à  $+12^{\circ}\text{C}$  afin d'éviter les phénomènes de condensation. En complément des traitements précédents, le vide ralentit les processus de dégradations de la chair et de développement des germes pathogènes.

Les produits conditionnés reçoivent l'étiquetage adéquat et sont pourvus d'un emballage de présentation muni des marques réglementaires s'ils sont destinés à être vendus directement au consommateur.

### Stockage et distribution du produit fini

Suivant si le produit fini est conservé en frais ou en congelé, les conditions de stockage et le circuit de distribution vont différer. Sont commercialisés directement en frais, les poissons fumés dont la consommation est stable tout au long de l'année. Ces produits ne sont stockés que quelques jours et leur commercialisation s'effectue par des circuits de distribution courts (GMS, poissonnerie) puisque la DLC des produits fumés conservés sous vide à  $+2^{\circ}\text{C}$  est de 3 à 4 semaines maximum. Le produit congelé permet une plus grande souplesse dans la commercialisation tant pour le fabricant que pour le distributeur. Le produit fumé peut être conservé 3 mois à  $-18^{\circ}\text{C}$ . Ce type de conservation s'applique bien au poisson fumé dont la vente est saisonnière (saumon, truite...). Le produit est soit vendu à l'état congelé, soit décongelé par le distributeur et vendu en frais. Le distributeur doit alors suivre les consignes de décongélation édictées par le fabricant afin de conserver une qualité gustative et une innocuité satisfaisantes au produit.

## 2. Procédé innovant

Traditionnellement, l'élimination d'eau d'un produit alimentaire est obtenue soit par voie mécanique, soit par voie thermique. Pour les produits alimentaires solides, une troisième voie peut être utilisée, il s'agit de l'élimination d'eau sous l'effet d'un gradient de concentration couplée à l'imprégnation en solutés. Cette technique, mise en œuvre par immersion ou par douchage du produit, permet de réaliser simultanément les opérations de salage et de séchage au sein du même équipement. Pour l'opération de fumage consécutive, il suffit d'un fumoir simplifié, c'est à dire n'intégrant par la fonction de séchage puisque le produit à déjà été déshydraté pendant la phase de salage.

En comparaison avec le procédé traditionnel, le séquençage des trois opérations et le type de matériel requis sont illustrés par le schéma suivant.

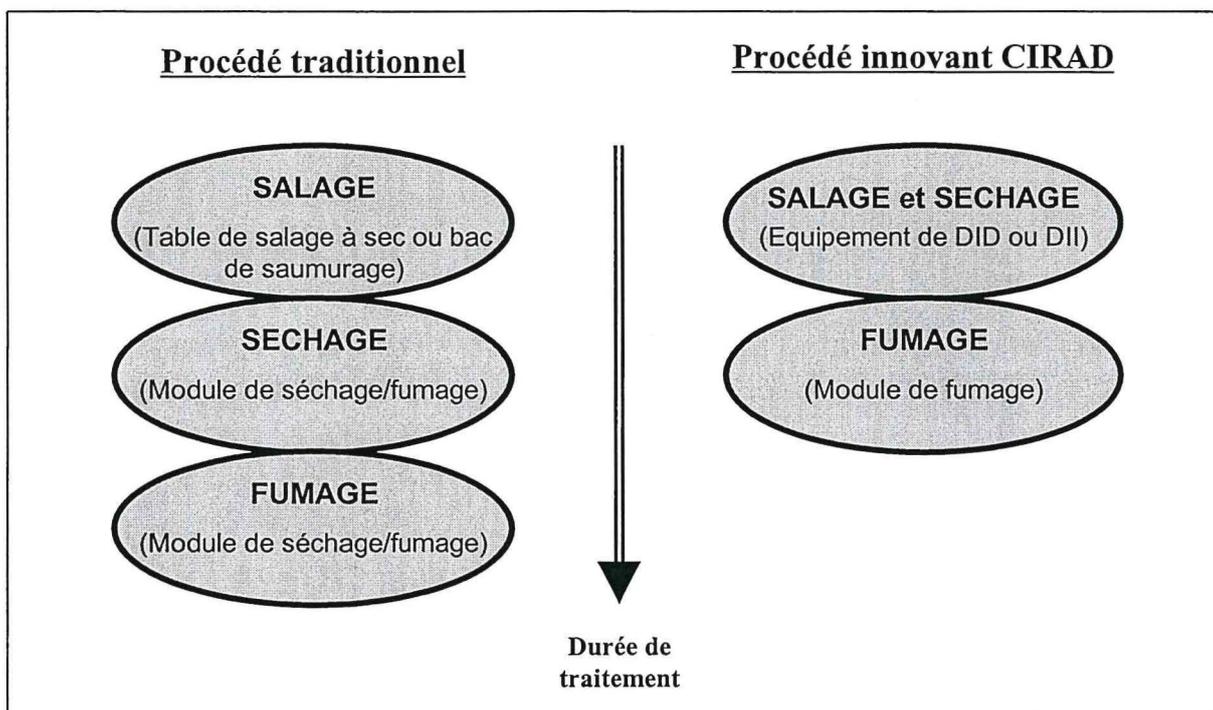


FIGURE 1 – COMPARAISON DES PROCÉDES TRADITIONNEL ET CIRAD CONCERNANT LES ÉQUIPEMENTS ET LE SÉQUENÇAGE DES OPÉRATIONS.

Les avantages du procédé CIRAD sont nombreux :

- ⇒ temps de traitement plus court grâce à la simultanéité du salage et du séchage,
- ⇒ équipement de salage simple,
- ⇒ équipement de fumage simplifié par rapport au séchoir/fumoir classique.

## 2.1. La Déshydratation Imprégnation par Douchage (DID)

### 2.1.1. Principe

Cette technique consiste à mettre l'aliment entier ou préalablement découpé en contact avec une solution fortement concentrée en solutés tels que le sel et le sirop de glucose (PONTING *et al.*, 1966). De nombreux procédés de transformation des aliments riches en eau sont basés sur l'immersion de l'aliment entier ou découpé dans des solutions très concentrées en sucre ou en sel. Il s'agit principalement du saumurage (DEL VALLE & NICKERSON, 1967) et du confisage (CAMPI, 1985). Ces techniques traditionnelles consistent à favoriser l'imprégnation du soluté dans l'aliment et le phénomène de déshydratation se trouve limité.

La Déshydratation Imprégnation par Immersion (DII) et la Déshydratation Imprégnation par Douchage (DID) permettent, quant à elles, de déshydrater et d'imprégner simultanément le produit traité au cours de la même opération. Ce procédé a tout d'abord été appliqué aux fruits (PONTING *et al.*, 1966 ; RAHMAN & LAMB, 1990) et aux légumes (LENART & FLINK, 1984) et, depuis peu aux produits d'origine animale, comme le lait (GEURTS *et al.*, 1980), la viande (FAVETTO *et al.*, 1981 ; COLLIGNAN & RAOULT-WACK, 1992 ; DEUMIER *et al.*, 1996) et le poisson (COLLIGNAN & RAOULT-WACK, 1994 ; COLLIGNAN *et al.*, 1992).

Ce procédé présente de nombreux avantages, tels que la grande simplicité de mise en œuvre, la possibilité de travailler à basse température (MUGURUMA *et al.*, 1987 ; VIDEV *et al.*, 1990), l'amélioration des qualités organoleptiques et nutritionnelles des produits obtenus (DIXON *et al.*, 1976 ; VIAL *et al.*, 1990), les économies d'énergie et de temps de traitement (COLLIGNAN *et al.*, 1992) et les possibilités de formulation directe des produits en substances de charge ou en ingrédients d'intérêt technologique, hygiénique et/ou organoleptique (DEUMIER *et al.*, 1996).

Concrètement, il se produit des transferts de matière croisés et interactifs :

- ⇒ une sortie d'eau du produit vers la solution,
- ⇒ une entrée de sel de la solution vers le produit,
- ⇒ une fuite des solutés propres du produit.

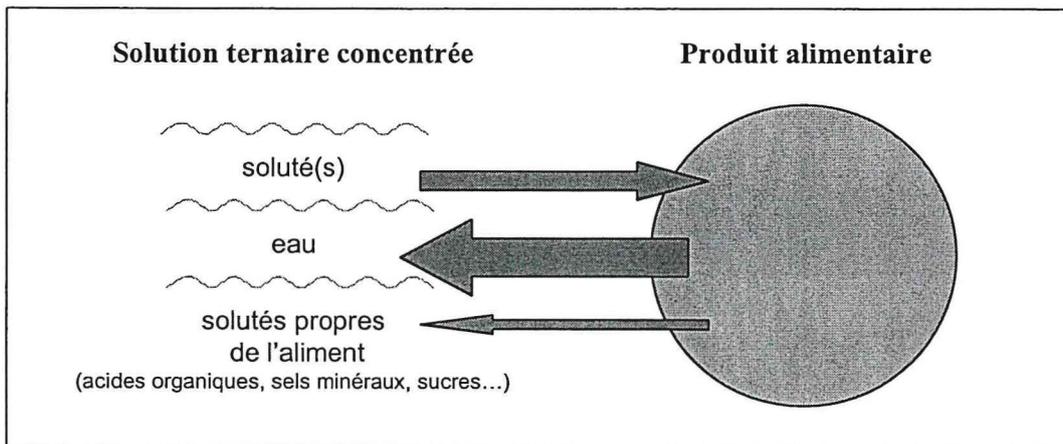


FIGURE 2 – TRANSFERTS DE MATIERE ENTRE LA SOLUTION ET LE PRODUIT [1].

Les membranes cellulaires agissant en qualité de membranes « semi-perméables » partiellement sélectives, le transfert de soluté vers le produit reste relativement faible (figure 2). L'essentiel des transferts a lieu lors des premières heures de traitement. Par la suite, on assiste à une forte diminution de l'échange d'eau tandis que l'imprégnation en solutés se poursuit lentement.

L'application de la DII au traitement de viandes et poissons dans les solutions mixtes (sels, sucres) concentrées à basse température (+10°C) a été réalisée (COLLIGNAN & RAOULT-WACK, 1994 ; DEUMIER *et al.*, 1996). Les résultats montrent que de fortes pertes en eau peuvent être obtenues aussi bien sur des produits gras que maigres. Dans le cas de produits maigres, une importante déshydratation avec un salage contrôlé du produit est possible tout en limitant l'imprégnation en sucre, grâce à l'utilisation de sucres de fort poids moléculaire, comme les sirop de glucose ou les malodextrines.

En effet, le sucre joue un double rôle. D'une part, il permet de contrôler l'imprégnation en sel, et d'autre part, il renforce l'effet de déshydratation du sel. Comme il pénètre peu dans l'aliment, son action reste localisée en surface du produit. Selon COLLIGNAN & RAOULT-WACK (1994), au cours d'une opération de DII, le sucre crée en surface un fort gradient de concentration entre le produit et la solution, d'où son action de déshydratation. Mais encore, le sucre a un effet antagoniste à la pénétration du sel dans l'aliment. Il crée un effet « barrière », non seulement parce qu'à la surface, le sucre provoque un déficit en eau disponible pour le sel, mais encore parce qu'il a un effet d'obstruction à la pénétration du sel de par son encombrement stérique. Ainsi, le sucre permet un ralentissement, donc un contrôle, de l'imprégnation en sel. Son rôle est purement technologique même si quelques traces de sucre se retrouve dans l'aliment.

L'intérêt du doucheage est multiple puisque la DID permet :

- ⇒ un traitement homogène des produits,
- ⇒ une rapidité du traitement,
- ⇒ la diminution des volumes de solution mis en œuvre,
- ⇒ une mise en œuvre aisée du procédé tant en continu qu'en discontinu.

### 2.1.2. Mise en œuvre

Suite au dépôt d'un brevet (MAROUZE *et al.*, 1996), la mise en œuvre du procédé de DID a été développée par le CIRAD dans un premier temps au laboratoire puis à l'échelle d'un prototype industriel. Les choix techniques retenus ont permis d'exploiter les nombreux avantages que procurent la DID par rapport au salage-séchage classique.

#### Support des pièces de poisson

La matière première (filet ou longe de poisson) repose sur des claies métalliques spécifiques. Des travaux antérieurs ont mis en évidence l'importance de la forme et de la taille des claies ainsi que la taille des mailles de la toile métallique.

Caractéristiques des claies de DID :

- ⇒ dimensions de 600 mm × 300 mm et 30 ou 60 mm en hauteur,
- ⇒ toile métallique de maille 12,5 mm de côté,
- ⇒ ondulations en forme de canaux parallèles de la toile métalliques (de 2 à 6 vagues suivant le calibre de la matière à traiter),
- ⇒ bâti et toile en acier inox,
- ⇒ profil du bâti permettant l'empilement des claies.

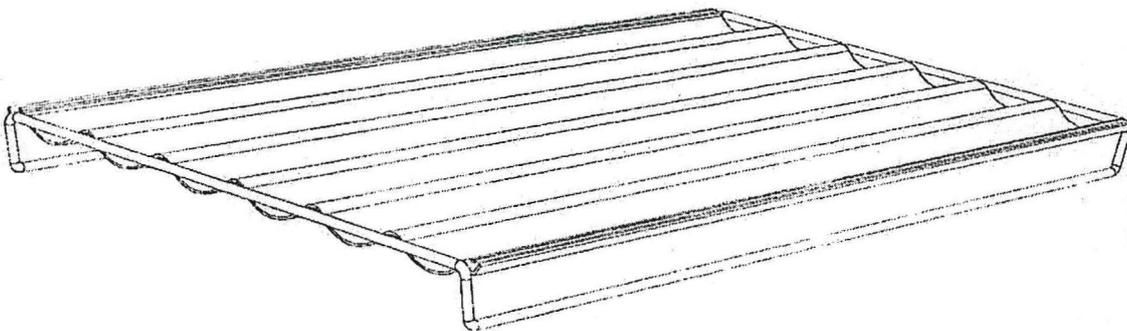


FIGURE 3 – CLAIE UTILISEE POUR LE PROCEDE DE DID [1].

Les ondulations constituent des logements aptes à recevoir les produits à traiter et permettent de canaliser l'écoulement de la solution de la claie supérieure sur la claie inférieure. La taille des mailles de la toile métallique offre une résistance à l'écoulement de la solution permettant de se rapprocher des conditions de l'immersion. La figure suivante illustre l'écoulement de la solution simulant une immersion dynamique du produit.



FIGURE 4 – COUPE D'UN FILET MONTRANT L'ECOULEMENT DE LA SOLUTION.

## Pilote de DID

Le pilote de DID de laboratoire fonctionne en batch. Ainsi pour chaque cycle de DID, une pile de claies (10 claies de 60 mm ou 20 claies de 30 mm) doit être chargée, traitée puis déchargée. Le douchage est réalisé à faible pression et fort débit grâce à une pompe centrifuge (environ 4 m<sup>3</sup>/h), afin de traiter une grande quantité de produit sans les endommager mécaniquement et sans favoriser l'apparition de mousse. Le pilote est constitué d'un caisson de douchage de surface 0,2 m<sup>2</sup>. La face inférieure du caisson est percée de trou dont la forme et le diamètre permettent un écoulement rapide de la solution par gravité sans pour autant générer une forte turbulence. L'espace sous le caisson de douchage permet le chargement des claies. Un bac situé en partie basse permet de récupérer la solution avant son renvoi par la pompe dans le caisson de douchage. L'ensemble du pilote est construit en acier inox 316 L.

Le pilote industriel reprend les mêmes éléments mais permet un traitement en continu : un empileur superpose automatiquement les claies, la pile de claies avance sur un convoyeur tout en étant douchée, puis après rinçage par douchage à l'eau glacée, un dépilleur dispose les claies pour un ressuyage sous lame d'air.

### 2.1.3. Solution concentrée utilisée en DID

La solution utilisée en DID est dite ternaire puisque composée d'eau, de sel et de sirop de glucose. La solution est saturée en chlorure de sodium soit 360 g/L d'eau à 20°C. La concentration en sirop de glucose est variable suivant le type de poisson à traiter. En effet, suivant le calibre des pièces et la richesse de la chair en matière grasse, le taux de déshydratation pour une même imprégnation en sel peut être ajusté via le poids moléculaire et/ou la concentration en sirop de glucose choisis.

Le vieillissement de la solution lors des différents cycles de DID nécessite soit son rejet, soit sa régénération. Le rejet systématique de solutions usagées posent des problèmes environnementaux et génère des coûts de fonctionnement élevés au regard du prix du sirop de glucose notamment. La régénération, même si elle a un coût, permet non seulement de réduire les problèmes liés au rejet de saumures, mais permet aussi de maintenir les qualités sanitaires et technologiques de la solution à un niveau supérieur. Lors de la DID, la solution s'enrichit aussi bien de solutés et de débris cellulaires provenant du poisson, que de la flore de surface provenant de l'action mécanique de lessivage. A contrario, la solution s'appauvrit en sel par imprégnation de la chair, et dans une moindre mesure en sirop de glucose. Ce dernier, sous l'effet de son poids moléculaire migre très peu, environ 0,5% de la masse du poisson (DEUMIER *et al.*, 1996). Il est donc nécessaire de réajuster la concentration en solutés dans la solution (saturation en sel, concentration définie en sirop de glucose) et de la débarrasser des contaminants microbiologiques et biochimiques. Plusieurs techniques ont été étudiées (DEUMIER *et al.*, 1996) ; il apparaît que des systèmes simples comme la filtration frontale couplée à un cycle d'acidification-neutralisation de la solution permettent une régénération acceptable. L'utilisation d'un saturateur à sel par percolation doit suffire à maintenir une concentration saturante de chlorure de sodium dans la solution. Seul le réajustement à une concentration déterminée du taux de sirop de glucose semble poser problème, en effet aucun système simple et précis n'a été testé jusqu'alors.

## **2.2. Pilote de fumage à froid**

Les études antérieures menées au CIRAD ont montré que le fumage à froid pouvait être mise en œuvre de manière simple. Les avantages liés au fumage à froid sont nombreux :

- ⇒ bonne conservation de la texture initiale de la chair (pas de dénaturation par cuisson),
- ⇒ détoxification de la fumée par condensation d'une grande partie des goudrons et HAP cancérigènes tel que le benzo-a-pyrène,
- ⇒ déshumidification par condensation dans le cas où l'air ambiant est trop humide (cas fréquent en milieu tropical).

Pour réaliser un fumage à froid, il faut disposer d'un générateur de fumée indépendant, d'un système de refroidissement de la fumée et d'une cellule de fumage proprement dite. Plusieurs essais ont été réalisés pour définir un système de refroidissement simple et efficace (ATHANASE, 1999). L'utilisation d'un tube en acier d'une longueur de 3 mètres pourvu d'une vis sans fin permet un bon refroidissement : la turbulence générée par la vis sans fin à l'intérieur du tube augmente de façon significative le coefficient d'échange thermique entre la fumée et l'air ambiant. Néanmoins pour abaisser la température de la fumée suffisamment bas, c'est à dire à une température inférieure à 15°C, il faut compléter le système de refroidissement par un échangeur thermique fumée/eau glacée. Des essais montrent que l'on peut atteindre une température de fumée de 17°C environ par aspersion du tube avec de l'eau glacée.

## **2.3. Valorisation des procédés innovants**

### En milieu industriel

Suite aux essais sur le prototype industriel de DID couplé à un fumage électrostatique, l'ensemble du fonctionnement du procédé a été validé et une licence d'exploitation a été acquise par l'équipementier ARBOR Technologies. Deux lignes de production industrielles d'une capacité de 500 kg/heure sont actuellement opérationnelles :

- ⇒ production de hareng fumé par la société LEDUN en Haute Normandie,
- ⇒ production de saumon fumé par la société SAGRA en Espagne.

### En milieu artisanal

Au niveau artisanal, les concepts de la DID et du fumage à froid peuvent être adaptés par modification des pilotes de laboratoire existants (DID et fumage à froid). En effet, ces derniers présentent une capacité proche de celle exigée par l'activité artisanale de fumage du poisson (environ 50 kg de produit fini par jour, voire par semaine). Néanmoins, l'ensemble des contraintes liées à la maîtrise du procédé telles que la gestion des solutions concentrées ou l'obtention d'une fumée froide en quantité et qualité satisfaisantes, nécessite de valider des solutions techniques à la fois simples d'emploi, peu coûteuses et efficaces.

Dans cette optique, la conception de l'équipement est guidée par le souci de simplification de l'utilisation du matériel, un coût de fonctionnement minimal tout en visant une qualité de produit en rapport avec les performances obtenues en milieu industriel.

#### **2.4. Points techniques sensibles lors de la mise en œuvre du procédé**

Lors de la conception puis de la mise en œuvre de l'équipement destiné à l'artisanat, plusieurs points ayant une influence importante sur la maîtrise du procédé doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Tout d'abord, le climat est d'une importance fondamentale puisque l'équipement est destiné à fonctionner en zone tropicale où température et humidité peuvent être très élevées. La DID permettant simultanément le salage et le séchage du produit, les problèmes inhérents au séchage par entraînement en enceinte traditionnelle ne se posent pas. L'opération de DID doit seulement s'effectuer dans un atelier réfrigéré (+10°C) pour satisfaire aux bonnes pratiques de travail.

Concernant la DID proprement dite, l'attention doit se porter sur la maîtrise de la gestion de la solution concentrée. La variation de sa composition dans le temps doit être aussi faible que possible pour maintenir une production régulière en terme de taux de salage et de déshydratation. Ainsi, le système doit assurer une saturation continue de la solution en sel. Une procédure doit également permettre le réajustement du taux de sirop de glucose à la concentration cible à l'issue de chaque cycle de DID ou de chaque journée de production. De plus, la solution doit être filtrée afin de la débarrasser de tous les contaminants entraînés à la surface du produit par actions mécanique et chimique :

- ⇒ pré filtration en ligne dans le but d'éliminer les contaminants macroscopiques susceptibles de gêner rapidement le fonctionnement normal de l'équipement pendant le douchage,
- ⇒ filtration à l'issue de chaque cycle de DID dans le but de clarifier la solution tant aux niveaux microbiologique que biochimique.

La procédure doit également prévoir un traitement physique ou chimique bactéricide permettant de réduire significativement la flore dans la solution. La mise en œuvre de ce traitement doit apporter l'assurance que la solution est quasi-stérile.

Au fumage, les points à prendre en compte sont nombreux. Au niveau du générateur, la composition de fumée produite (richesse en composés phénoliques, rapport phénols/acides organiques/composés carbonylés) est fonction de la température de combustion dans le foyer. Celle-ci est essentiellement dépendante du débit d'air entrant dans le foyer, de la fragmentation et de l'humidité du bois. Le générateur de fumée doit donc disposer d'un dispositif actif ou passif permettant le contrôle du débit d'air entrant. La quantité de fumée produite dépend essentiellement du débit de sciure consommée. La durée de fumage étant proportionnelle à la densité de fumée, celle-ci doit être maximale : la maîtrise du débit de fumée aide à réguler l'opacité dans la cellule de fumage.

La capacité de refroidissement de la fumée doit être suffisante pour obtenir une température de fumée de l'ordre de 10°C environ. Le refroidissement par échange de chaleur fumée/air peut être complété par un échangeur fumée/eau afin de contrôler de manière plus confortable la température de fumée.

Au niveau de la cellule de fumage, l'entrée de fumée doit se faire en partie basse et l'extraction en partie haute pour obtenir une bonne homogénéité de fumage et un bon tirage. Si la convection naturelle est insuffisante, l'extraction de fumée peut être forcée par une extraction directe ou indirecte par tube de Venturi, et apporter ainsi un contrôle sur le débit de fumée. En milieu tropical, l'isolation de la cellule doit être suffisante pour éviter une remontée en température de la fumée ; si besoin est, un groupe froid peut servir d'appoint pour le maintien en température de la cellule. Enfin, une résistance amovible dotée d'un thermostat placé dans la partie basse de la cellule de fumage est souhaitable dans le cas d'un fumage « semi-chaud » (vers 25-40°C) ou dans le cas d'un re-conditionnement en température de la fumée déshumidifiée par refroidissement.



# **PARTIE C**

**Etude et amélioration du  
fonctionnement du  
prototype CIRAD**



# 1. Conception et mise en œuvre du prototype artisanal

Grâce aux études antérieures sur la mise en œuvre de la DID et du fumage à froid, la conception de l'équipement et le choix du matériel de régénération et de réajustement ont été facilités. Le point suivant décrit la phase de conception, le matériel utilisé et son fonctionnement. Les schémas des différents modules sont présentés dans l'annexe D.

## 1.1. Description et choix techniques retenus

### 1.1.1. Le pilote de DID artisanal

Réalisé sur la base du pilote de laboratoire, le pilote artisanal intègre toutes les innovations issues des expériences passées. Il comprend :

- en partie haute, un caisson de douchage en inox de 650 mm × 350 mm soit une surface de 0,23 m<sup>2</sup>, percé de 774 trous emboutis de 2 mm de section. La forme des trous permet un écoulement rapide de la saumure sans turbulence,

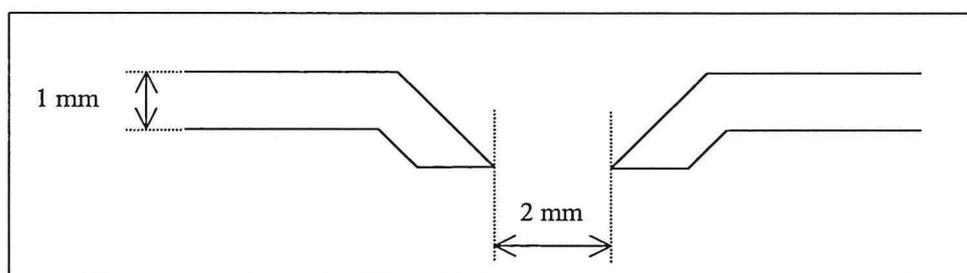


FIGURE 5 – FORME DES TROUS EMBOUTIS DANS LA TOLE INOX DU CAISSON DE DOUCHAGE.

