



**HAL**  
open science

# Etude de la torréfaction : modélisation et détermination du degré de torréfaction du café en temps réel

José Alfredo Hernández Pérez

## ► To cite this version:

José Alfredo Hernández Pérez. Etude de la torréfaction : modélisation et détermination du degré de torréfaction du café en temps réel. Sciences du Vivant [q-bio]. ENSIA (AgroParisTech), 2002. Français. NNT : 2002EIAA0124 . pastel-00003699

**HAL Id: pastel-00003699**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00003699>**

Submitted on 13 May 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# École Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires

N° attribué par la bibliothèque

---

## *Thèse*

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'ENSIA**

**Spécialité : Génie des Procédés**

présentée et soutenue publiquement

par

***José Alfredo HERNÁNDEZ PÉREZ***

*Titre :*

---

***Étude de la torréfaction : modélisation et  
détermination du degré de torréfaction du  
café en temps réel<sup>1</sup>***

---

*Directeur de thèse : Gilles TRYSTRAM - Bertrand HEYD*

### **JURY :**

Rapporteur : M. JEAN-PIERRE PAIN,	Professeur UVHC (IUP GSAI)
Rapporteur : M. ARSÈNE ISAMBERT,	Professeur École Centrale, Paris
MME. MARIE V. LE LANN,	Professeur INSA Toulouse
MME. GUADALUPE RODRIGUEZ,	Professeur ITV, Mexique
M. BERTRAND HEYD,	Maître de Conférence ENSIA Massy
M. GILLES TRYSTRAM,	Professeur ENSIA Massy

15 juillet 2002

---

1. <http://ensia.inra.fr/~jherp/these cafe.html>

À mes parents ROSA ET FÉLIX  
À ma sœur FABIOLA et mon frère ALFONSO  
À ROSA (*ma grand-mère*), LUPITA (*ma belle-sœur*), IVETTE, GLORIA, GUADALUPE,  
KARIME-OSCAR, ARACELY, JASSAN  
À mes amis

À mon épouse CLAUDINE  
*pour avoir été toujours là et pour me supporter tous les jours...*

# REMERCIEMENTS

Avant d'exprimer mes sincères remerciements à chacun, je voudrais mentionner que ces insignifiants mots de reconnaissance sont écrits de tout cœur, sans formalité et sans rigueur méthodologique, pour avoir participé d'une certaine manière à la réalisation de ce travail :

- Tout particulièrement, à M. BERTRAND HEYD (*Maître de Conférence à l'ENSIA*), pour m'avoir offert ces précieuses connaissances, dédié patience et temps, pour son soutien et son enthousiasme tout au long de ce travail, «*mille mercis Chef*».
- Également à M. GILLES TRYSTRAM (*Professeur à l'ENSIA*), pour m'avoir accueilli dans le département de GIA à l'ENSIA. Malgré ses multiples tâches il est toujours disposé à offrir son temps, son appui et son conseils scientifiques, «*Grand Chef merci*».
- Pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail, M. ARSÈNE ISAMBERT (*Professeur à École Centrale, Paris*) et M. JEAN-PIERRE PAIN (*Professeur UVHC IUP GSAI*), «*je vous adresse mes remerciements*».
- À MME. MARIE VÉRONIQUE LE LANN (*Professeur INSA, Toulouse*), MME. GUADALUPE RODRIGUEZ (*Professeur ITV, Mexique*), M. GILLES TRYSTRAM et M. BERTRAND HEYD, qui sont acceptés d'être les examinateurs de cette thèse, «*je tiens également à vous remercier*».
- *Mes remerciements* sont également adressés à Mlle. MELANIE COPER (*NEWS-SCIENTIST*) et à M. DR. KLAUS-DIETER LINSMEIER (*SCIENTIFIC AMERICAN Deutsche Ausgabe*), pour avoir écrit et publié un résumé de mon travail de thèse dans leurs revues. *NewScientist* No.2311 06-09-2001, pp : 17., et *Spektrum der Wissenschaft* 12-12-2001, pp : 83.
- *Ma reconnaissance* s'adresse à M. BERTRAND BOYART, à M. FRANCIS COURTOIS (*tous deux Maîtres de Conférence à l'ENSIA*) et à M. IOAN CRISTIAN TRELEA (*Maître de Conférence à l'INAP-G*), pour les discussions enrichissantes qui m'ont permis d'approfondir mes connaissances des phénomènes de transfert de chaleur et de matière, et de l'estimation en ligne.
- Mme. CLAUDINE IRLES, M. GILLES TRYSTRAM et M. BERTRAND HEYD, pour leur patience à lire ce mémoire, sans oublier leurs conseils pour ranger les idées de façon claire, «*je vous exprime ma profonde reconnaissance*».
- À Mme. MONIQUE BELGOME pour les démarches administratives, et également à tout le département de GIA à l'ENSIA, *mes plus grands remerciements* pour leur amitié et m'avoir accueilli depuis le début de ma thèse.
- À tous mes amis qui ont partagé les bons et les moins bons moments, tout au long de cette thèse, «*je vous remercie*».

Merci pour avoir supporté des expressions (*clé*) comme : «*ça va chef, la vie est belle, nickel, tranquillement, bientôt, ...*».

Et enfin, *mes vif remerciements* au CONACyT du Gouvernement Mexicain et à la SFERE, pour leur soutien financier, qui m'a permis de réaliser ce travail.

# Résumé

Afin de garantir et d'optimiser la qualité du café torréfié, il est important de contrôler un grand nombre de facteurs au cours du procédé. Aujourd'hui, des capteurs robustes et des algorithmes permettent d'analyser en temps réel des valeurs essentielles telles que la couleur, la surface, la température, la masse... Dans cette étude de torréfaction, une stratégie de contrôle est appliquée pour estimer la qualité du produit en considérant des capteurs-algorithmes. Pour la mise en place de cette stratégie, un outil expérimental, basé sur l'analyse d'images, l'acquisition de températures et de masse du produit en temps réel est développé. Les grains de café sont torréfiés par un courant d'air chaud. Une base de données expérimentales des grandeurs (température, masse, couleur et surface des grains de café) est réalisée permettant une meilleure compréhension des phénomènes pendant la torréfaction. Un modèle dynamique est obtenu pour prédire l'évolution de la température interne et la teneur en eau des grains de café au cours de la torréfaction en tenant compte de la mesure de la température de l'air d'entrée. Les cinétiques de niveau de gris et de surface des grains sont modélisées par des réseaux de neurones en utilisant comme entrée le temps et la température du grain. Des réseaux de neurones récurrents sont appliqués pour déterminer les cinétiques du niveau de gris au temps suivant ( $t + 1$ ), en considérant le niveau de gris des valeurs précédentes. Les modèles permettent de simuler la température, le niveau de gris et la surface des grains en temps réel. Le niveau de gris estimé par le modèle est le facteur clé pour arrêter le procédé, car le degré de torréfaction est atteint lorsque le niveau de gris est égal à la qualité optimale.

# Abstract

In order to guarantee and optimize the quality of coffee roasting, it is important to control a large number of factors during the process. Today's, robust sensors and algorithms are used to measure and on-line analyze essential values such as color, surface, temperature, weight... In this work, roasting coffee has been investigated, a control strategy is applied to estimate coffee roasting quality, considering sensors-algorithms based on real time air temperature. Coffee beans were roasted using hot air as heating medium. Bean temperature, weight, color and expansion of surface were measured on-line during the roasting. These experiences allow better understanding of the phenomena that appear during roasting. A dynamical model is proposed to predict coffee bean temperature and moisture during the roasting. Gray value and expansion kinetics of beans surface are estimated using artificial neural network (ANN), considering bean temperature and time during the process. Recurrents ANN are used to estimate the bean gray value in the next time ( $t + 1$ ). The gray value estimated is the key factor to stop the process. The roasting degree wished is obtained when the gray value reaches the optimal quality.

## Publications et Communications (réalisées au cours de cette thèse)

### • Chapitre dans deux livres :

1. Hernández-Pérez, J. A., Garcia-Alvarado, M. A., Trystram, G. and Heyd, B. 2002. "Application of Artificial Neural Network for the Moisture Transfer Prediction Considering Shrinkage During Drying of Foodstuff". In Press, in *Transport Phenomena in Food Processing*. CRC Pres.

Note : ce travail a été sélectionné parmi ceux présentés aux congrès suivants : Conference of Food Engineering 1999 (CoFE'99); International Congress of Engineering and Food 8 (ICEF8); Institute of Food Technologist Annual Meeting 2000 (IFT2000).

2. Hernández, J. A. Trystram, G. and Heyd, B. 2002. "Prediction en ligne de la couleur et des dimensions des grains de café pendant la torréfaction, VISUALISATION IMAGE MODELISATION". Société Française de Génie des Procédés. Lavoisier Technique et Documentation Paris. Vol. 78 pp:235-240.

### • Publication dans une revue :

1. Hernández-Pérez, J. A., Garcia-Alvarado, M. A., Trystram, G. and Heyd, B. 2001. "Artificial Neural Network for the Moisture Transfer Prediction Considering Shrinkage During Drying of Cassava and Mango". Submitted to *Journal Innovative Food Science and Emerging Technologies (IFSET)*.

### • Communications à des congrès :

1. Hernández, J. A., Heyd, B. and Trystram, G. "On-line Image Analysis and Prediction of Color and Expansion of Surface Kinetics During a Food Process". In *6<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering*, 23-27 September 2001, Melbourne, Australia.
2. Hernández, J. A., Heyd, B. and Trystram, G. "Prediction en ligne de la Couleur et des Dimensions des Grains de Café Pendant la Torréfaction". In *VIM2001 (Visualisation Image Modélisation)*, 15-17 mai 2001, Nancy, France.
3. Hernández-Pérez, J. A., Ramirez-Figueroa, E., Rodriguez-Jimenes, G., and Heyd, B. "Spray Dried Yogurt Sorption Isotherms Prediction Using Neural Network", In *IDS-2000 (International Drying Symposium)*, 28-31 August 2000, The Netherlands.
4. Hernández, J. A., Heyd, B. and Trystram, G. "On-line Image Analysis of Swell and Color During Roasting Coffee Beans", In *ICEF2000 (Eighth International Congress on Engineering and Food)*, 9-13 April 2000, Puebla, México. Technomic, pp : 74-77

5. Hernández, J. A., Garcia, M. A., Heyd, B. and Trystram, G. "Application of Artificial Neural Network for The Moisture Transfer Prediction During Drying of Cassava and Mango" , In ICEF2000 (Eighth International Congress on Engineering and Food), 9-13 April 2000, Puebla, México. Technomic, pp : 1096-1099



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Analyse bibliographique</b>	<b>15</b>
2.1	Le café . . . . .	15
2.1.1	Qualité d'un café boisson . . . . .	15
2.1.2	Les plantations de café . . . . .	15
2.1.3	Classification et origine . . . . .	16
2.1.4	De la cerise au café vert . . . . .	17
2.1.5	<b>Torréfaction du café</b> . . . . .	18
2.1.6	Mouture . . . . .	22
2.1.7	Comment servir le café . . . . .	23
2.1.8	Conclusion . . . . .	23
2.2	Types de torréfacteurs . . . . .	23
2.3	Modèles de la torréfaction . . . . .	26
2.4	L'automatisation dans l'industrie alimentaire . . . . .	27
2.4.1	Mesure et capteur . . . . .	27
2.4.2	De la mesure indirecte à l'estimation . . . . .	28
2.4.3	Applications de l'analyse d'images dans l'industrie alimentaire . . . . .	29
2.5	Choix de la méthode de travail . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Matériels et méthodes</b>	<b>32</b>
3.1	Matière première . . . . .	32
3.2	Matériel expérimental . . . . .	32
3.2.1	Cellule discontinue de torréfaction . . . . .	32
3.2.2	Système informatique . . . . .	33
3.3	Mesures . . . . .	34
3.3.1	Mesures de laboratoire . . . . .	34
3.3.2	Mesures en temps réel . . . . .	35
3.4	Méthodes . . . . .	39
3.4.1	Méthode optique . . . . .	39

	9
3.4.2	Protocole expérimental . . . . . 40
3.5	Conclusion . . . . . 41
<b>4</b>	<b>Résultats expérimentaux et discussions 43</b>
4.1	Évolution expérimentale des températures . . . . . 43
4.1.1	Évolution expérimentale de la température de l'air . . . . . 43
4.1.2	Évolution expérimentale de la température du grain . . . . . 43
4.2	Évolution expérimentale de la masse . . . . . 46
4.3	Traitement des images et extraction de l'information . . . . . 49
4.3.1	Calibration et extraction de l'information . . . . . 49
4.3.2	Seuillage . . . . . 51
4.3.3	Détermination de la taille du pixel . . . . . 52
4.3.4	Traitement des images . . . . . 52
4.3.5	Évolution de l'information extraite à partir des images . . . . . 55
<b>5</b>	<b>Modèle dynamique et de représentation des grandeurs clés de l'opération 64</b>
5.1	Modèle dynamique pour les transferts de matière et de chaleur sur le grain 64
5.1.1	Identification des grandeurs pour le modèle . . . . . 69
5.1.2	Solutions des équations du modèle . . . . . 72
5.1.3	Résultats et discussions du modèle . . . . . 74
5.1.4	Analyse de sensibilité du modèle . . . . . 75
5.1.5	Conclusions . . . . . 79
5.2	Modèles de représentation pour le niveau de gris et la surface du grain . . . 81
5.2.1	Réseaux de neurones . . . . . 81
5.2.2	Modèles à base de réseaux de neurones pour le niveau de gris et la surface projetée . . . . . 83
5.2.3	Modèle de réseaux de neurones récurrents pour le niveau de gris . . 87
5.2.4	Conclusion et discussions . . . . . 89
5.3	Conclusion . . . . . 89
<b>6</b>	<b>Utilisation du modèle : Réflexion sur la conduite de l'opération /Esti- mation 92</b>
6.1	Simulation pour étudier le rôle des conditions opératoires . . . . . 93
6.2	Prédiction . . . . . 97
6.3	Estimation . . . . . 100
6.4	Conclusions . . . . . 101
<b>7</b>	<b>Conclusion générale et perspectives 102</b>
<b>Annexe</b>	<b>109</b>

# Notations

$A$	paramètre connu
$A_{ab}$	surface de contact entre l'air et le grain [ $m^2$ ]
$Bi$	nombre de Biot
$b. s.$	base sèche
$b. h.$	base humide
$C_p$	chaleur massique [ $\frac{J}{kg^\circ C}$ ]
$d$	diamètre [ $m$ ]
$G$	flux massique d'air [ $\frac{kg}{h}$ ]
$gr$	niveau de gris réduit du grain
$h$	coefficient de transfert de chaleur entre l'air et une sphère [ $\frac{W}{m^2^\circ C}$ ]
$Ha$	énergie d'activation [ $\frac{J}{mol}$ ]
$HR = Hr$	humidité relative [%]
$H_e$	quantité de chaleur produite entre le début de la torréfaction et l'instant $t$ [ $\frac{J}{kg_{M.S}}$ ]
$H_{et}$	quantité totale de chaleur produite pendant la torréfaction [ $\frac{J}{kg_{M.S}}$ ]
$k_b$	conductivité thermique du café [ $\frac{W}{m^\circ C}$ ]
$L_v$	chaleur latente de vaporisation du grain humide [ $\frac{J}{kg}$ ]
$m$	masse [ $kg$ ]
$ng$	niveau de gris du grain
$Nu$	nombre de Nusselt
$Pr$	nombre de Prandtl
$P_v$	pression partielle de vapeur [ $Pa$ ]
$P_{vsat}$	pression de vapeur saturante [ $Pa$ ]
$Q$	vitesse de production de chaleur [ $\frac{W}{kg_{M.S.}}$ ]
$RVB$	rouge, vert, bleu
$Re$	nombre de Reynolds
$R_g$	constante des gaz parfaits [ $\frac{J}{mol^\circ K}$ ]
$S$	surface de la section perpendiculaire à la direction de flux thermique [ $m^2$ ]
$S_r$	surface réduite du grain
$t$	temps [ $s$ ] ou [ $h$ ]
$T$	température [ $^\circ C$ ]
$\hat{T}$	température estimée [ $^\circ C$ ]
$V$	vitesse [ $\frac{m}{s}$ ]
$V_h$	volume spécifique de l'air [ $\frac{m^3}{kg_{A.S}}$ ]
$X$	teneur en eau du grain de café [ $\frac{kg \text{ d'eau}}{kg_{M.S.}}$ ]

$Y$  teneur en eau spécifique de l'air  $\left[\frac{kg\ d'eau}{kg_{M.S.}}\right]$

## Lettres grecques :

$\alpha$  coefficient de transfert de chaleur global entre  
l'air et le grain  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot C}\right]$

$\mu$  viscosité  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

$\rho$  masse volumique  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\phi$  flux de chaleur  $[W]$

## Indices :

$a$  air

$ae$  air d'entrée

$as$  air de sortie

$A.S.$  air sec

$b$  grain de café

$bs$  grain sec

$exp$  expérimentale

$i$  initiale

$m$  métal

$M.S.$  matière sèche

$r$  réaction chimiques (exothermiques)

$sat$  saturante

$sim$  simulé

$v$  évaporation

# Chapitre 1

## Introduction

Afin de garantir la qualité constante d'un produit fini destiné au consommateur, l'industrie alimentaire est en charge de maîtriser chaque étape de transformation de la matière. Néanmoins, cette industrie se confronte à des problèmes de régularité des fabrications principalement dus au manque d'instrumentation en ligne, ce qui constitue un frein à l'automatisation [BOILLEREAUX, 1996, TRYSTRAM, 1994].

Normalement, dans l'industrie alimentaire, il existe des instrumentations robustes pour mesurer et analyser en ligne des grandeurs comme la température du produit, les débits, la masse, le pH. Cependant, pour d'autres grandeurs comme la teneur en eau, la couleur, l'arôme, le goût, la texture, la mesure et l'analyse en temps réel sont très difficiles à gérer à cause de trois types de contraintes : le coût, la faisabilité et la complexité du milieu dans lequel ils doivent travailler [TRELEA, 1997]. Le plus souvent ces mesures sont faites hors-ligne et nécessitent un traitement provoquant des retards qui peuvent poser des problèmes pour un bon contrôle de la production [BOILLEREAUX, 1996], ou simplement elles ne sont que mesurées par l'opérateur. Or, une alternative pour obtenir en ligne ces grandeurs est l'estimateur des variables d'état et de paramètres. Il s'agit d'exploiter au maximum l'information obtenue en ligne par les capteurs robustes, afin de reconstituer en temps réel l'évolution de variables importantes, telles que la teneur en eau, la couleur, ainsi que des paramètres cinétiques (par exemple le coefficient de transfert de chaleur estimé simultanément avec la variable d'état) [BOILLEREAUX, 1996, BOUDRANT et al., 1994, TRYSTRAM, 1994].

L'industrie alimentaire requiert des capteurs robustes et des algorithmes (estimateur) capables d'effectuer des mesures et des analyses en ligne, permettant ainsi, d'assurer la qualité, d'augmenter la production et d'optimiser le procédé en temps réel. Dans ce contexte, l'industrie du café est un exemple intéressant, puisqu'il n'existe pas d'instrumentation pour mesurer la qualité du produit, qui est une fonction compliquée de différentes

grandeurs (couleur, arôme, goût, «corps»). De nombreuses étapes de transformation de la matière sont nécessaires pour obtenir un café boisson prêt pour être consommé. Parmi toutes ces étapes, la torréfaction est probablement l'opération la plus importante, car elle confère au produit ses qualités organoleptiques.

La torréfaction est une opération unitaire qui consiste à chauffer les grains de café vert à une température comprise entre 160°C et 260°C. Deux phases peuvent être distinguées au cours de la torréfaction. La première phase correspond au séchage (à des températures du grain inférieures à 160°C), les réactions sont alors endothermiques. La seconde phase est exothermique et correspond à la torréfaction (à des températures du grain comprises entre 160°C et 260°C), c'est elle qui provoque des réactions de pyrolyse (la dégradation et la polymérisation de certains composés) induisant la formation de substances essentielles pour donner, entre autres, la qualité sensorielle de la boisson :

- la dénaturation des protéines en acides aminés participe, avec les sucres, dans les réactions de *Maillard* pour donner certains composés aromatiques qui avec la décomposition de la trigonelline contribuent au développement de l'ARÔME,
- la décomposition des acides chlorogéniques conduit directement au GOÛT,
- la formation de matériel polymérique comme les melanoidines collaborent au changement de la COULEUR,
- des polysaccharides jouent un rôle important dans la rétention des composants volatiles pour aider à la viscosité du café boisson, perçu comme le «CORPS», les lipides favorisent également cette propriété [ILLY and VIANI, 1998].

Ces réactions chimiques s'accompagnent d'importantes modifications morphologiques (volume, masse, forme). Les réactions génèrent du  $CO_2$ , dont une partie s'échappe et une partie est retenue dans les cellules du grain. Cette phase de torréfaction doit être suivie rapidement d'une étape de refroidissement afin d'arrêter la torréfaction au degré désiré et éviter un rôtissage excessif qui détériorerait les arômes [ILLY and VIANI, 1998, GUYOT, 1993, Nestlé, 2001, SCHWARTZBERG, 2002]. La température du grain et la durée sont deux paramètres très importants pour développer la qualité du café.

Dans l'industrie du café, une bonne maîtrise des températures et du temps de séjour permet d'obtenir un produit fini de qualité constante, mais uniquement si la qualité de la matière première ne varie pas. Pour la torréfaction artisanale, l'opérateur suit plusieurs paramètres du procédé dont les plus importants sont la couleur des grains et le moment où un craquement est émis par les grains. Le temps de torréfaction n'est pas décidé *a priori* comme dans l'industrie, mais plutôt ajusté en temps réel. Dans la torréfaction, il n'existe pas une instrumentation spécifique basée sur le capteur-algorithme pour maîtriser

cette opération, seul le maître torréfacteur garantit de la qualité finale. L'obtention d'une qualité attendue (en terme d'arôme par exemple) passe donc par le contrôle de propriétés à l'échelle de l'opération de torréfaction (couleur, taille des grains, teneur en eau).

Peu d'études antérieures ont abordé la torréfaction comme une opération unitaire. Nous nous proposons de développer une stratégie de contrôle en appliquant des capteurs et des algorithmes afin de répondre aux exigences de l'industrie du café, c'est-à-dire que cette stratégie (capteurs-algorithmes) doit :

- ★ pouvoir prendre en compte les variations de matière primaire et/ou du procédé dans l'industrie,
- ★ fournir, à partir des mesures disponibles, une estimation de la couleur et de la surface du grain, afin de déduire la qualité du produit en temps réel,
- ★ ainsi permettre d'optimiser en ligne les variables du procédé.

L'implémentation des capteurs et des algorithmes sur le procédé de torréfaction doit considérer le coût, être facilement réalisable et être fiable.

Après l'analyse bibliographique dans le chapitre 2, nous proposerons la stratégie de contrôle, laquelle est divisée en trois parties. La première partie est consacrée à l'instrumentation expérimentale et aux résultats expérimentaux acquis de certaines variables importantes (chap. 3 et 4), la deuxième partie est dédiée à la modélisation des variables acquises (chap. 5) et la troisième partie est une introduction à l'estimation de la variable d'état (chap. 6).

# Chapitre 2

## Analyse bibliographique

### 2.1 Le café

Le café est l'un des produits les plus consommés au monde, c'est la deuxième importation française après l'énergie et la deuxième boisson après l'eau. 13 *kg* de café vert sont consommés par français annuellement et 85% des français boivent du café tous les jours. Il est également la deuxième source de revenu du Mexique après le pétrole.