- immédiatement sous le caisson de douchage, une cellule de douchage équipée de deux glissières téflonnées permettant simultanément le chargement, le traitement et le déchargement de piles de 10 claies de 600 mm × 300 mm × 60 mm (ou 20 claies 600 mm × 300 mm × 30 mm). Les cotés de la cellule sont fermés par 4 portes inox dont 2 sont coulissantes pour le chargement et le déchargement des claies via les glissières, et les 2 autres sont amovibles pour faciliter le nettoyage,
- en partie basse de la cellule de douchage, un bac inox dont le fond incliné dispose en son centre d'une ouverture circulaire de 345 mm de diamètre, permettant une convergence rapide de la solution,
- sous le bac inox, un tamis *Gantois* tout inox de diamètre 450 mm et de 100 mm de hauteur équipé d'une toile de 500 µm d'ouverture, recevant la totalité de la solution provenant du bac supérieur,
- sous le tamis, un bac de stockage de la solution dont le fond incliné est équipé d'un orifice de vidange,

- une pompe centrifuge carénée de marque *Inoxpa* (puissance : 2,5 kW, rpm :1500). Par l'intermédiaire d'un flexible annelé de 30 mm de diamètre, la pompe est reliée côté aspiration à l'orifice de vidange du bac de stockage situé dans la partie basse du pilote et côté refoulement au caisson de douchage situé en partie haute du pilote.

Il est à noter que toute l'armature et tous les éléments du pilote sont en acier inoxydable 316 L, assurant ainsi une bonne résistance à la corrosion.

### 1.1.2. Le système de régénération combinant filtration frontale et acidification

Pour prolonger la durée de vie de la solution ternaire, plusieurs systèmes de régénération ont été testés. Le système présentant le meilleur compromis entre le coût et l'efficacité est la combinaison d'une filtration frontale sur filtre poche et d'un cycle alternant acidification à pH inférieur à 2 puis neutralisation de la solution (DEUMIER *et al*, 1996).

#### Filtration frontale

Après examen des modèles de filtration existant sur le marché, le système de filtration par filtre poche *X100B* de *FSI* a été retenu. Il se compose d'un corps de filtre en polypropylène percé de deux orifices filetés de 2 pouces de diamètre et d'un couvercle à visser équipé d'une jauge de pression. Un panier plastique s'insère dans le corps de filtre et sert de support au filtre poche. Le système supporte une pression et une température maximales respectivement de 6 bars et de 43°C. Les filtres poche ont une surface filtrante de 0,22 m<sup>2</sup> et sont disponibles avec des porosités de 1, 5, 10, 25, 50, 75 et 100 µm. Une pompe de transfert de marque *Deloule* (puissance : 0,25 kW, rpm :1400) assure l'écoulement de la solution sous pression au travers de la poche filtrante.

Il s'est avéré qu'au cours des essais, la pression en amont du filtre poche est restée nulle, traduisant un colmatage très faible de la membrane du filtre poche. Mais, la faible pression produite par la pompe de transfert ne permet pas de chasser toute la solution au travers du filtre, d'où la perte d'un volume de solution non négligeable à chaque filtration. Ainsi, pour ce type d'utilisation, une pompe du type "pneumatique à membrane" permettrait d'assurer une pression plus importante à la surface du filtre et donc de récupérer une fraction de filtrat plus conséquente. L'inconvénient est que ce type de pompe coûte environ 2 fois plus cher que la pompe centrifuge actuellement utilisée. Le tableau suivant donne le détail du prix des éléments composant le système de filtration.

Composant	Prix HT (métropole)
Corps de filtre et support de filtre (modèle <i>X100B</i> de <i>FSI</i> )	3150,00
Pompe de transfert de marque <i>Deloule</i>	4100,00
Raccords et vannes PVC	300,00
Flexible annelé diamètre 25 mm	100,00
Support inox de fixation des éléments	2500,00
<b>TOTAL</b>	<b>10150,00</b>

TABLEAU 6 – COÛT DÉTAILLÉ DU DISPOSITIF DE FILTRATION FRONTALE PAR POCHE FILTRANTE.

Les essais ont montré que la filtration frontale ne réduisait pas la charge bactérienne de la solution, mais au contraire était susceptible d'augmenter la flore totale surtout lorsque le filtre poche est réutilisé. Cependant, tout l'intérêt de la filtration réside dans l'élimination des contaminants macroscopiques et microscopiques tels que les globules gras et les micelles.

La filtration a donc un rôle technologique et se traduit par une clarification de la solution et une réduction de la production de mousse à l'agitation.

#### Le système de régénération par acidification et neutralisation

Pour assurer une qualité microbiologique satisfaisante et améliorer les performances de la filtration, la régénération de la solution est complétée par un cycle d'acidification à un pH inférieur à 2 suivi d'une neutralisation. On emploie de l'acide chlorhydrique concentré 4N pour l'acidification et de l'hydroxyde de sodium concentré 4N pour la neutralisation. Le contrôle du pH se fait grâce à un pH-mètre *WTW*.

#### 1.1.3. Le système de maintien de la saturation en chlorure de sodium

Lors du douchage, le transfert de sel de la solution vers le poisson conduit à un appauvrissement sensible de la teneur en sel de la solution. Le maintien de la saturation en sel est nécessaire au cours de la DID et a deux objectifs :

- ⇒ assurer une cinétique de salage optimale,
- ⇒ simplifier le calcul lors du réajustement en sirop de glucose.

Initialement, le système testé lors des essais en milieu industriel permettait le maintien de la saturation en ligne par dérivation de la solution sur un saturateur. Composé d'un cylindre inox fermé aux deux extrémités par des tamis et contenant des pastilles de sel pour adoucisseur, le dispositif permettait d'atteindre la teneur saturante par percolation de la solution sur le gâteau de pastilles de sel. Dans ce cas, la re-saturation était bonne (surface spécifique d'échange suffisante entre solution et sel) mais onéreuse (pastilles de sel pour adoucisseur au minimum 30% plus cher que le sel cristallisé).

Fort de ces constatations, le système mis en place pour le pilote artisanal de DID a été considérablement simplifié : du sel cristallisé est directement placé sur le tamis *Gantois* 500 µm du pilote et la saturation s'entretient au cours de la DID par percolation de la solution sur le lit de cristaux. La quantité de sel à placer sur le tamis en début de DID est fonction de la masse de poisson traitée et de la teneur en sel finale du produit. En général, on place une quantité légèrement excédentaire par rapport au besoin pour s'assurer de la saturation effective de la solution. Etant donné que la granulométrie du sel cristallisé est assez faible (environ 1 mm) la vitesse de dissolution est très rapide, et dans tous les cas, supérieure à la vitesse de salage du poisson. Ainsi, la solution est saturée en sel à tout instant.

#### 1.1.4. Le système de réajustement de la teneur en sirop de glucose

La concentration en sirop de glucose varie nécessairement lors de la DID par la migration aussi faible soit-elle dans le poisson et par la dilution suite à la déshydratation du produit. Le réajustement de la concentration est donc nécessaire pour maintenir constantes les caractéristiques de salage et de déshydratation de la solution ternaire.

Au laboratoire, il est facile de connaître le taux de sirop de glucose soit par mesure directe (HPLC) soit par mesure indirecte (mesure de la teneur en eau et en sel puis déduction de la teneur en sucre). Cependant, dans l'optique d'une utilisation artisanale, le réajustement doit être rapide, peu coûteux et fiable.

Le système de réajustement testé se base sur la mesure de la masse volumique de la solution à l'aide d'un densimètre de précision. Cet appareil, couramment utilisé dans le milieu viticole pour le pesage des moûts, permet une lecture de la densité avec une précision de +/- 1 g/L. Après avoir déterminé la relation entre la densité de la solution et sa concentration en sirop de glucose à température donnée (sous réserve que la solution soit saturée en sel), il est possible de donner sa composition en eau, sel et sirop de glucose. Dans un premier temps, il faut donc établir la relation entre masse volumique et concentration en sirop de glucose, puis dans un second temps, créer une feuille de calcul donnant les quantités d'eau, sel, sirop de glucose nécessaires pour préparer une solution ternaire de masse donnée ou pour corriger une solution existante.

#### 1.1.5. Le pilote artisanal de fumage à froid

Pour obtenir fumage à froid, une température dans l'enceinte de fumage doit être inférieure à 30°C, ce qui implique un refroidissement préalable de la fumée. Suite à des travaux sur ce sujet, le pilote artisanal a été conçu sur le principe du foyer indirect :

- un générateur de fumée de marque *Thirode* (Modèle FCS 90 à sciure) assure la production de fumée. Le générateur est entièrement en acier inoxydable. Il intègre en partie supérieure une trémie et un bras de distribution commandé par un temporisateur et un capteur de fin de course (le temporisateur déclenche la rotation du bras et le capteur de fin de course l'arrête). Sous la trémie se trouve une résistance électrique sur laquelle chute la sciure lorsque le bras est actionné. Une entrée d'air se situe au niveau de la résistance permettant ainsi une combustion lente par pyrolyse de la sciure. En partie basse du générateur, un bac permet de recueillir les cendres après raclage de la surface de la résistance. En façade se trouve le tableau de commande : minuterie de réglage de la fréquence de rotation du bras (temporisateur réglable sur 10 positions), bouton de distribution de la sciure (3 positions : arrêt (I), marche temporisée (II), marche manuelle (III)). A l'arrière du générateur, l'entrée d'air au foyer peut être régulée en fermant plus ou moins le volet d'obturation. L'évacuation de fumée se fait par une ouverture située à l'arrière du foyer,

- l'échangeur thermique relie le générateur à la cellule de fumage. Il est constitué d'un tube en acier de 88,9 mm de diamètre externe et de 2350 mm de longueur, et d'une vis sans fin placée à l'intérieur du tube sur toute sa longueur. La partie terminale du tube traverse un bac en acier de 120 litres environ. Le transfert thermique est amélioré grâce à la vis sans fin qui augmente la turbulence de la fumée à l'intérieur du tube. L'échange thermique se fait entre la fumée et l'air ambiant dans la première partie du tube et entre la fumée et l'eau dans la deuxième partie du tube immergé dans le bac à eau. On peut obtenir une large plage de température de fumée au niveau de la cellule de fumage selon que l'on favorise plus ou moins l'échange thermique. L'emploi ou non d'eau (glacée ou à température ambiante) dans le bac et le contrôle du débit de fumée permettent de moduler le flux thermique et d'assurer une maîtrise suffisante de la température de fumée refroidie. Le tube dispose en amont d'une purge destinée à évacuer les condensats (eau, goudrons...),
- la cellule de fumage, réalisée sur la base d'une armoire à froid positif de marque *Liebherr* (modèle Gastroline ES 562 litres), permet la disposition de 10 claies en acier inox de dimensions normalisées GN 2/1 (53 cm × 65 cm) soit une surface de fumage théorique de 3,45 m<sup>2</sup>. L'armoire est réalisée extérieurement en acier inox 8/10<sup>ème</sup> et intérieurement en ABS et l'isolation est assurée par des plaques de polyuréthane de 30 mm d'épaisseur. L'armoire dispose d'un groupe froid permettant d'imposer, si nécessaire, une température de +2 à +15°C, ainsi que d'une résistance amovible de 500 watts. L'entrée de fumée se situe en partie basse de la cellule à environ 15 cm du fond, la sortie est située dans le plafond de la cellule. La sortie de fumée, reliée à une cheminée d'évacuation, est équipée d'une ventilation pouvant travailler en extraction directe ou indirecte. La convection forcée permet de pallier les éventuelles insuffisances liées au tirage naturel en imposant un débit volumique de fumée en sortie.

La porte de la cellule de fumage est pourvue d'une vitre permettant en cours de traitement d'apprécier la densité de la fumée et de surveiller la coloration des produits. L'ensemble du pilote est équipé de piquage permettant grâce à des thermocouples de connaître la température de fumée :

- ⇒ à la sortie du foyer,
- ⇒ avant le bac à eau,
- ⇒ après le bac à eau,
- ⇒ dans la cellule de fumage.

## **1.2. Fonctionnement et mise en œuvre**

Le synoptique de transformation du poisson suivant le procédé CIRAD est présenté en annexe E et montre le séquencage des opérations lors de la mise en œuvre.

### **1.2.1. DID et gestion de la solution ternaire**

L'opération unitaire de DID est très simple à mettre en œuvre et suit les procédures décrites dans l'annexe E. En revanche, la gestion de la solution est plus délicate et il importe de suivre les différentes étapes de régénération et réajustement de la solution sous peine de détérioration rapide de la qualité de la solution de traitement et du produit obtenu. Lors du douchage, la pompe aspire la solution dans le bac de stockage et la refoule dans le caisson de douchage. La solution s'écoule ensuite par gravité sur les produits à traiter, passe sur le tamis 500  $\mu\text{m}$  (filtration et percolation sur le lit de cristaux de sel) et retourne au bac de stockage.

### **1.2.2. Fumoir à froid**

L'opération unitaire de fumage à froid suit les procédures décrites dans l'annexe E. Le fonctionnement du fumoir est assez empirique et il est important de bien comprendre son fonctionnement pour pouvoir effectuer les bons réglages et ainsi obtenir un fumage régulier, rapide et de bonne qualité. Lors du fumage, quatre paramètres sont directement contrôlés par l'opérateur :

- ⇒ l'admission d'air au foyer,
- ⇒ le débit de sciure au générateur,
- ⇒ le débit de fumée en sortie de cellule,
- ⇒ la température de la fumée.

Lors du fumage, il faut se placer dans les conditions optimales à savoir, une température de fumée en cellule inférieure à 30°C, une humidité de fumée d'environ 70% et une densité de fumée maximale. Tout d'abord, il est important d'attendre que le générateur soit à une température suffisante pour que la pyrolyse dans le foyer soit suffisante en qualité et en quantité ; on estime que ces conditions sont atteintes lorsque la température en tous points du système est stabilisée. Il faut en général 2 heures pour atteindre un régime thermique stable. Ensuite, en jouant sur les réglages, on peut maintenir des conditions homogènes.

## 2. Observations sur le fonctionnement de l'équipement

### 2.1. Bilan des problèmes rencontrés

#### DID

Le pilote de DID étant déjà bien rodé à l'origine du projet, il n'a pas posé de problèmes importants lors des différents essais. On regrettera cependant la perte de solution inutile lorsque la pile de claies est déchargée en fin de DID. En effet, la pile se retrouvant sur les glissières de déchargement, la solution qui s'écoule des filets et des claies tombe directement sur le sol.

#### Gestion de la solution

Le matériel choisi pour la gestion de la solution s'est révélé fiable et efficace. Après filtration à 1  $\mu\text{m}$ , la solution retrouve sa limpidité, ne contient aucune particule visible et la tendance à la formation de mousse diminue nettement dans le caisson de douchage et sur les produits traités. Le système de saturation en sel est également simple et efficace : la saturation en sel est permanente pendant toute la DID et le passage de sel dans la pompe (cristaux de granulométrie inférieure à 500  $\mu\text{m}$ ) n'occasionne aucun dégât, mais le nettoyage doit être plus poussé pour éviter des dépôts par cristallisation sur l'acier inoxydable et la corrosion qui en découlerait. Le réajustement de la concentration en sirop de glucose à l'aide du densimètre et de la feuille de calcul Excel est très simple et aussi performante que le réajustement au laboratoire, puisque sa précision est d'environ 3 à 5% (soit plus ou moins 10 à 16 g de sirop de glucose par litre d'eau). Les remarques sur la mise en œuvre sont les suivantes :

#### ☞ *Système de filtration*

La mise en œuvre par l'opérateur est délicate, étant donné que tous les éléments sont dissociés (pompe, corps de filtre, fût, pilote de DID). Le système doit être fixé sur une plateforme.

#### ☞ *Réajustement en sirop de glucose*

L'utilisation d'un densimètre en verre fin et d'une éprouvette en verre en situation de production entraîne des risques importants de casse et de contamination du produit traité. La précision de la lecture de la densité est très dépendante de l'état de repos de la solution. En effet, la richesse en solutés est telle que l'incorporation d'air sous agitation n'est pas négligeable et peut diminuer significativement la masse volumique à la lecture. Il est donc impératif de mesurer la densité de la solution au repos (après une nuit de stockage, par exemple, car le passage de +10 à +2°C associé au temps de repos facilite le dégazage) : on peut, par exemple juste avant l'acidification en fin de journée, prélever une éprouvette de 500 ml de solution et réaliser la mesure le lendemain matin. La précision de lecture est limitée par le modèle de densimètre utilisé (précision de 2g/L d'eau) mais en contrepartie, l'échelle de lecture est suffisante pour toutes les concentrations usuelles en sirop de glucose. Enfin, ne disposant pas de balance de portée suffisante, le pesage de la solution est fastidieux puisqu'il faut fractionner la solution dans différents bacs entraînant autant d'erreurs de manipulation et de lecture susceptibles de fausser la détermination de la masse réelle.

#### ☞ *Acidification-neutralisation*

La manipulation de solutions acide et basique très concentrées (HCl et NaOH) présente des risques de brûlures pour l'opérateur. Les opérations d'acidification et de neutralisation devront donc s'effectuer avec un minimum d'équipement spécifique (pompe doseuse par exemple) afin d'assurer la sécurité du personnel.

#### Fumage à froid

Le pilote de fumage à froid ayant été conçu pour ce projet, c'est lors de son utilisation que les problèmes les plus importants sont apparus. Quelques problèmes ont été résolus rapidement. Ainsi, le refroidissement de la fumée a d'abord été réalisé avec la vis sans fin et le bac rempli d'eau à température ambiante (soit 25 à 30°C). La température dans l'enceinte est descendue sans problème en dessous de 30°C (environ 25°C), mais à la suite de défauts organoleptiques constatés sur les filets, il a fallu augmenter le refroidissement en utilisant de l'eau glacée et de la glace pilée. Pour maintenir suffisamment longtemps une température de glace fondante, le bac a dû être isolé sur toute sa surface avec des plaques de polystyrène expansé de 50 mm d'épaisseur. L'isolation permet ainsi de garder de la glace dans le bac pendant plus de 12 heures malgré une température ambiante de 30°C. Pour améliorer encore le refroidissement, on peut générer de la turbulence dans le bac avec un circulateur d'eau.

L'extraction de fumée n'a pu se faire selon le principe de Venturi, il a donc fallu placer l'extracteur en extraction direct. Le matériau composant l'extracteur supporte finalement la condensation de fumée sans se détériorer et sans dysfonctionnement.

#### ☞ *Générateur*

Au niveau du générateur, le capteur de fin de course, qui provoque l'arrêt de la rotation du bras de distribution de la sciure après une rotation, a subi des défaillances régulières à cause de l'encrassement provoqué par la condensation de l'eau et des goudrons. Par conséquent, il faut veiller au bon fonctionnement du temps de rotation du bras et fréquemment actionner le capteur manuellement pour le dégripper. Il est certain que ce capteur devrait être placé à un endroit moins exposé à l'encrassement dans le cas d'une re-conception du générateur.

Des « coups de feu » peuvent se produire au niveau de la chambre de combustion, et les flammes sortent alors violemment par l'admission d'air. Ce problème se produit quand la trémie de sciure est trop chargée. Il est donc préférable de l'alimenter à moitié.

#### ☞ *Echangeur thermique*

La pente du sol où est implanté le pilote est telle que le tube de refroidissement est légèrement incliné vers la cellule de fumage. Pendant le fumage, les condensats s'écoulent donc librement dans le fond de la cellule où ils stagnent. Il en résulte une reprise en humidité de la fumée préalablement déshumidifier par refroidissement au niveau du bac.

#### ☞ *Enceinte de fumage*

L'intérieur de la cellule en ABS supporte très mal la fumée. En effet, le plastique jaunit et devient cassant, il se détériore rapidement et se nettoie difficilement. Le fond de l'enceinte n'est pas équipé de vanne de purge.

Lors de la re-conception de l'enceinte, il faudra prévoir d'un part, un matériau résistant à l'agressivité de la fumée (notamment aux phénols et aux acides), et d'autre part, un fond d'enceinte en forme de pointe de diamant avec une vanne pour faciliter le nettoyage et l'évacuation des liquides.

Malgré la vitre, la densité de fumée est difficilement perceptible. La condensation au niveau des pâles de l'extracteur et dans le conduit d'évacuation s'écoule dans l'enceinte et salit les produits.

## **2.2. Améliorations proposées**

### DID

⇒ Souder une tôle inox sous la structure supportant les glissières de déchargement pour guider la solution qui s'écoule des filets et des claies vers le bac de stockage (solution déjà adoptée sur un équipement similaire).

### Gestion de la solution

⇒ Fixer tous les composants sur une table inox, et étudier un système de telle manière que les opérations de filtration-remplissage et filtration-vidage ne nécessitent que la manipulation de vannes et la marche/arrêt de la pompe de transfert. Il faut veiller néanmoins à ce que les volumes morts soient les plus faibles possibles.

⇒ Densimètre incassable en polycarbonate.

⇒ Eprouvette plastique PMP (polyméthylpentène) incassable.

⇒ Lecture de la densité après une nuit de repos de la solution à +2°C.

⇒ Densimètre de précision (division de 1 voire 0,5 g/L).

⇒ Balance industrielle de précision (portée minimale de 50 kg et précision de 2 g).

⇒ Pompes doseuses pour l'addition des acides et bases concentrés.

### Fumage à froid

⇒ Remplacement du capteur de fin de course par un modèle plus robuste ou re-conception du système de temporisation.

⇒ Placer une purge sur le tube acier de l'échangeur thermique entre la sortie du bac de refroidissement et l'entrée de la cellule de fumage. Garder la pente inclinée vers la cellule pour éviter que les condensats ne coulent vers le foyer et ne réhumidifient la fumée.

⇒ Lors de la re-conception de l'enceinte de fumage : prévoir un intérieur en inox avec glissières embouties, un système d'éclairage intérieur et une plaque d'inox inclinée placée juste en dessous de la sortie de fumée pour recueillir les condensats et les guider vers une vidange à prévoir en fond de cellule.

⇒ La re-conception du générateur de fumée est rendu nécessaire du fait de l'absence de modèle adéquat sur le marché et d'un surdimensionnement du générateur existant.



# **PARTIE D**

**Etude et optimisation des  
conditions de traitement  
sur des poissons locaux**



# 1. Matériels et méthodes

## 1.1. Caractéristiques de la matière première utilisée

Les différentes espèces utilisées sont d'une part, le hareng pour les essais préliminaires à Montpellier, et d'autre part, le tilapia doré, le thon blanc et la truite de montagne pour les essais à La Réunion. Le tableau ci-dessous donne la composition biochimique moyenne de chaque espèce :

Nom commun	Eau %	Protéines %	Lipides %
Hareng	69,0	17,3	11,3
Tilapia doré	80,0	18,0	0,5
Thon blanc	74,0	17,5	6,5
Truite de montagne	68,0	17,9	12,0

TABLEAU 7 – COMPOSITION BIOCHIMIQUE MOYENNE DES ESPECES TRAITEES [4].

On remarque dans ce tableau, d'une part, que la teneur en lipides est en relation inverse avec la teneur en eau de la chair, et d'autre part, que la somme des fractions eau et lipides atteint invariablement la moyenne de 80%. Cette relation est couramment utilisée par les professionnels pour, à partir de la teneur en eau, en déduire la teneur en graisse des produits. Il est capital de connaître approximativement le taux de lipides puisqu'il va, avec le calibre du produit, conditionner fortement les durées de douçage et de fumage.

Le hareng se présente sous forme de filets congelés par plaque de 20 kg environ. La masse moyenne de ces filets est de 50 grammes. Le stockage s'effectue à  $-28^{\circ}\text{C}$  et avant leur utilisation, les filets sont décongelés 48 heures à  $+4^{\circ}\text{C}$  puis rincés à l'eau glacée avant d'être traités. La particularité du hareng est de posséder un taux de lipides variable de 5 à 25% suivant la saison, ce qui en fait un poisson dit « gras ». Les filets ont donc été utilisés à Montpellier pour tester l'efficacité du système de régénération par filtration frontale.

Le Tilapia doré est un poisson tropical d'eau douce ressemblant à une carpe dont la teneur en graisse est très faible puisqu'elle n'excède pas 0,5%. La coopérative réunionnaise AQUACOOOP a fourni le poisson nécessaire pour la phase d'essai à la Réunion. Les Tilapia sont livrés fraîchement pêchés dans des bacs glacés. Leur calibre moyen est de 470 à 500 grammes par pièce. Après préparation du poisson (écaillage, éviscération, étêtage et filetage), on obtient deux filets d'un poids moyen de 80 grammes chacun (15 cm de long par 7 cm de large et 1 à 1,5 cm d'épaisseur). Le rendement au filetage est très faible pour cette espèce (rapport de la masse des filets obtenues sur la masse du poisson entier) puisqu'il n'est que de 31,2%. A la vue de ce chiffre et à la demande d'AQUACOOOP, des essais de fumage sur du Tilapia entier ont été entrepris. Dans ce cas, le poisson est écaillé, éviscéré et l'ensemble des organes de la tête sont retirés. Le rendement est alors voisin de 80% puisque le squelette et la tête ne sont pas retirés ; le produit fini a l'aspect d'un poisson entier.

Le thon blanc provient de la coopérative mahoraise COPEMAY. La matière première se présente sous la forme de longes congelées de 300 grammes (20 cm de long et 10cm<sup>2</sup> de section environ). Après décongélation 48 heures à +2°C, les longes sont rincées à l'eau glacée avant traitement. Le thon est un poisson dit « semi-gras », sa teneur en lipides avoisinant les 5%.

La truite de montagne est fournie par AQUACOOP. Les pièces dite « truite portion » sont de petit calibre, environ 170 à 180 grammes. Les poissons sont livrés frais et entiers, les filets sont obtenus de la même manière que pour le tilapia, mais contrairement à ce dernier, le rendement au filetage est bien meilleur puisqu'il atteint 70% et permet d'obtenir des filets ayant un poids unitaire de 60 grammes environ. La chair de truite contient un taux de lipides analogue à celui du hareng, soit 12% environ.

## 1.2. Les analyses

### 1.2.1. Echantillonnage

Pour les analyses physico-chimiques et bactériologiques, on prélève 3 filets ou 1 poisson entier par point pour réaliser un broyat à partir duquel on constitue 3 échantillons. Les analyses physico-chimiques portent sur les teneurs en sel et en eau du produit et les analyses bactériologiques sur la flore totale et la flore pathogène (Staphylococcus aureus, ASR, Coliformes fécaux, Salmonelles, Listeria).

### 1.2.2. Mesure de la teneur en eau

Elle est mesurée par différence de pesée entre la matière fraîche et la matière sèche. Un échantillon de 5 grammes environ est placé dans une coupelle métallique préalablement pesée. L'échantillon est ensuite placé à l'étuve à 103°C jusqu'à poids constant. A la sortie de l'étuve, il est mis 15 minutes en dessiccateur afin d'éviter une reprise en humidité lors du refroidissement. La coupelle est à nouveau pesée puis on en déduit la teneur en eau du prélèvement d'après la relation suivante (AFNOR, 1968-a) :

$$T_{\text{eau}} = \frac{((M_{\text{coup}} + \text{MH}) - (M_{\text{coup}} + \text{MS}))}{((M_{\text{coup}} + \text{MH}) - M_{\text{coup}})}$$

avec :  $T_{\text{eau}}$  teneur en eau du produit (g/100g de produit),  
 $M_{\text{coup}}$  masse de la coupelle (g),  
 MH masse de produit humide (g),  
 MS masse de produit sec (g).

### 1.2.3. Mesure de la teneur en sel

Afin d'extraire les ions chlorures de la chair, un broyat d'environ 1 gramme de chair est mis en solution dans 25 ml d'acide nitrique à 0,3 N et placé sous agitation pendant 2 heures. Il est ensuite laissé au repos pendant une heure, afin de permettre la décantation des particules en suspension.

Un chlorimètre (CORNING chloride analyser 926) mesure la différence de potentiel entre une électrode de référence et une électrode d'argent, plongées dans une solution tampon contenant 0,5 mL de l'extrait. Le complexe des ions  $\text{Ag}^+$  avec les ions  $\text{Cl}^-$  en solution. On peut alors déduire la teneur en sel de l'échantillon :

$$T_{\text{sel}} = \frac{(1,648 \cdot 10^{-4} \cdot x \cdot V)}{m}$$

avec :  $T_{\text{sel}}$  teneur en sel de l'échantillon (g/100g de produit),  
 $x$  la réponse du chlorimètre,  
 $V$  le volume de la solution d'acide nitrique (mL),  
 $m$  masse d'échantillon prélevée (g).

### 1.2.4. Mesure de la masse volumique de la solution

Au laboratoire, la masse volumique est déterminée en mesurant sur une balance de précision la masse de solution nécessaire pour remplir une fiole jaugée de 250 ml. En situation de production, la détermination rapide de la masse volumique est réalisée en plongeant un densimètre en verre de précision 2g/L (échelle de lecture : 1200 à 1400 g/L) dans une éprouvette contenant 500 mL de solution.

### 1.2.5. Mesure du pH de la solution

Le pH est déterminé à l'aide d'un pH-mètre *WTW* pH 320 muni d'une électrode combiné *WTW* Sentix 97 T à correction de température. Après étalonnage avec des tampons de pH 4 et 7, l'électrode est plongée dans la solution sous agitation.

### 1.2.6. Mesure de la turbidité de la solution

Le turbidité exprimée en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) est mesurée à l'aide du turbidimètre Ratio/XR Turbidimeter de *Hach*. Le principe de la mesure est le suivant : tout d'abord la solution est placée dans un tube spécial, qui est inséré dans l'appareil. une fois le tube mis en place, un cache opaque obture l'ouverture, afin d'éviter tout passage de la lumière ambiante. Ensuite, un faisceau lumineux passe au travers de la solution. Des détecteurs permettent alors de mesurer la lumière transmise et la lumière déviée à 90°C (HERNANDEZ *et al.*, 1991).

### 1.2.7. Analyses microbiologiques

Les analyses bactériologiques sont réalisées par le laboratoire du CRITT Agroalimentaire selon les normes AFNOR en vigueur. Pour la caractérisation de la matière première et le contrôle du produit fini, un bilan bactériologique complet est réalisé (GTX, ASR, Salmonelles, Coliformes fécaux, S. aureus et Listeria). Pour suivre l'évolution de la qualité sanitaire de la solution, on effectue un dénombrement de la flore total et une recherche de Staphylococcus aureus.

### 1.3. Traitement et expressions des résultats

#### Expression de la perte en eau (PE)

$$PE = T_{\text{eau i}} - T_{\text{eau f}} \cdot \left( \frac{m_f}{m_i} \right)$$

avec : PE      perte en eau (g/100g de produit initial),  
T<sub>eau i</sub>      teneur initiale en eau (g/100g de produit initial),  
T<sub>eau f</sub>      teneur finale en eau (g/100g de produit final),  
m<sub>f</sub>      masse finale du produit (g),  
m<sub>i</sub>      masse initiale du produit (g),

#### Expression du gain en sel (GS)

Considérant que la teneur en sel initiale de la chair est suffisamment faible pour être négligé (T<sub>sel</sub> initiale < 0,1 %), le gain en sel s'établit de la manière suivante :

$$GS = T_{\text{sel}} \cdot \left( \frac{m_f}{m_i} \right)$$

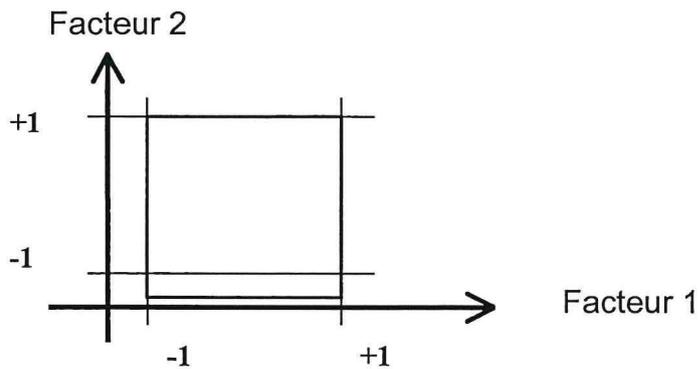
avec : GS      perte en eau (g/100g de produit initial),  
T<sub>sel</sub>      teneur finale en sel (g/100g de produit initial),  
m<sub>f</sub>      masse finale du produit (g),  
m<sub>i</sub>      masse initiale du produit (g),

#### Plan d'expérience factoriel 2<sup>2</sup>

Le plan d'expérience est utilisé pour définir les conditions optimales de DID pour chaque espèce traitée. Dans le cas du thon blanc et de la truite de montagne, la durée du traitement de DID est déduite de la cinétique de salage/séchage.

Dans le cas du tilapia en filet et entier, le choix s'est porté sur un plan d'expérience factoriel  $2^2$ . Les deux facteurs étudiés sont pour les filets, la durée de DID et la concentration en sirop de glucose et pour les poissons entiers, les durées de DID et de fumage. Pour chaque facteur étudié, deux niveaux (une borne inférieure et une borne supérieure) sont fixés par facteur définissant ainsi le domaine expérimental soit 4 points d'essai.

Les réponses sont le gain en sel et la perte en eau. On suppose qu'entre les points expérimentaux, le phénomène étudié varie linéairement. Cette hypothèse est d'autant plus vraisemblable que l'intervalle entre les bornes inférieures et supérieures du domaine est restreint. Le domaine d'étude borné est représenté par un carré au sommet duquel se situent les quatre points expérimentaux (A, B, C, D).



Les résultats des 4 essais sont rassemblés dans un tableau nommé matrice des essais. A partir de cette matrice, on calcule l'effet moyen de chaque facteur. Pour chaque facteur donné, chaque valeur de la réponse est affectée du signe correspondant dans la colonne de ce facteur. La somme algébrique obtenue est divisée par le nombre des essais, c'est à dire par quatre.

N° de l'essai	Facteur 1	Facteur 2	Moyenne	Interaction	Gain en sel	Perte en eau
A	-1	-1	+1	+1	GS A	PE A
B	+1	-1	+1	-1	GS B	PE B
C	-1	+1	+1	-1	GS C	PE C
D	+1	+1	+1	+1	GS D	PE D

TABLEAU 8 – MATRICE DES ESSAIS POUR PLAN FACTORIEL  $2^2$  [4].

Les facteurs optimaux sont déterminés d'après les réponses obtenues pour chaque facteur grâce à au système d'équation suivant :

$$GS = a_0 + a_1 \cdot F1 + a_2 \cdot F2 + a_{12} \cdot F1 \cdot F2$$

$$PE = b_0 + b_1 \cdot F1 + b_2 \cdot F2 + b_{12} \cdot F1 \cdot F2$$

Les coefficients a et b du système d'équations précédent sont calculés d'après la matrice des essais pour chaque réponse :

#### Réponse GS

Moyenne	$a_0 = (GSA + GSB + GSC + GSD) / 4$
Effet facteur 1	$a_1 = (-GSA + GSB - GSC + GSD) / 4$
Effet facteur 2	$a_2 = (-GSA - GSB + GSC + GSD) / 4$
Interaction	$a_{12} = (GSA - GSB - GSC + GSD) / 4$

#### Réponse PE

Moyenne	$a_0 = (PEA + PEB + PEC + PED) / 4$
Effet facteur 1	$a_1 = (-PEA + PEB - PEC + PED) / 4$
Effet facteur 2	$a_2 = (-PEA - PEB + PEC + PED) / 4$
Interaction	$a_{12} = (PEA - PEB - PEC + PED) / 4$

Pour les valeurs des réponses GS et PE, la résolution du système d'équation conduit à la détermination d'un couple de valeurs des facteurs 1 et 2. Pour valider le plan d'expérience, un essai de confirmation est réalisé avec les valeurs des facteurs 1 et 2 obtenues par le système d'équation.

### **1.4. Déroulement et description des essais**

#### 1.4.1. Essais préliminaires réalisés à Montpellier

Une première série d'essais préliminaires sur la régénération et le réajustement de la solution ternaire a été réalisée à Montpellier de septembre à octobre 1999, simultanément avec la conception et la fabrication du pilote de fumage à froid. Les essais ont portés sur l'étude du comportement de la solution ternaire en milieu particulièrement défavorable puisque la matière première utilisée était particulièrement grasse et déstructurée. La description et les résultats de la série d'essais suivante sont présentés en Annexe F :

- ⇒ étude de la cinétique de saturation en sel d'une solution ternaire,
- ⇒ évolution de la teneur en sel de la solution ternaire et de la matière première au cours du cycle de DID,
- ⇒ test d'un système de saturation continue en sel de la solution ternaire,
- ⇒ évolution de la turbidité de la solution et essai de régénération par filtration frontale.

#### 1.4.2. Essais réalisés sur l'équipement complet de saurissage à Saint Denis de La Réunion

Après envoi de l'équipement de fumage à froid simplifié à La Réunion, une deuxième série d'essais s'est déroulée de novembre 1999 à février 2000 à la Maison des Sciences à Saint Denis. Ces essais ont porté sur la mise en œuvre de l'équipement de DID et de l'équipement de fumage à froid avec deux objectifs distincts :

- ⇒ optimiser et valider le fonctionnement et les protocoles d'utilisation de l'équipement prototype,
- ⇒ définir et optimiser les conditions de traitements de quelques poissons locaux.

Pour la réalisation de la solution ternaire, deux types de sirop de glucose ont été testés, le SPG20 d'AVEBE et le Glucidex DE21 de Roquette.

##### 1.4.2.1. Traitements réalisés sur les filets de tilapia doré

###### Définition et optimisation des conditions de douchage

Les deux variables expérimentales *durée de traitement* et *concentration en sirop de glucose* ont été définies à l'aide d'un plan d'expérience factoriels 2<sup>2</sup>. Les variables de réponses retenues sont le gain en sel (GS) et la perte en eau (PE) du produit, puisqu'ils caractérisent les principaux transferts de matière au cours du procédé de DID. L'objectif fixé est de déterminer le couple (temps de traitement ; concentration en SPG20) permettant d'atteindre un gain en sel de 2,4% et une perte en eau de 6% sur le produit traité.

Lors du premier plan, les bornes étaient déduites de la bibliographie concernant la DII :

	Durée DID	[SPG20]
Niveau -1	20 minutes	400 g/L eau
Niveau +1	60 minutes	670 g/L eau

Le domaine du second plan d'expérience est le suivant :

	Durée DID	[SPG20]
Niveau -1	15 minutes	218 g/L eau
Niveau +1	45 minutes	516 g/L eau

Le traitement est effectué sur 3 filets par point d'expérience et les analyses sont triplées afin de s'affranchir de la variabilité de la matière première.

### Détermination de la durée de fumage optimale

La détermination du taux de fumage se fait visuellement au cours de l'opération de fumage, une dégustation permet de valider la durée de fumage ainsi que le couple (durée de douchage ; durée de fumage). Le refroidissement de la fumée se fait par l'intermédiaire de la vis sans fin et du bac rempli d'eau à température ambiante ( $T_{\text{eau}} \cong 28^{\circ}\text{C} \pm 2$ ).

### Modélisation de la durée de traitement pour le sirop de glucose Glucidex DE21

Pour comparaison, la DID est mise en œuvre avec une solution contenant du sirop de glucose DE21 de poids moléculaire moyen légèrement inférieur à celui du SPG20 (DE compris entre 22 et 30). La concentration en Glucidex est identique à celle déterminée initialement pour le SPG20 dans le plan factoriel  $2^2$ . Trois durées de douchage sont testés : 20, 25 et 30 minutes.

### Réalisation d'une production en présérie

Une petite production de filets de tilapia fumé a été réalisée sur 3 jours du 23 au 25/11/1999. Une quantité totale de 63 kg de matière première a été traitée à raison d'un cycle de douchage et d'un cycle de fumage par jour. Avec trois chargements complets pour l'opération de DID (un chargement : 90 filets, soit 7 kg en moyenne), l'impact de la position de la claie sur le gain en sel du filet a pu être validé en situation réelle de production. De même, le douchage d'une grande quantité de produit (21 kg de filets) a permis d'éprouver le fonctionnement des systèmes de régénération et de réajustement de la solution ternaire et de suivre son évolution microbiologique.

### Optimisation du saurissage par fumage dit « très froid »

Dans le but de condenser un maximum de goudrons et d'eau dans le tube de refroidissement, le bac du pilote de fumage est rempli d'un mélange d'eau glacée et de glace. Un calorifugeage, réalisé avec du polystyrène expansé d'épaisseur 50 mm, assure l'isolation du bac et maintient l'inertie thermique de la source froide.

#### 1.4.2.2. Traitements réalisés sur le tilapia entier

### Définition et optimisation des conditions de saurissage

Les deux variables expérimentales *durée de douchage* et *durée de fumage* ont été définis à l'aide d'un plan d'expérience factoriels  $2^2$ . Les variables de réponses retenues sont le gain en sel et la perte en eau du produit. Dans le cas du poisson entier, destiné à être cuit en cari, l'objectif fixé est de déterminer le couple (temps de traitement ; concentration en Glucidex DE21) permettant d'atteindre un gain en sel de 1,5% et une perte en eau de 6,5% sur le produit traité. Le traitement est effectué sur 3 poissons par point d'expérience et les analyses sont triplées afin de s'affranchir de la variabilité de la matière première.

Les bornes du domaine expérimental sont précisées dans le tableau suivant.

	<b>Durée DID</b>	<b>Durée de fumage</b>
<b>Niveau -1</b>	30 minutes	2 heures
<b>Niveau +1</b>	120 minutes	4 heures

Conditions d'essai : les flancs de chaque poisson sont incisés longitudinalement, la concentration en DE21 est de 325 g/L d'eau dans la solution de douchage, le fumage est réalisé avec un refroidissement par glace.

Impact de trois types d'incision sur le poisson entier sur l'efficacité du douchage et homogénéité de traitement entre les filets gauche et droit

La peau du poisson ralentissant les transferts de matière de par sa structure tissulaire, des essais d'incision des flancs des poissons entiers ont été réalisés dans le but de réduire le temps de traitement. Trois types d'incision ont été testés :

- ⇒ 1 incision longitudinale par flanc,
- ⇒ 2 incisions obliques par flanc,
- ⇒ 3 incisions transversales par flanc.

Le poisson étant douché sur le flanc, l'homogénéité de salage et de déshydratation a également été vérifiée afin d'établir si le protocole de traitement doit inclure un retournement du poisson à mi-douchage.

Essai de formulation sur le tilapia rouge dit « Gueule rouge »

Pour cet essai, l'espèce utilisée est le tilapia rouge de plus petite taille que le tilapia dorée. Le traitement de DID est identique à celui de l'essai précédent. Dans le but de présenter un produit plus sec et très légèrement cuit, le fumage est réalisé à une température de 40°C environ. Pour cela, le refroidissement préalable de la fumée est conservé afin de maintenir une condensation suffisante de l'eau et des composés toxiques, puis la fumée est réchauffée à l'aide une résistance électrique jusqu'à la température souhaitée. En parallèle, un fumage à « très froid » a été mené pour comparaison de la qualité organoleptique. Pour chaque type de fumage (à froid et à chaud), deux durées de fumage ont été testés. On teste aussi dans cet essai la différence de saveur entre un produit incisé et un produit non-incisé. Les paramètres d'essai sont les suivants :

<b>Temps de traitement</b>		<i>Fumage « très froid »</i>	<i>Fumage « semi chaud »</i>
Douchage (DE21 à 325g/L d'eau)	Poisson incisé	1 heure	1 heure
	Poisson non incisé	1,5 heures	1,5 heures
Fumage		4 heures	2 heures

#### 1.4.2.3. Optimisation des conditions de traitement des longues de thon blanc

Après analyses des teneurs en sel et en eau des produits traités par la COPEMAY à Mayotte, des essais de saurissage du thon blanc par le procédé CIRAD ont été entrepris. Les deux variables *durée de douchage* et *durée de fumage* ont été testées pour encadrer le couple de variables permettant d'obtenir un gain en sel compris entre 2,5 et 3% et une perte en eau d'au moins 6%. Le résultat de ces essais est consigné dans l'annexe H.

#### 1.4.2.4. Essais de traitement sur la truite de montagne dite « portion »

Un essai préliminaire de traitement de truite de montagne « portion » a été mis en place afin de cerner les problèmes liés au taux de lipide important dans ce type de poisson (résultats en annexe H).

#### 1.4.2.5. Validation de la gestion de la solution ternaire (systèmes et procédures de réajustement/régénération)

Suite aux expérimentations réalisées à l'échelle industrielle (DEUMIER *et al.*, 1996) et aux essais préliminaires du matériel à Montpellier, le travail à La Réunion consistait à affiner les protocoles de mise en œuvre de la régénération et du réajustement de la solution et de les valider par un suivi de la composition et de l'état microbiologique de la solution dans les conditions de travail proches d'une production réelle.

Au cours des différents essais, le matériel et les protocoles de traitement de la solution ont pu être éprouvés. Ainsi, après les différents séquençages filtration/acidification, filtration/neutralisation, cycle de DID et stockage à +2°C, les analyses microbiologiques indiquent si l'hygiène est maîtrisée et permettent également d'évaluer une durée de vie de la solution.

## 2. Résultats - discussions

### 2.1. Essais préliminaires sur le comportement de la solution ternaire

Les résultats des essais réalisés à Montpellier sont présentés en Annexe F. En résumé, le maintien à saturation en sel de la solution ternaire en cours de douchage donne les résultats escomptés, à savoir une saturation permanente et des cinétiques de séchage/salage optimales. Le système de filtration par filtre poche régénère de façon satisfaisante des solutions volontairement très chargées en contaminants. Ce matériel semble donc bien adapté à la gestion des solutions en milieu artisanal. Le cycle acidification/neutralisation déjà testée en milieu industriel (DEUMIER *et al.*, 1996) et dont l'efficacité est connue, n'a pas fait l'objet d'essais préliminaires.

### 2.2. Traitements réalisés sur les filets de tilapia

#### 2.2.1. Définition et optimisation des conditions de douchage

Deux plans factoriels  $2^2$  auront été nécessaires pour déterminer les valeurs du couple (temps de traitement ; concentration en SPG20) permettant d'atteindre un gain en sel de 2,4% et une perte en eau de 6% sur les filets. Les résultats du premier plan sont les suivants :

N° de l'essai	PE %	GS %
A	7.43	2.01
B	11.73	2.57
C	7.97	1.76
D	12.21	2.53

Pour les réponses voulues, le couple de valeurs obtenu par calcul est hors du plan d'expérience. D'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus, le GS de 2,4% est bien encadré par les 4 réponses. Par contre, les réponses PE ne sont jamais inférieures à 6%. Pour diminuer les valeurs de PE, il faut baisser largement la plage de concentration en SPG20 et diminuer légèrement les temps de traitement. Le second plan d'expérience donne les résultats suivants :

N° de l'essai	PE %	GS %
1	4.91	2.71
2	9.16	3.16
3	5.27	1.57
4	11.22	2.24

D'après les réponses observées de GS et de PE, les valeurs visées sont encadrées. Les facteurs optimaux sont obtenus par résolution du système d'équation.

<b>Durée de DID (minute)</b>	20.9
<b>[SPG20] (g/L eau)</b>	326.2

Les valeurs optimales pour le douchage des filets de tilapia sont respectivement arrêtées à 21 minutes pour la durée de traitement et à 325 g/L d'eau pour la concentration en SPG20. Dans ces conditions, l'essai de validation donne des valeurs de 2,48% pour le gain en sel et de 6,24% pour la perte en eau. On peut en conclure que les conditions de douchage sont définies et maîtrisées, mais qu'il reste à tester la maîtrise de ces conditions en production ainsi que l'homogénéité du traitement.

### 2.2.2. Détermination de la durée de fumage optimale

Les filets obtenus par DID dans les conditions précédentes sont ensuite soumis à un fumage dit à froid. La température de la fumée en fin de refroidissement est d'environ 20°C et la température dans la cellule de fumage de 25°C en moyenne. Deux durées de fumage sont testées : 1 et 2 heures. Après une heure de fumage, la coloration des filets est bonne et le goût de fumée suffisamment marqué. A 2 heures de fumage, la coloration et la saveur sont trop marquées. Le couple 21 minutes de douchage et 1 heure de fumage semble optimal. De plus lors des dégustations, la texture très fondante est appréciée.

On notera que les filets ont cependant une certaine âcreté que certains dégustateurs qualifieront de goût d'amande amère. Ce goût est perçu comme un défaut et devient vite gênant lors d'une dégustation prolongée.

Ce goût d'amande amère est associé à la présence de benzaldéhyde. La fraction aldéhydique de la fumée a donc un impact sensible sur les caractéristiques organoleptiques du produit en fumage à froid. Un des moyens de réduire la quantité d'aldéhydes consiste à les condenser par refroidissement, car il existe un équilibre air/vapeur de benzaldéhyde basé sur la tension de vapeur saturante du benzaldéhyde à température donnée. A 25°C, la concentration saturante de ce composé dans l'air est de 950 ppm (MERCK, 1976). Par refroidissement, la tension de vapeur en benzaldéhyde dans la fumée va diminuer et conduit à sa condensation. Aussi, un refroidissement plus poussé de la fumée est réalisé pour vérifier si la condensation des aldéhydes améliore les qualités gustatives du produit.

Il faut noter que l'humidité relative de la cellule est d'environ 75%. Cette humidité semble optimale puisque la masse des filets au cours du fumage ne varie pas. On en déduit donc que les transferts d'eau sont proches de zéro dans ces conditions.

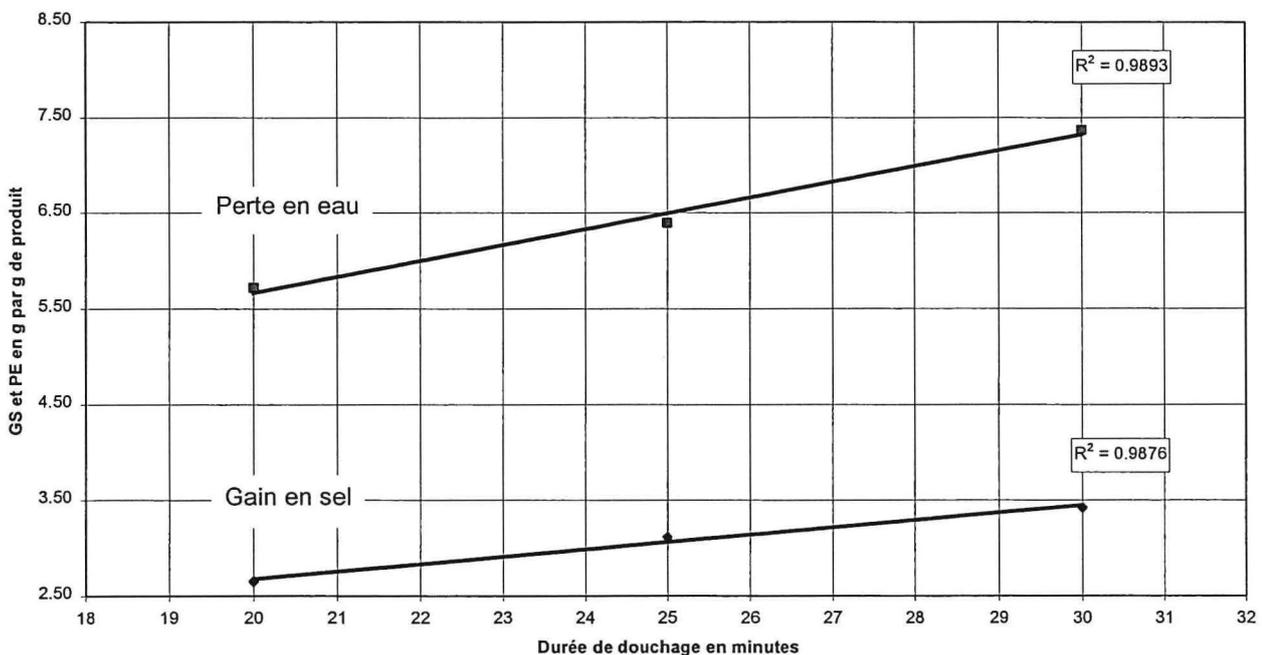
### 2.2.3. Modélisation de la durée de traitement pour le sirop de glucose Glucidex DE21

Le traitement de DID d'une durée comprise entre 20 et 30 minutes avec une solution ternaire à base de sirop de glucose DE21 (325 g/L d'eau) donne les cinétiques suivantes pour GS et PE. Dans le domaine expérimental, les phénomènes de GS et de PE sont considérés comme linéaire puisque les coefficients de régression sont respectivement de 0,9876 et 0,9893. On peut donc donner les équations modélisant le GS et la PE correspondant à une durée de douche de 20 à 30 minutes :

$$\text{GS} = 0,0771 \times \text{Durée DID} + 1,1328$$

$$\text{PE} = 0,1653 \times \text{Durée DID} + 2,3605$$

Gain en sel sur les filets de tilapia doré à l'issue de la DID en fonction de la durée de douche (solution ternaire à base de Glucidex DE21)



A 21 minutes, le GS et le PE sont de 2,75% et 4,85% pour le DE21 contre 2,48% et 6,24% pour le SPG20. Le poids moléculaire plus faible du Glucidex explique un salage plus fort et une déshydratation plus faible par rapport au SPG20. Dans le cas de l'utilisation du Glucidex, la concentration optimale serait plutôt de 350, voire 400 g/L d'eau.