#### 2.1.1 Qualité d'un café boisson

L'évaluation de la qualité finale d'un café boisson est essentiellement constituée des aspects sensoriels (arôme, goût, couleur, «corps»), et dans une moindre importance, de ses caractéristiques stimulantes, faiblement calorique et entièrement naturelle. Les aspects sensoriels proviennent de plusieurs facteurs, tels que l'origine et la variété des grains de café, le degré de maturation lors de la récolte, les conditions de traitement post-récolte, les paramètres de torréfaction, la mouture et les conditions de préparation du café boisson [GUYOT, 1993, PEZOA, 1989, ILLY and VIANI, 1998, SCHWARTZBERG, 2002, Nestlé, 2001].

#### 2.1.2 Les plantations de café

Le café appartient à la famille des *Rubiaceae*, laquelle comprend plus de 500 genres et environ 8000 espèces. L'arbuste (nommé caféier) est un dicotylédone pérenne qui peut atteindre 15 mètres de haut à l'état sauvage mais dans les plantations, il n'excède pas 2,5 à 3,5 mètres en raison des tailles pratiquées pour faciliter l'exploitation. Selon la taille choisie, ce très bel arbre présente soit un tronc unique, soit un tronc qui se divise en 3 ou 4 ramifications. La culture du caféier trouve son terrain de prédilection dans la ceinture équatoriale délimitée par les 30e parallèles nord et sud. En effet, le café exige un climat chaud et humide, avec une température constante de 17°C à 23°C [ILLY and VIANI, 1998,



Nestlé, 2001].

Ce n'est que dans sa troisième année que le caféier donne ses premiers fruits. La floraison ne dure que quelques jours, puis les fleurs se métamorphosent en fruits ovales ou ronds «cerises» [LUISETTI, 2002]. Les cerises mesurent jusqu'à 18 mm de longueur et 10-15 mm de diamètre. 7 à 11 mois, selon l'espèce et le climat, seront nécessaires pour que ces fruits, verts à l'origine, arrivent à maturité et prennent une coloration rouge écarlate [Nestlé, 2001, ILLY and VIANI, 1998].

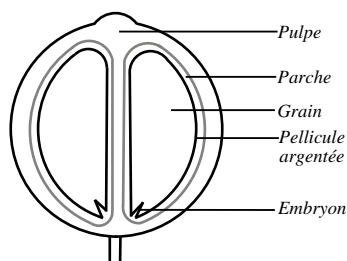


FIG. 2.1 – Coupe d'une cerise de café [VANIÉ, 1983]

La maturation est très hétérogène entre les arbustes, elle l'est même à l'intérieur d'une branche. L'épicarpe, peau du fruit, recouvre le mésocarpe, pulpe légèrement sucrée et poisseuse qui contient 2 grains ovales, disposés face à face : il s'agit des grains de café, d'un vert très pâle à ce stade. Chaque grain présente un sillon longitudinal et est recouvert par un tégument fin appelé «pellicule argentée». Entourant cette pellicule se trouve une peau jaune non adhérente, la «parche». Cet ensemble se trouve entouré par la pulpe, la figure 2.1 présente la coupe d'une cerise de café, elle montre les deux fèves accolées, la pellicule argentée et l'embryon [VANIÉ, 1983].

Selon PEZOA [1989], la récolte est importante pour la qualité finale du café, car elle exige que les fruits soient ramassés à un degré de maturité souhaité. La récolte manuelle a des avantages sur la récolte mécanique puisqu'elle permet de choisir les fruits avec le degré de maturité désiré.

### 2.1.3 Classification et origine

Parmi les 66 espèces de caféiers du genre *Coffea*, deux sont plus connues et présentent des qualités organoleptiques bien distinctes : il s'agit du *Coffea Arabica* et du *Coffea Canephora*, ce dernier étant essentiellement représenté par sa variété la plus répandue, le Robusta [ILLY and VIANI, 1998, Nestlé, 2001].

#### Café Arabica

Originaire d'Ethiopie. Selon ILLY and VIANI [1998], Nestlé [2001], ce caféier a été le premier exploité. Ses grains lisses de couleur vert-bleuté, allongés et très aromatiques sont appréciés dans le monde entier. Actuellement, la production d'Arabica couvre près des  $\frac{3}{4}$  de la production mondiale et représente 55% du marché français. Il est essentiellement

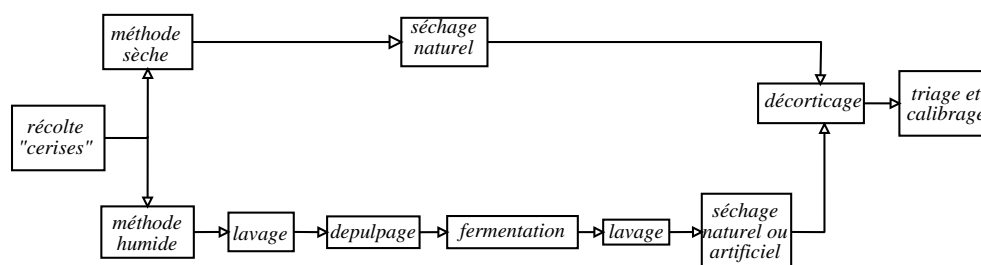


FIG. 2.2 – *Traitement de la cerise au café vert [PEZOA, 1989].*

cultivé sur les hauts plateaux d'Amérique Latine où il est adapté à l'altitude (de 500 à 2500 mètres), au climat (17°C à 20°C) et où il trouve l'alimentation en eau nécessaire à sa croissance (environ 1200 mm par an). Son profil organoleptique est aromatique, doux plutôt, un goût suave et équilibré avec une fine acidité.

### Café Robusta (*C. Canephora*)

Le Robusta, originaire d'Afrique, n'a été découvert qu'à la fin du XIXe siècle. Il constitue environ 25% de la production mondiale et 45% du marché français. Cultivé entre 0 et 1000 mètres d'altitude, ce café de couleur vert-paille est légèrement plus dur et plus amer, possède davantage de corps que l'Arabica ainsi qu'une teneur en caféine supérieure (1,8 à 2,6% de la matière sèche) [ILLY and VIANI, 1998, Nestlé, 2001].

Nestlé [2001] a identifié les propriétés organoleptiques des grains de café vert (Arabica et Robusta) de chaque pays producteur des régions subtropicale et tropicale. Le café Arabica du Brésil est ainsi réputé pour ses arômes, sa saveur douce et bien équilibrée; le café Arabica de Colombie a une bonne acidité conférant du corps; celui du Mexique est moyennement corsé mais avec de puissants arômes; celui d'Ethiopie a un goût plein, riche, puissant et intense; le café Robusta de l'Inde a une légère acidité avec corps et arômes délicats.

#### 2.1.4 De la cerise au café vert

Suite à la récolte, il faut débarrasser le grain de son enveloppe pour obtenir le café vert. Pour libérer la fève de la cerise, deux méthodes peuvent être mises en œuvre: la méthode sèche ou la méthode humide. La méthode humide est plus récente, elle est principalement utilisée pour le café arabica [VANIER, 1983, PEZOA, 1989, ILLY and VIANI, 1998]. La Figure 2.2 montre les étapes des deux méthodes pour la préparation des grains de café vert.

### Traitement de la cerise par la méthode humide

Après récolte, un lavage préliminaire des fruits est nécessaire pour éliminer les éléments étrangers et les impuretés. Les cerises de qualité inférieure sont séparées par flottaison. Par la suite, les cerises passent dans le dépulpeur à cylindres ou à disques pour séparer les grains de la pulpe. Un courant d'eau est ensuite utilisé pour faciliter la séparation et évacuer la pulpe. Il reste alors une mince épaisseur (0,5-2 mm) de pulpe (mucilage) fortement adhérente à la parche. Le dépulpage est suivi d'une fermentation naturelle qui est le procédé le plus courant de démucilagination. Le mucilage est dégradé par les enzymes déjà présentes dans le milieu et développées par les micro-organismes. Ce procédé peut durer de 18 à 36 heures, et dépend de la température ambiante. Après fermentation, les grains sont soigneusement lavés pour que la parche soit exempte de toute trace de pulpe. Ensuite, les grains en parche contenant 50% à 70% d'eau sont séchés soit au soleil, soit par séchage artificiel. La teneur en eau finale du grain vert ne doit pas dépasser 12%. De cette façon le café en parche sec est emmagasiné pour être départché et classé avant la commercialisation [PEZOA, 1989, VANIER, 1983, ILLY and VIANI, 1998].

### Traitement de la cerise par la méthode sèche

Étant donné que pour cette méthode aucun lavage est effectué, elle est plus directe et normalement plus économique. Les fruits récoltés sont séchés, soit par séchage artificiel ou au soleil, en évitant toutefois la cuisson de la pulpe, comme pour les grains en parche dans la méthode humide. Cette méthode est pratiquée dans les pays dont le climat est particulièrement chaud et d'humidité relative basse. Finalement les cerises sèches sont décortiquées et les grains calibrés [PEZOA, 1989]. Cette méthode est très utilisée au Brésil et presque exclusivement réservée à la production de *Robusta* [LUISSETTI, 2002].

Après l'obtention d'un café vert avec une humidité de 8 à 12 % en b. s., suit alors l'étape essentielle, à savoir la torréfaction.

#### 2.1.5 Torréfaction du café

La torréfaction est une opération unitaire. Elle consiste à amener avec rigueur le grain de café vert au juste degré de grillage souhaité, soulignant ainsi les qualités principales du café: arôme, goût, couleur et «corps». Cette transformation du café est menée sous l'effet de la chaleur et des réactions chimiques qui se développent. Plus de 1000 composés d'arômes ont été déterminés dans le café torréfié. Ces réactions chimiques s'accompagnent d'importantes modifications morphologiques (forme, volume, couleur, perte de poids). Les réactions génèrent du  $CO_2$ , dont une partie s'échappe et une partie est retenue dans les cellules du grain [ILLY and VIANI, 1998, SCHWARTZBERG, 2002, GUYOT, 1993, PEZOA,

1989, Nestlé, 2001, COSTE, 1968].

La torréfaction se fait par chauffage direct, par chauffage indirect ou par fluidisation dans un courant d'air chaud. Le chauffage indirect est le procédé le plus utilisé dans l'industrie du café [GUYOT, 1993].

ILLY and VIANI [1998], GUYOT [1993], RAEMY and LAMBELET [1982], RAEMY [1981] ont déterminé expérimentalement deux phases au cours de la torréfaction de café. La première phase appelée séchage a lieu à des températures du grain d'environ 100°C. Pendant cette phase les réactions sont endothermiques. La seconde phase appelée torréfaction est exothermique (à des températures du grain comprises entre 160°C et 260°C), elle correspond aux réactions chimiques de dégradation et de polymérisation des précurseurs d'arôme. ILLY and VIANI [1998] ont montré qu'à des températures du grain comprises entre 190°C et 210°C, les réactions de pyrolyses sont maximales. Les réactions deviennent légèrement endothermiques pendant un court intervalle de temps, en raison de l'échappement des composants volatiles puis, autour de 210°C, les réactions exothermiques reprennent. Lors de ce passage d'endothermique à exothermique, il est possible d'entendre un signal sonore émit par les grains de café. Un second signal correspond à l'explosion des cellules due à la pression interne, il indique la fin de torréfaction.

### Méthodes pour garantir la qualité du café torréfié

Dans cette étape de torréfaction, différentes méthodes sont utilisées pour conserver et garantir la qualité du café. les plus importantes sont les suivantes :

1. choisir les grains, ILLY and VIANI [1998] ont développé un système de contrôle automatique pour sélectionner les grains de café vert avant d'être torréfiés afin de garantir la qualité du produit, cette sélection est en fonction de la couleur ou de la forme du grain brut,
2. récupérer les arômes, Nestlé [2001] a mis au point et breveté un procédé appelé *Plein Arôme* pour la fabrication de Nescafé. Il consiste à récupérer par le froid l'essentiel des arômes qui s'échappent au moment de la torréfaction, puis de les réincorporer tout au long de la fabrication, depuis la percolation jusqu'au remplissage des flacons,
3. refroidissement rapide après la torréfaction, lorsque le résultat souhaité est atteint, le processus doit être interrompu par un refroidissement rapide pour arrêter les réactions chimiques, et ainsi éviter un grillage excessif qui détériorerait les arômes [ILLY and VIANI, 1998, Nestlé, 2001].

### Des grandeurs de la torréfaction (Température-durée-couleur)

La quantité de chaleur transférée au grain de café vert est essentielle dans le procédé de torréfaction. Cette quantité va développer des réactions chimiques, de telle façon que le produit de ces réactions fourniront les caractéristiques organoleptiques du café boisson. La qualité souhaitée d'un café torréfié va dépendre de la vitesse de réaction comme de la durée. La vitesse de réaction est fonction de la température du grain et de la concentration du réactif. Par conséquent, l'obtention de la qualité optimale dans le produit requiert le contrôle sévère de la température du grain et de sa durée pendant le procédé [SCHWARTZBERG, 2002, ILLY and VIANI, 1998]. En général, dans la torréfaction conventionnelle, la plage de températures utilisée est de 200°C à 230°C, pendant 12 à 20 min [COSTE, 1968, MENDES et al., 2001]. Cependant, ces valeurs peuvent varier en fonction du degré de grillage exigé (clair, moyen et foncé), du type de torréfacteur utilisé, de la teneur en eau, de l'âge du grain de café, etc. Plus la torréfaction est courte (1,5-3 min), plus le café offre force et acidité. Plus la torréfaction est longue (8-20 min), plus le café gagne en douceur [LUISSETTI, 2002]. Il faut noter que SCHWARTZBERG [2002] et COSTE [1968] situent la «zone de torréfaction» entre 185 et 240°C, l'optimum étant entre 210 et 230°C pour COSTE [1968] et 238°C pour SCHWARTZBERG [2002].

Selon COSTE [1968], quand la température du grain atteint 100°C, la couleur verte des grains commence à virer au jaune pâle; la dessiccation se traduit par un dégagement de vapeur d'eau et une odeur de pain grillé. Au dessus de 120-130°C, le grain prend une teinte châtain qui s'accroît peu à peu vers les nuances brunes plus ou moins foncées. Autour de 150°C, le grain de café commence à dégager une odeur rappelant celle des graines grillées, sans qu'on puisse encore déceler son arôme caractéristique. Celui-ci commence à se développer aux environs de 180°C, et les gaz de combustion apparaissent avec un dégagement de  $CO_2$ . On constate aussi que les grains virent au marron et que leur volume augmente. Au dessus de 180°C, le dégagement des gaz est plus abondant et la nuance est plus foncée. L'arôme atteint alors son plein développement. Les grains augmentent encore de volume, crépitent et un exsudant brillant, plus ou moins abondant, apparaît à leur surface. Vers 270°C, le dégagement des fumées s'atténue, les grains noircissent et deviennent ternes; leur volume n'augmente plus. Vers 300°C, ils sont noirs, charbonneux, friables à une légère pression et l'arôme a totalement disparu. Le café est carbonisé. On peut noter que ILLY and VIANI [1998], HERNÁNDEZ et al. [2001] ont observé que les grains prennent une couleur rouge-brun entre le passage du jaune-pâle au foncé, pour une température du grain supérieur à 160°C.

ORTOLÀ et al. [1998] ont testé l'influence de la température de torréfaction sur les

propriétés physico-chimiques de différents cafés (Arabica et Robusta de différentes origines). Ils ont mesuré la couleur (CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) du grain de café moulu avant et après le procédé de torréfaction. Les températures d'air utilisées dans le torréfacteur sont comprises entre 200°C et 295°C. Tous les échantillons sont torréfiés à la même couleur : un degré foncé. Ces auteurs ont montré statistiquement que la température de torréfaction n'affecte pas significativement la perte de poids, ni à la teneur en eau des différents cafés. Néanmoins, la température affecte la densité et le volume du grain, la quantité des solides solubles et l'acidité d'extrait de café. NAGARAJU et al. [1997] ont observé que la couleur des grains de café torréfiés est très sensible à la température de torréfaction. En outre, MENDES et al. [2001] ont présenté une méthodologie pour l'amélioration du procédé de torréfaction de café Robusta. Cette méthodologie utilise une corrélation entre des réponses du consommateur d'un café boisson (arôme, goût, couleur) et la couleur ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) des grains torréfiés qui est mesurée par un colorimètre, après la torréfaction.

Finalement, MENDES et al. [2001], PITTIA et al. [1996], DA PORTO et al. [1991], NJOROGE [1998], ACILU [1997], ORTOLÀ et al. [1998], ILLY and VIANI [1998], SCHWARTZBERG [2002] ont proposé que le degré de torréfaction peut être déterminé par certains paramètres : la couleur, la perte de poids, l'arôme et le goût développé, par le changement chimique de certains composants (p. ex. la teneur résiduelle de trigonelline et le degré de la décomposition des acides chlorogéniques), la température du grain et la durée. DUTRA et al. [2001], MASSINI et al. [1990], PIZZIRANI et al. [1996] ont aussi montré que le pH, la teneur en eau, la composition des fumées peuvent décider le degré de la torréfaction de café.

## La torréfaction dans l'industrie

Dans l'industrie du café, le maître torréfacteur tient une place essentielle pour maîtriser la qualité du produit. Celui-ci se base d'une part, sur une interprétation des mesures physiques (durée, température), d'autre part sur les propriétés organoleptiques du produit (couleur, arôme, goût, « corps »), afin de l'accepter, le rejeter, ou agir en conséquence, si nécessaire, sur le procédé. Cependant, ces évaluations se font hors-ligne, à cause du manque d'instrumentation permettant de suivre la qualité en temps réel. Fréquemment, les grains de café vert (matière première) sont torréfiés en petites quantités dans un torréfacteur pilote pour mettre au point la température et le temps de séjour. Une fois ces paramètres déterminés, tout le lot de café est torréfié dans le torréfacteur industriel.

TAB. 2.1 – *Composition chimique des grains de café (% en matière sèche) [ILLY and VIANI, 1998]*

Composant	Arabica		Robusta	
	vert	torréfié	vert	torréfié
caféine	1,2	1,3	2,2	2,4
trigonelline	1,0	1,0	0,7	0,7
protéines	9,8	7,5	9,5	7,5
acides aminés	0,5	0	0,8	0
sucrose	8,0	0	4,0	0
sucres réducteurs	0,1	0,3	0,4	0,3
autres sucres	1,0	–	2,0	–
polysaccharides	49,8	38,0	54,4	42,0
acidité aliphatique	1,1	1,6	1,2	1,6
acide quinique	0,4	0,8	0,4	1,0
acide chlorogénique	6,5	2,5	10,0	3,8
lipides	16,2	17,0	10,0	11,0
caramélisation		25,4		25,9
arôme volatile	trace	0,1	trace	0,1
minéraux	4,2	4,5	4,4	4,7
teneur en eau	8-12	0-5	8-12	0-5

### Composition chimique des grains de café torréfié

La transformation chimique des grains de café torréfiés a été extensivement étudiée par ILLY and VIANI [1998]. Le tableau 2.1 présente la composition chimique des grains de café vert et torréfiés d'*Arabica* et de *Robusta*, il permet d'observer les différences remarquables du produit avant et après la torréfaction.

#### 2.1.6 Mouture

Nestlé [2001], COSTE [1968], VANIER [1983] ont proposé que les grains des cafés torréfiés doivent être moulus à une granulométrie précise et très homogène, ni trop fine ni trop grosse, pour que l'eau chaude puisse entraîner le maximum de principes aromatiques. En effet, si la mouture est trop grossière, l'eau filtre trop rapidement et le breuvage, insuffisamment chargé des principes aromatiques, à une saveur plutôt fade. Au contraire, si la granulométrie est trop fine, d'une part l'eau entraîne des particules qui se déposent au fond de la tasse ; d'autre part, l'opération est trop lente et s'effectue avec de l'eau refroidie, le café est «boueux» et âcre. C'est entre ces extrêmes que se situe la gamme des degrés de finesse de mouture convenant le mieux à chaque type d'appareil. Ainsi on emploie une mouture moyenne pour les cafetières de ménage, une mouture ultra fine pour le café «à la turque», une mouture fine pour les appareils à dépression, une mouture plus fine et tassée

pour les percolateurs (cafetière à pression de vapeur).

### 2.1.7 Comment servir le café

Pour préparer une bonne tasse de café, COSTE [1968] a proposé que certaines conditions doivent être remplies : la nature du café employé, le degré de finesse de la mouture de café, la qualité de l'eau (la présence de certains sels ou de chlore est propre à dénaturer l'arôme), l'eau doit être mise en contact avec la mouture à la température de sub-ébullition (95°C à 98°C), la qualité du breuvage, sa «force», est également fonction de la qualité de café utilisé. La quantité de café n'a pas de standard. En France, une enquête faite par le «comité du café» a conseillé d'utiliser 8,5 g de mouture pour 170 g d'eau, ce qui donne la valeur d'une grande tasse de 150 g. La réglementation française (décret du 3 septembre 1965) précise (art. 11) que la dénomination de «café» est réservée à «la boisson obtenue à partir d'eau potable et de café torréfié; la quantité de café mise en œuvre ne doit pas être inférieure à 5 g par décilitre de boisson». Le texte exige pour les dénominations de supériorité de qualité (filtre, express, spécial, etc.) qu'il soit employé au moins 7 g de café torréfié par décilitre de boisson.

### 2.1.8 Conclusion

L'analyse bibliographique nous a permis de faire ressortir que la torréfaction est probablement l'étape la plus importante, car le café vert n'a aucun goût ni arôme, seule la torréfaction permet de révéler ses caractéristiques organoleptiques. De plus, la torréfaction de café n'utilise pas une stratégie de contrôle basée sur le capteur-algorithme pour garantir la qualité du produit final en temps réel, seul le maître torrificateur peut conduire à un produit final propre à la consommation. Par ailleurs, cette analyse nous a également permis de connaître les paramètres qui peuvent déterminer le degré de torréfaction (couleur, arôme, goût, température-durée, pH, composition de gaz, teneur en eau, perte de poids, signal sonore émit par le grain). Néanmoins, nous avons noté que le goût et la couleur sont les principaux critères d'acceptation du café boisson. Il est donc important de mentionner que le goût s'est développé en parallèle avec le développement de la couleur. Par conséquent, la couleur peut être un indicateur essentiel pendant le procédé de torréfaction.

## 2.2 Types de torrificateurs

Comme il a été décrit dans la section 2.1.5, les torrificateurs par chauffage de courant d'air chaud sont les plus utilisés dans l'industrie du café. Aujourd'hui, ces torrificateurs sont très automatisés, la température et le temps sont contrôlés automatiquement. Dans



ces torréfacteurs, le gaz chaud passe à travers la masse de grains de café en agitation, ou à travers une cascade ou des torrents ininterrompus de façon à maintenir les grains de café suspendus dans l'air en considérant un meilleur transfert de chaleur entre l'air et le grain. Pour des petits torréfacteurs pilotes, le gaz est parfois chauffé par une résistance électrique, mais le gaz chaud est plus souvent produit par un brûleur à gaz ou fioul. La plupart du temps, la chaleur est conduite par convection forcée vers les grains de café. Le gaz qui s'échappe du torréfacteur passe à travers un cyclone qui sépare les particules (pellicules) des gaz libérés sortant. En général, ces torréfacteurs modernes utilisent une surveillance de la température intérieure du lot des grains. Ils assurent également une température, une vitesse du flux d'air et de combustible constante. De plus, ils peuvent fournir des étapes de changement pré-sélectionnés de variables opératoires en utilisant la température intérieure du lot des grains [SCHWARTZBERG, 2002].