#### 2.2.4. Production en présérie

Cette présérie a été l'occasion de mettre l'ensemble du matériel et de l'organisation des tâches en situation de petite production artisanale.

Plusieurs observations concernant la mise en œuvre ont été notées. Tout d'abord, la préparation du poisson est très longue car le rendement au filetage est au mieux de 33%. La matinée doit donc être consacrée à la préparation de la matière première. On notera que les risques de contaminations sont sensiblement réduits en séparant l'étape « sale » d'écaillage/éviscération de l'étape « propre » d'étêtage/filetage. En organisant les tâches en équipe et de manière séquentielle, le temps consacré à la préparation d'un kg de matière première est d'environ 8 minutes en tenant compte des phases de nettoyage. L'après-midi est consacré au traitement de la matière première : le cycle de DID est d'environ 30 minutes et le fumage de 1 à 2 heures suivant le degré de fumage souhaité. Entre les deux opérations, le ressuyage est de 1 à 2 heures à +10°C mais peut être accéléré en chambre froide à +2°C. L'étape de surgélation/conditionnement est d'environ 6 minutes par kilogramme de produit fini. L'étape de gestion de la solution ternaire est délicate si le système de filtration n'est pas intégré dans un équipement et si les procédures de réajustement en sirop de glucose notamment sont mal définies.

La présérie a permis de vérifier l'effet de l'empilement des claies sur l'homogénéité du traitement au douchage. Le tableau suivant montre les résultats des teneurs en sel et en eau relevées pour les claies 1 (supérieure), 5 (centrale) et 10 (inférieure) lors du douchage d'un chargement complet.

N° claie		Bilan DID			
		GS (%)		PE (%)	
		(moy)	(e-type)	(moy)	(e-type)
Filet	1	2.48	0.06	6.24	0.07
	5	2.35	0.06	6.71	0.30
	10	2.45	0.02	6.58	0.15

Une analyse de la variance pratiquée successivement sur la teneur en sel et la teneur en eau montre que les différences entre les claies ne sont pas significatives au risque 5% (Annexe G). Le traitement est donc considéré comme homogène pour l'ensemble des filets.

Concernant la solution, la filtration à 1 micron est technologiquement efficace puisque la quasi-totalité de la mousse disparaît. Cela signifie que la majorité des particules organiques responsables de la formation des mousses est retenue à 1 micron. Pour le tilapia, la pré filtration à 50 ou 100 microns n'est pas nécessaire du fait de l'absence de phase grasse dans la solution.

Au niveau de la limpidité, la solution ne change pas visuellement d'aspect (pas de brunissement des sucres, pas de développement de colonies ou d'amas de micro-organismes). N'ayant pas eu la possibilité de faire des mesures de turbidité, on peut néanmoins juger que la solution n'excède pas 100 NTU au plus. Un choc acide à pH < 2 en complément d'un stockage à +2°C devraient assurer une précipitation des acides aminés ayant des pHi bas.

Des prélèvements ont été effectués à chaque stade de la régénération en vue d'un suivi microbiologique. Les résultats dans le tableau suivant montrent qu'à l'issue du traitement de 21 kg de produit, la flore banale présente est très faible et qu'il n'y a pas de pathogène halophile tel que *Staphylococcus aureus*. La bonne qualité sanitaire de la matière première limite considérablement la contamination de la saumure. Après filtration à 1 µm, il n'y a toujours pas de pathogène recensé mais la flore banale est en augmentation. La filtration contamine légèrement la solution par l'intermédiaire de la toile polypropylène du filtre poche. La filtration 1 µm n'a, en aucun cas, un effet positif sur la réduction de la charge bactérienne. Son utilité ne se justifie donc que par sa capacité à éliminer la quasi-totalité des colloïdes et autres contaminations macroscopiques responsables de la formation de mousse.

Echantillon	Solution 25/11 après production	Solution 25/11 filtration à 1 µm	Solution 26/12 pH < 2	Valeurs limites recommandées (1)
Germes mésophiles totaux (par g)	390	590	< 10	1000000
<i>Staphylococcus aureus</i> (par g)	Absence	Absence	Absence	1

(1) Arrêté du 21.12.1979 - Article 9.

Après acidification à pH < 2 et stockage à +2°C, il n'y a aucun pathogène et la flore banale est proche de zéro alors que le prélèvement a été fait le 26 décembre soit après 1 mois de cycle de DID, filtration et acidification (environ 30 kg de produit traité au total dont des poissons entiers qui induisent une plus forte contamination bactérienne et biochimique). Le traitement par acidification permet de maîtriser, voire de réduire fortement la charge microbienne de la saumure et allonge considérablement sa durée de vie.

S'il n'y a pas de contamination de pathogène (il n'y aura pas de contamination de pathogène si la matière première est de bonne qualité et si les conditions d'hygiène en production sont satisfaisantes) et si le traitement de régénération est correctement appliqué (filtration, acidification, neutralisation, stockage au froid), la durée de vie de la saumure ne sera limitée que par son évolution physico-chimique (brunissement, mousse persistante malgré la filtration...). On peut envisager de garder la saumure au minimum 1 mois pour le traitement des filets de *Tilapia*.

Pour la matière première, les analyses microbiologiques sont satisfaisantes d'après l'arrêté du 21.12.1979 (Article 5). La DLC des filets à +2°C a également été testée à 21 jours. Les échantillons de filet fumé sont restés 7 jours congelés. Après décongélation et 21 jours de stockage au froid positif, l'analyse de trois filets montre une absence totale de germes pathogènes et une flore banale inférieure à 100 UFC par gramme soit 10000 fois moins que la valeur limite recommandée (Arrêté du 21.12.1979 - Article 9). La qualité sanitaire des produits finis est donc très bonne mais dépend fortement de la matière première.

Lors de la présérie, 3 temps de douchage ont été testés : 21, 24 et 25 minutes. Il semble qu'à la dégustation, le produit traité à 25 minutes soit le plus apprécié. Le défaut d'âcreté est toujours retrouvé. On note que la durée de douchage peut être modifiée de quelques minutes selon l'épaisseur des filets à traiter. Ainsi, on préférera une durée de douchage de 28 à 30 minutes pour les filets de calibre 120 grammes.

A partir de toutes les informations recueillies pendant cet essai, un dossier d'agrément CEE a été constitué pour la production de filet de tilapia fumé par le procédé CIRAD [6].

#### 2.2.5. Optimisation du saurissage par fumage dit « très froid »

L'utilisation d'eau glacée et de glace maintenues isolées de la température ambiante par du polystyrène permet le maintien d'une température de 4 à 5°C dans le bac de refroidissement du pilote de fumage pendant plus de 12 heures. Pendant l'opération de fumage, ce point froid permet d'obtenir une température de fumée refroidie de 10 à 15°C suivant le débit d'extraction. La température dans l'enceinte de fumage oscille entre 16 et 20°C. A ces températures, le fumage est environ deux fois plus lent, d'une part parce que l'abaissement de température ralentit le dépôt de fumée, et d'autre part, parce que l'augmentation de la condensation dans le tube diminue la richesse de la fumée en phénols et autres composés. Néanmoins, l'amélioration recherchée est sensible puisque aucun goût âcre ou d'amande amère n'est retrouvé à la dégustation. La saveur du produit est très agréable, moins agressive et globalement plus équilibrée en comparaison avec les produits obtenus par le fumage à froid classique. Avec l'intensification du refroidissement de la fumée survient un autre problème. La condensation de l'humidité et des composées de la fumée est telle que les condensats s'écoulent librement et en grande quantité dans le fond de l'enceinte et y maintiennent une humidité relative de 100%.

Les produits reprennent alors de l'humidité par condensation et leur masse s'accroît pendant le fumage. Sous vide, les produits exsudent énormément, ce qui n'est pas très présentable et constitue un milieu propice au développement bactérien. L'ajout d'une purge en bout du tube de refroidissement a permis par la suite de résoudre ce problème. L'évacuation des condensats par la purge évite une reprise en humidité du produit dans la cellule de fumage. Les filets traités dans ces conditions conservent la même humidité pendant le fumage et n'exsudent que très peu dans l'emballage sous vide.

Pour obtenir des filets plus secs en surface, il faudrait agir en amont du fumage, par exemple en effectuant un ressuyage en chambre froide pour assécher légèrement la surface des filets. Cependant dans l'optique d'une vente des filets fumés à des professionnels, il est souhaitable de conserver cette humidité de surface afin que le produit ne se dessèche pas entre le déballage et la vente au consommateur final.

### **2.3. Traitements réalisés sur le tilapia entier**

Les deux principaux atouts du tilapia fumé entier sont un rendement de 85% à la préparation et un marché potentiel au niveau local car ce produit pourrait être incorporé dans le cari, plat traditionnel réunionnais.

#### **2.3.1. Définition et optimisation des conditions de saurissage**

Les deux variables expérimentales *durée de douchage* et *durée de fumage* sont définies à l'aide d'un plan d'expérience factoriel 2<sup>2</sup>.

N° de l'essai	PE %	GS %
1	6.21	1.13
2	7.46	1.92
3	5.32	1.22
4	8.19	1.95

D'après les réponses obtenues pour chaque point expérimental, les valeurs optimales sont de 66 minutes et 3,7 heures respectivement pour la durée de douchage et la durée de fumage.

Dans l'essai de validation, les valeurs de traitement sont arrêtées à 70 minutes et 4 heures. Les produits obtenus ont un GS de 1,4% et une PE de 6,15%, donc conformes aux objectifs fixés.

### 2.3.2. Impact de trois types d'incision sur l'efficacité du douchage et l'homogénéité de traitement entre les filets gauche et droit

Au point central du plan d'expérience précédent (durée DID : 75 minutes ; durée fumage : 3 heures), 3 types d'incision ont été testés.

Echantillon	Bilan SAURISSAGE			
	GS (%)		PE (%)	
	(moy)	(e-type)	(moy)	(e-type)
<b>1 incision longitudinale</b>	1.73	0.05	7.54	0.17
<b>2 incisions obliques</b>	1.87	0.05	7.22	0.03
<b>3 incisions transversales</b>	2.05	0.04	6.84	0.13

Les résultats montrent que le traitement de DID a un impact différent suivant le type d'incision. Globalement, plus le nombre d'incisions est réduit, moins l'imprégnation en sel est importante et au contraire, plus la perte en eau est importante. Pour un produit entier, il est surtout intéressant de bien le déshydrater. Visuellement, les incisions ne sont pas très esthétiques. On choisira plutôt de travailler avec une incision longitudinale, voire sans incision.

En général, les essais montrent que le filet inférieur est de 12 à 14% plus salé et 4 à 5% moins déshydraté que le filet supérieur. Si le poisson est retourné à la moitié de la durée du traitement, les écarts relatifs sont alors de 8% pour le GS et de 4% pour la PE entre les deux filets. On constate donc que la différence d'homogénéité entre un poisson retourné et un poisson non retourné est quasi nulle. Le douchage assure une immersion dynamique du poisson et une bonne homogénéité des transferts de matière en tout point de la surface du produit.

### 2.3.3. Essai de formulation sur le tilapia rouge dit « Gueule rouge »

Cet essai de formulation a permis de tester un fumage à 40°C et une modification du pilote : une purge a été placée à la fin du tube de refroidissement afin d'évacuer les condensats du système. On remarque que le produit s'assèche considérablement en surface (perte de 4,5% d'eau au fumage) et est beaucoup plus attrayant. Sous emballage, le poisson n'exsude pas.

Le poisson fumé à froid conserve son humidité en surface (pas de variation de masse au cours du fumage) prouvant que le système de purge est efficace. Sous emballage, le produit n'exsude pas.

A la dégustation, les produits incisés présentent une moins bonne homogénéité de traitement. Les poissons fumés à froid ont une chair plus tendre et plus fondante. En effet, la légère cuisson à 40°C, si elle stabilise le produit, rend également la texture plus ferme et plus sèche.

Globalement, les poissons entiers préparés en cari sont appréciés par les dégustateurs et les tests de commercialisation peuvent démarrer sur la base de ces essais.

## 2.4. Validation de la gestion de la solution ternaire (systèmes et procédures de réajustement/régénération)

Au cours de la petite production du mois de novembre 1999, le système de régénération a été testé avec succès. La filtration sur filtre poche de 1 µm de porosité permet surtout de réduire la formation de mousse puisque la limpidité de la solution n'est jamais nettement détériorée. Le traitement acide suivi du stockage au froid positif réduit considérablement la flore banale du milieu, si bien que le milieu est presque stérile lors de la neutralisation. Une filtration complémentaire en milieu acide permet de retenir des fractions protéiques coagulées à ce pH et améliore la purification de la solution.

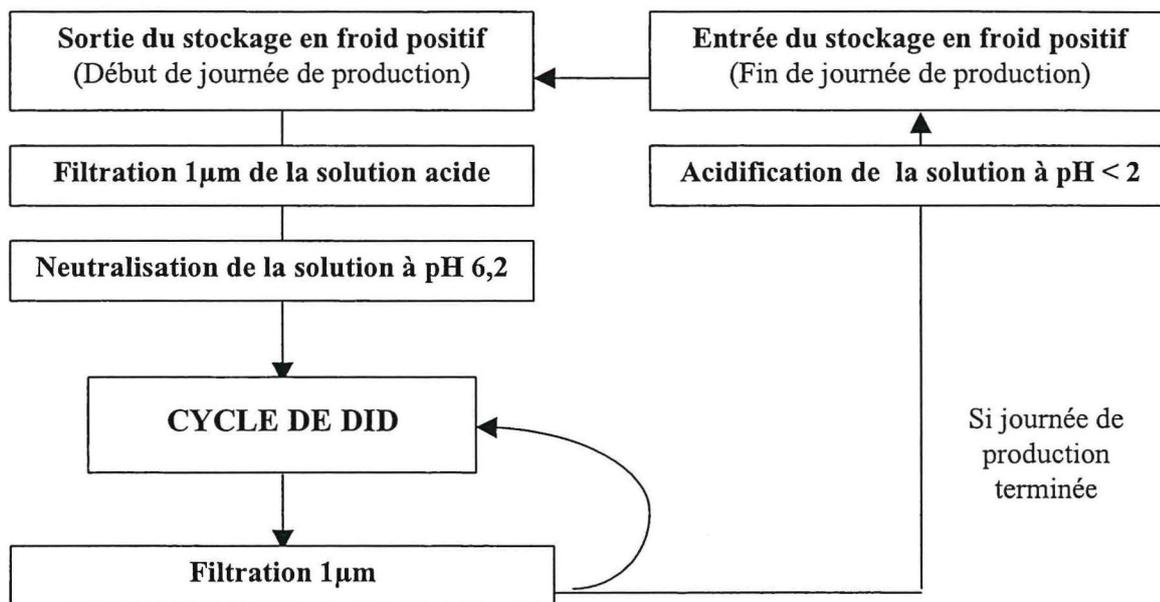


FIGURE 9– LE SEQUENÇAGE DES OPERATIONS DE REGENERATION.

Concernant les opérations de réajustement en solutés, le maintien d'une saturation permanente en sel est effectif ainsi bien avant, pendant et après douchage lorsque l'on place une quantité suffisante de sel sur le tamis pendant le cycle de DID. Pour le réajustement en sucre, une corrélation entre concentration en DE21 d'une solution saturée en sel et masse volumique de cette solution a tout d'abord été déterminée au laboratoire grâce à des solutions étalons. A +3°C, l'équation dans le domaine de concentration en DE21 200 à 400 g/L d'eau est la suivante :

$$\text{Masse volumique (g/L solution)} = 0,12 \times \text{concentration en DE21 (g/L d'eau)} + 1217$$

A partir de cette relation et sachant que la solution est à saturation en sel, on peut en déduire la teneur en eau et établir ainsi la composition de la solution ternaire. La feuille de calcul Excel (Annexe I) permet grâce à cette relation, non seulement de faire le bilan massique à l'aide de la masse et de la densité de la solution, mais fournit également, suivant les caractéristiques souhaitées pour la solution corrigée, les quantités d'eau, sel, DE21 à rajouter. Pour valider, ce système de réajustement de la teneur en sirop de glucose, deux tests en conditions réelles ont été réalisés avec en parallèle un contrôle par les méthodes d'analyse de laboratoire de la composition de la solution corrigée.

La solution initiale est pesée puis sa masse volumique est déterminée par l'utilisation du densimètre. Grâce à ces données, les corrections à effectuer pour obtenir 30 litres de solution à 325 g/L de DE21 par litre d'eau sont fournies par la feuille de calcul. Le tableau suivant donne alors les performances du réajustement par cette méthode.

Mesures à +3°C	Masse volumique relevée sur la solution corrigée	Concentration en sucre déterminée d'après la masse volumique	Concentration réelle en sucre
Essai 1	1256	325	314
Essai 2	1257	333	321

On constate que le réajustement est assez précis puisqu'il n'y a pas plus de 3,5% d'écart entre la valeur vraie de DE21 et la consigne. Le réajustement par mesure de densité a l'avantage d'être très rapide et très simple, et vraisemblablement est aussi précis qu'un réajustement au laboratoire dont la précision oscille entre 3 et 9%.

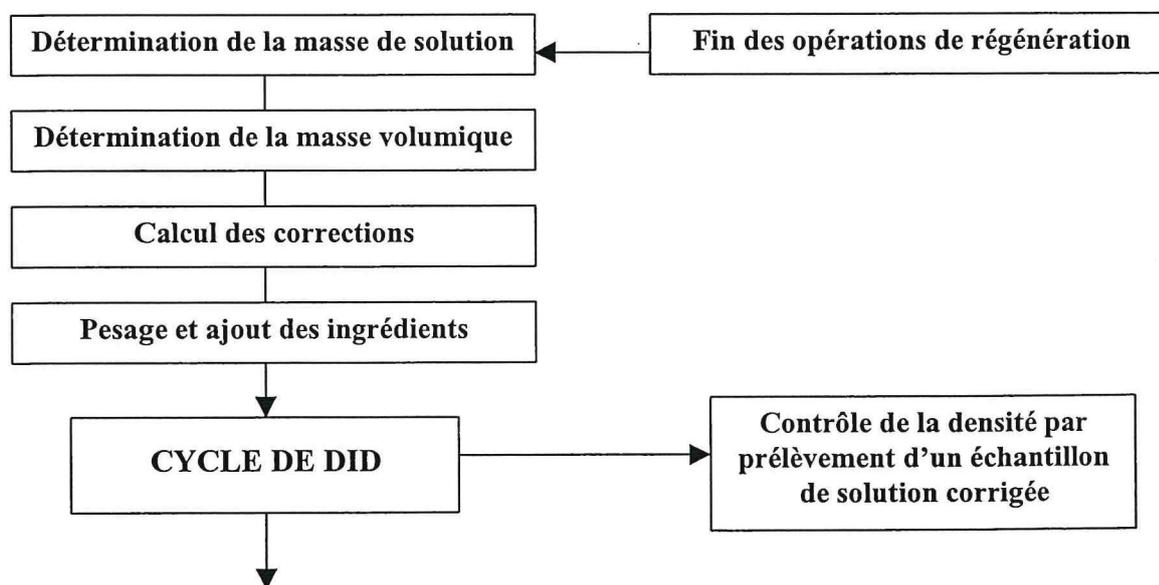


FIGURE 10 – LE SEQUENÇAGE DES OPERATIONS DE REAJUSTEMENT EN DE21.

## 2.5. Résumé des paramètres de traitement établis

Le tableau suivant donne les durées de traitement conseillées pour le traitement de différentes espèces.

<b>Procédé CIRAD</b>	<b>Durée de douchage (DE21 à 325 g/L d'eau)</b>	<b>Durée de fumage</b>
<b>Tilapia en filet Fumé à froid</b>	25 à 30 minutes	2 heures
<b>Tilapia entier (non incisé) Fumé à froid</b>	1 heure et 30 minutes	4 heures
<b>Tilapia entier (non incisé) Fumé à chaud</b>	1 heure et 30 minutes	2 heures
<b>Thon blanc en longe Fumé à froid *</b>	1 heure et 30 minutes	4 heures
<b>Truite en filet "portion" Fumé à froid *</b>	15 à 20 minutes	2 heures

\* les résultats des essais concernant le thon blanc et la truite de montagne sont présentés en annexe H.

# **PARTIE E**

## **Bilan technico économique du procédé CIRAD**



# 1. Evaluation du coût de production par le procédé CIRAD

## 1.1. Détermination du coût de la gestion de la solution

Le coût de la maintenance de la solution a été établi par kilogramme de produit fini en fonction d'une production artisanale de 40 kg de produit fini par jour et en fonction des hypothèses de travail suivantes :

- ⇒ 4 cycles de DID par jour,
- ⇒ 10 kg de produit traité par cycle de DID,
- ⇒ 20 jours de durée de vie pour la solution ternaire traitée,
- ⇒ Caractéristique de la saumure :     350 g de sel par litre d'eau  
   325 g de sucre par litre d'eau.

La régénération de la solution est mise en œuvre selon le protocole défini. Il en résulte une consommation d'un filtre 1 µm par jour (et d'un second filtre à 100 µm si le poisson traité est gras) et des consommables nécessaires à l'acidification/neutralisation de la solution (les filtres ne doivent en aucun cas servir plus d'une journée de production). Les quantités de matière nécessaires au réajustement d'une solution ternaire de 30 litres sont de 4 kg de sirop de glucose et de 2 kg de sel par jour de production. Les prix des consommables et des matières sont présentés dans le tableau suivant.

Consommables (unité), fournisseur	Prix Franc HT (Réunion)
Filtre poche 1 µm (unité), FSI	30,78
Filtre poche 100 µm (unité), FSI	25,66
Eau (mètre cube), CGE	8,00
Sel (kg), Réunion Protéine Service	2,30
Sirop de glucose SPG20 (kg), Réunion Protéine Service	10,50
Acide chlorhydrique fumant 37% (litre), Humeau laboratoires	116,00
Hydroxyde de sodium 50% (litre), Humeau laboratoires	124,00

Les coûts de fonctionnement sont les suivants :

- ⇒ une solution ternaire neuve de 30 litres à 325 g de sucre par litre d'eau revient à 95,10 FHT,
- ⇒ le coût de la maintenance journalière (régénération et le réajustement de la solution) est de 77,26 FHT pour le traitement des poissons maigres et de 108,04 FHT pour le traitement des poissons gras.

Sur la base des hypothèses énoncées ci-dessus, le coût de la gestion de la solution ternaire se monte à :

- ⇒ 2,05 FHT par kilogramme de produit fini pour le traitement des poissons maigres,
- ⇒ 2,82 FHT par kilogramme de produit fini pour le traitement des poissons gras.

Dans le cas où le produit traité salit beaucoup plus la solution (exemple : tilapia entier), il est préférable de ne maintenir la solution que 5 jours au lieu de 20. Le coût de maintenance s'établit alors à 2,41 FHT par kilogramme de produit fini.

Les avantages de la gestion de la solution par rapport à un rejet systématique après chaque journée de production sont de trois ordres : économique, écologique et technologique. Economique car la gestion de la solution permet dans le cas du filet de tilapia d'économiser 33 centimes par kilogramme de produit fini. Ecologique car les quantités de solution rejetées sont considérablement réduites. Le rejet systématique entraîne une pollution importante des eaux usées qui affecte non seulement l'environnement mais aussi les systèmes d'épuration classiques ou un coût de retraitement non négligeable des effluents. Technologique car le réajustement et la régénération à l'issue de chaque cycle de DID concourent au maintien d'une qualité de douchage optimale, ce qui n'est pas le cas si la solution n'est pas gérée en cours de production.

### **1.2. Détermination du coût matière première par kilogramme de produit fini**

Le tableau ci-dessous indique en fonction du prix de revient du poisson à l'élevage et du rendement à la préparation, le coût de matière première avant transformation nécessaire à la production d'un kilogramme de produit fini.

Type de produit fini	Coût de la matière première (FHT/kg)	Rendement à la préparation (%)	Coût matière première (FHT/kg produit fini)
Filet de tilapia fumé	35,00	33	106,06
Tilapia fumé entier	35,00	85	41,18
Filet de truite fumé	25,00	70	35,71
Truite fumée entière	25,00	95	27,17

### 1.3. Détermination de la charge salariale par kilogramme de produit fini

Le coût horaire de la main d'œuvre est de 60 francs pour un ouvrier et 100 francs pour un technicien. Considérant que la préparation du poisson se fait uniquement la matinée (4 heures effectives) et la transformation toute la journée, le tableau suivant donne une évaluation :

- ⇒ du temps journalier nécessaire à la préparation de la matière première et au traitement (pour 40 kg de produit fini),
- ⇒ du coût de main d'œuvre journalier et par kg de produit fini,
- ⇒ des ressources humaines à prévoir pour accomplir les tâches.

Type de produit fini	Temps nécessaire (heure) *	Ressources humaines à prévoir	Coût journalier (FHT)	Coût main d'œuvre (FHT/kg produit fini)
Filet de tilapia fumé	16+8	4 ouvriers à 50% 1 technicien à 100%	1760,00	44,00
Tilapia fumé entier	12+8	3 ouvriers à 50% 1 technicien à 100%	1520,00	38,00
Filet de truite fumé	8+8	2 ouvriers à 50% 1 technicien à 100%	1280,00	32,00
Truite « portion » fumée entière	4+8	1 ouvrier à 50% 1 technicien à 100%	1040,00	26,00

\* Pour 40 kg de produit fini.

Au temps de préparation de la matière première (qui inclut aussi les phases de nettoyage de l'atelier et du matériel), il faut ajouter le temps nécessaire au traitement du poisson au douchage et au fumage, soit 8 heures.

Les temps nécessaires et la main d'œuvre associée pour traiter les différents produits sont donnés à titre indicatif et ne sont pas optimisés. L'entraînement du personnel ainsi que l'utilisation d'outils adaptés (couteaux électriques par exemple) devraient diminuer sensiblement ce poste. Par contre, il est intéressant de comparer la différence de main d'œuvre mobilisée d'un produit à l'autre. La production de filet de tilapia fumé réclame la plus grosse charge de main d'œuvre car le rendement au filetage est faible et le filetage est rendu difficile par la morphologie de ce poisson. Pour le poisson entier, le temps de préparation est réduit puisque il n'y a pas de filetage et que le rendement matière est bien meilleur. A l'opposé, la préparation de la truite réclame peu de main d'œuvre car le filetage est aisé et la productivité élevée si les pièces ont un calibre important. La truite « portion » réclame encore moins de préparation même si le nombre de pièce à manipuler est élevé.

#### 1.4. Détail du prix de revient estimé pour chaque type de produit

Le tableau suivant donne une estimation du prix de revient par kilogramme de produit fini pour chaque type de produit. Le coût de la sciure au fumage est de 4 centimes par heure et par kilogramme de matière traitée. Le prix du kW est de 65 centimes.

Poste	Filet de tilapia fumé	Tilapia fumé entier	Filet de truite fumé	Truite « portion » fumée entière
Matière première	106,06	41,18	35,71	27,17
Main d'œuvre	44,00	38,00	32,00	26,00
Amortissement du matériel	6,25	6,25	6,25	6,25
Gestion de la solution	2,05	2,41	2,82	3,18
Sciure	0,16	0,32	0,16	0,32
Eau	2,00	2,00	2,00	2,00
Energie	0,10	0,15	0,10	0,15
Conditionnement	0,32	0,56	0,32	0,56
<b>PRIX DE REVIENT</b>	<b>160,94</b>	<b>90,87</b>	<b>79,36</b>	<b>65,63</b>

Il est intéressant de constater que d'un produit à l'autre, les contraintes concernant le prix de revient sont différentes.

Pour le filet de tilapia, le coût de la matière première représente les deux tiers du prix de revient à cause d'un rendement matière déplorable à la préparation (33%). Ainsi même si le coût de main d'œuvre est relativement élevé, le poste prépondérant et incompressible reste celui de la matière première. L'économie peut se porter sur la réduction du coût de la main d'œuvre, mais n'aura vraisemblablement pas d'effet significatif sur la diminution du prix de revient.

Pour le tilapia entier et la truite, le poste matière première diminue nettement et est équivalent à celui de la main d'œuvre. Dans ce cas, la réduction du coût de la main d'œuvre peut avoir un impact significatif sur le prix de revient.

## 2. Perspectives de commercialisation

Un test consommateur courant mars 2000 va permettre de définir les attentes des consommateurs en matière de poisson d'eau douce fumé et ainsi d'évaluer le marché potentiel sur l'île de La Réunion. Le tableau suivant donne le prix indicatif de vente en GMS des produits fumés en retenant des marges pour le transformateur et le distributeur respectivement de 10 et 20%.

Poste	Filet de tilapia fumé	Tilapia fumé entier	Filet de truite fumé	Truite « portion » fumée entière
Prix de revient	160,94	90,87	79,36	65,63
Marge transformateur (10%)	16,09	9,09	7,94	6,56
Marge distributeur (20%)	35,41	19,99	17,46	14,44
TVA (2,1%)	4,46	2,52	2,20	1,82
<b>PRIX DE VENTE TTC</b>	<b>216,90</b>	<b>122,47</b>	<b>106,96</b>	<b>88,45</b>

Sachant que le prix de vente moyen des produits fumés vendus en filet (espadon, marlin, truite...) est de 200 à 240 FTTC en GMS à La Réunion, le prix de vente du filet de tilapia reste dans la moyenne mais peut se démarquer par sa qualité de chair et son faible taux de matière grasse qu'il faut impérativement mettre en avant.

En présentant de la truite fumé en filet à environ 110 francs le kilogramme soit 50% moins cher que le tilapia et la plupart des poissons fumés, le transformateur s'arrogue un avantage concurrentiel indéniable en terme de prix, en plus d'une bonne qualité de produit.

Pourtant le marché potentiellement le plus prometteur n'est pas seulement celui du filet fumé mais aussi celui du poisson fumé entier pour préparation en cari. La demande en poisson pour la préparation de ce plat n'étant pas toujours satisfaite à cause d'approvisionnements irréguliers en poisson de mer, le poisson d'aquaculture fumé entier peut se positionner grâce à ses qualités et à son prix raisonnable comme une alternative intéressante pour le consommateur. On pourra mettre en avant le côté traditionnel du poisson fumé entier, puisqu'il apporte au plat préparé un goût de fumée proche du plat cuit au feu de bois.

# CONCLUSION

Le travail effectué a permis d'optimiser et de valider le fonctionnement de l'équipement CIRAD de salage-séchage-fumage à La Réunion d'une part et, d'établir des procédures de travail et les conditions de traitement de quelques poissons locaux en filet et entiers d'autre part.

Au niveau technique, la plupart des objectifs sont atteints puisque :

- ⇒ la procédure de gestion de la solution ternaire a été définie puis validée lors d'essais particuliers,
- ⇒ le fonctionnement du prototype a été amélioré d'une part, par la mise en place d'un système de filtration-transfert de la solution pour l'opération de DID, et d'autre part, par des modifications sur le pilote de fumage. Les procédures de travail établies et la maîtrise des paramètres de traitement ont été validées par les analyses physico-chimiques, microbiologiques et sensorielles,
- ⇒ les conditions de traitement sont définies pour divers produits comme le tilapia en filet et entier.

Economiquement, les résultats sont partiels :

- ⇒ les prix de revient des produits testés lors des essais sur l'équipement ont pu être estimés,
- ⇒ la commercialisation test reste à venir et devrait fournir de nombreux renseignements sur les attentes des consommateurs réunionnais.

Les résultats obtenus montrent que le procédé CIRAD est viable techniquement et économiquement au niveau artisanal. L'équipement permet la production de poisson fumé de bonne qualité organoleptique et sanitaire pour un investissement voisin de 250000 FHT et des coûts réduits de fonctionnement. A la vente du produit, cela se traduit par un avantage concurrentiel intéressant en terme de qualité et de prix.

Les résultats des premiers tests commerciaux devraient confirmer la qualité des produits et permettraient d'envisager le démarrage d'une activité de production en petite série. Le passage à une production artisanale régulière intéresse les partenaires du projet à plusieurs titres :

- ⇒ pour la coopérative réunionnaise AQUACOOP, c'est un moyen de mieux valoriser sa production aquacole et de rehausser l'image de marque du tilapia,
- ⇒ pour le CIRAD, cela conduit à une démonstration en production réelle du fonctionnement de son équipement pilote et du savoir-faire qui lui est associé dans l'optique d'une diffusion de la technique dans les Pays du Sud et de la formation de ses utilisateurs.

Les perspectives de développement de la technique CIRAD en milieu tropical sont prometteuses grâce aux résultats obtenus, aux améliorations continues de l'équipement et à la formulation de nouveaux produits adaptés aux marchés locaux.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **DEUMIER, F., RIVIER, M., et COLLIGNAN, A.** *Procédé de séchage-salage-fumage en continu de produits carnés.* CIRAD-SAR, 1996.
  
- [2] **SAINCLIVIER, M.** *L'industrie alimentaire halieutique. Deuxième volume : des techniques ancestrales à leurs réalisations contemporaines.* Rennes : ENSA - Sciences agronomiques, 1985.  
ISSN 0370 8411.
  
- [3] **KNOCKAERT, C.** *Le fumage du poisson.* Plouzané : Service de la Documentation et de la Publications de l'IFREMER, 1990.
  
- [4] **BUSSAC, E., LE MORVAN, I.** *Optimisation des techniques de salage-séchage-fumage du Tilapia.* Rapport interne CIRAD-Réunion, 1996.
  
- [5] **LINDEN, G., LORIENT, D.** *Biochimie agro-industrielle.* Masson, 1994
  
- [6] **BERNARD, E.** *Demande d'agrément CEE. Transformation de poisson d'aquaculture par un procédé artisanal de salage-séchage-fumage.* CIRAD-Réunion, janvier 2000.
  
- [7] **ROUX, J.L.** *Conserver les aliments.* Tec & Doc Lavoisier, 1994.



# **ANNEXES**

# **SOMMAIRE DES ANNEXES**

- ANNEXE A :**                    **Présentation du projet**
- ANNEXE B :**                    **Caractéristiques biochimiques du poisson**
- ANNEXE C :**                    **Les techniques de fumage**
- ANNEXE D :**                    **Schémas descriptifs de l'équipement CIRAD**
- ANNEXE E :**                    **Synoptique de transformation**  
**Procédure de travail pour l'opération de DID**  
**Procédure de travail pour l'opération de fumage**  
**Plan de nettoyage**
- ANNEXE F :**                    **Essais préliminaires réalisés à Montpellier**
- ANNEXE G :**                    **Tests statistiques**
- ANNEXE H :**                    **Essais sur le thon blanc et la truite de montagne**
- ANNEXE I :**                    **Exemple de feuille de calcul Excel utilisée pour le réajustement de la solution ternaire**
- ANNEXE J :**                    **Illustrations photographiques**

## ANNEXE A

### **PROJET : VALIDATION D'UNE UNITE PILOTE A VOCATION ARTISANALE DE SALAGE-SECHAGE-FUMAGE A FROID DE PRODUIT CARNES**

Ce projet a pour objectif d'évaluer les performances d'une unité artisanale de salage-séchage-fumage à froid de produits carnés combinant une opération de salage-séchage par douchage à un fumage par pyrolyse de sciure de bois. Les travaux ont pour but de valider des choix techniques testés sur l'unité pilote et de réaliser des essais de formulation et d'optimisation des conditions de traitement sur différents poissons locaux.

#### **1. Origine du projet**

Depuis plusieurs années, le CIRAD en collaboration avec plusieurs partenaires du nord (Région Languedoc-Roussillon, IFREMER, ARBOR Technologies, Belmonte, Salins du Midi) et du sud (Mali, Niger, Burkina, Brésil, Réunion) a engagé des recherches sur le salage-séchage-fumage et marinage de produits carnés avec comme objectif finalisé de proposer des techniques de conservation simples, rapides et économes permettant de maîtriser et d'améliorer les qualités sanitaires et nutritionnelles des produits finis.

##### ***1.1. Innovation en matière de salage-séchage-fumage***

Un nouveau procédé de salage-séchage-fumage et formulation de produits carnés a été mis au point. Les travaux initiés il y a 7 ans par le CIRAD ont montré que le séquençage traditionnel des opérations de salage et de séchage des produits carnés pouvait être évité en utilisant une seule opération de Déshydratation-Imprégnation par Immersion (DII) en solution ternaire (eau, sel, sirop de glucose). Cette technique consiste à mettre l'aliment en contact avec une solution concentrée en solutés et a été appliquée à la valorisation du poisson et, plus récemment, de la viande. Simultanément, de fortes pertes en eau (40 à 50%) et un salage contrôlé du produit peuvent être obtenues, tout en limitant l'imprégnation en sucre grâce à l'utilisation du sirop de glucose. De plus, une formulation plus complexe du produit peut être réalisée par ajout d'additifs de salaison dans la solution. Ce procédé s'applique aussi bien dans l'optique d'un séchage que dans l'optique d'une formulation. De manière générale, le procédé de DII présente certains avantages par rapport aux procédés classiques, comme la rapidité du traitement, la mise en œuvre en continu, l'amélioration du rendement, les économies d'énergie et la limitation des rejets par régénération des solutions usagées. Un bon contrôle du procédé peut être obtenu par un suivi des caractéristiques des solutions concentrées utilisées ou bien en effectuant des mesures sur le lot de produits traités. Une première évaluation des différentes alternatives à mettre en œuvre pour le traitement des solutions concentrées a été réalisée à partir de laquelle des choix technologiques ont été arrêtés pour le développement industriel du procédé.

Plusieurs dispositifs d'immersion, en batch ou en continu, ont été mis au point. En particulier, deux brevets ont été déposés sur le traitement des produits animaux. Le premier est un brevet conjoint CIRAD-IFREMER et porte sur un nouveau procédé et dispositif de salage-séchage-fumage, combinant la DII à un fumage électrostatique. L'autre est un brevet CIRAD portant sur un procédé et dispositif de Déshydratation-Imprégnation par Douchage (DID).

### **1.2. Développement industriel**

Sur la base des deux brevets déposés, un prototype industriel de salage-séchage par DID en continu de filets de poisson qui a fait l'objet d'une aide à l'innovation ANVAR en 96-97 a été réalisé et validé sur site industriel. Une licence d'exploitation a été concédée en février 1997 à la société ARBOR Technologies, qui commercialise des équipements de salage-séchage-fumage en continu à vocation industrielle. A l'heure actuelle, deux équipements d'une capacité de 500 kg/heure ont été vendus à la société LEDUN en Haute-Normandie (production de hareng fumé) et à la société SAGRA en Espagne (production de saumon fumé).

De même, le procédé de DID a été appliqué au marinage de filets de poisson. Un producteur du Languedoc-Roussillon (Belmonte) a acheté une licence d'exploitation (juin 98) et utilise la DID pour la fabrication d'anchois marinés.

Lors du dernier salon de l'agroalimentaire à Paris, le procédé développé par ARBOR Technologies a été primé comme une des 5 meilleurs innovations des 2 dernières années (IPA 98). La société Belmonte (SIAL 98) a en outre été primée pour la qualité de ces anchois marinés.

### **1.3. Engagements du CIRAD auprès de ses partenaires**

Sachant que le premier brevet est un brevet conjoint CIRAD-IFREMER, une convention a été établie et précise que le CIRAD peut exploiter librement la DID seule ou tout autre procédé de traitement de produits carnés dès qu'il n'y a pas couplage avec un fumage électrostatique. Par rapport à l'équipementier ARBOR, par le contrat de cession de licence, le CIRAD dispose du libre usage des éléments techniques relatifs au dispositif DID dès lors que les réalisations ne font pas intervenir de procédé en continu ou ne génèrent pas de séries supérieures à 6 dispositifs en batch. Dans le cas contraire, le CIRAD a l'obligation de consulter prioritairement ARBOR pour que ce dernier établisse les conditions de fabrication de ces dispositifs.

Le CIRAD a obtenu un prêt remboursable de l'ANVAR Languedoc-Roussillon en 96-97, aussi a-t-il l'obligation de remboursement sur les résultats liés aux traitements par DII ou DID appliqués au salage-séchage-fumage que la DII ou la DID soit utilisée seule ou en couplage avec une autre technique que le fumage électrostatique.

## **2. Projet actuel : Mise en œuvre de la DID et du fumage à froid à l'échelle artisanale**

En septembre 1998, l'activité de recherche d'Antoine COLLIGNAN, chercheur du CIRAD spécialiste de la transformation des produits animaux et qui a coordonné le développement industriel du salage-séchage-fumage par DII et DID, est délocalisée de Montpellier à La Réunion afin de mieux répondre aux demandes locales et régionales. Un de ses projets de recherche porte sur la mise en œuvre à petite échelle du procédé de Déshydratation-Imprégnation par Immersion ou par Douchage. En effet, des études ont été réalisées par le CIRAD (Réunion, Nouvelle Calédonie) à l'échelle du laboratoire et ont montré que la DII couplée à un fumage conventionnel permettait l'obtention de poissons fumés de qualité (Tilapia, marlin, espadon, thon, truite de montagne, poissons de lagon). D'autre part, des travaux se poursuivent sur le développement de la DII dans le domaine de la salaison à l'échelle industrielle. Mais aucun travail n'a jusqu'alors été effectué sur les possibilités d'utilisation de ce procédé appliqué aux produits carnés (poisson et viande) à petite échelle et en milieu tropical.

### ***2.1. Intérêts local et régional***

L'intérêt local et régional est bien réel puisque plusieurs demandes ont déjà été formulées sur la mise en œuvre à l'échelle artisanale du procédé CIRAD pour le salage-séchage-fumage à froid de filets de poisson (Nouvelle Calédonie, Mayotte, La Réunion). A La Réunion, les applications sont multiples puisque la consommation de produits fumés est courante. Pour le cas particulier du Tilapia, la mise en place d'une unité de traitement de ce produit par fumage à La Réunion permettrait d'une part de répondre à une demande locale et d'autre part, pourrait déboucher sur des actions à envergure régionale.

Ainsi une dernière étape consiste à valider le procédé à petite échelle et à réaliser une évaluation technico-économique complète de celui-ci, validation qui n'a pu être faite faute de données techniques (coût d'un petit fumoir à froid, coût et efficacité d'un système de régénération des solutions en DII ou DID).

La recherche de compétences locales en matière de réalisation d'équipements est intégrée dans le projet afin de réduire les coûts de fabrication d'une part et de positionner La Réunion comme leader sur la diffusion de cette technique au niveau local et régional, ceci bien entendu, dans le respect des engagements pris par le CIRAD avec ses partenaires.

## **2.2. Séquençage prévisionnel du projet**

Pour mener à bien ce projet, la mise en œuvre à l'échelle artisanale du nouveau procédé de salage-séchage-fumage à froid de filets de poissons développé par le CIRAD sera réalisée avec une application particulière au traitement d'un poisson local (le Tilapia). Pour des raisons de coût et de disponibilité de matériel et de personnel, ce travail sera réalisé en partie à Montpellier et en partie à La Réunion.

### **2.2.1. Première phase (Août 1999 – octobre 1999)**

#### Opération de salage-séchage

Le mode de mise en contact du produit avec la solution concentrée le mieux adapté (DII ou DID) sera évalué et appliqué au Tilapia. Cette étape sera réalisée à la Réunion. A Montpellier, un dispositif de maintien à saturation en sel sera réalisé et un système de filtration (filtre millipores ou poche) retenu pour la régénération des solutions concentrées. Des essais successifs seront effectués afin :

- ⇒ de valider les procédures de maintien à saturation en sel, d'ajustement de la concentration en sucre,
- ⇒ en fonction de l'efficacité de ces dispositifs, le volume de solution de traitement adéquat (l'objectif étant qu'il soit le plus faible possible),
- ⇒ d'évaluer la durée de vie des solutions de traitement avec le dispositif de filtration retenu.

#### Fumage à froid

A Montpellier, la modification d'un petit fumoir existant sera réalisée afin d'effectuer un fumage à froid de qualité. Cette étape nécessite l'étude de la meilleure liaison entre le fumoir et l'enceinte (longueur de la liaison, meilleur échange thermique, refroidissement à eau par exemple) pour avoir un bon refroidissement de la fumée, le choix entre la modification de l'enceinte existante ou la réalisation d'une nouvelle enceinte, l'optimisation de cette opération en recherchant une densité de fumée maximale dans l'enceinte.

### **2.2.1. Deuxième phase (Octobre 1999 – janvier 2000)**

Cette phase sera réalisée dans la halle de technologie du CRITT agroalimentaire à La Réunion. Elle comprend plusieurs étapes :

- ⇒ envoi du matériel de régénération et du module de fumage de Montpellier à La Réunion et implantation de l'unité pilote complète sur le site,
- ⇒ campagne d'essais étalée sur 3 mois dans la halle technologie du CRITT (octobre à décembre 1999).

### 2.2.2. Troisième phase (Février 2000 - mars 2000)

Le bilan technico-économique sera réalisé :

- ⇒ évaluation technico-économique complète de l'unité pilote,
- ⇒ dimensionnement d'une unité artisanale adaptée au traitement du Tilapia,
- ⇒ recherche de compétences au niveau local à la Réunion pour la construction d'équipements.

## ANNEXE B

### Caractéristiques biochimiques du poisson

La composition biochimique de la chair de poisson se rapproche sensiblement de celle des animaux terrestres, qu'il s'agisse de poisson marin ou d'eau douce. Si la chair de poisson peut être comparée à la viande sous l'angle de sa composition protéinique, des sels minéraux, des vitamines, on ne peut le faire en ce qui concerne la teneur en matières grasses extrêmement fluctuante selon l'espèce considérée. De surcroît, on relève une forte teneur en acides gras polyinsaturés. Le rapport de ses différents constituants entre eux a une influence marquée sur la texture de la chair. Pour résumer sur le plan pratique, la chair de poisson de petite taille (250 à 600 grammes) contient peu de lipides et présente des caractéristiques relativement neutres et dominées par les composants des myofibrilles du muscle. La chair des poissons de grande taille (2 à 4 kg) est caractérisée à la fois par les composants myofibrillaires et lipidiques.

#### Le muscle de poisson

Le muscle est la partie la plus intéressante en tant qu'aliment. Lorsque sur les chaînes de préparation on prélève les filets, ce sont essentiellement les muscles du tronc que l'on prélève. Ils représentent environ, de 35-40% du poids du poisson entier (lieu noir, merlan, cabillaud, tilapia) à 65-70% (hareng, anchois, truite). Le muscle de poisson contient les mêmes constituants protéiques que le muscle squelettique de mammifères, mais il s'en distingue par quelques caractéristiques.

	Muscle de poisson	Muscle squelettique de mammifère
Eau *	70-80	65-72
Protéines	15-26	15-23
Lipides	1-10	4-15
Glucides	0,3-1,0	0,5-1,0
Minéraux	1,0-1,5	1,0-1,3
Protéines sarcoplasmiques **	20-35	30-35
Protéines myofibrillaires	60-75	50
Protéines du stroma	2-5	15-20

TABLEAU 1 – COMPARAISON DE LA COMPOSITION DU MUSCLE DE POISSON ET DU MUSCLE SQUELETTIQUE DE MAMMIFERE [5].

(les concentrations sont exprimées en pourcentage du muscle frais)

\* exprimé en g pour 100 g de muscle,

\*\* exprimé en g pour 100 g de protéines totales.

Le collagène dont la proportion est moindre que dans le muscle de mammifère, présente une thermorésistance plus faible ; il se gélatinise dès 35-40°C au lieu de 60-65°C pour le collagène bovin. Au niveau de la composition protéique, les proportions respectives des diverses protéines myofibrillaires sont analogues dans le muscle de poisson et dans le muscle squelettique de mammifère ; il faut toutefois relever la plus grande sensibilité des molécules de myosine à la protéolyse ainsi qu'à la dénaturation par la chaleur. On retiendra ces caractéristiques lors du fumage, puisque dès 30°C, le muscle de poisson peut subir une dénaturation perceptible au niveau de la texture de la chair.

### **Evolution post mortem**

Chez le poisson, les phénomènes d'apparition et de résolution de la rigidité cadavérique sont rapides et interviennent en moyenne 5 à 22 heures après la mort pour un entreposage immédiat à +2°C. Le durcissement *post mortem* et la chute de pH restent modérés. Le pH s'abaisse généralement de 7 à 6,6-6,0 dans le cas de poissons maigres et à environ 6,0-5,6 dans le muscle brun de poisson gras.

Cet abaissement de pH du muscle est insuffisant pour inhiber ou ralentir le développement microbien. Or, les viscères et la peau du poisson sont riches en bactéries psychrotrophes et le muscle contient de nombreux composés susceptibles d'être utilisés comme substrats nutritifs de croissance.

En plus d'une activité protéolytique susceptible d'amollir rapidement les tissus, des enzymes comme les lipases ou les phospholipases restent remarquablement actives au froid positif et favorisent l'oxydation des acides gras libérés. Des activités décarboxylasiques provoquent notamment la formation d'histamine à partir d'histidine tandis que les réductases bactériennes transforment l'oxyde de triméthylamine en triméthylamine, composé odorant caractéristique du poisson non frais.

Ainsi on conçoit qu'avec un tel potentiel enzymatique et microbiologique, le poisson doit être réfrigéré immédiatement après sa mort et conservé à +2°C pendant moins de 24 heures pour conserver intactes les qualités initiales de sa chair.

Pour résumer sur le plan pratique l'évolution du muscle chez le poisson, il faut surtout retenir que le pH descend moins bas au cours de la *Rigor Mortis*, que dans la viande de boucherie. Ainsi, pour la chair de poisson, le problème de l'attendrissement ne se pose pas. Par contre, l'altération proprement dite (baisse de la solubilité des protéines, fragilisation des cellules, libération des acides gras) commence plus tôt. Le pH remonte assez vite, des saveurs désagréables apparaissent, la contamination et la multiplication bactériennes interviennent alors très rapidement.

### **Propriétés fonctionnelles des protéines myofibrillaires**

Il est à noter que les protéines myofibrillaires de poisson possèdent un bon pouvoir gélifiant. Elles sont en effet capables, à une concentration protéique proche de 20% et en présence de 0,5 M de NaCl, de former un gel élastique, d'aspect lisse et de fermeté supérieure à celle du blanc d'œuf. Dans ces conditions, les protéines subissent des modifications de structure, les protéines myofibrillaires sont partiellement solubilisées et on observe la formation d'actomyosine. La température de dénaturation s'abaisse de 5 à 10°C. La formation d'un pré-réseau élastique gélifié peut se produire à faible température : en 24 heures à 0°C ; 1-2 heures à 20°C ; 30 minutes à 40°C. Lors du salage du poisson, il faut éviter une concentration trop faible de la saumure et une température trop élevée ou un stockage trop long afin de limiter la gélification de la chair. En effet, la gélification est susceptible de modifier la texture et de gêner le dépôt de la fumée et sa migration lors de l'opération de fumage.