Le torréfacteur à tambour tournant horizontal est le plus souvent utilisé (voir fig. 2.3). Dans ce torréfacteur, le mouvement de spirale soulève les grains qui par la suite descendent en cascade quand leur angle de repos dynamique est dépassé. Le mouvement mélange les grains axialement. Le tambour tourne à une vitesse légèrement inférieure à la force centrifuge qui est susceptible de provoquer l'adhésion du grain contre les parois du tambour [SCHWARTZBERG, 2002].

La Figure 2.4 montre un torréfacteur à fluidisation (torréfaction rapide) de type RFG-G (Neuhaus Neotec GmbH). Il s'agit d'un torréfacteur de petite capacité, de 100 à 200  $\frac{kg}{h}$ , pour la production de mélanges spécifiques et de petites charges. Le café est torréfié dans un important courant d'air chaud produit par un brûleur à gaz et un ventilateur puissant pour garantir la fluidisation et la rotation du produit. Ceci assure à chaque grain une torréfaction uniforme. Chaque fève de café obtient de ce fait une même quantité de chaleur. La torréfaction dure de 3 à 6 min en dépendant de la température de l'air utilisé (232 à 270 °C), mais elle peut être finie en 1,5 min, en utilisant une température d'air de 300°C.

Le torréfacteur à roue-pales de type RT (Probat) se compose d'un récipient rotatif à pales assurant un mélange régulier du café vert dans le flux d'air chaud à affluence tangentielle. L'apport en énergie par air chaud est commandé séparément de l'agitation du produit par le dispositif rotatif. De grands regards de verre permettent de contrôler les opérations de torréfaction (voir fig. 2.5).

Le torréfacteur à coupe-tournant (Probat) est un système dans lequel les grains sont transportés sur toute la surface du torréfacteur par la force centrifuge d'un flux d'air chaud (voir fig. 2.6), les grains en mouvement traversent ensuite le flux de gaz chaud pour

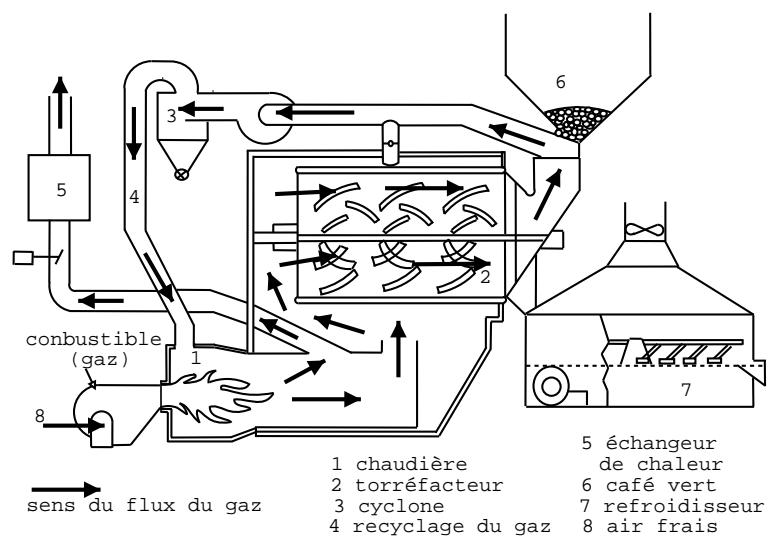


FIG. 2.3 – Torrificateur de tambour avec parois solide [Probat-Werke GmbH].

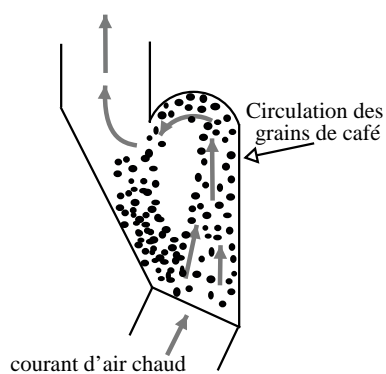


FIG. 2.4 – Torrificateur à fluidisation de type RFG-G [Neuhaus Neotec GmbH].

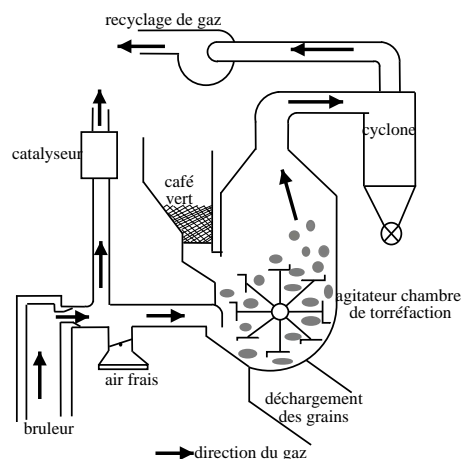


FIG. 2.5 – *Torréfacteur à roue-pales de type RT [Probat-Werker GmbH].*

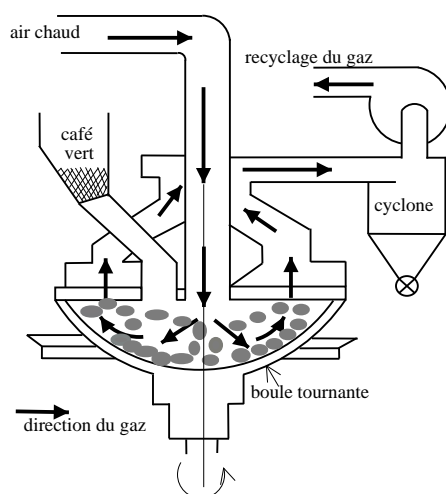


FIG. 2.6 – *Torréfacteur à coupe-tournante de type RZ [Probat-Werker GmbH].*

être transporté sur la surface.

## Conclusion

Pour faire cette étude, nous avons besoin d'un pilote facilement instrumentable et modélisable, nous avons donc utilisé un torréfacteur proche du modèle à fluidisation, où le transfert de chaleur (par convection) entre l'air et le grain est supérieur au transfert de chaleur entre les grains et les parois métalliques du torréfacteur.

## 2.3 Modèles de la torréfaction

Il faut noter qu'il n'existe qu'un modèle pour déterminer la torréfaction de café comme une opération unitaire, de plus, aucun modèle ne décrit les propriétés qualitatives des grains avec une approche cinétique (couleur, arôme, etc.). Il existe pourtant plusieurs

modèles de type entrée-sortie, c'est-à-dire caractérisant globalement une relation, une propriété fonction des conditions opératoires.

SCHWARTZBERG [2002] a proposé un modèle physique prédisant la température du grain de café en fonction du temps de torréfaction. Ce modèle est basé sur la description des mécanismes de transport et des réactions chimiques. La modélisation du transfert de chaleur au grain découle des bilans d'énergie, des réactions exothermiques du grain et du refroidissement évaporatoire qui a lieu par l'évaporation d'eau. Ce modèle est le suivant :

$$\frac{d(T_b)}{dt} = \frac{[\phi_{ae} - \phi_{as}] - \phi_{a \rightarrow m} + \phi_{m \rightarrow b} + \phi_r - \phi_v}{m_{bs}(1 + X)Cp_b} \quad (2.1)$$

L'équation 2.1 a été testée par SCHWARTZBERG [2002] en utilisant un torréfacteur de type coupe-tournante (fig. 2.6), avec 400 kg de café vert dans le torréfacteur, et une température d'air constante de 482°C. Le modèle a présenté des résultats satisfaisant pour prédire le comportement de la température du grain au cours de la torréfaction, qui est, un paramètre clé pour déterminer l'arrêt du procédé. Néanmoins, ce modèle ne décrit que l'évolution de la température du grain (supposé homogène).

## 2.4 L'automatisation dans l'industrie alimentaire

L'automatisation dans l'industrie alimentaire est limitée par le manque d'instrumentation en ligne. Le plus souvent, les mesures sont coûteuses, peu fiables et longues [TRELEA, 1997, BOILLEREAUX, 1996, BOUDRANT et al., 1994]. Par ailleurs, certains capteurs sont difficiles à appliquer pour déterminer certaines grandeurs dans l'industrie alimentaire, à cause de la problématique du milieu dans lequel ils doivent travailler [TRYSTRAM, 1994]. Par conséquent, l'application des capteurs robustes liés à un estimateur est une nécessité [BOILLEREAUX, 1996]. Aujourd'hui, les industries alimentaires requièrent des capteurs et des algorithmes capables d'effectuer des mesures et d'analyser des grandeurs en temps réel (couleur, arôme, teneur en eau, concentration de micro-organismes, etc.), afin de *maîtriser le procédé* et ainsi d'assurer la qualité constante du produit fini qui sera consommé, en permettant également d'augmenter la production, le bon fonctionnement, et la sécurité [TRELEA, 1997, TRYSTRAM, 1994, TRYSTRAM and COURTOIS, 1994].

### 2.4.1 Mesure et capteur

La mesure en temps réel peut être faite d'une façon directe ou indirecte. Les mesures directes sont fournies par les capteurs robustes, lesquels mesurent en ligne quelques grandeurs physico-chimiques (température, pression, débits, pH, etc.). La mesure indirecte est

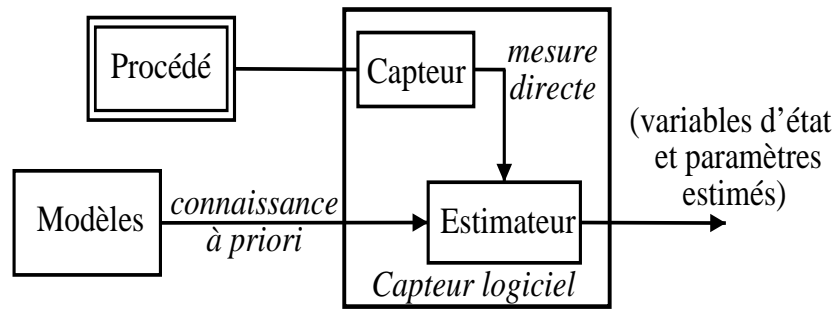


FIG. 2.7 – Définition d'un capteur logiciel Chéruby, A. et Flauss, J. M. [BOUDRANT et al., 1994]

appliquée quand il est difficile d'implanter des capteurs en ligne dans l'industrie. Les mesures directes sont en général exploitées afin de reconstituer en temps réel l'évolution de variables d'état et de paramètres difficiles à mesurer, en utilisant un algorithme appelé estimateur. Ce dernier est appelé *capteur combiné* ou *capteur logiciel* (fig. 2.7) [BOUDRANT et al., 1994, TRYSTRAM, 1994].

## 2.4.2 De la mesure indirecte à l'estimation

L'utilisation des mesures indirectes des variables d'état et d'estimation des paramètres (physico-chimiques et biologiques) en temps réel est une nécessité pour garantir la qualité constante du produit. BOUDRANT et al. [1994] ont défini quatre différents types de capteurs combinés : mesure indirecte statique, mesure indirecte dynamique, estimation partielle d'état et de paramètres, estimation complète d'état. Chaque type de capteur combiné est fonction des modèles dont on dispose (*connaissance a priori*), en représentant ces modèles comme le modèle de mesure et le modèle dynamique du procédé. Le modèle de mesure est une relation mathématique entre la mesure fournie par le capteur robuste et la variable d'état du procédé. Le modèle dynamique du procédé décrit la variable d'état dans le temps au cours du procédé.

### Mesures indirectes (statique et dynamique)

La mesure indirecte statique est déterminée simplement par une corrélation entre la mesure directe obtenue par le capteur robuste et le modèle de mesure en fonction de la variable à estimer. Dans la mesure dynamique, on utilise un modèle de mesure associé au modèle dynamique du procédé. Le principe consiste à substituer les paramètres cinétiques du modèle dynamique du procédé par ceux de la mesure, de manière à pouvoir simuler l'évolution du procédé et obtenir ainsi l'évolution de cette variable d'état [TRELEA, 1997, BOUDRANT et al., 1994].

### Estimateurs d'état et de paramètres

L'application de l'estimation d'état et l'identification de paramètres est bien claire pour les systèmes linéaires et systèmes non linéaires [TRELEA, 1997]. Dans les systèmes linéaires, l'estimation ou l'observabilité partielle de l'état est déterminée en utilisant un modèle de mesure associé au modèle dynamique du procédé. Deux grands types d'estimateurs sont utilisés : (*estimateur de Luenberger adaptatif et filtre de Kalman adaptatif*). L'estimateur d'état de *Luenberger* applique un modèle du procédé, dont l'évolution est corrigée en fonction de l'écart constaté entre les sorties prédites et les sorties mesurées (modèle de mesure). Le *filtre de Kalman* est un estimateur de *Luenberger* particulier, qui minimise la variance de l'état estimé sous certaines hypothèses statistiques. Le principe de ces algorithmes consiste à estimer en ligne simultanément les variables d'état et les paramètres cinétiques non modélisés [TRELEA, 1997, BOUDRANT et al., 1994].

Pour les systèmes non linéaires, le principe est analogue au cas précédent. On utilise le modèle de mesure associé au modèle dynamique du procédé incluant les expressions cinétiques (estimation complète d'état). On applique également l'écart mesure-prédiction par le modèle pour corriger l'estimation d'état, mais la connaissance *a priori* introduite par les expressions cinétiques, permet de mieux employer l'information acquise en ligne et contenue dans la mesure. L'observateur de *Luenberger étendu* et le *filtre de Kalman étendu* font appel à des modèles linéarisés localement. Dans ces algorithmes, le réglage est plus difficile car il dépend de l'état courant, surtout pour les procédés discontinus et semi-continus, qui n'ont pas de point de fonctionnement [TRELEA, 1997]. Par ailleurs, la méthode à horizon glissant avec indicateur de qualité est aussi un autre algorithme pour l'estimation d'état en ligne d'un système non-linéaire [BOILLEREAUX, 1996]. Nous n'avons trouvé aucune référence portant sur l'application de ces techniques à la torréfaction. Il faut noter que l'obtention d'un modèle fiable est l'étape clé de ces démarches.

### 2.4.3 Applications de l'analyse d'images dans l'industrie alimentaire

L'objectif de l'analyse d'images est d'aider à la perception humaine des phénomènes visuels (amélioration des images), à la création de systèmes de mesure optique en utilisant la couleur et la magnitude, et de fournir des contrôles de l'environnement aux systèmes robotiques [KAR and DASH, 1999].

L'évaluation de la qualité des produits dans l'industrie alimentaire est principalement constituée des aspects sensoriels, microbiologiques et nutritionnels. Les aspects sensoriels comme la couleur et l'arôme sont importants pour l'appréciation globale d'un produit, car le goût et la texture ne sont pas accessibles au consommateur avant l'achat d'un

produit conditionné. La couleur est donc un des paramètres à contrôler [ROCHA, 1993]. Aujourd'hui, les capteurs et les algorithmes de l'analyse d'image permettent d'analyser des propriétés du produit fini et pendant le procédé, en utilisant des valeurs essentielles telles que la couleur (ou niveaux de gris), la surface et texture visuelle [KAR and DASH, 1999, GUIZARD, 2001, HERNÁNDEZ et al., 2001, GUIZARD et al., 1992, ABUD, 2000].

## 2.5 Choix de la méthode de travail

L'analyse bibliographique met en évidence que peu d'études ont abordé la torréfaction comme une opération unitaire, en effet, dans cette opération il n'existe pas une instrumentation spécifique en ligne, fonctionnant en temps réel, pour prendre en compte les variations liées au produit. Les perturbations sont nombreuses tant au niveau de la matière première que des conditions de torréfaction. Il est important de noter que la torréfaction à l'échelle industrielle est un procédé difficile à instrumenter pour déterminer en ligne la température du grain, la couleur, le gonflement, la masse, l'arôme du produit. Car, la masse des grains est toujours en agitation de façon que les grains sont suspendus dans l'air chaud. Néanmoins, dans le torréfacteur industriel, l'obtention de la température de l'air d'entrée et de sortie, le signal sonore émis par le grain, la température du métal du torréfacteur et la température du lot des grains à l'intérieur de la chambre sont faciles à mesurer en ligne. Or, nous nous proposons d'essayer une stratégie de contrôle spécifique basée sur l'instrumentation (capteur et algorithmes) du procédé de torréfaction pour maîtriser la qualité du produit en temps réel.

Nous avons identifié le besoin de construction d'un dispositif expérimental fiable et répétable. De la même manière on a également identifié la nécessité du développement d'un modèle dynamique de cette opération. La bibliographie met en évidence la grande difficulté de la définition des arômes caractérisant le produit. Il nous paraît illusoire en l'état des connaissances de tenter de modéliser la production de ces arômes. Par contre, les travaux antérieurs soulignent les liens potentiels entre les variables [ILLY and VIANI, 1998, NAGARAJU et al., 1997, MENDES et al., 2001, COSTE, 1968]. C'est pourquoi nous décidons de considérer l'opération de torréfaction au travers des propriétés de couleur, d'expansion du grain, de teneur en eau et de température.

Nous travaillerons sur une stratégie de contrôle représentée dans la figure 2.8. Cette stratégie propose d'établir le degré de torréfaction des grains de café au cours du procédé. Le degré obtenu est comparé au degré de torréfaction du café optimal, pour permettre, d'arrêter le procédé lorsque la qualité obtenue est égale à celle souhaitée, et ainsi assurer la qualité du produit en temps réel. Elle est constituée essentiellement d'un modèle

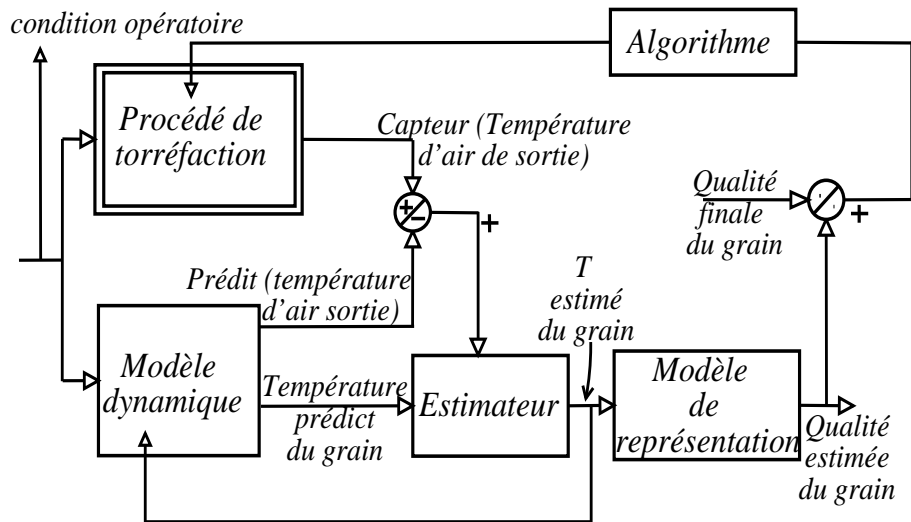


FIG. 2.8 – Schéma de la stratégie de contrôle pour la torréfaction de café

dynamique qu'il convient d'établir pour simuler la température du grain, en utilisant la température de l'air d'entrée et simulant la température de l'air de sortie. La mesure de la température de l'air de sortie est associée à un estimateur, lequel est un algorithme, qui estime en temps réel et d'une façon fiable la température du grain avec l'aide du modèle dynamique. Cette grandeur estimée est introduite dans le modèle de représentation afin de décrire la qualité du produit en temps réel (couleur ou niveau de gris). Pour la mise en place de cette stratégie, nous avons fixé les objectifs particuliers suivants :

### Objectifs particuliers

- ★ mise en place de la méthode expérimentale pour suivre en temps réel quelques paramètres du procédé (températures, masse, couleur et surface du grain),
- ★ modélisation de l'évolution des grandeurs : températures, couleur (ou niveau de gris) et surface du grain de café,
- ★ fournir une estimation fiable de la température du grain de café en temps réel à partir de la mesure disponible (température de l'air de sortie) et du modèle développé,
- ★ en déduire l'évolution dynamique des critères de qualités retenus.

Pour réussir ces objectifs, nous avons divisé la suite en trois parties : la première partie, (chapitres 3 et 4) est consacrée à la mise au point de l'acquisition d'information expérimentale et aux résultats expérimentaux, sur un torréfacteur statique. La deuxième partie (chapitre 5) décrit les modèles dynamiques et de représentation des grandeurs expérimentales (températures, couleur et surface du grain). La troisième partie (chapitre 6) dédiée à l'estimation de la couleur et la conduite de l'opération, est suivie de la conclusion générale (chapitre 7).



# Chapitre 3

## Matériels et méthodes

### 3.1 Matière première

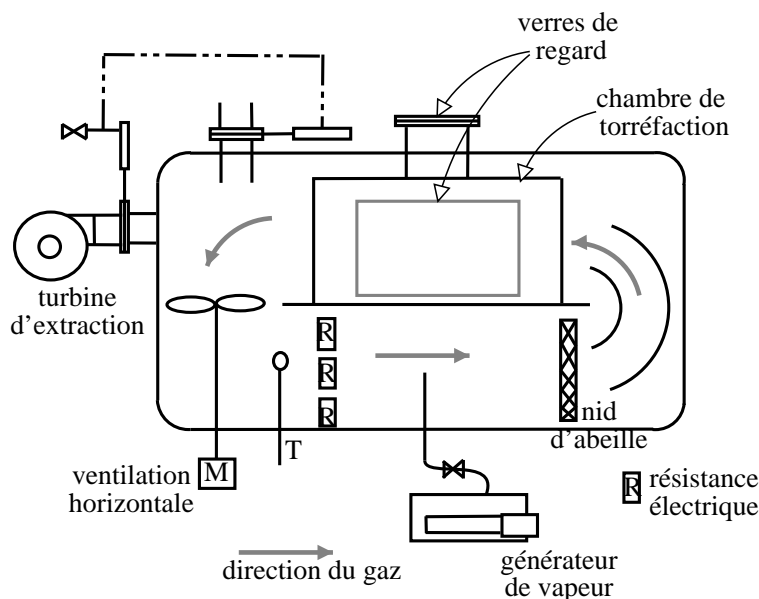
Pour les expériences de torréfaction du café, nous avons utilisé des grains de café vert «frais» (qualité inaltérée) du genre *Coffea Arabica* d'origine colombienne, ceux-ci étant mondialement connus et reconnus comme un grand cru. Ces cafés Arabica ont été fournis par l'importateur *Les Comptoirs Coffea* du Havre.

### 3.2 Matériel expérimental

#### 3.2.1 Cellule discontinue de torréfaction

L'apport de chaleur aux grains de café vert est fait par de l'air chaud dans une chambre de torréfaction statique. La Figure 3.1 montre la cellule discontinue de torréfaction (Veine d'air SERVATHIN série SV02 7817), laquelle est constituée d'une chambre de torréfaction (500 mm en largeur, 500 mm en profondeur et 300 mm en hauteur), d'un ventilateur horizontal et de résistances électriques (R), suivies d'un générateur de vapeur. Elle permet donc de chauffer les produits solides dans des conditions constantes ou variables, en utilisant un contrôle de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air. La chambre est constituée d'acier inoxydable soudé étanche avec bonde d'évacuation et deux grands regards (l'un latéral, l'autre sur la face supérieure), elle est isolée par de la laine minérale en couches croisées et équipée d'une grille latérale en nid d'abeilles pour l'homogénéisation du flux d'air.