## ANNEXE C

### Les techniques de fumage

Il existe deux variantes à la technique de fumage :

- ⇒ Le fumage est dit à froid lorsque la température du traitement est inférieure à +28°C. Elle est généralement comprise entre +20 et +25°C. Si l'humidité relative est d'environ 75%, elle peut varier plus ou moins en fonction de la dessiccation souhaitée. On cherche à améliorer la conservation, par l'action combinée de la déshydratation et des propriétés bactériostatiques des composants de la fumée, et d'autre part à lui communiquer un goût et une odeur de fumée plus ou moins prononcés. Les produits fumés à froid sont des produits sensibles à la chaleur pour lesquels une température trop élevée pourrait entraîner une exsudation des matières grasses mal stabilisées dans la masse du produit. Dans un fumage à froid l'essentiel est que le produit reste cru après traitement.
- ⇒ Dans le cas du fumage à chaud, on cherche à cuire le produit tout en lui donnant un goût fumé. On applique au produit un traitement dit de « cuisson-fumage progressif ». La température est en début de fumage de +30 à +35°C et en fin de fumage de +50 à +55°C ; lorsque la cuisson a lieu dans la même enceinte que le fumage, cette température peut atteindre progressivement +75 à +80°C. Plus la température est élevée, et plus l'humidité relative du fumoir doit être élevée afin d'éviter les pertes par évaporation trop importantes, et un croûtage superficiel (humidité relative de 75% à 50°C, humidité relative de 90-95% à 70°C). Les pertes de poids sont beaucoup plus élevées : 20 à 25% contre 10 à 15% dans le cas d'un fumage à froid. Les durées de fumage sont plus courtes à la suite de l'augmentation importante de la vitesse de dépôt de la fumée dans les conditions de températures et d'hygrométrie mises en application. Dans le cas du fumage à chaud, la cuisson permet de faire exsuder les graisses. En règle générale, les poissons maigres sont fumés à froid, les poissons gras peuvent être fumés à chaud ou à froid.

#### Nature du bois

Selon la nature du bois choisi, la couleur, l'odeur et la saveur du poisson fumé peuvent varier. Les bois durs sont pratiquement les seuls utilisés. Les bois les plus couramment employés sont, dans l'ordre : le hêtre, le chêne, le noyer, l'orme, et le bouleau. A La Réunion, le bois de pêcher sauvage semble très apprécié car il a la réputation de donner une belle couleur et un bon goût au produit (le seul problème est qu'on ne le trouve pas en grande quantité) ; l'acacia est un autre bois approprié au « boucanage ». Il est présent en grande quantité dans les hauts de l'île, mais les seuls inconvénients sont qu'il ne donne pas de goût au produit, et qu'il se consume très vite. D'autres bois sont également utilisés pour le fumage, en l'occurrence, le tamarin, le litchi, et le filao.

Les générateurs de fumée modernes travaillent essentiellement avec des copeaux ou sciures calibrés, préalablement séchés ou avec de la sciure à humidifier plus ou moins avant usage. Les résineux (cryptomeria par exemple) sont à proscrire en raison de la saveur acide qu'ils confèrent au produit et de la contamination importante en 3-4 benzopyrène qu'ils entraînent.

### Composition du bois

Les composants chimiques du bois sont nombreux. Les principaux sont décrits comme un ensemble de polymères dont les plus représentatifs sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine dans les proportions 2/1/1 (CAUMARTIN-AUORE, 1998). Les autres composés des bois sont les sucres, les protéines, les résines, les tannins, les gommages, les pigments, les huiles essentielles et les matières minérales.

Le bois se compose de deux fractions (KNOCKAERT, 1990) :

- ⇒ les polyoses : essentiellement de la cellulose et de l'hémicellulose (partie tendre du bois),
- ⇒ la lignine : partie dure du bois.

### La fumée

La pyrolyse de la cellulose aboutit à la formation d'acide acétique, d'eau et de phénols. La pyrolyse de l'hémicellulose donne des acides carboxyliques aliphatiques. La pyrolyse de la lignine conduit à des composés phénoliques (phénols, éthers). La combustion complète du bois conduit à la formation d'eau, de gaz carbonique et de cendres (résidus minéraux). Pour produire de la fumée, la réaction de combustion est incomplète et met en jeu d'une part, la décomposition sous l'action de la chaleur des polymères constitutifs du bois en molécules organiques de faibles poids moléculaire, et d'autre part, des réactions d'oxydation, de polymérisation et de condensation. D'autres réactions succèdent à la pyrolyse du bois. En effet, lors de la pyrolyse, certains composés volatils peuvent être décomposés en radicaux éthylène et en hydrogène. Ceux-ci subissent des réactions diverses, de dimérisation, télomérisation, dépolymérisation cyclisation et aromatisation (CAUMARTIN-AUORE, 1998). C'est ainsi que la formation de HAP comme le naphtalène et de 3-4 benzopyrène sont initiés à partir de radicaux éthylène. Le phénanthrène est issu de l'interaction d'unités intermédiaires intervenant dans la formation du naphtalène. L'anthracène, lui, provient du réarrangement du phénanthrène.

Empiriquement, les conditions optimales pour la production d'une fumée de qualité « alimentaire » non toxique et efficace sont :

- ⇒ une température de combustion de 350 à 400°C,
- ⇒ une température d'oxydation de 375°C,
- ⇒ une vitesse d'air en corrélation avec l'humidité et la fragmentation du bois,
- ⇒ l'utilisation de bois dur de préférence à 17-20% d'humidité,
- ⇒ un refroidissement préalable de la fumée permettant la condensation des HAP.

Les réactions qui se produisent durant l'élaboration de la fumée, son transfert et son dépôt à la surface de la chair et les interactions entre les constituants de la fumée et les protéines, lipides et autres molécules biochimiques du poisson ne sont pas encore connus avec précision. La fumée est constituée d'une suspension de particules solides et liquides en milieu gazeux. Les substances contenues dans ces phases sont les mêmes, mais en concentration différente.

La phase liquide représente environ 90% de la fumée, ses particules mesurent environ 0,1 micron, sont peu solubles et ont des points d'ébullition élevés. Les substances chimiques les plus volatiles, et qui sont absorbées par le poisson, se trouvent principalement dans la phase vapeur. Elles se dissolvent dans l'eau superficielle du poisson. Les gouttelettes ou phase particulaire ne jouent pas un rôle essentiel dans le processus de fumage mais servent plutôt de réservoir à constituants pour la phase gazeuse.

L'équilibre entre les deux phases peut être modifié par la température et par l'admission d'air ; la proportion de particules solides et liquides dans le milieu gazeux détermine la densité de fumée (KNOCKAERT, 1990).

#### Composition chimique de la fumée

La composition de la fumée de bois est extrêmement complexe. Plus de 200 constituants ont été identifiés. Ils peuvent être classés en phénols (les plus importants), acides organiques, alcools et composés carbonylés. Les fumées contiennent de nombreux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) mais ces constituants sont quantitativement peu importants dans les poissons fumés (de l'ordre de quelques ppb) ; seuls certains d'entre eux (en particulier le 3-4-benzopyrène ou BaP et le dibenzanthracène) retiennent l'attention en raison de leur cancérogénicité possible. Ces produits se situeraient plus dans la phase particulaire que dans la phase gazeuse. La teneur en 3-4 benzopyrène peut être limitée par une température de pyrolyse de 450 °C et une condensation de la phase particulaire par refroidissement de la fumée (KNOCKAERT, 1990). L'OMS (Organisation mondiale de la santé) admet une teneur maximale en 3-4 benzopyrène de 1 µg par kg de chair (1ppb).

#### Propriétés des fumées

On admet généralement qu'une fumée provenant de la combustion d'un bois dur donne un produit fumé de meilleure qualité (CAUMARTIN-AURORE, 1998). Ainsi, le hêtre, le chêne, l'orme et le frêne assureraient une meilleure qualité de fumage à une denrée alimentaire que le bouleau, l'aulne ou le saule.

Le fumage permet d'améliorer à la fois l'aspect, la conservation et les qualités gustatives d'un produit carné. Quatre critères permettent d'apprécier l'efficacité des fumées sur un produit carné : la couleur, la saveur, la texture et la conservation. Des effets indésirables peuvent aller à l'encontre des qualités recherchées. Ceux-ci sont attribués à des composés chimiques précis de la fumée (dérivés carbonylés, HAP) qui provoquent la détérioration des qualités des aliments fumés.

### ☞ La couleur

La couleur caractéristique des produits fumés varie du jaune doré au brun foncé, avec des variantes liées essentiellement aux paramètres technologiques retenus lors du fumage. Cette coloration est due à des réactions de brunissement non enzymatiques, type réaction de Maillard, impliquant des interactions entre les groupements oxygénés des molécules carbonylées présentes dans les fumées acides, plus particulièrement glyoxal, méthyl-glyoxal, diacétylène, furfural et glycéraldéhyde, et les groupements aminés des protéines des produits carnés (CAUMARTIN-AUORE, 1998).

Les produits de ces interactions conduisent à l'apparition d'une couleur de rouille, phénomène appelé « RUSTING » par les Anglo-saxons. La couleur caractéristique du produit fumé est aussi fonction du taux d'humidité initiale en surface. La mise en couleur se trouve facilitée par une humidité faible.

### ☞ La flaveur

La flaveur d'un aliment regroupe à la fois le goût (impressions gustatives) et l'odeur (impressions olfactives) ressentis au moment de sa consommation. Dans le cas d'un produit fumé, la flaveur représente l'ensemble des caractéristiques de « l'arôme de fumé ». Cet arôme de fumée est dû à un mélange de composants de fumée : phénols, composés carbonylés, lactones, acides, furanes, etc (CAUMARTIN-AUORE, 1998). Une proportion significative de l'arôme « fumée » est attribuée à la fraction phénolique, notamment les phénols de bas ou moyen point d'ébullition. Les composés carbonylés, les acides organiques, la vanilline, le diacétylène, bien que ne jouant qu'un rôle mineur, participent également à l'arôme typique. L'odeur de fumée est plutôt associée au syringol et au 2-6 diméthoxy-méthylphénol alors que le gáïacol et l'eugénol contribuent surtout au goût de fumée. Les composés carbonylés tels que les cétones linéaires et cycliques (1,2-cyclopentanedione, et les homologues de 2-buténolide) jouent un rôle par l'adoucissement des saveurs fortes apportées par les phénols. Cependant, une remarque s'impose : en raison des interactions entre les constituants de la fumée et ceux du poisson lui-même, la flaveur du produit fumé ne dépend pas des seuls éléments de la fumée.

### ☞ La texture

Le fumage a également une action sur la texture. Il y a d'abord une action de la chaleur pendant le séchage préalable puis pendant celui concomitant au fumage ; ensuite les constituants même de la fumée modifient un peu la texture. La texture du poisson fumé à froid est molle et tendre, celle du poisson fumé à chaud est plus dure et plus sèche. Il est toutefois possible d'obtenir des poissons fumés à chaud qui ne durcissent que légèrement en surface et restent moelleux à l'intérieur. Les modifications essentielles : perte d'eau, fusion de la matière grasse, dénaturation des protéines du tissu conjonctif (gélatinisation de la couche sous-cutanée dans le fumage à chaud) sont plutôt l'œuvre de la température, d'autant qu'il est notoire que les protéines du poisson figurent parmi les plus sensibles à la chaleur.

Toutefois la pellicule brune brillante lustrée qui se forme ensuite sur la surface sèche de la chair de poisson pendant le fumage résulte de l'action du formaldéhyde de la fumée qui coagule les protéines avec l'aide des acides volatils. Certains spécialistes attribuent la pellicule brillante lustrée à la dessiccation de la solution d'actomyosine formée lors du salage préalable.

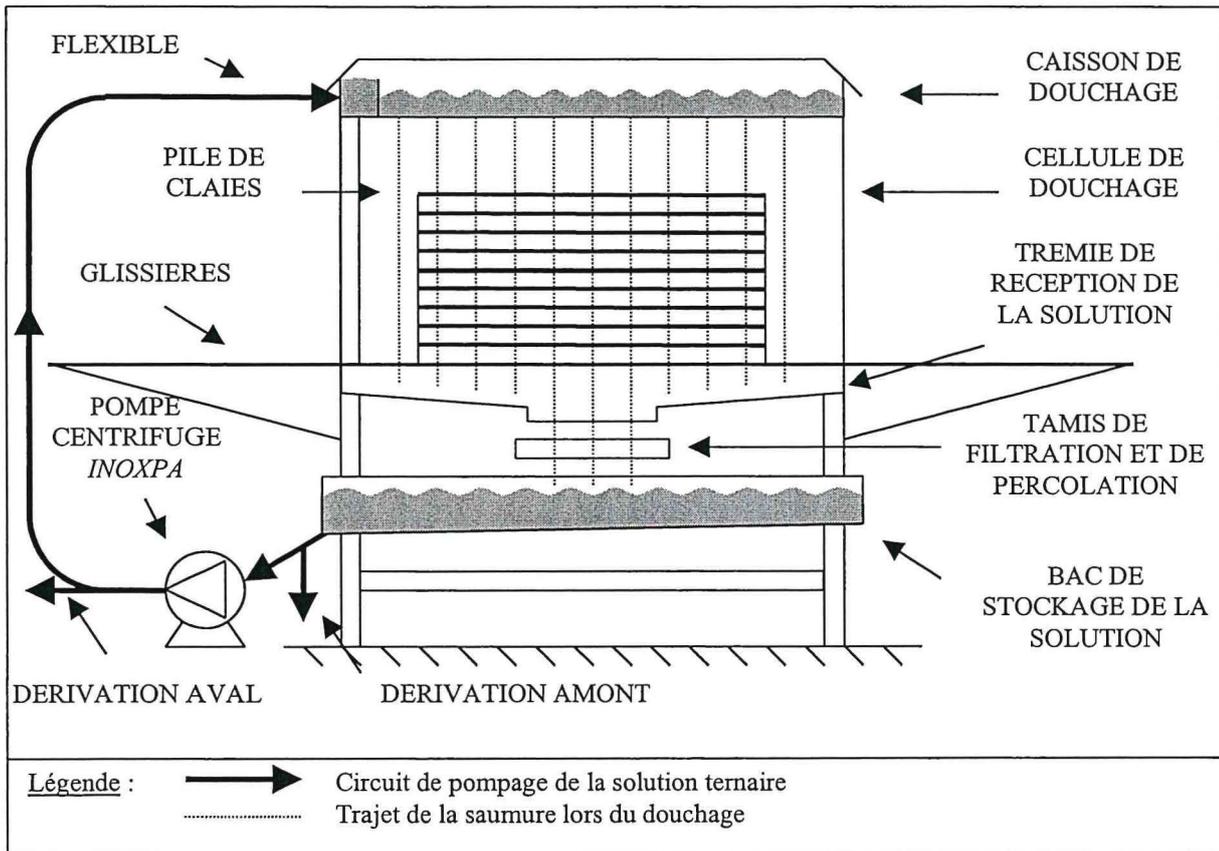
#### ☞ La conservation

La conservation d'un produit carné est favorisée par la fumée qui met en jeu deux types d'actions. La première action est antioxydante, elle retarde les réactions de dégradation oxydative des lipides (les phénols seraient les composés antioxydants des fumées). La deuxième est antimicrobienne, elle diminue ou stabilise la charge microbienne du produit fumé (cette action antimicrobienne est attribuée à l'origine au méthanal, aux phénols, aux acides pyrolytiques et à de nombreux autres composés).

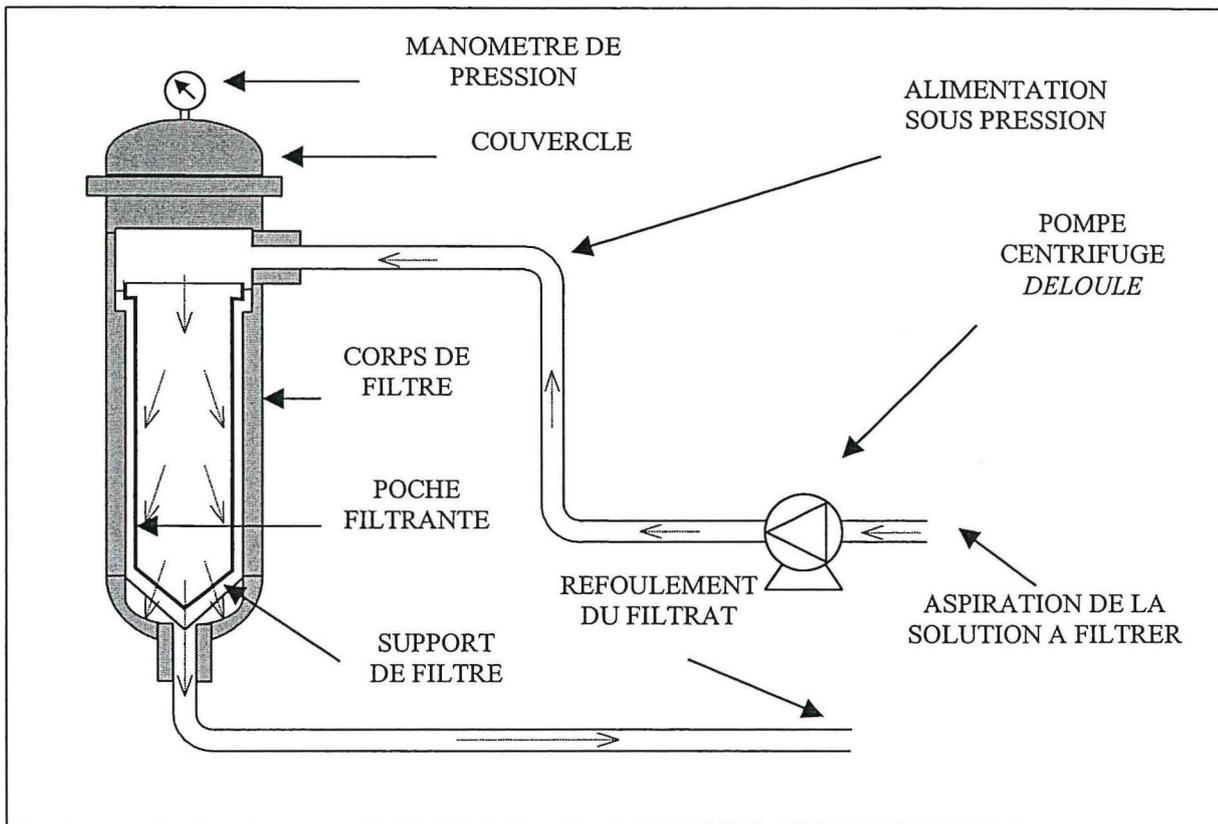
Pour conclure, résumons en quelques mots l'action biochimique de la fumée. Dans le cas du fumage à froid, les pertes en lysine des protéines se situent autour de 20% alors qu'elles peuvent excéder 55% par fumage à chaud traditionnel. En dehors de la dénaturation partielle des protéines et d'une C-nitrosation des phénols, le rôle intéressant de la fumée est surtout un effet antioxydant dû aux phénols sur les lipides du poisson : ils inhibent la phase de propagation de l'autoxydation. Alors que dans le fumage à chaud, c'est surtout la chaleur qui détruit les microorganismes, dans le fumage à froid c'est la fumée qui joue le rôle essentiel. Bien que l'on ait longtemps considéré le formol comme la cause principale de l'action antibactérienne de la fumée, il est désormais établi que ce sont les phénols à bas point d'ébullition qui sont les plus actifs. Leur action est sélective, mais cet effet sélectif est lui-même très diversifié selon les types de fumées.

## ANNEXE D

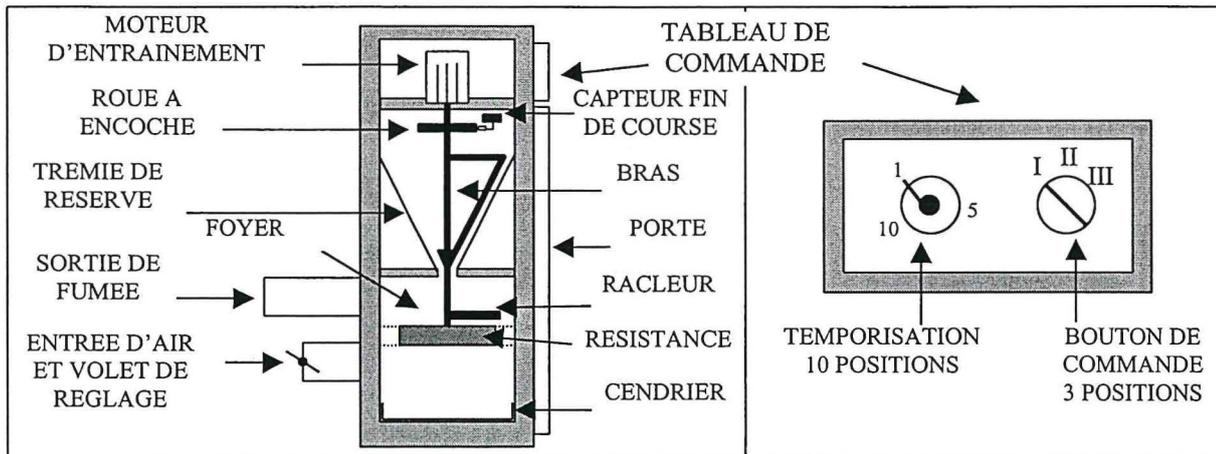
### Schémas descriptifs de l'équipement CIRAD



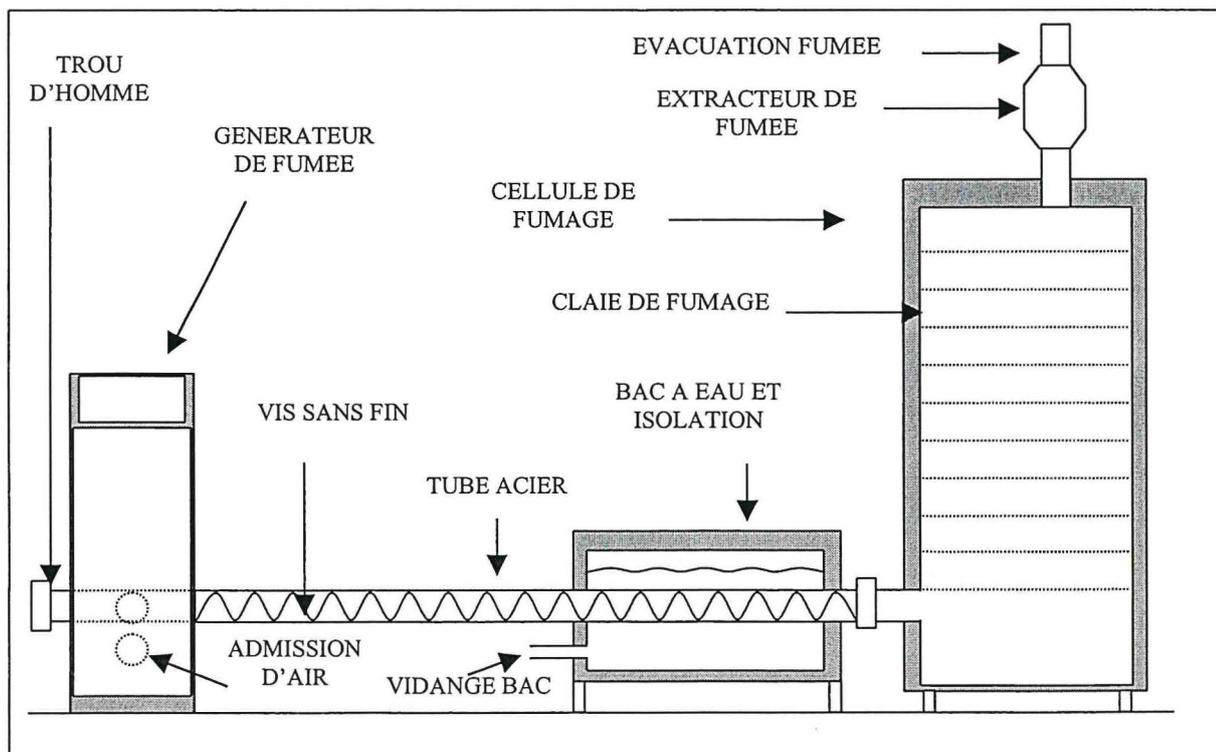
SCHEMA DU PILOTE ARTISANAL DE DOUCHAGE



DISPOSITIF DE FILTRATION FRONTALE PAR POCHE FILTRANTE



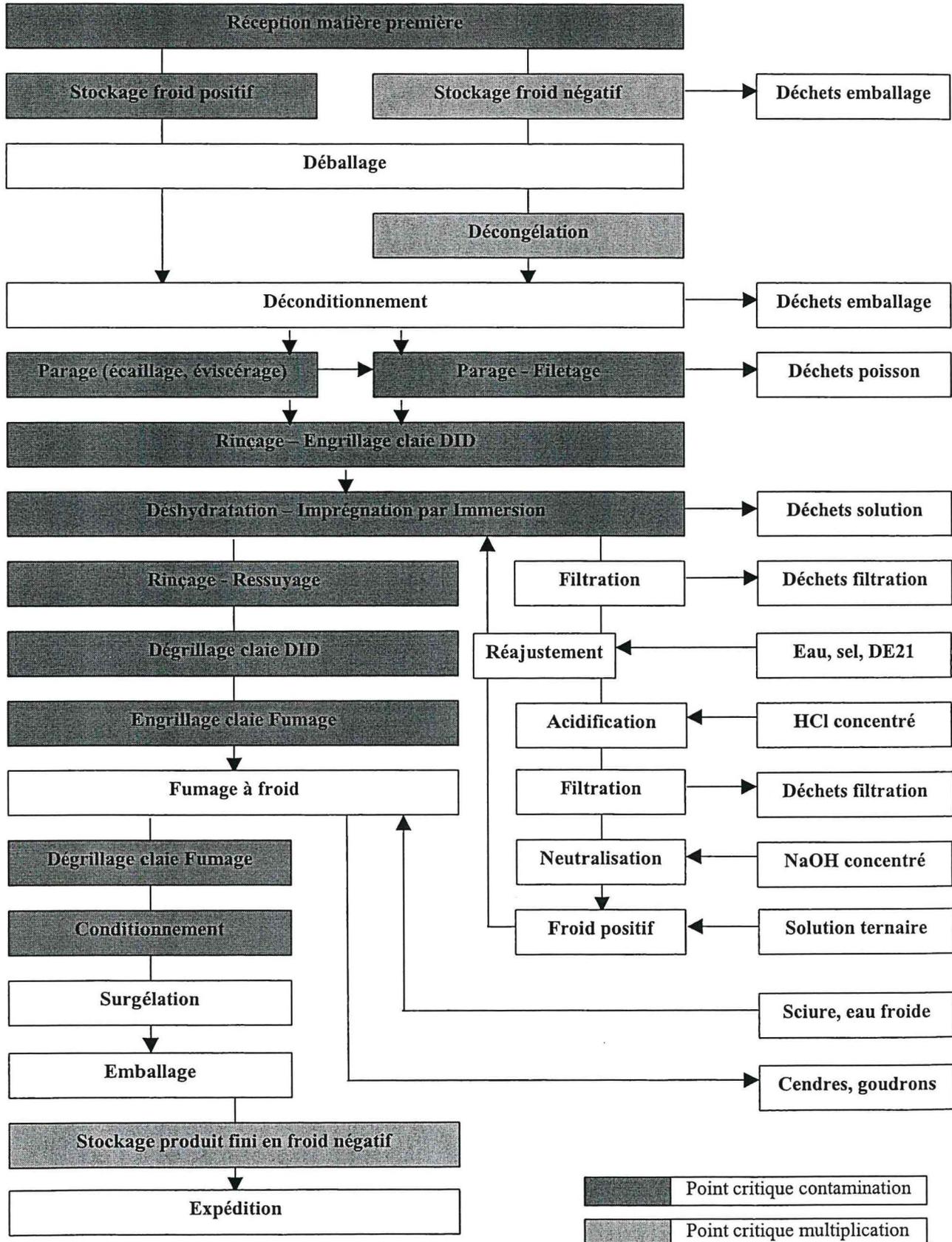
SCHEMA DU GENERATEUR DE FUMEE (VUE LATERALE) ET DETAIL DU TABLEAU DE COMMANDE



SCHEMA DU PILOTE ARTISANAL DE FUMAGE (VUE ANTERIEURE)

# ANNEXE E

## Synoptique de transformation



## Procédure de travail : séquençage de l'opération de DID

<i>Détails des opérations</i>	<i>Commentaires</i>
Nettoyage et désinfection de l'atelier	Suivre le plan de nettoyage
Préparation de la matière première	Ecaillage, éviscération, étêtage, puis filetage du poisson
Nettoyage et désinfection de l'atelier	Suivre le plan de nettoyage
Nettoyage et désinfection du pilote	Suivre le plan de nettoyage
Préparation de la solution	<p>Protocole de réajustement de la solution ternaire (si solution préalablement saturée en sel) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ déterminer la masse volumique à +3°C en immergeant le densimètre dans une éprouvette de 500 ml remplie de solution</li> <li>▪ déterminer la masse de solution par pesage</li> <li>▪ utiliser la feuille de calcul Excel qui d'après la masse de solution initiale et sa densité donne les quantités d'eau, sel et sirop de glucose à rajouter pour obtenir le volume de solution désirée à la concentration en sucre souhaitée</li> </ul>
Saturation en sel pendant la DID	Peser la masse de produit à traiter puis déterminer la quantité de sel à rajouter sur le tamis 500 µm pour assurer la saturation de la solution. Toujours mettre une quantité de sel en excès (10 à 20%) par rapport à la quantité calculée
Filtration 1µm et réajustement éventuel du pH de la solution	<p>Protocole de neutralisation (si début de journée de production) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ filtrer la solution à 1 µm puis la remettre dans le fût</li> <li>▪ ajouter de l'hydroxyde de soude concentré jusqu'au pH 6,2</li> </ul>
Transfert et filtration de la solution vers le bac de stockage du pilote	<p>Protocole de filtration/chargement de la solution :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ placer un filtre 1 µm propre dans le corps de filtre</li> <li>▪ brancher le flexible de sortie du filtrat sur le circuit de douchage au niveau de la dérivation amont</li> <li>▪ placer le flexible d'aspiration de la pompe dans le fût de stockage, mettre en route la pompe de transfert</li> <li>▪ après filtration, couper la pompe afin d'éviter qu'elle tourne à sec et nettoyer le filtre et le matériel de filtration au DIVOSAN S3</li> </ul>
Préparation des claies	Disposition de la matière première sur les claies propres
Chargement du pilote	Chargement de la pile de claies dans la cellule de douchage
Douchage	Mise en route de la pompe de douchage puis arrêt après la durée de douchage fixée
Déchargement du pilote	Déchargement de la pile de claies de la cellule de douchage

## Procédure de travail : séquençage de l'opération de DID (suite)

<i>Détails des opérations (suite)</i>	<i>Commentaires</i>
Transfert et filtration de la solution vers le fût de stockage	Protocole de filtration/vidage de la solution : <ul style="list-style-type: none"><li>▪ placer un filtre 1 µm propre dans le corps de filtre</li><li>▪ placer le flexible de sortie du filtrat dans le fût de stockage</li><li>▪ brancher le flexible d'aspiration de la pompe sur le circuit de douchage au niveau de la dérivation aval, mettre en route la pompe de transfert</li><li>▪ après filtration, couper la pompe afin d'éviter qu'elle tourne à sec et nettoyer le filtre et le matériel de filtration au DIVOSAN S3</li></ul>
Rinçage des claies et ressuyage	Rinçage à l'eau glacée des filets sur les claies puis égouttage des filets
Acidification de la solution	Protocole d'acidification (si fin de journée de production) : <ul style="list-style-type: none"><li>▪ ajouter de l'acide chlorhydrique concentré jusqu'à un pH inférieur à 2</li><li>▪ stocker le fût de solution à +2°C</li></ul>
Transfert des filets	Les filets sont transférés des claies DID vers les claies de fumage
Nettoyage et désinfection du pilote	Suivre le plan de nettoyage
Nettoyage et désinfection de l'atelier	Suivre le plan de nettoyage

## Procédure de travail : séquençage de l'opération de fumage

<i>Détails des opérations</i>	<i>Commentaires</i>
Mise en route du pilote	Mise sous tension de la cellule et du générateur, chargement en sciure de la trémie
Réglage des paramètres de fumage	Ouvrir à fond le volet d'admission d'air au générateur, régler le débit de sciure sur la position 1, régler le débit d'extraction d'air sur la position 10
Remplissage éventuel du bac à eau	Après avoir fermé la vanne de vidange, remplir le bac d'eau ou d'eau plus glace
Réglage des paramètres de fumage	A l'apparition de fumée dans la cellule, régler le débit d'extraction d'air de telle manière que le tirage soit minimal (première position de l'extracteur où il n'y a pas de refoulement de fumée à l'entrée d'air du générateur) et éventuellement ajuster le volet d'admission d'air et le débit de sciure
Chargement du fumoir	Lorsque la densité dans la cellule est maximale et que la température de cellule est inférieure à 30°C, placer les claies de fumage
Déchargement du fumoir	Lorsque le temps de fumage est écoulé ou que le fumage est jugé suffisant, couper l'extraction de fumée et le générateur puis retirer les claies de fumage
Nettoyage du générateur et de la cellule	Vider le cendrier du générateur, laver l'intérieur de la cellule au détergent et rincer à grande eau
Nettoyage de la vis sans fin et de l'extracteur	Suivant la fréquence d'utilisation, il faut plus ou moins souvent nettoyer vis sans fin et pâles de l'extracteur

## Plan de nettoyage et désinfection des postes de travail

Local	Matériel et surface	Action	Produit	Fréquence (*)					Responsables
				vu	pu	Q	h	m	
ATELIER	Sol	Nettoyage et désinfection	Déogen SL		X				Personnel de l'atelier
	Tables, bacs		DIVOSAN S3	X	X				
	Matériel de découpe et de conditionnement		DIVOSAN S3	X	X				
	Equipement DID		DIVOSAN S3	X	X				
CHAMBRE FROIDE POSITIVE	Sols, plafonds, murs, portes et étagères	Nettoyage et désinfection approfondie à la mousse	Déogen SL				X		Personnel de l'atelier et personnel d'entretien
SAS	Toutes surfaces : sols, murs, plafonds, portes et tout matériel	Nettoyage et désinfection approfondie à la mousse	Déogen SL				X		Personnel d'entretien
HALL ENTREE	Sol	Nettoyage et désinfection avec brossage	Déogen SL			X			Personnel d'entretien
VESTIAIRE	Sols	Nettoyage et désinfection	Déogen SL			X			Personnel d'entretien
SANITAIRE	Installations sanitaires	Nettoyage et désinfection	Déogen SL			X			Personnel d'entretien

(\*) vu = avant chaque utilisation

(\*) pu = après chaque utilisation

q = quotidienne

h = hebdomadaire

m = mensuelle

1 - Après nettoyage, tout matériel et produits rangés en local fermé à clefs

2 - Séparer le matériel affecté au nettoyage des zones de manutention et celui destiné aux vestiaires et bureau

3 - Nettoyages à faire en dehors / après manipulation de produits (nus)

4 - Identifier les bidons et flacons de produits de nettoyage : nature, concentration

5 - Port obligatoire de gants et lunettes de protection par le personnel lors de la préparation et

l'application des produits de nettoyage et désinfection.

Certains produits très concentrés en soude ont un pouvoir corrosif puissant

6 - Ne jamais mélanger les produits / solutions de nettoyage différents entre eux

7 - Bien respecter les **concentrations** et **temps d'action** - sauf spécification contraire, ne pas

laisser sécher le produit sur la surface avant rinçage

8 - Chaque produit a une action spécifique : ils ne sont pas interchangeables entre eux !

## Essais préliminaires réalisés à Montpellier

### 1. Matériels et méthodes

#### 1.1. Déroulement et description des essais

Une première série d'essais préliminaires sur la régénération et le réajustement de la solution ternaire a été réalisée à Montpellier de septembre à octobre 1999, simultanément avec la conception et la fabrication du pilote de fumage à froid.

##### Dispositifs expérimentaux

L'équipement utilisé à Montpellier pour l'étude de la DID est le pilote de laboratoire (Annexe L). Ce dernier est composé d'un caisson de douchage identique à celui du pilote artisanal de la Réunion (même dimension et même porosité) intégré dans une cellule de douchage reposant sur une cuve réfrigérée à double paroi. Un tamis de 450 mm de diamètre et de seuil de coupure 500  $\mu\text{m}$  permet une filtration en ligne. Le système de filtration utilisé est celui défini dans la partie précédente.

##### 1.1.1. Etude de la cinétique de saturation en sel d'une solution ternaire

Cet essai a pour but de déterminer le temps nécessaire à la re-saturation en sel par percolation sur un lit de cristaux d'une solution ternaire eau/sel/sucre initialement non saturée en sel. Afin d'étudier uniquement la cinétique de dissolution du sel, l'expérience a lieu dans le pilote de douchage sans chargement de poisson.

La matière première utilisée pour la préparation de la solution ternaire est :

- ⇒ de l'eau froide du réseau,
- ⇒ du sel fin de mer en conditionnement de 50 kg,
- ⇒ du sirop de glucose déshydraté *GLUCIDEX* DE21 de marque *Roquette* en conditionnement de 25 kg.

Après avoir pesé les différents ingrédients, la solution est agitée jusqu'à dissolution complète du sel et du sucre, puis transférée dans la cuve du pilote régulée à +15°C. Une quantité de sel excédentaire est placée sur le tamis 500  $\mu\text{m}$ , le douchage est lancé et la cinétique de re-saturation est suivi par prélèvement fréquent de solution dans la cuve. En fin d'essai, la solution est stockée à +4°C sans aucun traitement particulier.

#### Paramètres initiales de la solution :

Durée de traitement : 40 minutes

Concentration en sel : environ 330 g/L d'eau

Concentration en DE21 : environ 500 g/L d'eau

#### 1.1.2. Evolution de la teneur en sel de la solution ternaire et de la matière première au cours du cycle de DID

Cet essai a pour objet d'étudier les cinétiques de gain en sel pour la matière traitée et de perte en sel pour la solution ternaire lors d'un cycle de DID de 120 minutes. La matière première utilisée est du filet congelé de hareng d'un poids unitaire de 30 à 50 grammes. La solution ternaire est initialement saturée en sel mais la saturation n'est pas entretenue. Les filets de hareng sont disposés sur 19 claies de 30 mm de hauteur.

#### Paramètres du cycle de DID

Durée de traitement : 120 minutes

Concentration en sel : environ 350g/L d'eau

Concentration en DE21 : environ 500 g/L d'eau

Masse totale de harengs avant traitement : 15,650 kg disposés sur 19 claies

Les filets des claies n°14 et n°15 sont pesés séparément avant le traitement. Ils sont ensuite prélevés toutes les 10 minutes pour pesage et détermination de la teneur en sel.

#### 1.1.3. Test d'un système de saturation continue en sel de la solution ternaire

Au cours d'un cycle de DID, la solution ternaire percole sur un lit de cristaux de sel déposé sur la toile du tamis, le but de l'essai étant d'obtenir une saturation permanente en sel de la solution.

#### Paramètres du cycle de DID

Durée de traitement : 120 minutes

Concentration en sel : environ 350g/L d'eau

Concentration en DE21 : environ 500 g/L d'eau

Masse totale de harengs avant traitement : 16,750 kg disposés sur 19 claies

Les filets des claies n°14 et n°15 sont pesés séparément avant le traitement. Ils sont ensuite prélevés toutes les 15 minutes pour pesage et détermination de la teneur en sel. En parallèle, un échantillon de solution est prélevé toutes les 15 minutes pour détermination de la teneur en sel.

#### 1.1.4. Evolution de la turbidité de la solution et essai de régénération par filtration frontale

Dans un premier temps, les prélèvements réalisés lors des deux cycles de DID servent à la détermination de la turbidité de la solution afin de suivre son vieillissement.

Dans un second temps, l'essai de régénération porte sur la mise en œuvre du système de filtration X100 de FSI utilisant des filtres poche de porosité 1 à 100  $\mu\text{m}$ . Une pompe volumétrique de débit 24 litres par minute assure le passage de la solution au travers du filtre poche. La solution ayant subi au préalable deux cycles de 120 minutes de DID sur 16 kg de harengs, on réalise trois filtrations successives de 100, 10 puis 1  $\mu\text{m}$ . Au cours de chaque filtration, la masse de filtrat est mesurée à intervalle régulier afin de déterminer la cinétique de filtration et d'identifier d'éventuels problèmes de colmatage du média filtrant. Après chaque filtration, un échantillon de filtrat est prélevé pour la détermination de sa turbidité. L'efficacité de la filtration est alors fonction de la turbidité mesurée. Il est à noter que la solution ne subit pas de modification de pH au préalable.

## 2. Résultats - discussions

### 2.1. Essais préliminaires sur le comportement de la solution ternaire

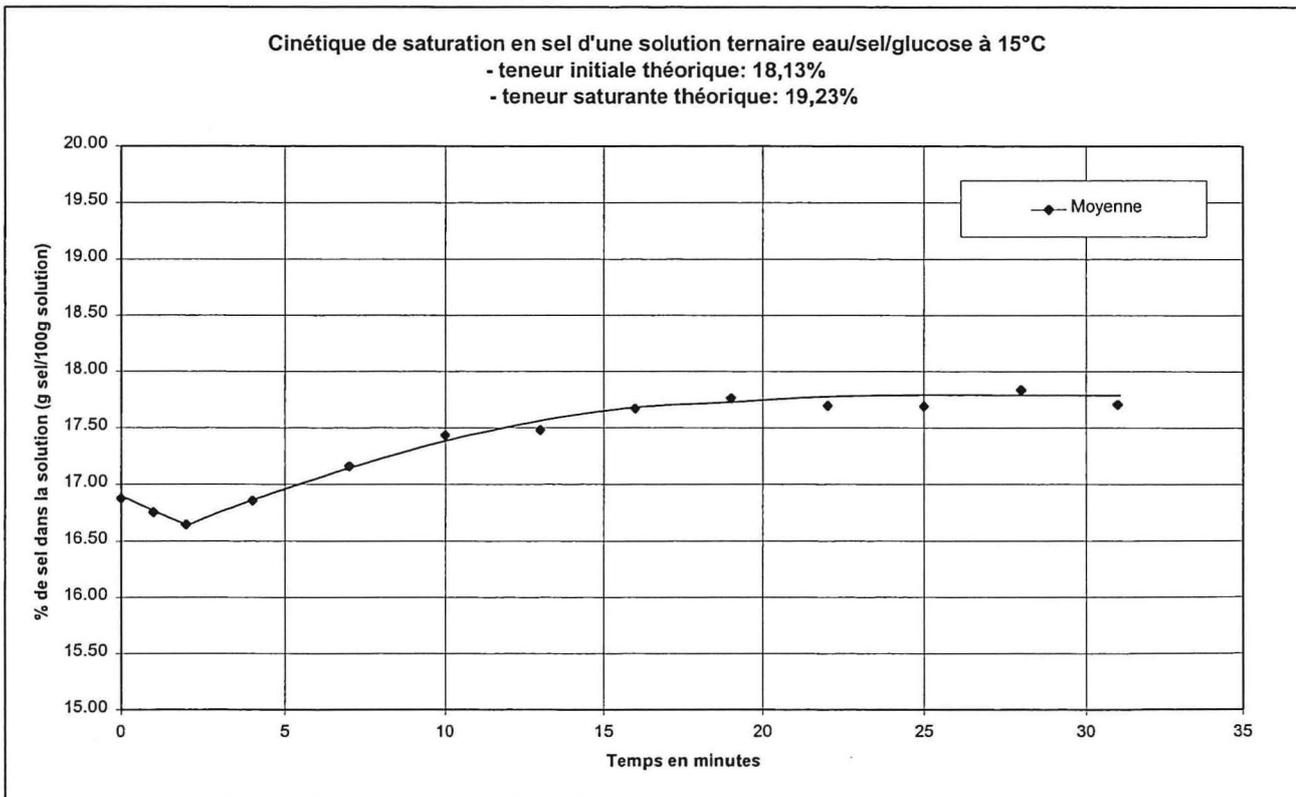
#### 2.1.1. Etude de la cinétique de saturation en sel d'une solution ternaire

##### Observations

Entre 0 et 5 minutes, le lit de cristaux de sel induit une perte de charge se traduisant par une montée de la solution à mi-hauteur du tamis. Entre 5 et 10 minutes, la hauteur de solution diminuant graduellement, la majorité des cristaux atteint une granulométrie inférieure à 500  $\mu\text{m}$  et est entraînée en fond de cuve. Vers 30 minutes de douchage, il ne subsiste que quelques cristaux, la totalité du sel est soit dissous, soit en fond de cuve.

##### Courbe de saturation en sel

L'analyse de la teneur en sel pour chaque prélèvement donne la cinétique suivante. On remarque que les concentrations relevées sont inférieures à celles attendues. De plus, il existe un effet de dilution pendant les premières minutes de l'essai.



Il semble que le volume mort de la pompe et des canalisations où subsiste toujours de l'eau après rinçage soit responsable de cet effet de dilution et de l'écart relevée entre la valeur théorique de saturation et la valeur réelle.

Dans ces conditions, le temps nécessaire à la saturation en sel de la solution ternaire est de 20 minutes au minimum, ce qui correspond à une vitesse de dissolution moyenne de 40 g de sel par minute. Etant donné que les caractéristiques de la solution initiale sont proches de celles ayant subi un cycle de DID avec 15 kg de poisson, il faut 20 minutes de réajustement de la teneur saturante en sel si aucun dispositif de maintien en ligne de la saturation n'existe.

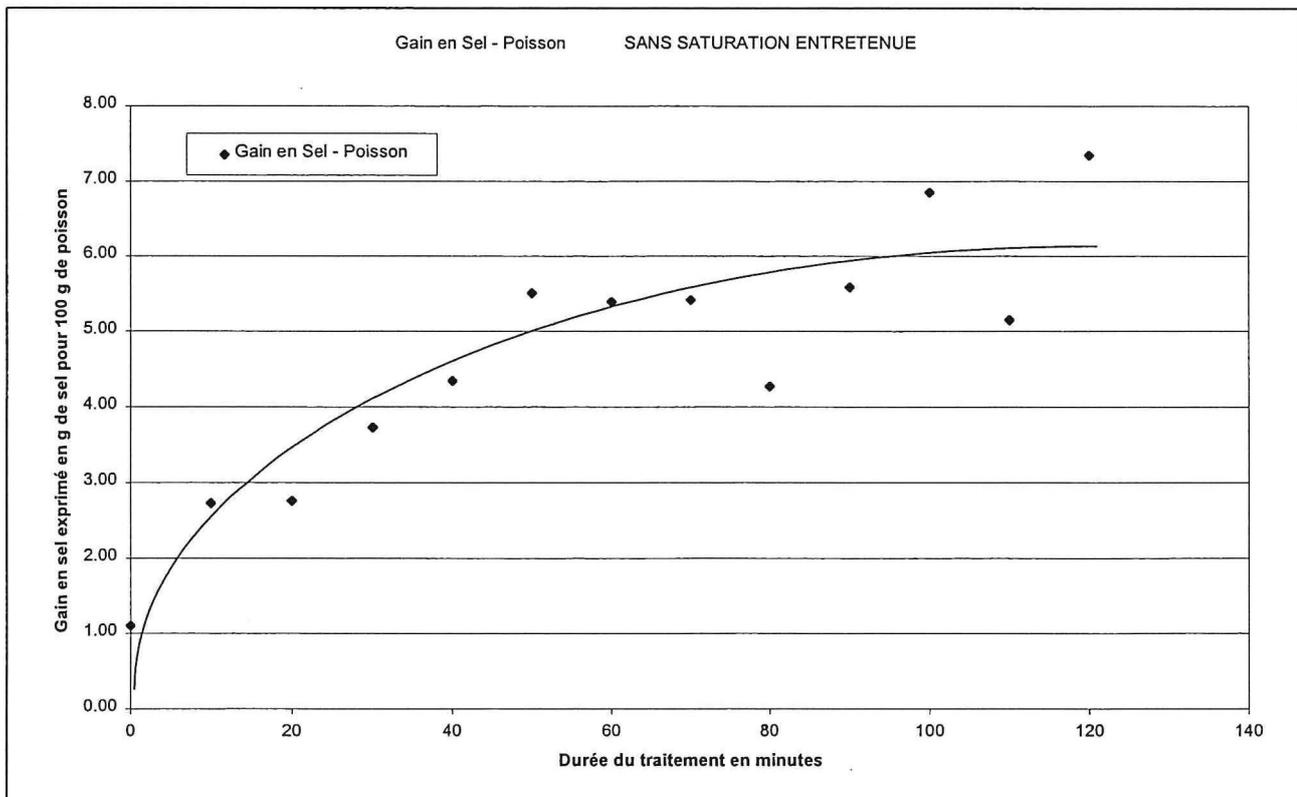
### 2.1.2. Evolution de la teneur en sel de la solution ternaire et de la matière première au cours du cycle de DID

#### Observations lors du douchage de 15 kg de filets de hareng

De la mousse fait son apparition après 15 minutes de traitement puis croît jusqu'à la fin du cycle de DID. Cette mousse ne perturbe pas le douchage proprement dit puisque l'écoulement sur les filets reste satisfaisant, mais a pour conséquence un nettoyage plus long de l'équipement et notamment du caisson de douchage.

#### Courbe d'évolution du gain en sel dans les filets

La cinétique de gain en sel des filets de hareng est seulement indicative, étant donné la hétérogénéité des teneurs en sel. Néanmoins, on peut estimer le gain en sel moyen à 6% environ à l'issue des 120 minutes de traitement.



Dans ces conditions, la vitesse moyenne de transfert du sel, de la solution vers le poisson, est d'environ 6 g par minute. La vitesse de dissolution du sel dans la solution (essai précédent) étant nettement supérieure à la vitesse d'imprégnation du sel, on peut présumer que la percolation en ligne de la solution sur des cristaux de sel suffira à maintenir une teneur saturante pendant le cycle de DID.

Concernant la solution ternaire, la teneur en sel passe de 18 à 16 % en 120 minutes, diminuant d'autant son pouvoir d'imprégnation.

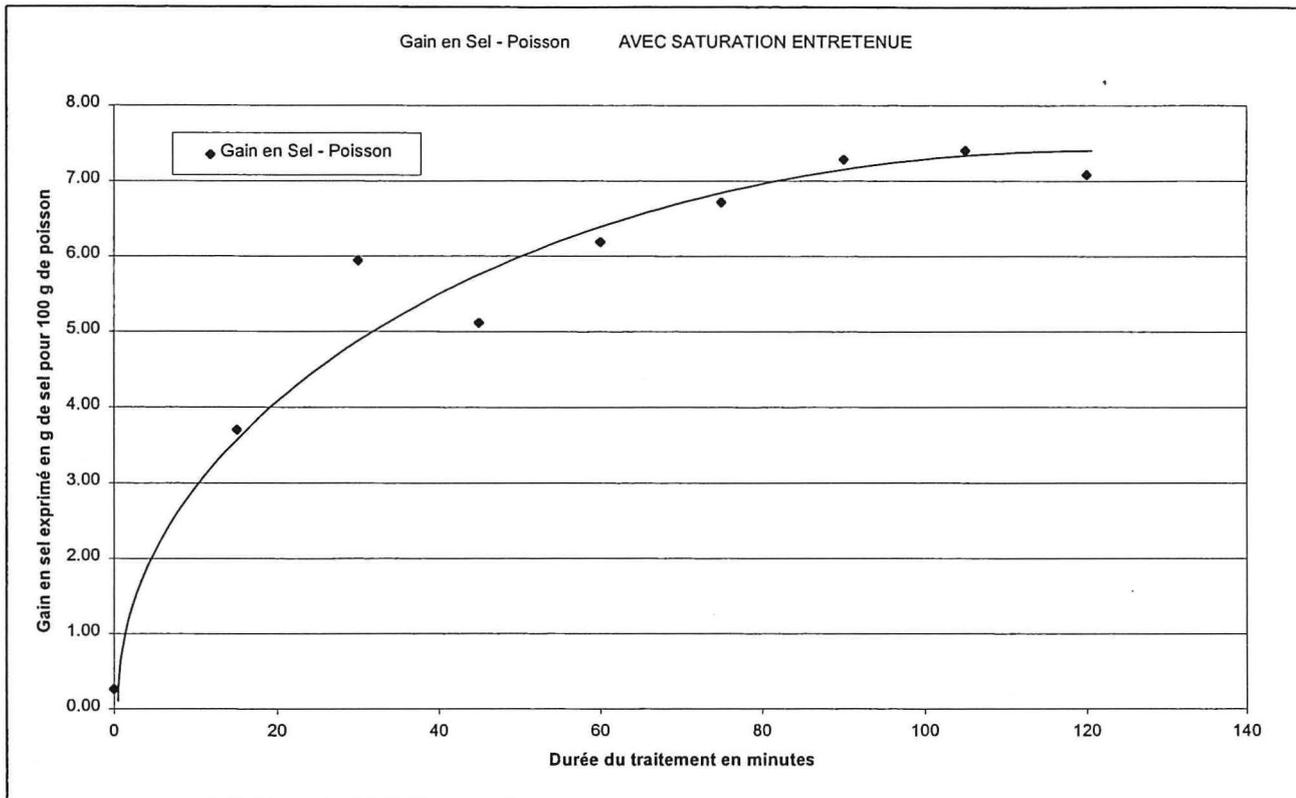
Le bilan sur les transferts de matière au cours du cycle de DID donne les flux suivants exprimés pour 100 grammes de hareng :

- ⇒ 9 grammes d'eau migrent du poisson vers la solution,
- ⇒ 6 grammes de sel migrent de la solution vers le poisson.