Dans la cellule, la température de l'air peut varier de  $+50^{\circ}\text{C}$  à  $+300^{\circ}\text{C}$  avec une précision de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . La montée en température, comme le refroidissement peut se faire à  $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ . La régulation automatique de la température de consigne est d'une précision de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  pour une vitesse d'air d'au moins  $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Néanmoins, nous avons constaté que la

FIG. 3.1 – *Cellule discontinue de torréfaction.*

régulation a une amplitude de  $\pm 6^\circ\text{C}$  quand on utilise une température de consigne de  $300^\circ\text{C}$ . L'humidité est contrôlée par injection de vapeur produite par un générateur de vapeur, le point de rosée est réglable de  $+40^\circ\text{C}$  à  $+76^\circ\text{C}$ , soit de 50 à  $400 \frac{\text{g d'eau}}{\text{kg d'air sec}}$ . La vitesse d'air au niveau du grain de café dans l'enceinte de torréfaction est réglable de 1 à  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  avec une précision de  $\pm 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . La veine d'air horizontale forme une boucle avec des longueurs droites de stabilisation du débit d'air. Le refroidissement s'effectue par l'ouverture des vannes d'entrée et d'extraction de l'air et par action sur la vitesse de rotation de la turbine d'extraction. Cette cellule de torréfaction est instrumentée (caméra, balance, microphone et capteurs de températures) afin d'avoir des mesures qui sont décrites plus loin §3.3.2.

### 3.2.2 Système informatique

Nous avons travaillé sur deux ordinateurs et un serveur de calcul partageant leurs ressources par réseau Ethernet et également visibles sur Internet, ce qui permet une supervision à distance. Cette architecture a été choisie pour dissocier les fonctions «mesures» de fonctions du calcul, de supervision, et pour tenir compte des ressources nécessaires au traitement d'images en temps réel. Chaque ordinateur a une fonction particulière, *Buda* Pentium II à 133 MHz, premier ordinateur fait l'acquisition des images, du signal sonore et stocke l'information. *Café* processeur Pentium à 75 MHz, acquiert et interprète les températures, la masse du produit et stocke l'information, de plus, celui-ci commande l'arrêt et l'allumage du ventilateur lors de la prise de masse pour éviter les perturbations de la ventilation. *Leda* PIII à 1,3 GHz (déporté loin du pilote), s'occupe du traitement des

images de *Buda*, de modéliser l'information, de contrôler les ordinateur *Café* et *Buda*, et de prendre la décision du degré de torréfaction (p. ex. comparer la luminance ou niveau de gris du grain au cours du procédé avec la luminance ou niveau de gris de référence, afin d'arrêter le procédé). Sur le plan technique, nous avons utilisé un système d'exploitation du type *Unix*, pour ses capacités multi-utilisateurs et multi-tâches en parallèle. La version choisie : *GNU Linux*, présente l'avantage d'être libre. Ce système multi-tâches propose la caractéristique d'un temps d'utilisation du microprocesseur réparti entre les différentes tâches. Les ressources de l'ordinateur sont affectées aux tâches selon leur niveau de priorité. Cette particularité du système *Unix* est importante, elle nous permet d'obtenir l'information en pseudo temps réel, de les traiter et de prendre une décision. Ces différentes tâches sont indépendantes, ce qui accroît la robustesse du système d'acquisition. Si une précision meilleure que  $10^{-1}$  seconde est désirée, il existe des versions libres *d'U\*X* adaptées, mais ce n'est pas utile dans notre cas. En outre, ce système nous donne la possibilité de superviser l'opération et de consulter les données à partir de tout terminal connecté à Internet.

## 3.3 Mesures

### 3.3.1 Mesures de laboratoire

#### Colorimètre *Minolta*

Pour la mesure absolue de la couleur dans le système  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  de la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), nous avons utilisé le colorimètre *MINOLTA CR-200*. Il est caractérisé par une illumination diffuse, un angle d'observation de  $0^\circ$ , et par une surface de mesure de 8 mm de diamètre. Il permet une lecture précise d'une grande variété d'échantillons et de surfaces uniformes, de plus il effectue automatiquement les conversions entre les codes numériques de couleur et dans la notation *Munsell Color* [color, 2001].

#### Teneur en eau du produit

Pour obtenir la teneur en eau des grains de café vert, nous avons appliqué la méthode pratique de dosage de l'eau des grains de café selon les spécifications de la norme Afnor NF V 03-311 [Afnor, 1976]. 5 g des grains de café, pesés avec précision, sont mis à sécher en deux temps, avec repos intermédiaire, dans une étuve à  $130^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  et à la pression atmosphérique, afin de re-homogénéiser la répartition de l'eau dans le grain. Après déshydratation, l'extrait sec est pesé avec précision. La teneur en eau initiale obtenue par notre café est de  $0,095 \frac{\text{g d'eau}}{\text{g de matière humide}}$  (10,5% en base sèche).

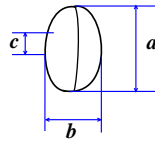


FIG. 3.2 – Dimensions du grain de café vert

### Dimensions du grain de café *Arabica*

Afin de connaître les dimensions des grains cafés verts utilisés pour les expériences de torréfaction, nous avons mesuré 36 grains de café de tout le lot. La Figure 3.2 montre les mesures réalisées sur chaque grain individuel. Les dimensions obtenues sont  $a = 9,08 \pm 0,596 \text{ mm}$ ,  $b = 6,85 \pm 0,34 \text{ mm}$  et  $c = 3,705 \pm 0,24 \text{ mm}$ .

### 3.3.2 Mesures en temps réel

#### Mesure et traitement de la température du grain

La conduite de la température de torréfaction a une influence considérable sur les qualités du café. Pour suivre la température de l'air et du grain, nous avons utilisé quatre thermocouples type *K* d'un diamètre de 1 mm. Nous avons percé un trou d'environ 4 mm de profondeur et de 1 mm de diamètre sur le côté du grain vert, afin de pouvoir introduire un thermocouple dans le grain. Un autre thermocouple est inséré à la surface (environ 0,2 mm de profondeur) du même grain, pour suivre la température proche de la surface ; sur un deuxième grain, seule la température interne est mesurée. Nous pouvons ainsi suivre la température du grain au cours de la torréfaction. Le dernier thermocouple est placé à une distance de 2 cm des grains pour mesurer la température de l'air au-dessus du lit des grains. Les grains sont placés sur une grille (maille de 6x6 mm) pour les tenir ainsi en suspension. L'ensemble est introduit dans le torréfacteur au moment où la température de consigne est atteinte. Pour réduire les causes d'incertitude, nous avons isolé la partie du thermocouple en contact avec l'air chaud.

Toutes les mesures de température ont été acquises par l'ordinateur *Café* (voir fig. 3.3) muni de deux cartes :

- ★ une SCB7 qui est une carte de conditionnement des signaux pour quatre voies thermocouples. Elle permet de créer une interface entre les thermocouples RS du type *K* et la carte d'acquisition Arcom A/N,
- ★ Arcom PCAD12/16H (ADC 12 bits à 16 voies) qui est une carte d'extension de bus ISA 8 bits comprenant un convertisseur analogique-numérique (ADC) rapide de 12 bits et 16 entrées différentielles multiplexées.

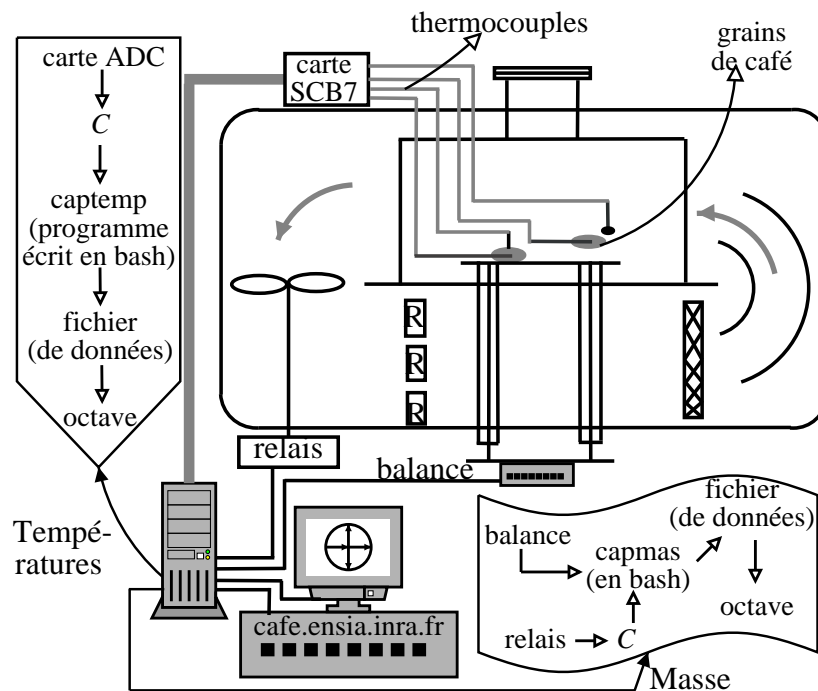


FIG. 3.3 – Schéma des données expérimentales (températures et masse).

La Figure 3.3 décrit l'acquisition et le traitement de la température. Un programme écrit en *C* (langage de programmation) lit les mémoires de la carte ADC et affiche les températures avec une précision de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Un autre programme écrit en *bash* (langage descriptif qui fait la liaison entre l'utilisateur et le noyau U\*X) est utilisé pour commander l'exécution du programme en *C*, gérer la température et sauvegarder les données à intervalles réguliers (chaque seconde) dans un fichier. Le traitement de la température en temps réel est fait avec le logiciel *Octave* [EATON, 2001].

### Mesure et traitement de la masse du produit

La mesure de la masse est un paramètre utile car elle est souvent associée pour identifier la teneur en eau, les composants volatiles, l'évolution du  $\text{CO}_2$ , et probablement des réactions de pyrolyses [DUTRA et al., 2001]. Elle peut donc faciliter l'établissement de bilans de matière.

Nous avons mesuré la masse du produit à intervalles de temps programmables à l'aide d'une balance électronique METTLER (SB16001), d'une portée de 16 kg et d'une précision de 0,1 g, reliée à l'ordinateur *Café* par une liaison RS232 (voir fig. 3.3). Un programme écrit en *bash* fait l'acquisition de la masse, en utilisant les commandes d'entrée-sortie classique [LAWYER, 2000]. Pendant l'acquisition, le ventilateur du torrificateur est arrêté

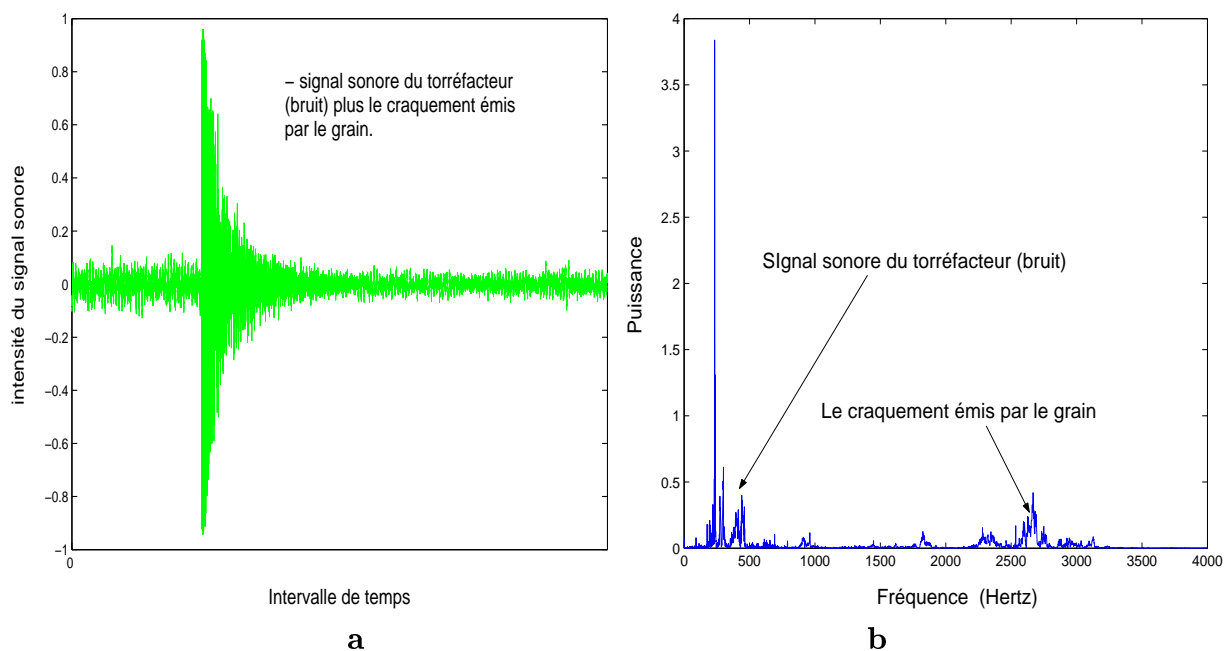


FIG. 3.4 – (a) Le signal sonore sur un intervalle de temps (bruit du torréfacteur plus signal sonore émis par le grain). (b) La puissance du signal sonore en fonction de la fréquence

automatiquement pour éviter les perturbations dues à l'écoulement d'air, par un programme écrit en *C*, qui commande un relais par l'intermédiaire d'une liaison parallèle [PHOTIS, 1999]. L'arrêt de ventilation dure 8 s chaque minute. Le temps cumulé d'arrêt de l'air (1,2 min) est considéré négligeable par rapport au temps total de l'expérience (10 min). Le traitement des données est fait avec le logiciel *Octave* [EATON, 2001].

### Mesure et traitement du signal sonore

Un des paramètres utilisé par les opérateurs au cours de la torréfaction artisanale est le moment où un craquement est émis par les grains. Ce phénomène est dû probablement à la pression de vapeur d'eau et à l'échappement du  $CO_2$  à l'extérieur des grains qui provoquent aussi le gonflement et l'éclatement des cellules [ILLY and VIANI, 1998, GUYOT, 1993]. Normalement le  $CO_2$  est produit quand ont lieu les réactions exothermiques. En outre, ILLY and VIANI [1998] ont mentionné qu'un second signal sonore émis par le grain indique la fin de torréfaction. GUYOT [1993] propose que les craquements des grains sont d'autant moins importants que la vitesse de torréfaction est lente. Le moment du craquement émis par le grain est donc un paramètre à considérer afin d'aider à prendre la décision de la qualité finale du produit.

Nous avons suivi le signal sonore du procédé à l'aide d'un microphone lié à l'ordinateur *Buda* muni d'une carte de son compatible *Soundblaster*. Un programme écrit en *bash* fait l'acquisition du signal sonore et l'enregistre dans un fichier, en utilisant la commande

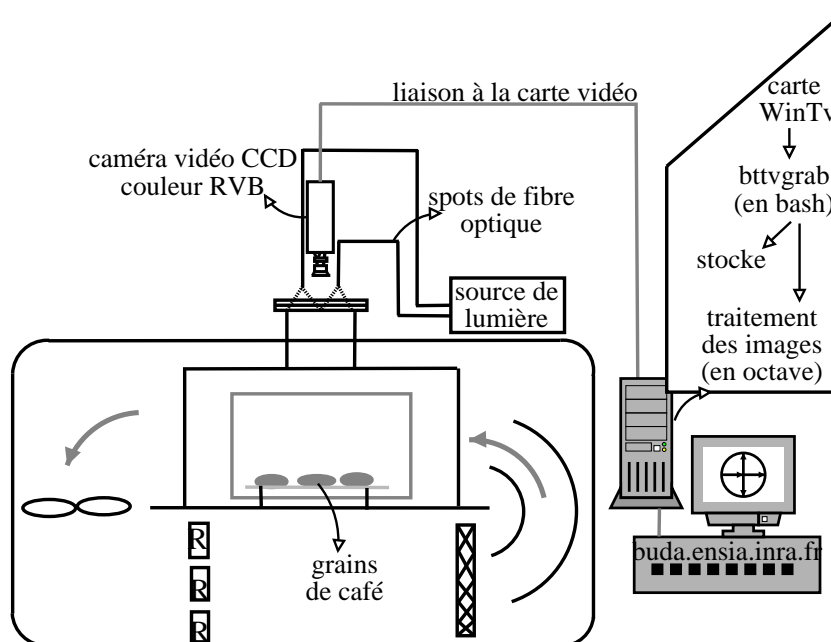


FIG. 3.5 – Schéma du système expérimental d'analyse d'image

`wavrec -t 600 -b8` [TRANter, 2000]. La Figure 3.4a présente le signal sonore pris dans un intervalle de temps de torréfaction (bruit créé principalement par le ventilateur plus le craquement émis par le grain). Afin d'extraire le craquement caractéristique du bruit de fond, nous avons fait une transformée de Fourier du signal (fonction `fft` de *Octave*). La Figure 3.4b montre la différence de fréquences entre le bruit du torréfacteur et le craquement du grain. Nous avons ainsi remarqué que les craquements sont émis à haute fréquence, ils sont ainsi facilement différenciables du bruit de fond. Nous avons envisagé la mise en place d'un filtre passe haut permettant de limiter la quantité de données à traiter. Il faut noter que ces données ne sont pas utilisées dans ce mémoire, néanmoins, elles peuvent être employées pour l'avenir comme un autre paramètre important.

### Acquisition des images

La Figure 3.5 montre le système expérimental développé pour suivre la couleur [*rouge, vert, bleu*] ou au niveau des intensités lumineuses «niveau de gris» et la surface des grains de café au cours de la torréfaction. Ce système est constitué, comme tous les dispositifs classiques d'analyse d'image :

- ★ d'un système d'éclairage : une source de lumière avec deux petits spots de fibre optique sont établis pour éclairer la scène,
- ★ d'un capteur d'images : une caméra vidéo CCD (capacité à transfert de charges) couleur RVB (*rouge, vert, bleu*) de marque Sony (modèle XC-711P) travaillant dans le visible et munie d'un objectif de 50 mm  $\phi$ 25,5. Ce type de capteur est le plus

utilisé et le moins coûteux,

- ★ d'un système de numérisation : nous avons utilisé l'ordinateur *Buda*, muni d'une carte d'acquisition vidéo *Hauppauge WinTV* équipée d'un convertisseur *bttv 878* permettant la numérisation de l'image. Nous avons volontairement appliqué ces matériels grand public pour leur robustesse à moindre coût, mais surtout la disponibilité des codes sources des pilotes logiciels du composant *bttv 878*.

Comme on peut le voir dans la figure 3.5, la caméra est installée à l'extérieur de la chambre de torréfaction et visualise la scène au travers d'une fenêtre en verre qui introduit une distorsion négligée du chemin optique. L'acquisition des images est faite en utilisant le logiciel *bttvgrab* (commande `bttvgrab -s1 -Q -l1 -oppm -dq -w640 -W480`) [WALTER, 2001]. Ce logiciel présente l'avantage de pouvoir être appliqué comme une commande utilisée en *bash*. Il peut sauvegarder à intervalles réguliers les images (nous avons utilisé  $480 \cdot 640$  pixels, 3 octets par pixel) dans divers formats dont le *ppm* (portable pixel map) sur le disque dur. La visualisation des objets est faite avec le logiciel *xv*. Pour le traitement des images en temps réel, nous avons écrit un programme dans le langage *Octave* [EATON, 2001].

## 3.4 Méthodes

### 3.4.1 Méthode optique

Comme tout système de traitement d'images et comme nous l'avons vu (figure 3.5), notre système est considéré comme une succession de trois étapes : l'acquisition (visualisation des objets, numérisation), le traitement et l'extraction de l'information [GUIZARD et al., 1992, BOUDRANT et al., 1994, GUIZARD, 2001]. Nous parlerons d'abord de la mise au point de la première étape (éclairage, objectif et numérisation).

#### Éclairage

Le capteur (caméra) est destiné à récupérer le signal lumineux provenant de la scène à analyser, dans ce cas les grains de café. La scène que nous voulons analyser est située dans l'espace défini par la chambre du torréfacteur (avec deux ouvertures : l'une latérale, l'autre sur la face supérieure). Il est donc nécessaire de mettre en place un dispositif d'éclairage permettant de créer une énergie lumineuse suffisante sur la scène et évitant les ombres portées qui nuisent au traitement. L'élimination des ombres peut être permise en grande partie par un dispositif d'éclairage adéquat. Par cela, nous avons procédé à divers essais d'éclairage de la chambre du torréfacteur. Des images ont été testées dans les mêmes conditions de prises de vues, mais sous différents types d'éclairages (éclairage latéral, éclairage



annulaire et éclairage bilatéral). Nous avons remarqué que l'éclairage latéral permet de bien illuminer la scène mais les ombres des grains sont fortement prononcées, l'éclairage annulaire n'est pas exploitable à cause des reflets qui se forment sur les deux vitres de la chambre de torréfaction, et l'éclairage bilatéral permet d'éviter les ombres, mais il ne permet pas de disposer d'un éclairage uniforme sur une grande surface. Néanmoins, c'est ce type d'éclairage que nous avons employé car il est le meilleur compromis, le manque d'uniformité de l'éclairage pouvant être traité de façon logicielle (figure 3.5).

### Objectif ou optique

Parmi les objectifs testés, seules 2 permettent d'obtenir une image nette dans les conditions d'utilisation spécifique à la chambre de torréfaction, la contrainte principale étant une distance entre la caméra et la scène de 45 cm. Ces objectifs ont des distances focales de 28 et 50 mm respectivement, qui définissent des champs différents. Ainsi, le 28 mm couvre une surface très importante  $245,6 \text{ cm}^2$  (17,3 cm de long et 14,2 cm de largeur) mais il n'est pas possible d'avoir un éclairage uniforme sur l'ensemble de ce champ. Nous avons donc travaillé avec l'objectif de 50 mm qui couvre un champ de  $44,6 \text{ cm}^2$  (7,7 cm de long et 5,8 cm de largeur).

### Numérisation

La dernière étape avant le traitement proprement dit est l'obtention de l'image numérique, c'est-à-dire la numérisation. Cette étape est assurée par la carte *Hauppauge WinTV* que nous avons employée. Un programme écrit avec le logiciel *Octave* [EATON, 2001] lit en ligne l'image prise par *bttvgrab* (*format ppm*) et fournit les trois matrices de l'image [*rouge*, *vert*, *bleu*] qui sont traitées. La taille de l'image numérisée est de 921 kilo-octets (640x480 pixels pour chaque couleur, 3 octets par pixel).

Dans le chapitre 4, nous décrivons le traitement des images en temps réel et de l'extraction de l'information.

#### 3.4.2 Protocole expérimental

Pour les expériences d'acquisition de données sur le torréfacteur, nous avons choisi une gamme de températures de consigne de l'air. Ces expériences sont faites à des humidités relatives ambiantes avec une vitesse d'air constante. Les données mesurées sont les températures des grains de café, la perte de masse, et les images au cours de la torréfaction afin d'avoir des connaissances du procédé. Le tableau 3.1 montre le plan d'expériences sélectionnées en tenant compte des températures utilisées dans la littérature [ORTOLÀ et al., 1998, DUTRA et al., 2001, MENDES et al., 2001, NAGARAJU et al., 1997, DA

TAB. 3.1 – Protocole d'acquisition des données expérimentales

T'air (°C)	Première répétition			Deuxième répétition			Troisième répétition		
	HR (%)	Température (bulbe sec °C)	Masse initiale (g)	HR (%)	Température (bulbe sec °C)	Masse initiale (g)	HR (%)	Température (bulbe sec °C)	Masse initiale (g)
190	52	24.5	20	69	22.5	25	52	21	25
200	52	24.5	20	56	24.5	25	69	22.5	25
210	52	24.5	20	56	24.5	25	69	22.5	25
220	56	24.5	25	58	21	25	52	21	25
230	48	23	25	55	24	25	58	21	25
240	55	24	25	58	21	25	52	21	25
250	48	23	25	55	24	25	51	21	25
260	54	20.5	20	46	24	25	51	21	25
270	48	23	25	54	25.5	25	51	21	25
280	60	25.5	20	46	24	25	66	21.5	25
290	46	24	25	54	25.5	25	66	21.5	25
300	60	25.5	20	54	25.5	25	66	21.5	25

Toutes les expériences sont faites pendant 10 min, à une vitesse d'air de  $\approx 4$  m/s.  
T'air=Température de l'air.