### 2.1.3. Test d'un système de saturation continue en sel de la solution ternaire

#### Observations lors de l'essai

Un excès de sel est placé sur le tamis avant le déclenchement du cycle de DID. La percolation s'effectue sans problème mais la mousse devient de plus en plus persistante. A 60 minutes, une petite quantité de sel est rajouté sur le tamis par sécurité. A 90 minutes, la mousse se retrouve en grande quantité dans la cellule de douchage et commence à perturber l'écoulement de la solution. La conséquence directe sur le produit est une hétérogénéité du douchage des filets, mais la mousse rend aussi le nettoyage du caisson plus long et plus difficile.



Avec le système de saturation, le gain en sel final des filets de hareng passe de 6 à 7% environ pour un temps de traitement identique de 120 minutes. Dans ce cas, la cinétique de salage est meilleure et justifie l'emploi d'un tel système. La solution ternaire voit sa teneur en sel passer de 18,3 à 19, 1%. Bien qu'augmentant, la teneur en sel reste saturante car l'augmentation de la part du sel dans la solution provient essentiellement de la dilution provoquée par la déshydratation du poisson.

Le bilan sur les transferts de matière au cours du cycle de DID donne les flux suivants exprimés pour 100 grammes de hareng :

- ⇒ 15 grammes d'eau migrent du poisson vers la solution,
- ⇒ 7 grammes de sel migrent de la solution vers le poisson.

Le maintien à saturation de la solution ternaire semble donc améliorer les transferts de matière. En assurant un gradient de concentration en sel maximal entre la solution et le produit, les taux d'imprégnation et de déshydratation sont supérieurs respectivement de 20 et 67% à temps de traitement équivalent. En d'autres termes, le gain de temps est d'environ 25% pour obtenir les mêmes taux d'imprégnation et de déshydratation. Etant donné sa simplicité de mise en œuvre, son efficacité et son faible coût, le système de percolation semble une alternative intéressante pour le maintien en ligne de la saturation en sel de la solution.

#### 2.1.4. Evolution de la turbidité de la solution et essai de régénération par filtration frontale

Le suivi de la solution ternaire au cours de deux cycles de DID et de son stockage a permis de mieux comprendre son processus de dégradation des qualités biochimiques et microbiologiques. Le tableau suivant illustre le vieillissement d'une solution pendant toute sa durée de vie.

Stade de vieillissement de la solution	Turbidité mesurée en NTU
Solution neuve	4,0
Solution après un cycle de DID	56,5
Solution après un cycle de DID et stockée 1 semaine à +2°C	66,0
Solution après deux cycles de DID	152,0
Solution après deux cycles de DID et stockée 1 semaine à +2°C	5230,0

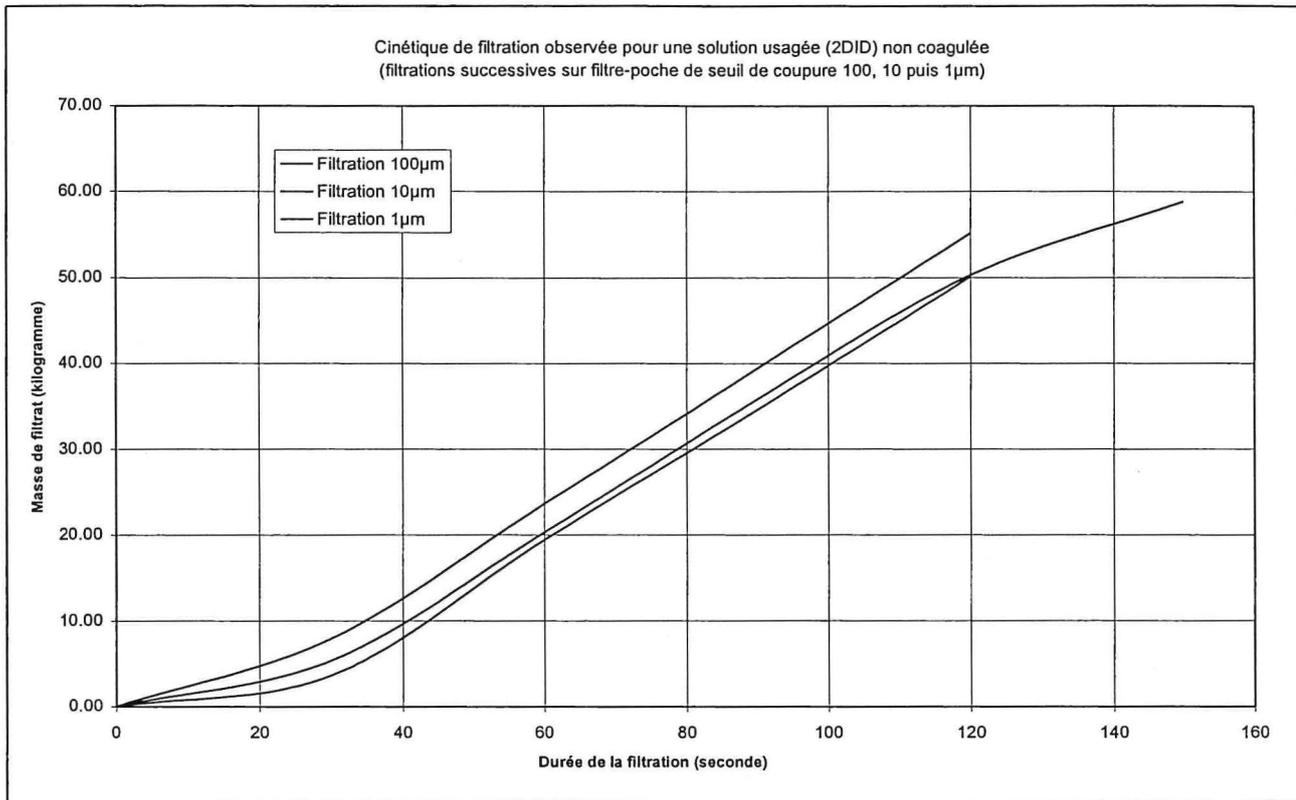
On constate que la limpidité de la solution se dégrade très rapidement en l'absence de traitement de régénération. En effet, si la turbidité n'augmente que très peu au cours du premier cycle de DID et au cours de la première période de stockage, les contaminants recueillis (protéines, matière grasse, flores banale et pathogène...) provoquent une dégradation exponentielle de la limpidité de la solution. Ainsi après deux cycles de DID et deux semaines de durée de vie, la solution présente une turbidité de 5230 NTU. Cette turbidité très importante est due, d'une part au développement d'une flore qui tend à épaissir et opacifier le milieu, et d'autre part à une réaction de brunissement non-enzymatique appelée « rusting » entre les composés carbonylés provenant de l'oxydation des lipides et les groupements aminés des protéines générant, comme son nom l'indique, une pigmentation de couleur rouille.

#### Régénération par filtration frontale

La solution « vieillie » de turbidité 5230 NTU a servi de solution test pour évaluer l'efficacité des filtres poche. Le tableau suivant donne la turbidité des filtrats recueillis sachant que la solution fût successivement traitée avec des filtres poche de porosité 100, 10 puis 1  $\mu\text{m}$ .

Porosité du filtre poche	Turbidité mesurée en NTU
100 $\mu\text{m}$	129,0
10 $\mu\text{m}$	129,0
1 $\mu\text{m}$	98,0

La solution de départ, visiblement très chargée en matières en suspension, décroît sensiblement en turbidité dès la première filtration à 100 $\mu$ m. Pour les autres filtrations, la turbidité reste apparemment constante.



Quelque soit la porosité du filtre utilisé, la surpression en amont du filtre reste nulle. Le colmatage du filtre-poche, bien qu'il existe visuellement, n'induit pas de contre-pression. D'ailleurs, les cinétiques de filtration sur le graphique ci-dessus montrent bien que le débit du filtrat est régulier et proche du débit optimal de la pompe.

Pour la filtration d'une solution non-coagulée et présentant une forte contamination notamment par la présence d'une phase grasse, le seuil de coupure 100  $\mu$ m donne des résultats probants sur la turbidité de la solution. La filtration de solution non-coagulée n'occasionne aucun problème de colmatage du filtre poche en utilisation en série dans ces conditions.

La filtration 100  $\mu$ m avec un filtre poche semble être un moyen efficace de pré filtrer une solution usagée non-coagulée (chute importante du taux de matières en suspension). Une précipitation d'une fraction de protéines par abaissement de pH sera ensuite nécessaire, suivie d'une filtration plus fine (exemple : 10 puis 1 $\mu$ m pour la solution coagulée).

## ANNEXE G

### Tests statistiques

#### 1. Détermination de l'effet CLAIE sur l'imprégnation en sel

TS % moyenne			
	Claie 1	Claie 5	Claie 10
DID = 21'	2.58	2.43	2.51
	2.47	2.42	2.52
	2.57	2.33	2.49

Analyse de variance: Facteur CLAIE

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
Claie 1	3	7.6288	2.5429	0.0039
Claie 5	3	7.1777	2.3926	0.0032
Claie 10	3	7.5160	2.5053	0.0002

#### ANALYSE DE VARIANCE

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	0.0367	2	0.0184	7.5403	0.0231	10.9249
A l'intérieur des groupes	0.0146	6	0.0024			
Total	0.0514	8				

La valeur F calculée est inférieure à la valeur critique F donc il n'y a pas de différence significative d'imprégnation en sel d'une claie à l'autre.

## 2. Détermination de l'effet CLAIE sur la déshydratation

		TE % moyenne		
		Claie 1	Claie 5	Claie 10
DID = 21'		76.19	75.12	74.71
		75.52	74.12	75.32
		75.58	75.20	75.58

Analyse de variance: Facteur CLAIE

Groupes	Nombre d'échantillons	Somme	Moyenne	Variance
Claie 1	3	227.2939	75.7646	0.1370
Claie 5	3	224.4414	74.8138	0.3613
Claie 10	3	225.6155	75.2052	0.2007

### ANALYSE DE VARIANCE

Source des variations	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité	Valeur critique pour F
Entre Groupes	1.3702	2	0.6851	2.9407	0.1288	10.9249
A l'intérieur des groupes	1.3978	6	0.2330			
Total	2.7680	8				

La valeur F calculée est inférieure à la valeur critique F donc il n'y a pas de différence significative de déshydratation d'une claie à l'autre.

## ANNEXE H

### Essais sur le thon blanc et la truite de montage dite « portion »

#### 1. Thon blanc

Suite à une mission d'appui technique du CIRAD à Mayotte, des échantillons de thon blanc fumé localement par la coopérative COPEMAY ont pu être analysés à Saint Denis.

Concernant les analyses physico-chimiques, la teneur en sel est de 2,75% et la teneur en eau de 72,8%. Au niveau des paramètres microbiologiques, un bilan a été réalisé sur le thon fumé après 5 jours de conservation à +2°C (DLC J+5). Les résultats montrent une forte contamination du produit en *Staphylococcus aureus* (280 UFC/g) soit une charge 280 fois plus élevée que la valeur limite recommandée par l'Arrêté du 21.12.1979. La présence massive de ce type de germe pathogène dans le produit révèle des manquements importants du personnel aux règles d'hygiène et/ou la présence parmi le personnel d'un porteur sain de la souche *Staphylococcus aureus*.

Des longes congelés de thon blanc ont également été traitées par le procédé CIRAD. La matière première contient moins de 0,1% de sel et environ 74% d'eau. Après traitement avec une solution ternaire à 325 g de DE21 par litre d'eau à trois temps différents (30, 127 et 210 minutes), les résultats sont les suivants :

N° échantillon	Bilan DID			
	GS (%)		PE (%)	
	(moy)	(e-type)	(moy)	(e-type)
DID = 30 minutes	1.81	0.05	1.65	0.27
DID = 127 minutes	3.10	0.06	6.71	0.01
DID = 210 minutes	4.34	0.08	9.60	0.30

On remarque que le temps de traitement optimal est inférieur à 2 heures pour obtenir un GS et une PE proches de 3 et 6%. D'après la cinétique déduite des résultats, le traitement optimal est atteint pour 95 minutes de douchage.

L'essai de confirmation et de détermination du temps de fumage donne les résultats suivants :

N° échantillon	Bilan DID				Bilan FUMAGE			
	GS (%)		PE (%)		GS (%)		PE (%)	
	(moy)	(moy)	(e-type)	(moy)	(e-type)	(e-type)	(moy)	(e-type)
DID = 95 minutes + FUMAGE = 2 heures	2.92	0.10	5.49	0.47	2.93	0.10	5.21	0.47
DID = 95 minutes + FUMAGE = 4 heures	3.52	0.09	6.10	0.49	3.53	0.09	5.97	0.49

Le temps de fumage optimal, tant pour les caractéristiques de GS et de PE obtenues que pour la qualité du fumage, est de 4 heures. On note que la différence de salage entre les deux échantillons provient de la variabilité de la section des longes.

On retiendra une durée de douche de d'1h30 (DE21 à 325 g/L) et une durée de fumage à froid de 4 heures.

## 2. Truite de montagne

Les essais sur la truite de montagne ont été très succincts. Un douche de 20 minutes (DE21 à 325 g/L) sur du filet de truite « portion » d'environ 50 grammes montre que le gain en sel est d'environ 3,2% et la perte en eau de 7%. Il semble donc que malgré son petit calibre, la chair de truite demande un traitement assez long car la matière grasse s'oppose aux transferts de matière.

Au fumage, il faut 2 heures pour obtenir des filets suffisamment colorés. Sous réserve d'essais complémentaires, on peut situer les temps de traitement pour les filets de truite « portion » à 15-20 minutes pour le douche et 2 heures pour le fumage à froid.

# ANNEXE I

## Exemple de feuille de calcul Excel utilisée pour le réajustement de la solution ternaire

Formulation de la solution ternaire

DE21 = 400 g/L eau

### 1. Bilan avant formulation

Masse volumique (g/L eau)	1254
Masse solution (g)	32290

Bilan	Solution ternaire (T° = +3°C)	Eau	Chlorure de sodium	Sirop de glucose DE21	Solution initiale
	Concentration (g/litre eau)	1000		352	308
Concentration (g/100g solution)	60.25		21.18	18.58	100
<b>Masse totale (g)</b>	<b>19454</b>		<b>6838</b>	<b>5998</b>	<b>32290</b>

### 2. Caractéristiques souhaitées pour la solution ternaire

Concentration souhaitée DE21 (g/L eau)	400
Volume souhaité de solution (litre)	30

### 3. Bilan après formulation

Bilan	Solution ternaire (T° = +3°C)	Eau	Chlorure de sodium	Sirop de glucose DE21	Solution finale
	Concentration (g/litre eau)	1000		352	400
Concentration (g/100g solution)	57.09		20.07	22.84	100
<b>Masse totale (g)</b>	<b>21667</b>		<b>7616</b>	<b>8667</b>	<b>37950</b>

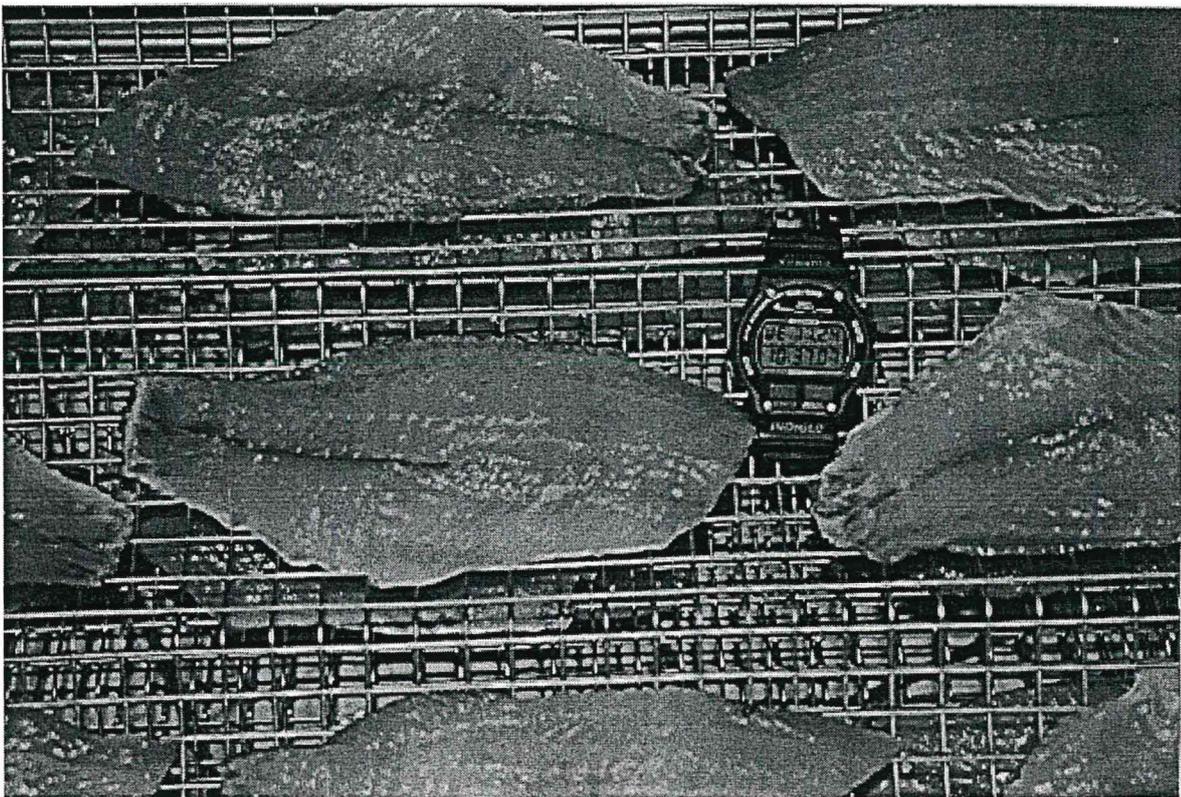
### 4. Correction à effectuer

Quantité à ajouter (g)		
Eau	Chlorure de sodium	Sirop de glucose DE21
2213	778	2669

Pour chaque ingrédient: masse à ajouter = masse après formulation - masse avant formulation

## ANNEXE J

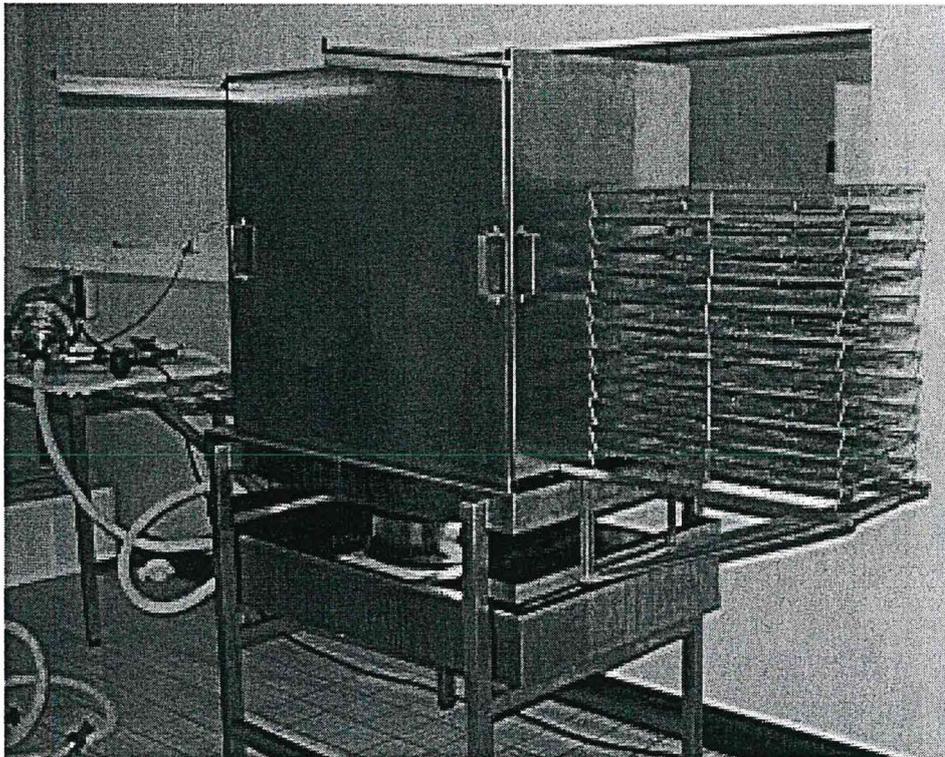
### Illustrations photographiques



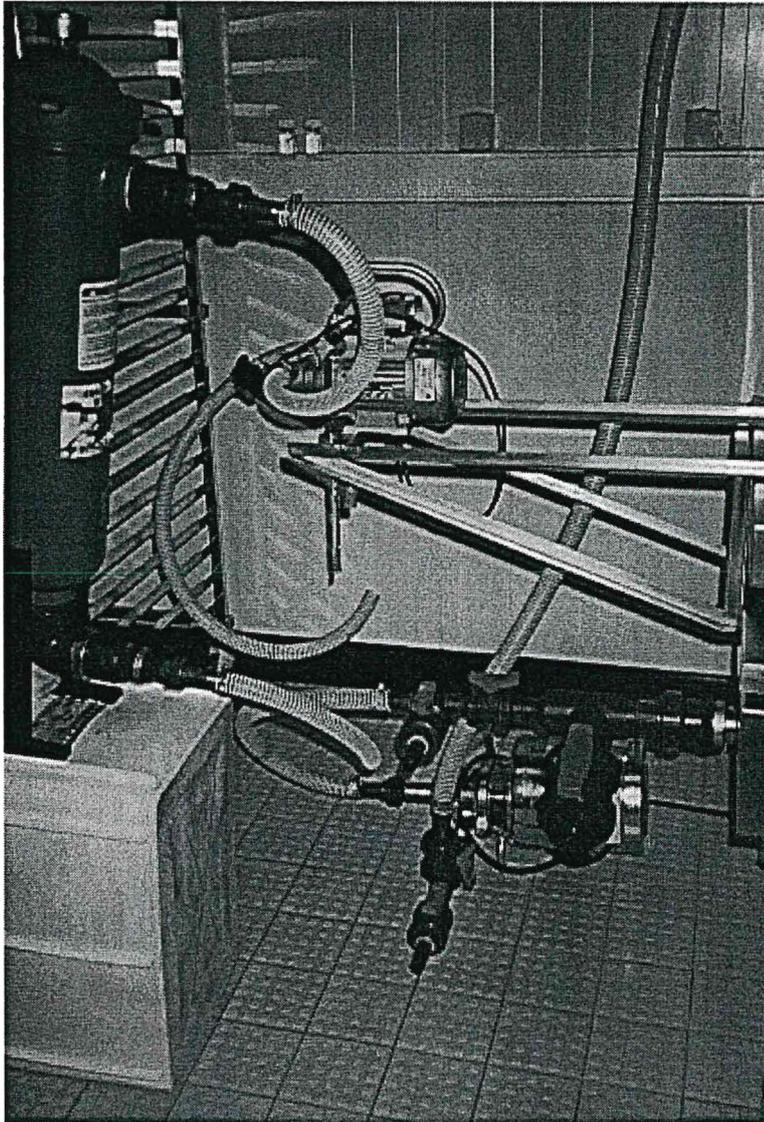
**Filets de tilapia doré sur claie de douchage**



**Préparation des filets de tilapia doré**



**Pilote de douchage (DID)**



**Systeme de filtration et de transfert (DID)**





---

## RESUME TECHNIQUE

Un équipement artisanal innovant de salage-séchage-fumage à froid de produits carnés conçu par le CIRAD, combinant une opération de salage-séchage par douche à un fumage conventionnel par pyrolyse de sciure de bois, a été validé dans la halle de technologie du CRITT de La Réunion. Le tilapia, poisson tropical d'eau douce, fourni par la société AQUACCOP sert de support aux essais d'optimisation et de validation du matériel testé.

Les travaux réalisés ont permis d'optimiser et de valider le fonctionnement de l'équipement CIRAD en milieu tropical, d'établir des procédures de travail et les conditions de traitement de filets de poissons locaux. Quelques essais de formulation de poisson entier fumé ont également été réalisés. Les résultats obtenus montrent que le procédé CIRAD est viable techniquement et économiquement au niveau artisanal. Sous réserve de quelques améliorations dans la conception du matériel et du succès des tests commerciaux pour le tilapia au niveau local, une production pourrait rapidement être initiée par AQUACOOOP à La Réunion.

**MOTS-CLES :** Fumage à froid, Ile de La Réunion, Prototype artisanal, Salage, Séchage, Tilapia.