PORTO et al., 1991, SMALL and HORRELL, 1993]. La variation de la température de l'air est comprise entre 190°C et 300°C par pas de 10 °C. Nous avons aussi vérifié la reproductibilité des résultats en effectuant 3 expériences pour chaque condition expérimentale (un total de 36 expériences sont donc réalisées).

Pour chaque expérience de torréfaction de café, nous avons pris 31 images à 20 secondes d'intervalle. La température est mesurée chaque seconde et la masse est mesurée chaque minute après l'arrêt du ventilateur. Toutes les données sont stockées par date dans le disque dur du serveur *Leda* (Annexe 1).

## 3.5 Conclusion

Nous avons instrumenté la cellule de torréfaction afin d'avoir des données expérimentales, en utilisant des capteurs pour mesurer :

- la température à l'intérieur et à la surface du grain avec une précision de 0.5°C,
- la masse du produit avec une précision de  $\pm 0.1$  g,
- l'image qui nous permettra de déterminer la surface et la couleur  $[R, V, B]$  du grain,
- le signal sonore émis par le grain, nous avons bien identifié le craquement du grain par rapport à celui du bruit du fond, mais comme il s'agit d'une mesure discrète,

difficile à manipuler en modélisation, nous avons décidé de ne pas ajouter cette difficulté supplémentaire à notre étude.

Il est important de noter que toutes ces mesures sont acquises en ligne, et permettent donc d'agir sur le procédé en temps réel. Dans le suivant chapitre (Chap. 4), nous présentons les résultats expérimentaux : des températures du grain, de la masse et des images des grains de café.

# Chapitre 4

## Résultats expérimentaux et discussions

Au cours de la torréfaction de café, des résultats expérimentaux sont acquis pour développer et valider des modèles mathématiques, et mieux comprendre le comportement des grandeurs comme la température, la masse, la couleur (système colorimétrique  $[R, V, B]$ ) et la surface du grain de café. Nous présentons ici ces résultats.

### 4.1 Évolution expérimentale des températures

#### 4.1.1 Évolution expérimentale de la température de l'air

La Figure 4.1 montre l'évolution de la température de l'air mesurée à 2 cm en amont des grains en fonction du temps pour une température de consigne pour l'air de 220°C. La moyenne de la température mesurée est de 223°C, c'est-à-dire 3°C supérieur à la consigne. Ceci peut s'expliquer par la position du thermocouple du régulateur qui est situé à 40 cm en amont des grains de café dans la cellule de torréfaction. Tous nos calculs tiennent compte de la température mesurée. On remarque également que la température n'est pas tout à fait stabilisée après 600 secondes, mais l'amplitude reste inférieure à 2,5°C, ce qui nous semble acceptable. Il faut noter que nous avons considéré comme début d'expérience le moment où la température de l'air augmente, c'est-à-dire quand la porte de la cellule vient d'être fermée.

#### 4.1.2 Évolution expérimentale de la température du grain

Nous avons mesuré la température interne et de surface du grain, cette dernière est prise à environ 0,2 mm de profondeur.

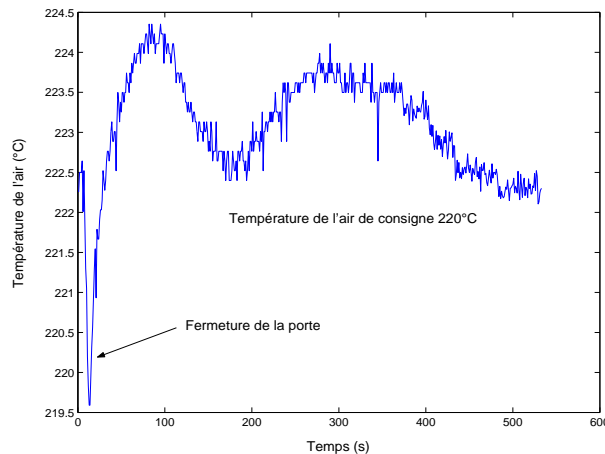


FIG. 4.1 – Évolution de la température de l'air fonction du temps

La Figure 4.2 présente l'évolution de la température interne du grain de café, exprimée en °C, au cours du temps pour toutes les expériences de torréfaction avec deux répétitions. Ces cinétiques de température montrent un comportement semblable à celui rapporté par SCHWARTZBERG [2002] pour une température du grain de torréfaction inférieure à 250°C, néanmoins, la cinétique qu'a montré SCHWARTZBERG [2002] est toujours simulée. Ces courbes mettent en évidence l'effet de la température de l'air sur le comportement de la température du grain. Une petite déviation de la tendance de la courbe est observée entre 80 et 100 secondes de torréfaction (fig. 4.3a, voir aussi fig. 4.2) pour les cinétiques avec une température d'air supérieure à 260°C. Le comportement est d'allure exponentielle qui se complique à des températures d'air élevées, comme le montre la figure 4.3b qui présente l'évolution logarithmique de la température du grain réduite (adimensionnelle) fonction du temps, à des températures de l'air de 190°C, 240°C et 300°C. Lorsque la température optimale de torréfaction du grain est dépassée, des réactions exothermiques responsables de l'arôme sont réduites et les grains commencent à être carbonisés. Ce phénomène est appelé sur-torréfaction par COSTE [1968], il peut être le responsable de la déviation observée. Par conséquent, ceci confirme que la température du grain en fonction du temps peut être un indicateur du degré de torréfaction au cours du procédé. Il est important de mentionner que SCHWARTZBERG [2002] a arrêté le procédé lorsque la température du grain atteint 238°C, il n'observe donc pas ce phénomène.

Pour montrer l'évolution de la température de surface du grain, nous présentons deux graphiques (fig. 4.4) pour deux températures de consigne extrêmes (190°C et 300°C). Cette figure 4.4 présente pour chaque température, la température de l'air, la température de surface et la température interne du grain. On peut constater que la température de la surface du grain est plus élevée que la température interne du grain au début du procédé. L'homogénéité de la température du grain est acquise après 90 s de torréfaction, lorsque

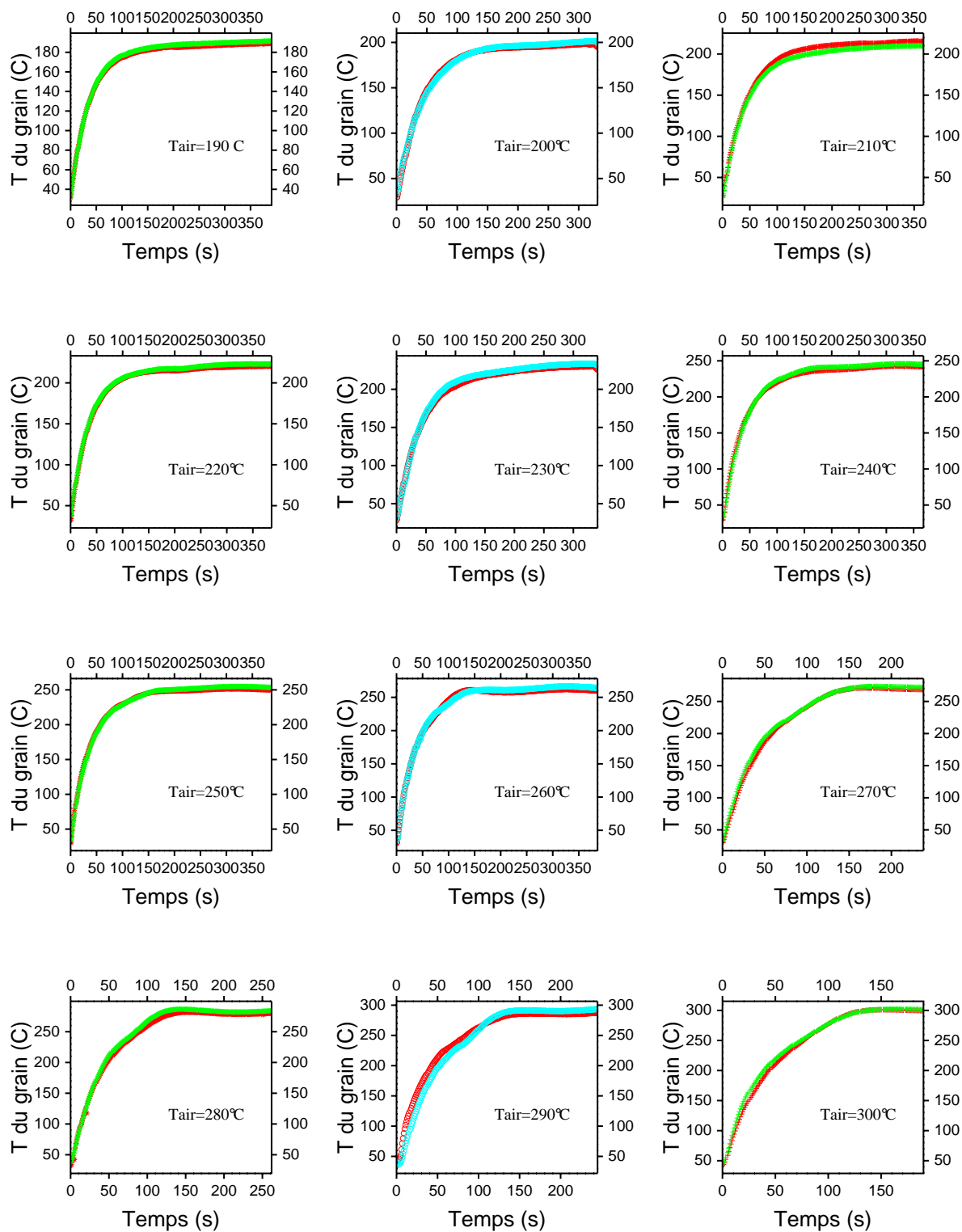


FIG. 4.2 – Évolution de la température au centre du grain à différentes températures d'air, au cours de trois essais.

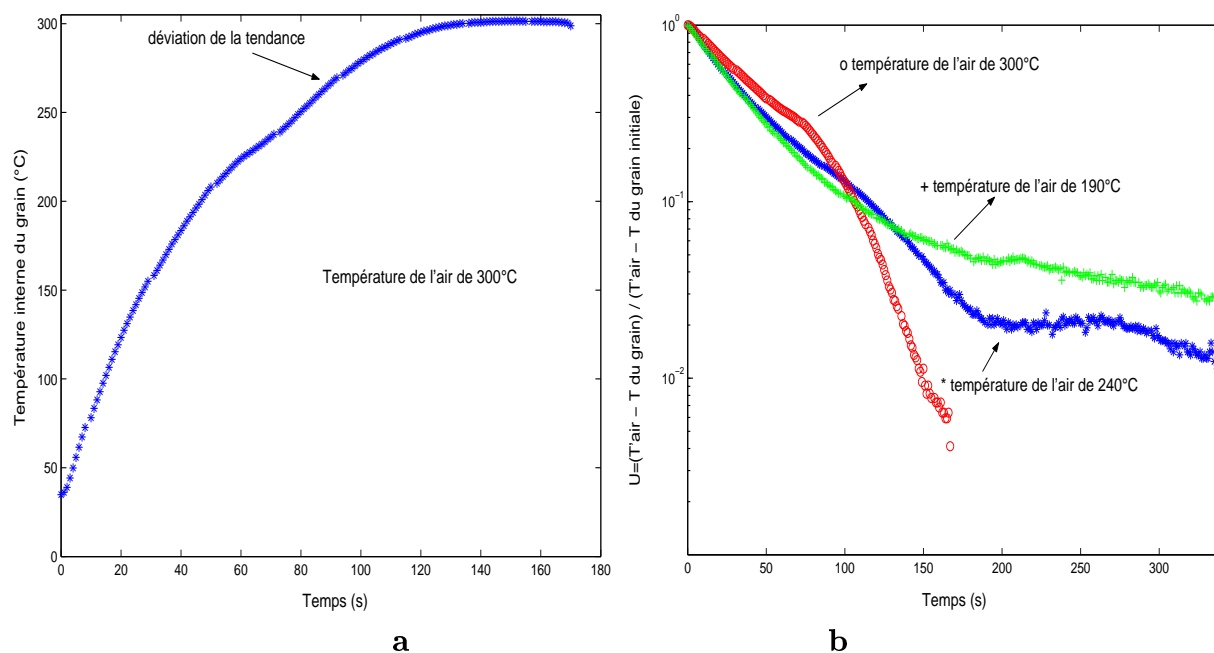


FIG. 4.3 – (a) évolution de la température du grain à une température d'air de 300°C en fonction du temps. (b) évolution de la température du grain adimensionnelle en fonction du temps

la température interne du grain arrive à la température de consigne.

## 4.2 Évolution expérimentale de la masse

La perte de masse des grains est mesurée chaque minute au cours de la torréfaction. Les résultats sont présentés figure 4.5. Toutes les courbes présentent une allure similaire plus ou moins marquée selon la température de l'air. Après une phase de latence courte, nous observons un comportement quasi linéaire suivi par un ralentissement marqué. La répétition des essais, notée sur les courbes de la figure 4.5, montre bien le caractère répétable de la première phase de cette perte de masse. Il apparaît cependant que le ralentissement de perte de masse se différencie d'un essai à un autre. On peut constater que la température de l'air et le temps de torréfaction sont deux facteurs importants à considérer dans la perte de masse du produit. Nous pouvons voir que le pourcentage de perte de masse est compris entre 3% et 12%. Cette figure 4.5 montre une perte de poids d'environ 5% en 10 min à une température d'air 220°C et proche de 10% en 10 min à une température d'air de 280°C. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par plusieurs auteurs: 5 – 6% en 10 min et 13% en 20 min avec une température d'air de 220°C, en utilisant un torréfacteur de type tambour tournant pour du café *Arabica* [PITTIA et al., 1996]; perte de 14% en 9 min avec une température d'air de 275°C, en torréfaction du café *Arabica* par chauffage direct [DUTRA et al., 2001]; 12-16% en 5,5 min à une température

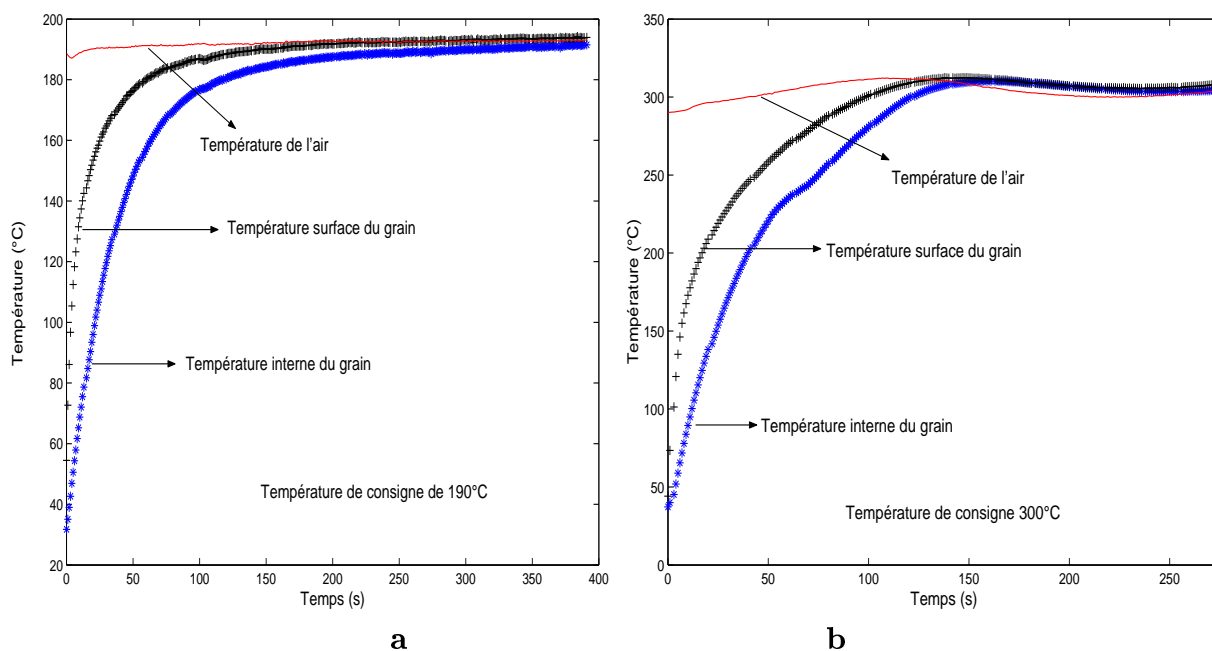


FIG. 4.4 – Évolution des températures du grain et de l'air pour une température de consigne de 190°C et 300°C

d'air de 480°C, en employant un torréfacteur à coupe-tournant pour une mélange *Arabica-Robusta* [SCHWARTZBERG, 2002]; 8,2-22% en 4 à 10 min et des températures du grain de 190°C à 245°C, en utilisant un torréfacteur de type tambour tournant (café *Arabica*) [DA PORTO et al., 1991]. La différences sont principalement dues aux différents types des torréfacteurs, aux temps et aux températures d'air utilisés.

Selon ILLY and VIANI [1998], GUYOT [1993], la teneur en eau des grains passe de 8-12% base sèche à 0-3% base sèche, de plus, des composants volatiles se forment diminuant d'autant la masse. La perte en eau est néanmoins le principal facteur de la perte de masse. En outre, il faut noter que DUTRA et al. [2001] ont déterminé la perte de poids au cours du procédé pour 300 g de café vert en utilisant un chauffage direct. Ils ont trouvé deux vitesses différentes de perte de masse : la première période de torréfaction du café, comprise entre 0 et 7 min, est décrite par une ligne droite avec une faible pente, cette période correspond à une perte d'eau et de volatiles, la deuxième période de 7 à 12 min est décrite par une ligne droite avec une forte pente, et ceci correspond à une perte de  $CO_2$  et de composantes organiques du grain. De plus, ils ont montré que la perte de  $CO_2$  augmente quand la teneur en eau diminue significativement. L'évolution de la perte de masse peut donc offrir un critère du degré de torréfaction, mais ce n'est pas un critère clé pour nous car elle est difficile à mesurer dans une expérience à l'échelle industrielle.



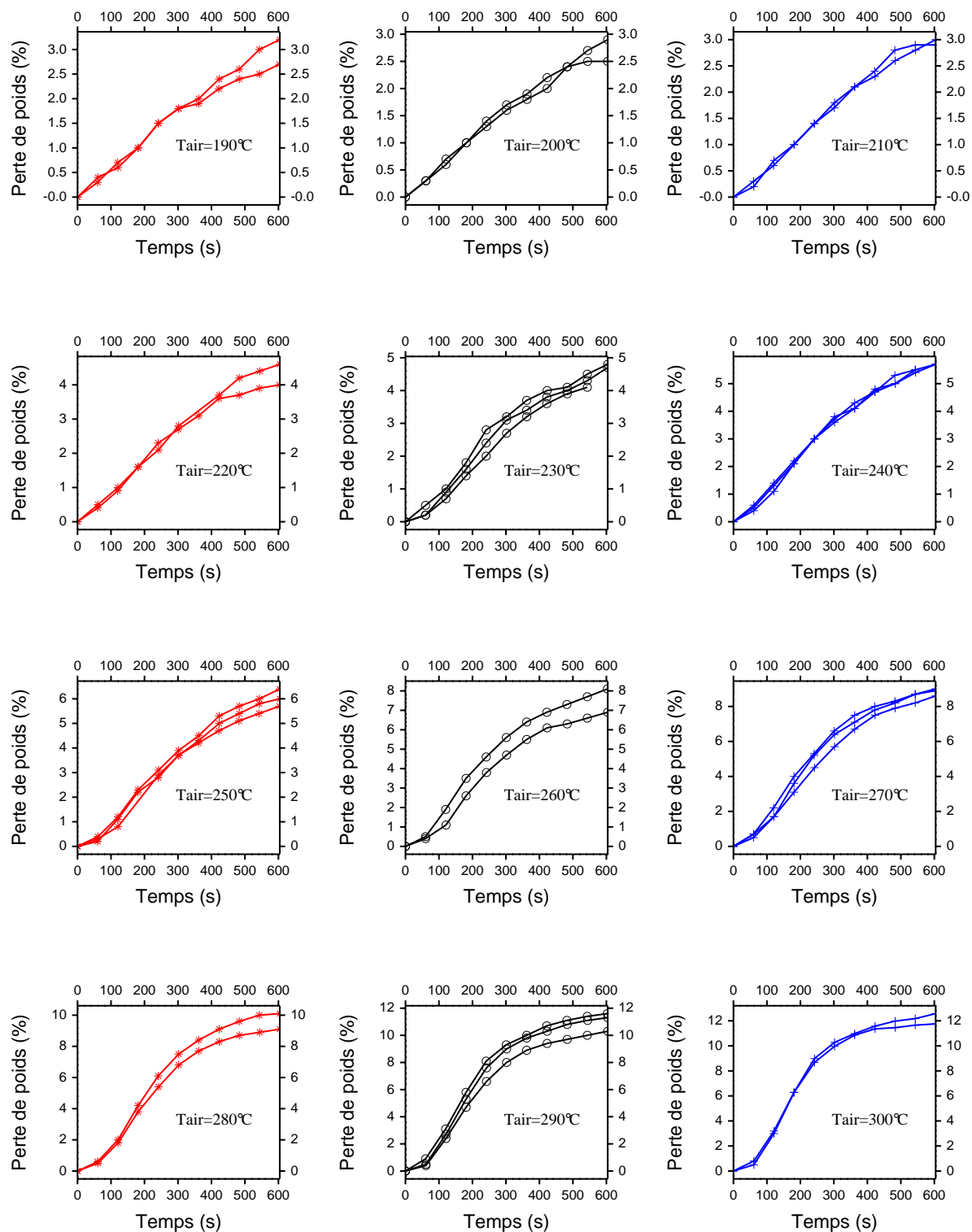


FIG. 4.5 – Évolution expérimentale de la perte de masse.

## Conclusion

Comme nous l'avons vu §4.1 et §4.2, on dispose d'une base de données expérimentales répétées, constituées de 12 x 3 expériences. Les grandeurs mesurées sont la température du grain et la masse du produit fonction du temps. Dans ces expériences, il faut noter que la variation de la température de l'air entre l'entrée et la sortie (fig. 4.1) est très petite à cause de la faible masse des grains utilisée (20-25 g de grains de café vert, voir tableau 3.1). Il est important de mentionner que l'homogénéité de la température du grain est atteinte après environ 90 s de torréfaction.

## 4.3 Traitement des images et extraction de l'information

Comme nous l'avons vu à la section 3.4.1, la première étape de l'analyse d'images est la visualisation des objets. La seconde étape est le traitement de ces images pour finalement faire une extraction de l'information. Or, l'objectif est d'avoir les moyens de contrôler le procédé de torréfaction en temps réel en utilisant des paramètres pour déterminer le degré de torréfaction. Nous nous intéressons ici à la couleur (ou à l'intensité de niveaux de gris) qui est un critère de qualité majeur (§2.1.5).

### 4.3.1 Calibration et extraction de l'information

Malgré les précautions que nous avons apportées à la mesure, les images sont prises dans des conditions proches du milieu industriel. Il est difficile de contrôler rigoureusement l'éclairage, les images dépendent donc des conditions expérimentales. Il est donc nécessaire, pour comparer les résultats de diverses expériences, de procéder à une «calibration» pour rapporter les résultats numériques à des dimensions absolues, donc indépendantes des conditions expérimentales. Nous sommes confrontés principalement à une hétérogénéité dans l'espace (chaque point de l'image ne reçoit pas la même quantité et la même qualité de lumière) et dans le temps (les conditions d'éclairage, positions des spots, conditions d'ensoleillement, peuvent changer). Nous devons donc effectuer une calibration pour chaque série de mesures effectuées.

#### Prise en compte de l'éclairage

Si les conditions d'éclairage sont hétérogènes dans l'espace, la couleur des grains de café mesurée par notre appareillage (notée  $R, V, B$ ) dépend de leurs positions sur l'image. Si ces conditions varient avec le temps, la couleur ( $R, V, B$ ) dépend du jour de l'expérience. Pour contrôler les mesures et éventuellement les corriger, nous avons pris des images d'un

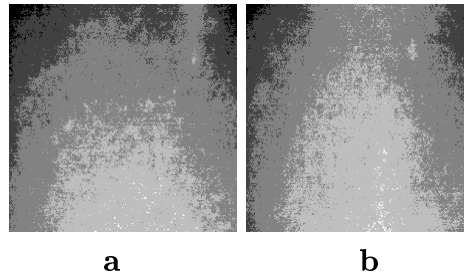


FIG. 4.6 – Les images (a) et (b) représentent un fond blanc pris à deux moments différents (a: jour 1, b: jour 2), pour visualiser l'hétérogénéité de l'éclairage, nous avons accentué le contraste

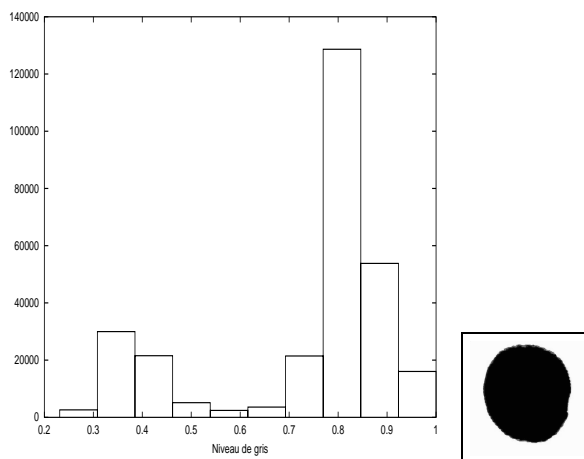
TAB. 4.1 – Les valeurs du niveau de gris des images 4.6

niveau de gris	image a	image b
■ zone 1	180 - 190	196 - 206
■ zone 2	191 - 200	207 - 216
■ zone 3	201 - 210	217 - 226
■ zone 4	211 - 220	227 - 236
□ zone 5	221 - 230	237 - 246

fond blanc uniforme avant chaque expérience. Nous obtenons ainsi les valeurs de chaque pixel en *rouge*, *vert* et *bleu* ( $R, V, B$ ) sur un octet chacune. Pour travailler sur l'intensité de l'éclairage, on peut passer en niveau de gris en utilisant l'équation suivante :

$$\text{niveaux de gris} = \frac{\text{rouge} + \text{vert} + \text{bleu}}{3} \quad (4.1)$$

La Figure 4.6a présente l'hétérogénéité dans une image représentant un fond blanc. On peut également observer l'influence du jour en comparant les figures 4.6a et 4.6b (les valeurs du niveau de gris de ces images sont dans le tableau 4.1). Ce problème d'éclairage est dû aux conditions expérimentales, notamment à la présence «de deux» vitres entre les objets et la caméra. La cellule de torréfaction n'est pas optimisée pour l'analyse d'image. Les mêmes problèmes sont rencontrés en milieu industriel. Il nous semble difficile d'améliorer encore l'éclairage. La seule possibilité est donc de reconstituer, à partir des données disponibles, une mesure fiable indépendante du jour et de l'emplacement. Le principe de ce pré-traitement est de soustraire à chaque image de grains  $[R, V, B]_{fBCafe}$  une image du fond blanc prise dans les mêmes conditions d'éclairage  $[R, V, B]_{fB}$ . On obtient ainsi trois matrices notées  $[R, V, B]_{fBCafe} - [R, V, B]_{fB}$  auxquelles on ajoute les coordonnées colorimétriques moyennes du fond blanc mesurées à l'aide d'un colorimètre MINOLTA et du logiciel de *Munsell Color* [color, 2001]. Le résultat est une couleur de café corrigée des variations d'éclairage notée  $[R, V, B]_{corrigé}$ .

FIG. 4.7 – *Seuillage des images*

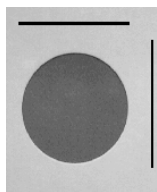
Une fois ce pré-traitement effectué, il faut pouvoir déterminer les valeurs de  $[R,V,B]$  de la zone souhaitée «le café». Pour cela, nous devons utiliser un seuillage.

### 4.3.2 Seuillage

Le but du seuillage est la séparation des images en parties, afin d'isoler les objets du fond. Le seuillage consiste à diviser l'image en 2 régions homogènes, caractérisant dans notre cas *le fond* et *les grains de cafés*. La méthode de seuillage est couramment utilisée dans les systèmes de traitement d'images, la difficulté consiste à choisir le bon seuil. En effet, le choix d'un seuil arbitraire présente un gros défaut : celui de ne pas tenir compte de l'évolution de la scène au cours du temps. Si le seuil est placé trop bas, les pixels appartenant au café (sombre) risquent d'être rejetés. Par contre, si le seuil est placé trop haut, les pixels du fond risquent d'être pris comme *café*.

Pour déterminer la zone d'intérêt (grains), on peut travailler de deux manières : soit un triple seuillage  $[R,V,B]$ , un par couleur ; ou soit un seul seuillage de façon binaire pour l'image au niveau de gris. Le travail sur des images de gris donne des résultats acceptables. La transformation d'une image couleur à une image en niveau de gris est simple (équation 4.1), un histogramme est utilisé pour la représentation graphique du nombre de pixels de chaque niveau de gris. On obtient ainsi, les deux zones bien identifiées (café et fond). L'histogramme nous apporte des informations précises et globales sur l'image, en particulier sur les possibilités de segmentation.

La Figure 4.7 présente l'histogramme et l'image d'un grain seuillé, où le noir représente le grain et le blanc est le fond. Nous avons utilisé le même seuil pour chaque expérience. En effet, on détermine les histogrammes des premières images, celles où les grains de

FIG. 4.8 – *Disque de diamètre de 3 cm*

cafés sont les plus clairs. S'il est possible d'avoir des valeurs de seuil pertinentes pour ces images, ces seuils pourront s'appliquer à l'ensemble des images des grains de café qui s'assombrissent au cours de leur torréfaction.

### 4.3.3 Détermination de la taille du pixel

Les distances sur les images sont comptées en nombre de pixels. Elles dépendent donc des conditions expérimentales et en particulier de la distance focale de l'objectif et de la distance des objets à la caméra. Il est donc nécessaire de pratiquer une calibration pour convertir les distances exprimées en nombre de pixels, en millimètres. Pour cette calibration, nous avons pris une image représentant un disque noir de diamètre 30 mm sur un fond blanc (fig. 4.8). On détermine facilement la *largeur* et la *hauteur* du disque en sommant les lignes ou les colonnes de la matrice de n'importe quelle composante colorimétrique de l'image [R,V,B] ou niveaux de gris, comme le montre la figure 4.9. Nous pouvons également déterminer la surface du carré circonscrit au disque en nombre de pixels, afin de calibrer la surface de ce carré. Pour cela, nous avons mesuré une largeur de 274 pixels et une hauteur de 262 pixels pour l'image du disque. Donc, le carré circonscrit de  $900 \text{ mm}^2$  compte donc 71788 pixels, on déduit la surface d'un pixel dans notre système de  $0.012537 \text{ mm}^2$ . La surface du pixel est stockée dans un fichier texte qui sera lu ultérieurement au cours du traitement d'images. Les résultats obtenus sont semblables quelle que soit la position du disque sur l'image. Il faut noter que la largeur et la hauteur devraient être égales, cependant ce n'est pas le cas. En effet, cette petite distorsion peut être due à la résolution spatiale du capteur CCD qui échantillonne plus en largeur qu'en hauteur.

### 4.3.4 Traitement des images

L'objectif du traitement d'images est de récupérer les informations souhaitées, en utilisant des algorithmes capables de manipuler une ou plusieurs images. L'algorithme fait appel à des outils qui effectueront l'acquisition des images numériques pour être traitées. Selon Vivier et Pons [BOUDRANT et al., 1994], la conception d'un traitement d'images est équivalente à la conception d'un algorithme de résolution d'un problème informatique. En

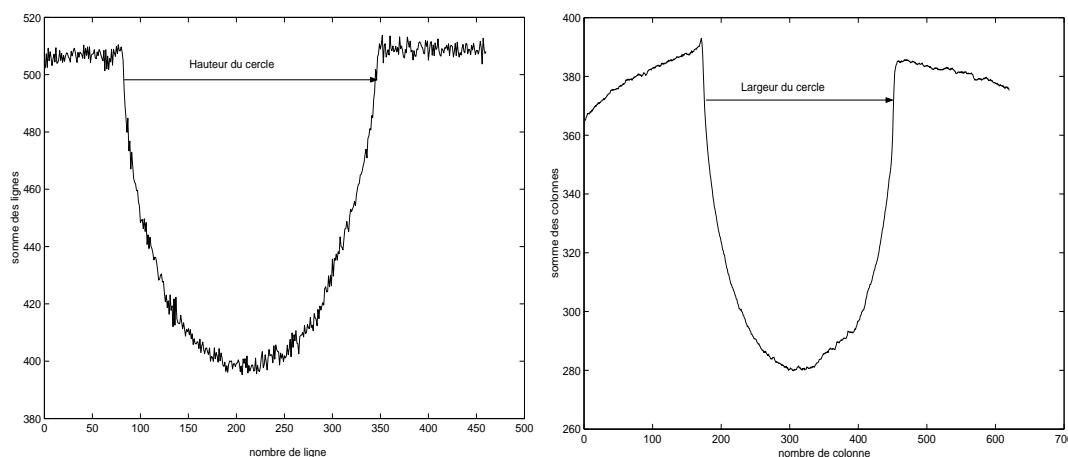


FIG. 4.9 – Analyse du cercle de calibration

conséquence, ces algorithmes de traitement d'images peuvent se faire en n'importe quel langage de programmation, nous avons choisis Octave [EATON, 2001].

### Le traitement

Comme nous l'avons vu (section 3.3.2), un programme écrit en *bash* lance de façon simultanée les acquisitions des images et le programme de traitement d'image. La gestion des différentes étapes du traitement d'image est assurée par le programme écrit en *Octave*, qui réalise le traitement d'une image obtenant les composantes colorimétriques  $[R, V, B]$ , le niveau de gris et la surface des grains et stocke les résultats sur l'ordinateur *Leda*. En outre, cet algorithme fonctionne de façon particulière puisqu'il attend l'existence de l'image pour exécuter son traitement. Cette particularité lui permet de fonctionner en même temps que s'effectue l'acquisition des images. Les images acquises sont également stockées sur l'ordinateur *Leda*.

La Figure 4.10 décrit l'organigramme du traitement des images que nous avons effectué. La première étape du traitement consiste à obtenir les trois matrices colorimétriques ( $R, V, B$ ) de chaque image pour identifier les zones d'intérêt. Une fonction tronque simplement les bords de l'image de 10 pixels. En effet, lors de l'acquisition, les bords de l'image sont noirs. Ces bords ne correspondent pas à une acquisition de la scène, mais apparaissent lors de la conversion de l'image analogique en image numérique. Ensuite, nous utilisons la méthode du pré-traitement discuté §4.3.1. Puis le seuillage est effectué comme indiqué §4.3.2. Le résultat est constitué de trois vecteurs ( $R, V, B$ ) des pixels correspondant aux grains de café. La taille de ces vecteurs correspond donc à la surface en pixels des grains de café. La surface est l'un des plus simples descripteurs utilisé dans la caractérisation des formes. Elle s'obtient par décompte des points appartenant à la forme. Les grains de

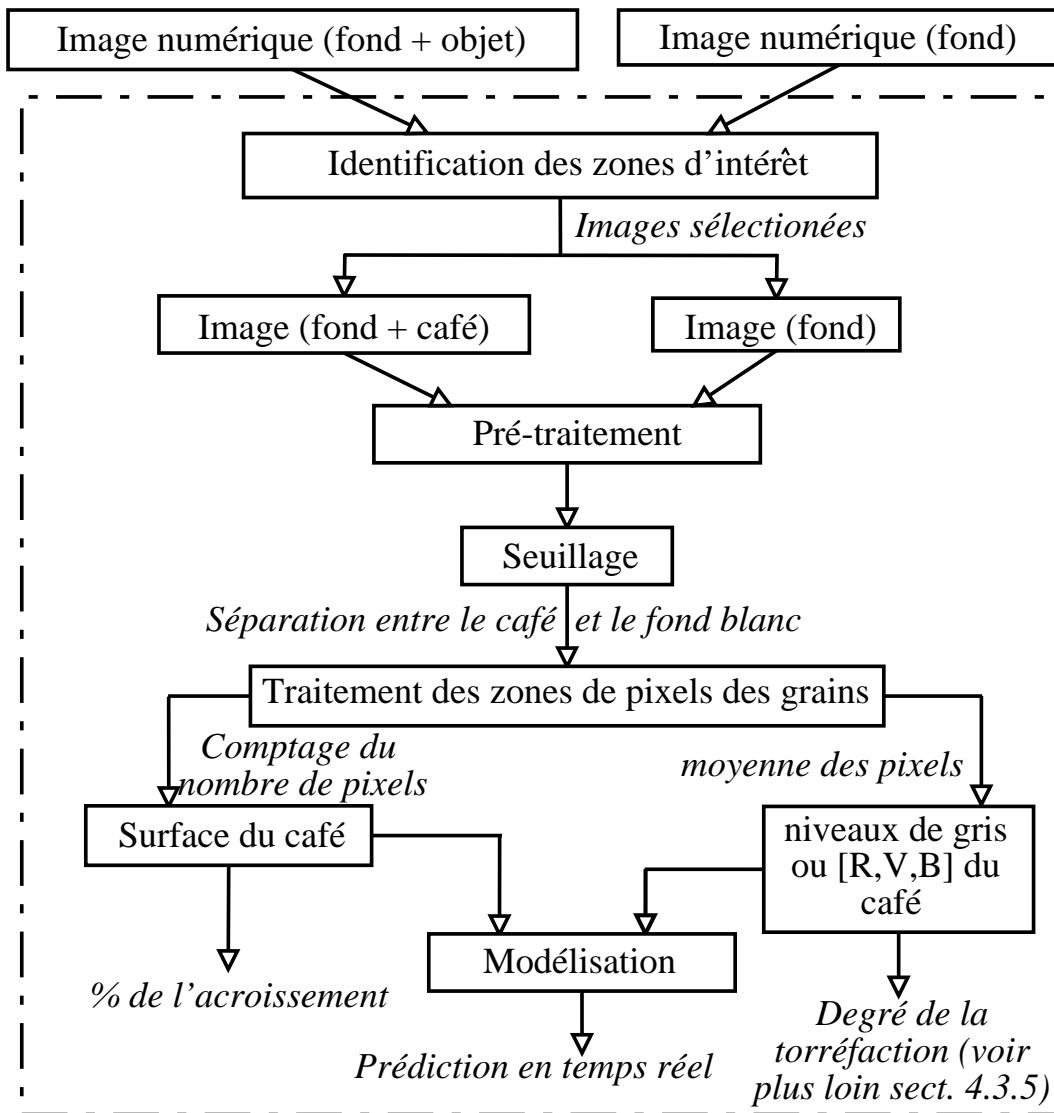


FIG. 4.10 – Organigramme de notre traitement des images

café au cours de la torréfaction subissent une expansion volumique. On calcule également la moyenne des valeurs de chaque vecteur *rouge*, *vert* et *bleu* des grains de café.

Ces trois valeurs moyennes de  $R$ ,  $V$ ,  $B$  des grains de café peuvent être converties dans un niveau de gris, en utilisant l'équation 4.1. Cette valeur de niveau de gris pourrait suffire à déterminer le degré de torréfaction au cours du procédé. La modélisation de ces paramètres (surface et niveaux de gris) est développée dans le chapitre 5.

### 4.3.5 Évolution de l'information extraite à partir des images

Avant de présenter les résultats extraits à partir des images du protocole expérimental (§3.4.2), nous voulons montrer qu'il est possible de faire une expérience en temps réel avec le système d'acquisition d'image présenté, afin d'arrêter le procédé lorsque le degré de torréfaction est optimal. Pour cela, nous connaissons les valeurs de  $[R,V,B]$  des grains à chaque acquisition par notre caméra CCD et traitement d'image. Donc l'intensité du niveau de gris issu du traitement d'image peut être comparée en ligne avec la valeur optimale du niveau de gris d'un café déjà torréfié. Dans ce cas, nous avons utilisé trois types de café torréfié commercial. Les valeurs de  $[R,V,B]$  optimales ont été obtenues dans notre système d'analyse d'images et correspondent à des grains de café torréfiés par 3 entreprises différentes :

- ★ *CAFÉS RICHARD* de France (Café *Arabica*) a comme valeur de  $[rouge, vert, bleu]$   $[56,4; 75,0; 80,1]$  et donc le niveau de gris est égal à 70,5,
- ★ *CAFIVER du Mexique* a comme valeur  $[55,296; 72,96; 77,568]$  et le gris est égal à 68,608 (Café *Arabica*),
- ★ *CAFÉ CORDOBA du Mexique* a comme valeur  $[54,78; 71,68; 78,336]$  et le gris est égal à 68,267 (Café *Robusta*).

Il est intéressant d'observer que la différence entre les valeurs de  $[R,V,B]$  du café torréfié pour les trois entreprises est minime. Ceci est très important car la couleur des grains de café torréfiés est presque la même. En outre, cette différence peut être due aux trois types de degrés de café torréfié : le foncé, le moyen et le clair, et nous ne savons pas auquel correspond chaque valeur optimale. De plus, il faut noter que nous avons étudié deux types de cafés (*Arabica* et *Robusta*). La Figure 4.11 montre l'intensité du niveau de gris obtenu en temps réel fonction du temps à une température d'air de 230°C au cours de la torréfaction. Le procédé est considéré fini quand le niveau de gris des grains de café atteint l'optimum déterminé ci-dessus, de plus cette fig. 4.11 présente cinq images, les trois premières sont les optimales de chaque entreprise et les deux dernières sont : le café vert et le café obtenu lors de cette expérience. On peut observer qu'on obtient une couleur acceptable. Nous commenterons la forme de la courbe plus loin §4.3.5.



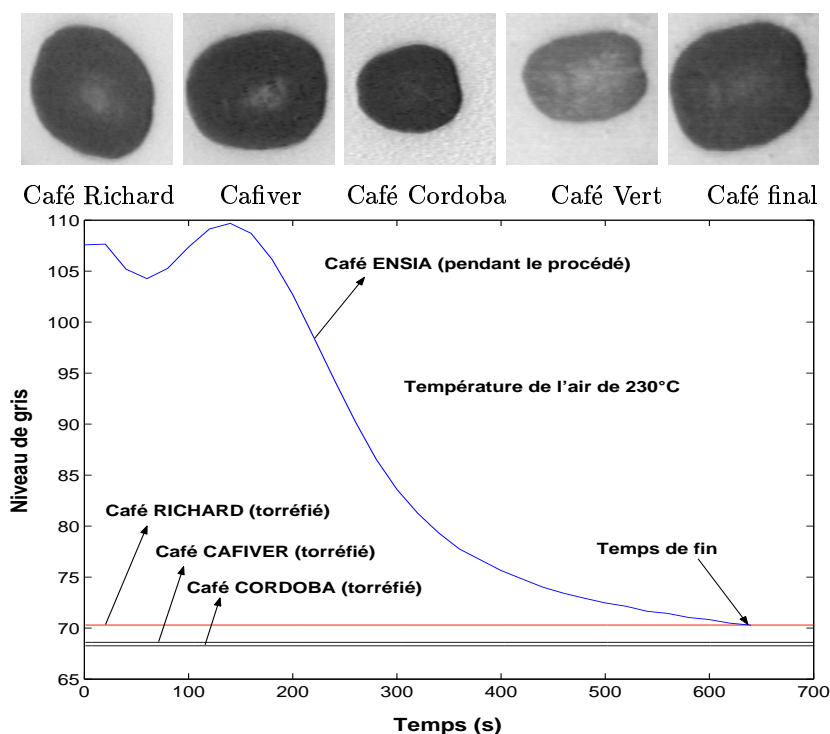


FIG. 4.11 – Cinétique expérimentale du niveau de gris obtenu en temps réel.

## Conclusion

Nous avons réussi à acquérir et à traiter les images en temps réel au cours du procédé de torréfaction de café. Ce succès est dû aux programmes qui fonctionnent correctement en parallèle. En effet, le temps de calcul pour chaque image est d'environ 4,4 secondes, or les images sont prises toutes les 20 secondes. Cette base de temps de 20 s nous apparaît suffisante pour être qualifiée de temps réel compte tenu des constantes de temps de la torréfaction. Le café ainsi obtenu a été consommé dans le laboratoire et a été déclaré acceptable. Cet essai confirme qu'il est possible de torréfier des grains de café vert dans notre système et d'optimiser le procédé en ligne. Nous considérons par la suite que la mesure exprimée en niveau de gris constitue un indicateur fiable et répétable du degré de torréfaction.

## Cinétiques expérimentales de la surface des grains

Après la calibration de la surface du pixel (§4.3.3), la surface du grain est mesurée en  $mm^2$  à partir du nombre de pixels comptés sur l'image. La Figure 4.12a montre l'accroissement de la surface des grains en fonction de la température de l'air et du temps de torréfaction étudié. Ces courbes de surface (fig. 4.12a) présentent un accroissement de 15% à 70% pour des températures d'air entre 190°C et 300°C. Par ailleurs, SCHWARTZBERG [2002] a montré une expansion de volume du grain de 50% à 120% pour des températures

d'air de 270°C à 550°C. DUTRA et al. [2001] ont déterminé une augmentation de volume de 120% en un temps de torréfaction de 12 min et à une température de 275°C, en utilisant un chauffage direct (procédé le plus ancien qui n'est plus utilisé industriellement). La température de l'air est donc un des paramètres important pour le gonflement du café au cours de la torréfaction. On peut aussi constater qu'aux températures de 280°C à 300°C et pour un temps supérieur à 360 secondes, l'accroissement est presque terminé (voir fig. 4.12a), ceci peut être dû à la température optimale du grain (§2.1.5) qui est dépassée, la sur-torréfaction a donc lieu. COSTE [1968] a mentionné que le volume du grain n'augmente plus lorsque la température du grain dépasse les 280°C.

Pour une meilleure compréhension de ce phénomène d'accroissement, la figure montre également une cinétique de surface et de température du grain en fonction du temps (fig. 4.12b et fig. 4.12c) pour une température d'air de 190°C. Cette figure 4.12b permet de mettre en évidence que le grain de café commence à gonfler seulement quand la température interne du grain devient supérieure à 100°C, ce qui confirme l'hypothèse de GUYOT [1993] qui attribue cette expansion à la pression de vapeur d'eau. En revanche, DUTRA et al. [2001] ont mentionné que l'accroissement de la surface est provoqué par 3 phénomènes qui ont lieu pendant le procédé de torréfaction : l'évaporation de l'eau, la libération du dioxyde de carbone  $CO_2$ , et le détachement de composants volatiles (organiques) des grains, mais la formation de  $CO_2$  suppose une grande perméabilité à l' $O_2$  des parois ce qui semble difficile si on considère que l'augmentation de volume est due à une grande pression interne.

Il est important de mentionner que nous avons fait un essai pour analyser si le gonflement du grain est homogène, c'est-à-dire si l'expansion relative du grain est la même dans toutes les directions. Pour cela, nous avons analysé le gonflement des grains de café dans les trois vues différentes au cours de la torréfaction : grains à plat vue au-dessus et vue au-dessous, et grain vertical (fig. 4.13). Nous avons observé que les trois vues des grains analysées ont présenté un gonflement homogène [HERNÁNDEZ et al., 2000]. Par conséquent, on peut facilement calculer le volume.

### **Cinétiques expérimentales de couleur et du niveau de gris du grain**

La Figure 4.14 présente les valeurs de la couleur (système *Rouge*, *Vert*, et *Bleu*) mesurée par la caméra CCD et corrigées (§4.3.1) au cours de la torréfaction avec une température de consigne pour l'air de 240°C. Les allures des courbes de la figure 4.14 sont similaires. Toutes ces courbes présentent une allure avec une décroissance rapide à partir de 20 secondes, suivie d'une croissance quasi-symétrique (autour de 60-100 s), ensuite, une décroissance continue d'allure exponentielle est constatée.

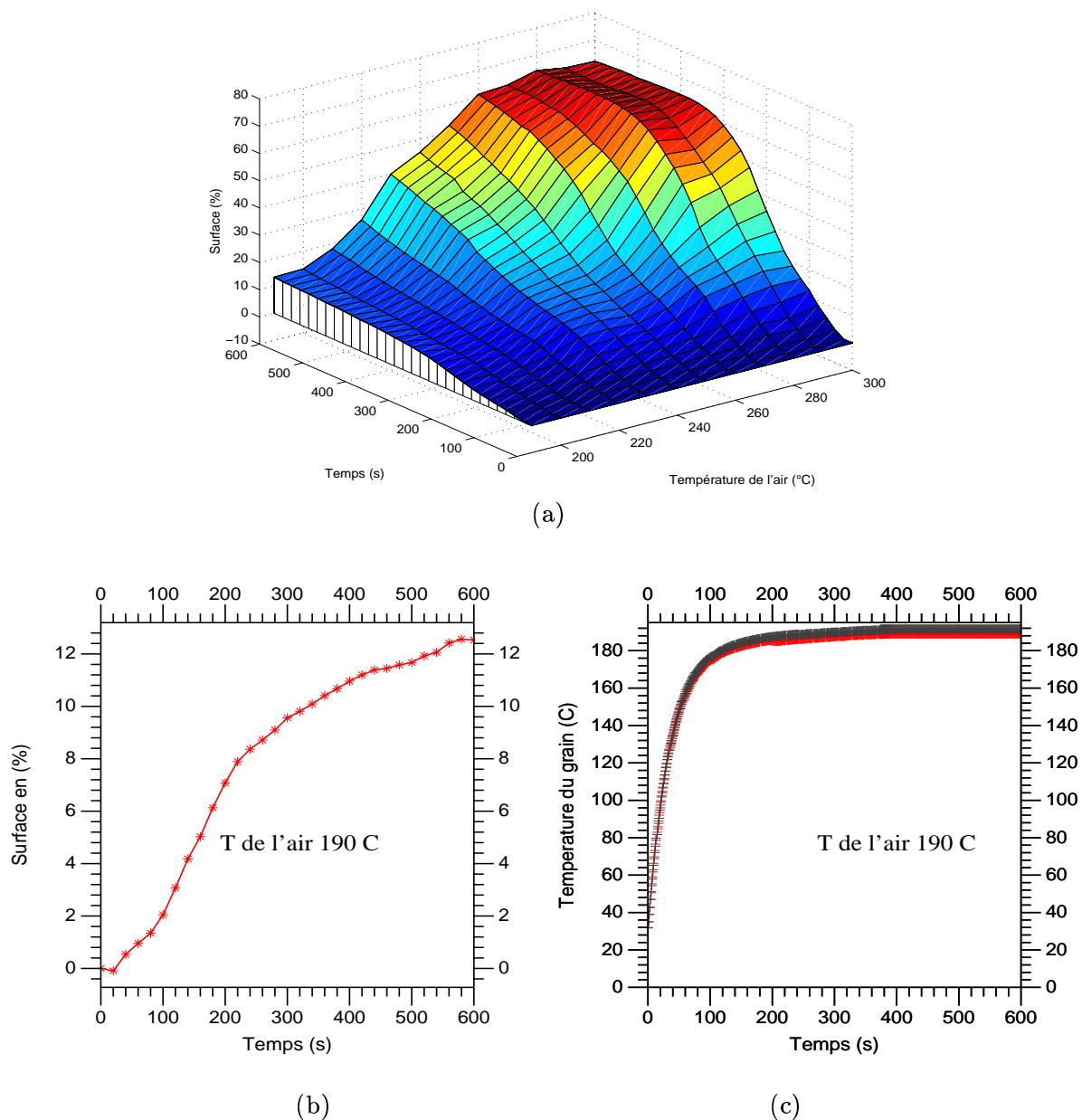


FIG. 4.12 – Cinétique expérimentale d'accroissement de la surface et de la température du grain. (a) courbes de surface fonction du temps et des températures de l'air. (b) une expérience de surface fonction du temps. (c) la même expérience mais de la température du grain fonction du temps



FIG. 4.13 – L'expansion du grain homogène, a (au-dessous), b (vertical) et c (au-dessus)

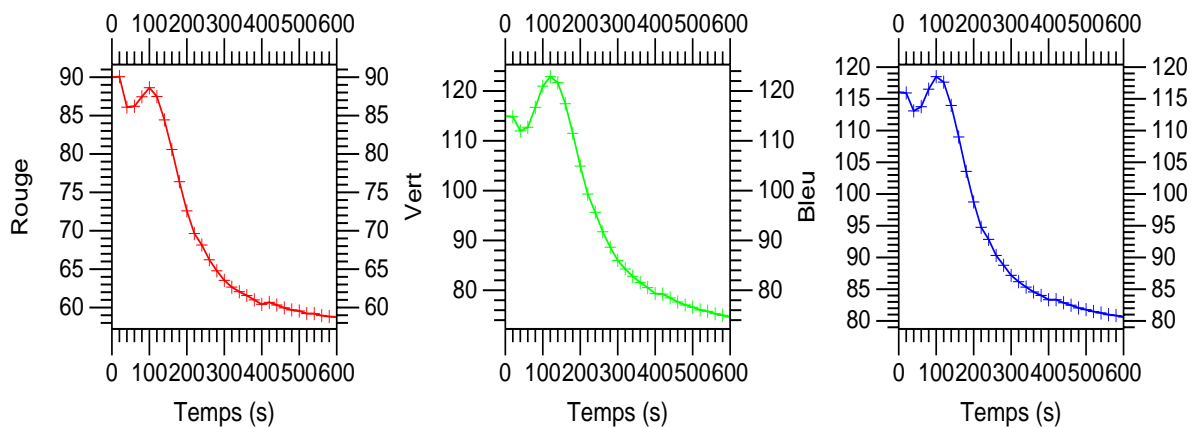


FIG. 4.14 – Cinétiques des indices Rouge, Vert et Bleu fonctions du temps pour une température de l'air de  $240^{\circ}\text{C}$

En outre, la figure 4.15 montre quelques images brutes (sans traitement) du grain de café au cours de la torréfaction pour une température de consigne pour l'air de  $230^{\circ}\text{C}$ . Cette figure présente également la courbe expérimentale du niveau de gris fonction du temps pour toute l'expérience de torréfaction. L'image ( $gA_{(t=0)}$ ) correspond au grain de café vert. On peut observer comment le niveau de gris décroît entre 20 et 60 s de torréfaction ( $gB_{(t=40)}$  et  $gC_{(t=60)}$ ). Les images  $gD_{(t=100)}$ ,  $gE_{(t=120)}$  et  $gF_{(t=140)}$  montrent l'augmentation de la luminance du grain qui passe par une couleur jaune-pâle. Ensuite les images  $gG_{(t=160)}$  et  $gH_{(t=180)}$  jugent le passage de jaune-pâle à rouge-brun. Ce passage de couleur rouge-brun est également observé visuellement par ILLY and VIANI [1998]. On voit sur l'image  $gI_{(t=220)}$  le changement de rouge-brun à une couleur foncée et finalement les images  $gJ_{(t=320)}$  et  $gK_{(t=520)}$  présentent une couleur plus foncée.  $gL_{(t=640)}$  est la couleur optimale du grain (voir fig. 4.11).

Pour une meilleure compréhension de ces allures des courbes (fig. 4.14 et des images des grains), étudions-les en considérant la température du grain fonction du temps (fig.

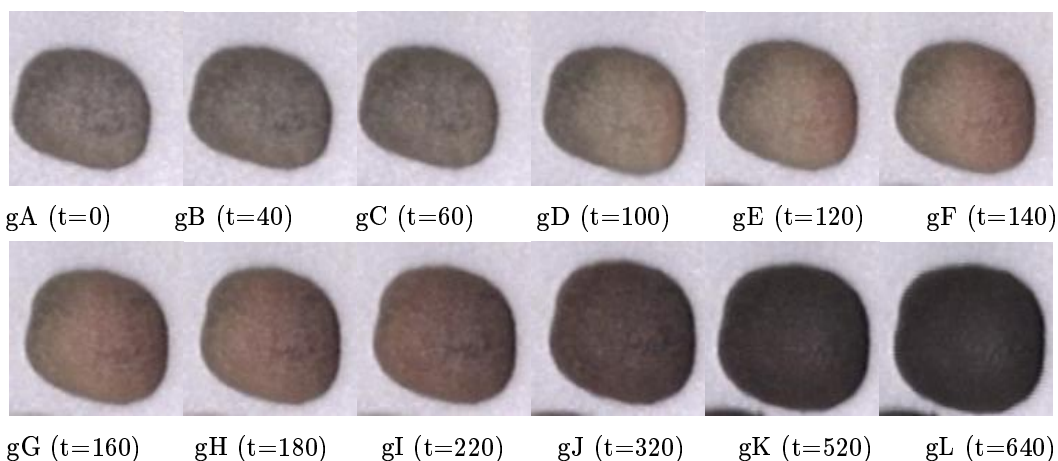
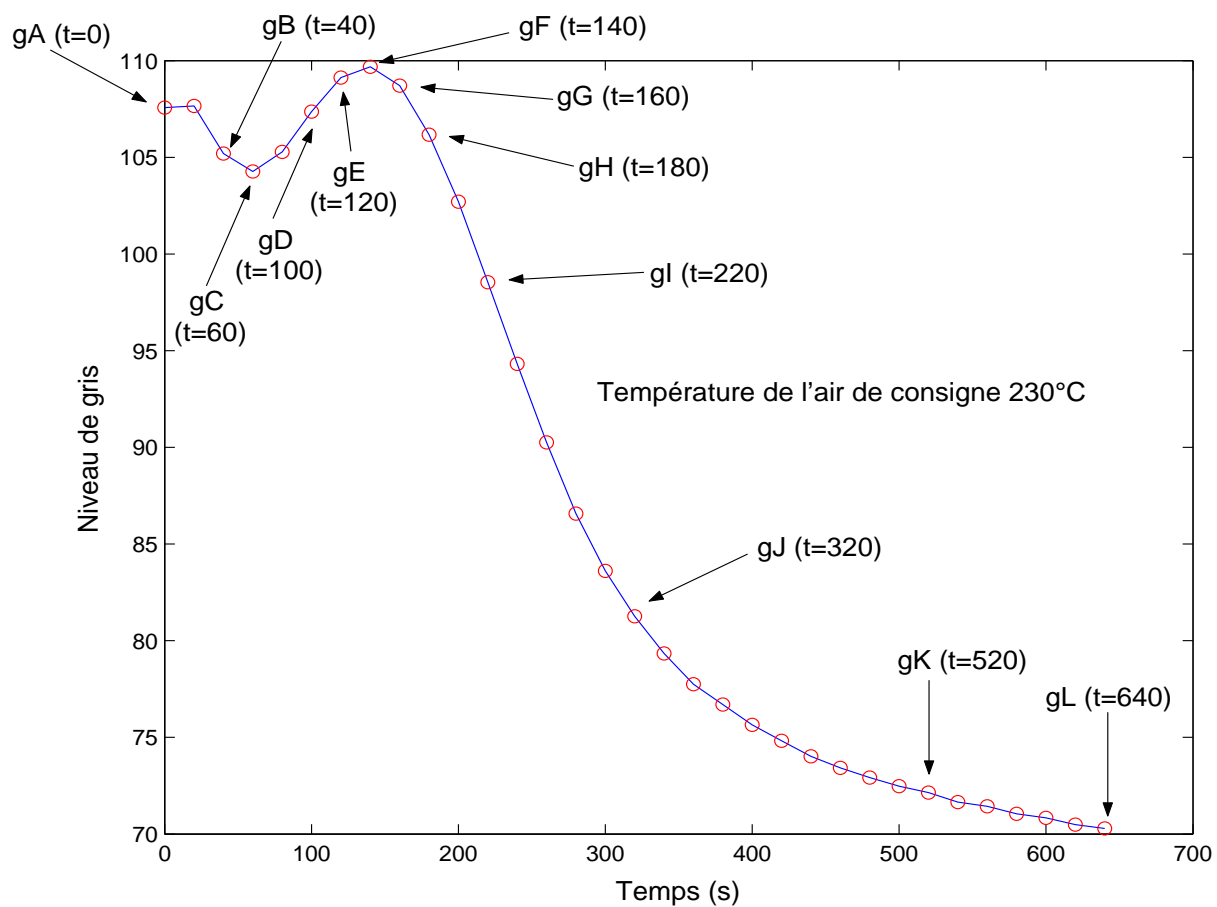


FIG. 4.15 – Image du grain de café au cours du procédé de torréfaction en considérant une température de consigne pour l'air de 230°C

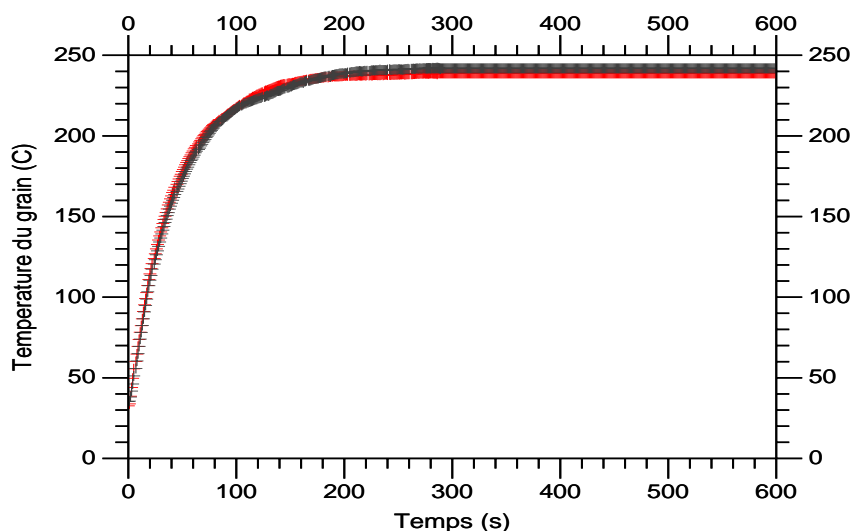


FIG. 4.16 – Cinétique de température du grain fonction du temps pour une température d'air de  $240^{\circ}\text{C}$

4.16). Quatre phases différentes sont observées au cours du procédé :

1. pendant les premières secondes (période de 0 à 20 s), les grains restent de la même couleur,
2. lorsque la température interne du grain atteint  $100^{\circ}\text{C}$  (fig. 4.16), la couleur devient légèrement plus foncée (période environ de 20 à 60 s), ce qui peut être dû à l'évaporation d'eau non liée,
3. au-dessus de  $160^{\circ}\text{C}$ , les grains commencent à s'éclaircir de manière très importante (période environ 60 à 100 s),
4. ensuite la couleur s'assombrit peu à peu jusqu'à celle du café carbonisé (visuellement).

La Figure 4.17 décrit l'évolution du niveau de gris du grain de café pendant la torréfaction à différentes températures d'air. À hautes températures d'air ( $\geq 260^{\circ}\text{C}$ ) le changement du niveau de gris est plus rapide pendant le procédé. Les courbes de niveau de gris montrent donc que la température de l'air et le temps sont deux facteurs importants pour le procédé de torréfaction. La répétition des essais, notée sur les courbes de niveau de gris, montre bien un caractère de répétabilité acceptable.

## Conclusions

Cette étude montre qu'il est possible d'instrumenter la cellule de torréfaction de façon à obtenir en temps réel toutes les informations nécessaires à sa maîtrise. On peut ainsi

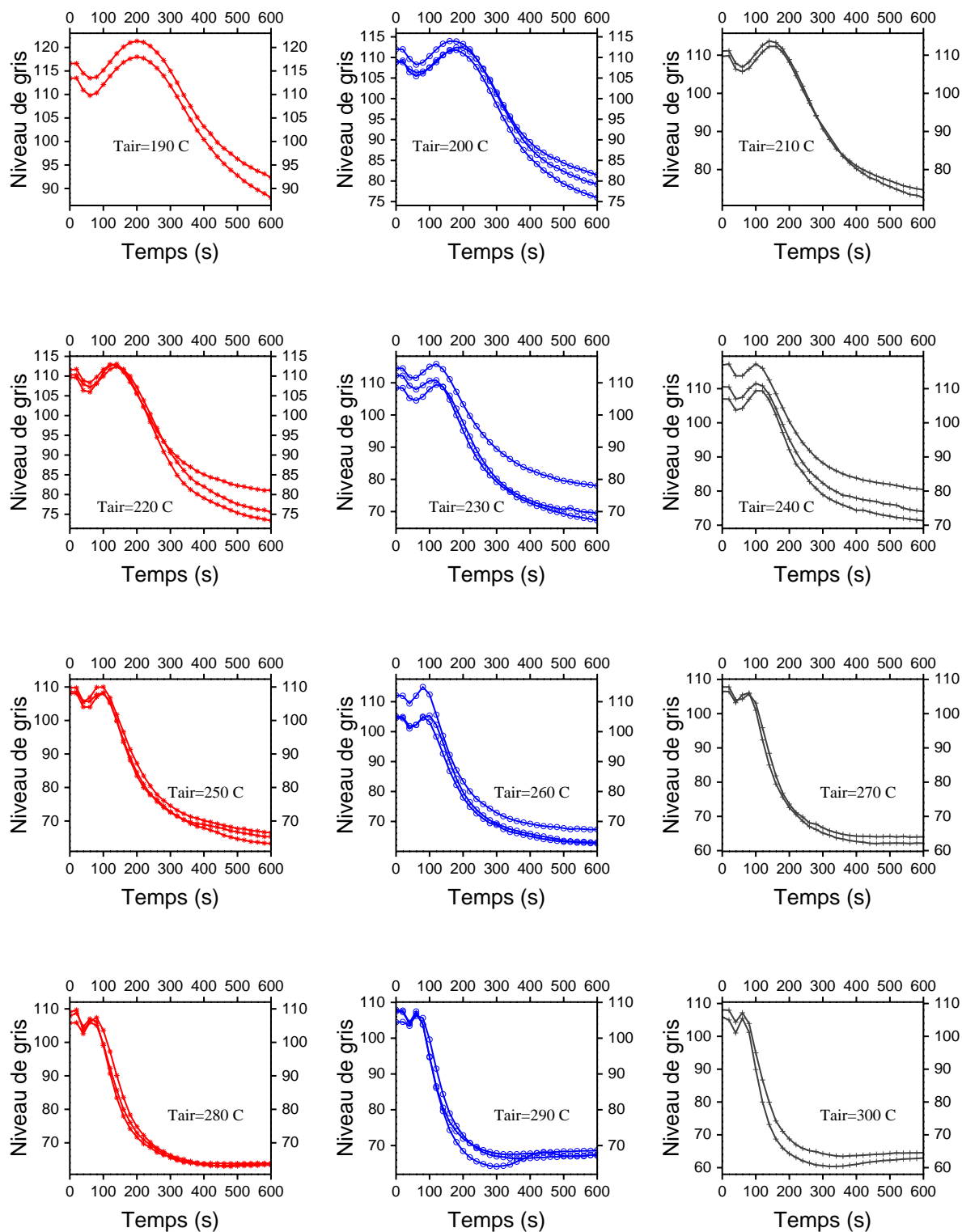


FIG. 4.17 – Cinétiques du niveau de gris pour toutes les expériences et leurs répétitions

déterminer le temps de torréfaction optimal, par exemple celui qui permet d'atteindre le niveau de gris optimal déterminé *a priori* pour des grains déjà torréfiés (critère commercial). Nous disposons d'une base de données expérimentales répétables, contenant la température du grain, la masse, la couleur  $[R, V, B]$  et la surface projetée du grain, en fonction du temps. Il faut noter que les deux problèmes rencontrés dans notre système d'analyse d'images, l'hétérogénéité de l'éclairage dans l'espace et dans le temps ont été résolues, mais il est donc nécessaire, pour chaque expérience d'analyse d'images, de procéder à une « calibration » pour avoir des résultats indépendants des conditions expérimentales.

Il est important de mentionner que les grandeurs mesurées (température du grain, masse, niveau de gris et surface du grain) sont néanmoins difficiles à mesurer dans une expérience à l'échelle industrielle. Nous essayerons donc de déterminer en temps réel quelques unes de ces grandeurs pour déterminer le degré de torréfaction (mesuré par le niveau de gris et éventuellement la surface du grain), en utilisant des capteurs et des algorithmes faciles à installer à une échelle industrielle, comme l'indique la figure 2.8. Les chapitres 5 et 6 sont donc consacrés à développer des modèles (algorithmes) pour développer une stratégie de contrôle.



# Chapitre 5

## Modèle dynamique et de représentation des grandeurs clés de l'opération

La transformation de café vert en café torréfié se fait, de façon générale, sous l'influence de la température et du gradient de température du grain. Par conséquent, un contrôle sévère de la température du grain est essentiel au cours du procédé. Nous abordons ici la modélisation des transferts de matière et de chaleur dans le grain. Nous construisons également des modèles de représentation permettant de déterminer le degré de torréfaction du café.

### 5.1 Modèle dynamique pour les transferts de matière et de chaleur sur le grain

L'étude des travaux antérieurs montre que pendant la torréfaction :

- la chaleur massique du grain  $Cp_b$  varie du simple au double ( $1,5$  à  $3 \frac{kJ}{kg^\circ C}$ ) en fonction du type de grain, de la température du grain  $T_b$  ( $25$  à  $260$  °C) et de la teneur en eau du produit  $X$  ( $8-12$  à  $0-5$  % *b.s.*) [RAEMY and LAMBELET, 1982, SINGH et al., 1997, SCHWARTZBERG, 2002],
- la masse des grains  $m$  diminue de  $12$  à  $16\%$  au cours du procédé [SCHWARTZBERG, 2002, DUTRA et al., 2001],
- le refroidissement dû à l'évaporation (étant un effet significatif) et les réactions chimiques (exothermiques) ont lieu seulement sur un domaine restreint de la température du grain  $T_b$  [SCHWARTZBERG, 2002].

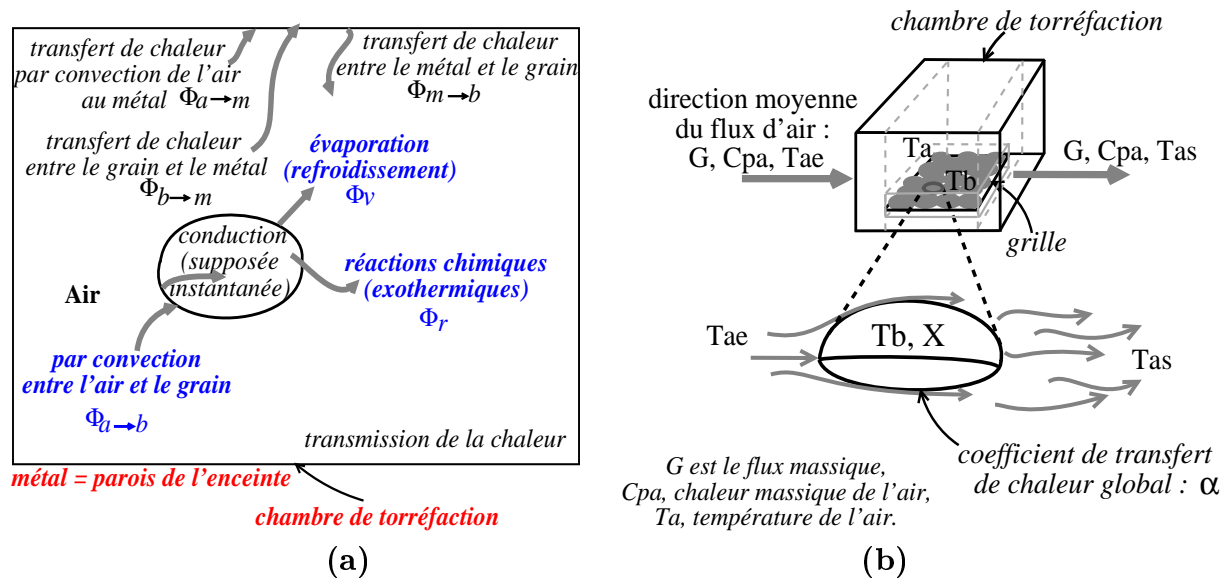


FIG. 5.1 – Mécanismes de transport et des réactions chimiques (exothermiques) dans un grain de café «moyen» au cours de la torréfaction.

La Figure 5.1a montre les différents modes de transfert de chaleur intervenant au sein d'un torréfacteur moderne (§2.2). Notre objectif est de déterminer la température du grain fonction du temps pour notre système de torréfaction. Pour cela, il est nécessaire de faire certaines hypothèses simplificatrices.

Hypothèses :

- ▷ la figure 4.4 montre que pendant les premières 90 secondes de torréfaction, la température de surface est différente de celle du centre. Compte tenu de la taille réduit du grain, on considère la température du grain  $T_b$  et sa teneur en eau  $X$  uniformes (voir fig. 5.1b) pour tout le temps de torréfaction ( $Bi \leq 0,1$ ),
- ▷ on suppose qu'à un temps  $t$ , la température du grain  $T_b$ , le coefficient de transfert de chaleur global entre l'air et le grain  $\alpha$  (voir fig. 5.1b), et la surface de contact sur laquelle se présente le transfert de chaleur entre l'air et les grains  $A_{ab}$  (voir fig. 5.3) représentent des valeurs moyennes pour toute la charge des grains dans la cellule,
- ▷ on néglige le débit de chaleur de l'air vers les parois de la cellule  $\phi_{a \rightarrow m}$ , car ces parois sont à la température de consigne au début de l'expérience. On suppose donc  $\phi_{a \rightarrow m}$  très inférieur à  $\phi_{a \rightarrow b}$  (voir fig. 5.1a),
- ▷ on néglige le débit de chaleur par rayonnement du métal vers le grain  $\phi_{m \rightarrow b}$  et le débit de chaleur entre le grain et le métal  $\phi_{b \rightarrow m}$  car dans notre cellule, la convection est de loin le facteur principal de transfert de chaleur : les grains sont loin des parois (au moins 20 cm), ils ne touchent la grille qui les supporte qu'en quelques points (transfert de chaleur par contact). On considère donc que  $\phi_{grille \rightarrow b}$  très inférieur à  $\phi_{a \rightarrow b}$ ,

Étant donné ces hypothèses et avant de décrire le bilan de matière et de chaleur de notre système, nous allons établir les quantités de chaleur échangées entre les éléments de la cellule de torréfaction (fig. 5.1a) :

- flux de chaleur dû aux réactions exothermiques en watts ( $W$ ) :

$$\phi_r = Q_r m_{bs}$$

$Q_r$  est la vitesse de production de chaleur ( $\frac{W}{kg_{M.S.}}$ ),  $m_{bs}$  est le poids sec des grains ( $kg_{M.S.}$ ),

- flux de chaleur nécessaire pour évaporer l'eau à la surface du grain en  $W$  :

$$\phi_v = Lv \left( -\frac{dX}{dt} \right) m_{bs}$$

$Lv$ , chaleur latente de vaporisation du grain humide (nous considérons que  $Lv = 2790 \frac{kJ}{kg}$  à teneur en eau du grain  $\approx 10\%$  *b.h.*),

- flux de chaleur apporté par l'air en  $W$ , en traversant le lit de café dans la chambre de torréfaction. Les hypothèses supplémentaires considérées sont présentées plus loin (le bilan thermique sur l'air) :

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{T_{ae}} \\ \Phi_{ae} = \boxed{\phantom{G}} \\ \xleftarrow{\Phi_{as} =} \\ \xrightarrow{T_{as}} \\ \Phi_{as} = \\ \xleftarrow{G C p_a (T_{as} - T_o)} \end{array} \quad (\phi_{ae} - \phi_{as}) = G C p_a [T_{ae} - T_{as}]$$

FIG. 5.2 –

où  $G$  est le flux massique de l'air en  $\frac{kg}{h}$ ,  $C p_a$  est la chaleur massique de l'air en  $\frac{kJ}{kg^\circ C}$ ,  $T_{ae}$  et  $T_{as}$  sont respectivement la température de l'air d'entrée et de sortie en  $^\circ C$  (fig. 5.2).  $G$  (la vitesse de l'air est uniforme sur toute la trajectoire de la surface de la chambre) et  $C p_a$  ne varient pas.

### • Bilan de teneur en eau sur le produit

En l'absence des données fiables relatives aux mécanismes de transport de l'eau dans le grain, le plus naturel est de considérer un mécanisme diffusif. Le coefficient de diffusivité est souvent considéré comme variant avec la température selon une loi d'*Arrhenius*. Comme proposé par SCHWARTZBERG [2002], une loi de proportionnalité avec  $X^2$  pour la diffusivité permet de proposer la loi (équation 5.1).

$$-\frac{dX}{dt} = \frac{4,32 \times 10^9 \cdot X^2}{d_p^2} \exp \left[ -\frac{9889}{T_b (K)} \right] \quad (5.1)$$

où  $d_p$  est le diamètre effectif du grain.

La surface de la section perpendiculaire  
à la direction du flux thermique :  $S$

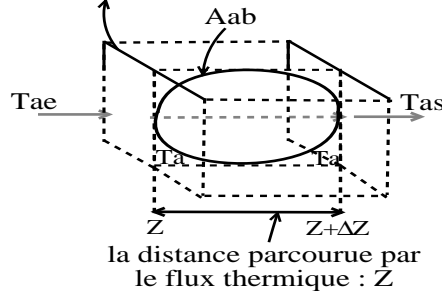


FIG. 5.3 – Bilan thermique sur l'air unidimensionnel.

### • Bilan thermique du grain

La vitesse de variation de la charge d'énergie est égale à l'énergie cédée par l'air plus l'énergie produite par les réactions chimiques moins l'énergie consommée par l'évaporation soit :

$$mCp_b \frac{dT_b}{dt} = (\phi_{ae} - \phi_{as}) + \phi_r - \phi_v \quad (5.2)$$

où,  $m$  est la masse des grains en  $kg$ ,  $Cp_b$  est la chaleur massique du grain en  $\frac{kJ}{kg^\circ C}$ .

Or, si on considère  $mCp_b = m_{bs}(1 + X)Cp_b$  (voir plus loin §5.1.1), la variation de la teneur en eau  $X$  dans  $mCp_b$ , et  $-\frac{dX}{dt}$  dans  $\phi_v$ , l'équation 5.2 donne :

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{(\phi_{ae} - \phi_{as}) + \phi_r - \phi_v}{m_{bs}(1 + X)Cp_b} \quad (5.3)$$

soit après substitution :

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{GCp_a[T_{ae} - T_{as}] + m_{bs} \left( Q_r + Lv \frac{dX}{dt} \right)}{m_{bs}(1 + X)Cp_b} \quad (5.4)$$

Pour pouvoir déterminer  $[T_{ae} - T_{as}]$  de l'équation 5.4, un bilan thermique sur l'air est nécessaire, car la température de l'air change graduellement en passant à travers le torréfacteur si l'on utilise une quantité déterminée des grains de café.

### • Bilan thermique sur l'air

Pour écrire le bilan thermique sur l'air, on applique la loi de la *continuité* [BIMBENET and LONCIN, 1995]. Pour considérer cette loi à la température de l'air, il est nécessaire de faire quelques hypothèses supplémentaires [BIMBENET and LONCIN, 1995, ABUD, 2000].

Hypothèses :

- ◇ l'écoulement de l'air est uniforme (vitesse de l'air  $V_a$  uniforme dans toute la charge des grains) et dans une seule direction  $Z$  (voir fig. 5.3) (écoulement piston),

- ◇ il n'y a pas d'accumulation d'air (masse volumique de l'air ( $\rho_a$ ) constante),
- ◇ la chaleur massique de l'air est supposée constante,
- ◇ la perte de charge est négligeable (pression constante et uniforme),
- ◇ on considère que la surface de la section perpendiculaire à la direction du flux thermique  $S$  est constante,

Le bilan thermique de l'air [BIMBENET and LONCIN, 1995] en  $\frac{W}{m^2}$  :

$$(\text{vitesse d'accumulation}) = -\text{div}(\phi_{\text{convection}}) - (\text{vitesse de consommation})$$

donc :

$$\frac{d(\rho_a C p_a T_a)}{dt} \cdot dZ = [\rho_a C p_a (T_a - T_0) V_a]_Z - [\rho_a C p_a (T_a - T_0) V_a]_{Z+dZ} - \alpha(T_a - T_b) \quad (5.5)$$

On divise par  $dZ$  :

$$\frac{d(\rho_a C p_a T_a)}{dt} = -\frac{d(\rho_a C p_a T_a V_a)}{dZ} - \frac{\alpha(T_a - T_b)}{dZ} \quad (5.6)$$

En supposant que dans un intervalle de temps ( $\Delta t$ ) suffisamment petit,  $T_a$  reste constante et varie seulement par rapport à l'espace [ABUD, 2000], et  $\rho_a$ ,  $C p_a$ ,  $V_a$  sont constantes, on peut donc négliger le terme  $\frac{d(\rho_a C p_a T_a)}{dt}$  et écrire :

$$-\rho_a C p_a V_a \frac{dT_a}{dZ} = \frac{\alpha(T_a - T_b)}{dZ} \quad (5.7)$$

Si l'on considère la surface de la section perpendiculaire à la direction du flux thermique  $S$  dans le premier terme et l'aire de contact sur laquelle se présente le transfert de chaleur par convection entre l'air et les grains  $A_{ab}$  dans le second terme, on obtient :

$$-G C p_a \frac{dT_a}{dZ} = \alpha \left( \frac{dA_{ab}}{dZ} \right) (T_a - T_b) \quad (5.8)$$

L'équation 5.8 exprime les variations de température de l'air en fonction des valeurs de  $T_b$  et de  $\alpha A_{ab}$ , pour la charge des grains exposés au flux d'air à n'importe quel temps. Pour résoudre l'équation 5.8 de façon analytique, SCHWARTZBERG [2002] suppose que  $T_b$ ,  $\alpha A_{ab}$  représentent des valeurs moyennes pour toute la population, de plus, on considère le transfert de chaleur instantané entre l'air et les grains, on peut donc multiplier l'équation 5.8 par  $dZ$ , en réarrangeant et en faisant apparaître l'intégration entre  $T_{ae}$  et  $T_{as}$  :

$$\int_{T_{ae}}^{T_{as}} \frac{1}{(T_a - T_b)} dT_a = -\frac{\alpha A_{ab}}{G C p_a} \quad (5.9)$$

Une hypothèse supplémentaire est nécessaire, sur un faible pas de temps, nous supposons que  $T_b$  est constante, *c'est-à-dire que la température du grain est momentanément utilisée comme une constante*. Alors, en intégrant et réarrangeant l'équation 5.9, on obtient donc :

$$(T_{as} - T_b) = (T_{ae} - T_b) \exp \left[ -\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a} \right] \quad (5.10)$$

Ainsi, en réarrangeant les termes :

$$(T_{ae} - T_{as}) = (T_{ae} - T_b) \left( 1 - \exp \left[ -\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a} \right] \right) \quad (5.11)$$

Cette équation 5.11 permettra de calculer  $T_{as}$  à chaque instant  $t$ , en considérant la mesure de la température de l'air d'entrée pour être intégré dans l'équation 5.4.

### 5.1.1 Identification des grandeurs pour le modèle

Pour résoudre l'équation 5.4 en considérant l'équation 5.11, il faudrait connaître  $\alpha$ ,  $Cp_b$  et  $Q_r$  en fonction du temps ( $t$ ). Par conséquent, nous allons expliquer comment déterminer ces paramètres :

#### • Détermination du coefficient de transfert de chaleur global entre l'air et le grain $\alpha$

Pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur à l'interface entre l'air et le grain ( $h_e$ ), une relation empirique [KREITH, 1967] a été appliquée, prenant en compte d'une géométrie sphérique :

$$Nu = 2 + 0,6Re^{0,5}Pr^{\frac{1}{3}} \quad (5.12)$$

où  $Nu$  est le nombre de *Nusselt* ( $Nu = \frac{h_e d_b}{k_a}$ ),  $Re$  est le nombre de *Reynolds* ( $Re = \frac{d_b \rho_a V_a}{\mu_a}$ ) et  $Pr$  est le nombre de *Prandtl* ( $Pr = \frac{Cp_a \mu_a}{k_a}$ ).  $k_a$  est la conductivité thermique de l'air ;  $\mu_a$ , viscosité de l'air ;  $\rho_a$ , masse volumique ;  $V_a$ , vitesse relative du flux d'air aux grains et  $d_b$  est la taille effective du grain (diamètre). Dans tous les types de torrificateurs, la surface d'échange des grains dans la zone de fort transfert de chaleur est proportionnelle à  $\frac{1}{d_b}$ .

Le transfert de chaleur est compliqué. En l'absence de données précises sur le grain, considérant que celui est homogène en température, le coefficient externe  $\alpha$  dépend implicitement de la conductivité thermique du grain  $k_b$ , de  $h_e$  et de  $d_b$ . Des données expérimentales relient le nombre de *Biot* ( $Bi = \frac{h_e d_b}{2k_b}$ ) et  $\alpha$ , selon SCHWARTZBERG [2002], par l'équation 5.13, dans le cas où  $Bi < 3,5$ .

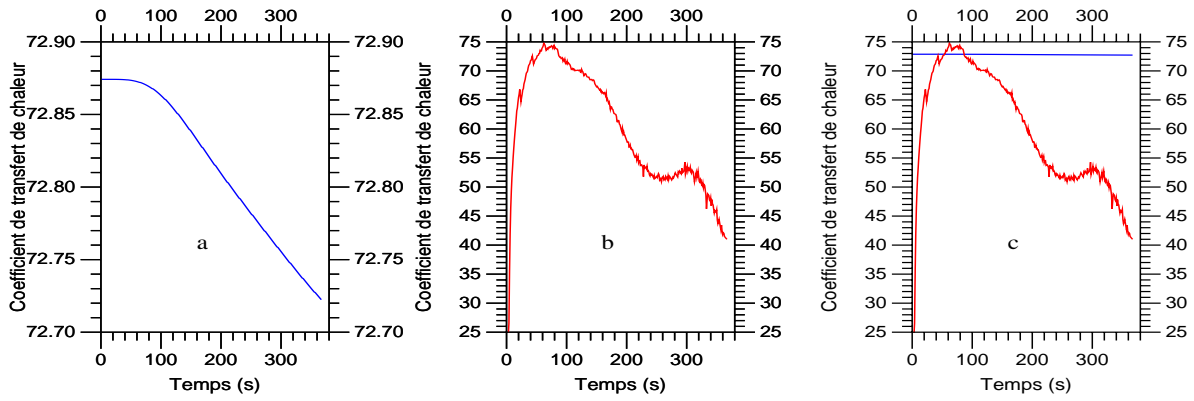


FIG. 5.4 – Évolution de  $\alpha$  en  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$  pour la température d'air de  $24^\circ C$ . (a) présente les valeurs de l'équation 5.13, (b) montre les valeurs de l'éq. 5.15, et (c) sont les valeurs des deux équations (5.13 et 5.15).

$$\alpha = \frac{h_e}{1 + 0,3 \cdot \frac{h_e d_b}{2k_b}} \quad (5.13)$$

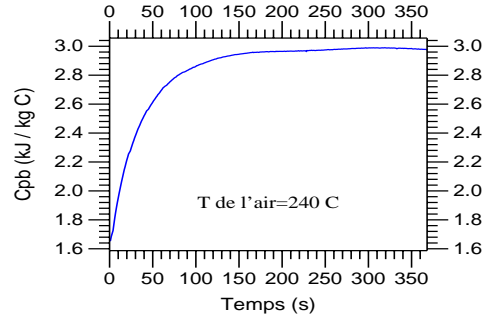
Le coefficient de transfert de chaleur  $h_e$  se déduit : du diamètre du grain  $d_b$  supposé constant et de la conductivité thermique du café  $k_b$  est fonction de la teneur en eau. SIVETZ and DESROSIER [1979] suggèrent que  $k_b$  du grain de café est approximativement égal à celui du bois. La conductivité thermique du bois dépend de sa densité et de sa teneur en eau  $X$ . Pour les grains de café avec une teneur en eau de 10% b. h. (p. ex.  $X = 0,111$ ), la relation donne  $k_b$  en  $\frac{cal}{h \cdot cm \cdot ^\circ C}$  [SCHWARTZBERG, 2002] :

$$k_b = 3,06 + 1,2 \cdot X \quad (5.14)$$

Nous avons aussi déterminé de manière empirique le coefficient de transfert de chaleur global  $\alpha$ , en utilisant l'équation suivante [KERN, 1965] :

$$\frac{T_{ae} - T_{bi}}{T_{ae} - T_b} = \exp\left(\frac{\alpha A_{gb} t}{m C_{p_b}}\right) \quad (5.15)$$

Nous avons calculé le  $C_{p_b}$  de la façon décrite au §5.1.1. Comme température d'air en entrée et température du grain ( $T_{ae}$  et  $T_b$ ) nous avons utilisé les données expérimentales (§3.4.2). Nous avons ainsi toutes les données pour calculer  $\alpha$  à partir de l'équation 5.15. Le résultat de l'équation 5.15 est comparé avec celui issu de l'équation 5.13. La Figure 5.4 montre que les deux équations (5.13 et 5.15) décrivent une évolution de  $\alpha$  du même ordre de grandeur ( $25-73 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ), mais l'équation 5.13 peut être préférée, bien qu'elle ne prenne pas en compte le refroidissement dû à l'évaporation, car elle n'utilise pas la température du grain. Il est important de noter que NAGARAJU et al. [1997] ont utilisé une relation

FIG. 5.5 – Le  $Cp_b$  simulé par l'équation 5.16.

similaire à l'équation 5.15 pour acquérir le coefficient de transfert de chaleur en utilisant un torréfacteur à fluidisation. Ils ont obtenu un coefficient  $\alpha$  variant de 11 à 22  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$  pour 0,75 kg de café avec des températures de l'air comprises entre 190°C et 310°C.

#### • Propriété thermique $Cp$ (grain)

RAEMY and LAMBELET [1982] et SINGH et al. [1997] ont apporté des données de  $Cp_b$  des différents cafés. Ils ont montré que le  $Cp_b$  change d'une façon marquée en fonction du type de grain de café, de  $T_b$  et de  $X$ . On peut proposer la relation classique  $Cp_b = \frac{Cp_s + X Cp_w}{1 + X}$ , où  $Cp_s$  est la chaleur massique des grains secs et  $Cp_w$  est la chaleur massique de l'eau dans les grains. D'après SCHWARTZBERG [2002],  $Cp_w = 5,0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$  (celui-ci ne varie pas beaucoup avec la température) et  $Cp_s = 1,099 + 0,0070 \cdot T_b$  en  $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ , pour un mélange 50% d'*Arabica* et 50% de *Robusta*. Les valeurs utilisées dans ce travail sont calculées par l'équation suivante [SCHWARTZBERG, 2002] :

$$Cp_b(1 + X) = 1,099 + 0,0070 \cdot T_b + 5,0 \cdot X \quad (5.16)$$

La Figure 5.5 présente la courbe du  $Cp_b$  simulée par l'équation  $Cp_b = \frac{Cp_s + X Cp_w}{1 + X}$  pour une température d'air de 240°C. L'équation 5.16 permettra de calculer le  $Cp$  du grain et sera intégré dans l'équation 5.4 pour décrire la température du grain.

#### • Réaction exothermique des grains

RAEMY [1981] et RAEMY and LAMBELET [1982] ont utilisé deux techniques (flux calorimétrique de la chaleur et analyse thermique différentielle DTA) pour étudier les propriétés thermiques du café. Ils ont montré que 250 à 420  $\frac{kJ}{kg}$  de chaleur sont générés entre 150 et 230°C par des réactions exothermiques de la torréfaction, compte tenu de l'évaporation partielle de l'eau contenue dans les grains. Cette évaporation partielle diminue la quantité d'énergie libérée par les réactions. 0,05  $\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ M.S.}}$  sont produits et perdus pendant les réactions exothermiques de la torréfaction. De 120 à 290  $\frac{kJ}{kg}$  de chaleur sont



consommés pour le refroidissement évaporatoire [SCHWARTZBERG, 2002]. La torréfaction du café nécessite de 1000 à 1500  $\frac{kJ}{kg}$  [ILLY and VIANI, 1998].

RAEMY [1981], RAEMY and LAMBELET [1982] ont montré que la génération de chaleur due aux réactions exothermiques commence à 150°C, avec un maximum (un grand pic) à 200°C et se termine à 240°C (thermogrammes obtenus pour une vitesse de 1  $\frac{°C}{min}$ ). Un deuxième pic, plus petit, apparaît à 220°C. Le grand pic est dû aux réactions de pyrolyses et le petit pic est probablement le fait des réactions et des composants volatils du café [ILLY and VIANI, 1998].

SCHWARTZBERG [2002] a modélisé la vitesse de chaleur exothermique pendant la torréfaction, en supposant que : a) la vitesse de génération de chaleur est proportionnelle à la vitesse de production de chaleur des réactions ; b) la vitesse de ces réactions est proportionnelle à la concentration du réactif et au coefficient gouverné par une équation de *Arrhenius* ; c) les réactifs sont consommés par les réactions ; et d) les concentrations du reste des réactifs sont proportionnelles à  $\frac{H_{et}-H_e}{H_{et}}$ , où  $H_{et}$  est la quantité totale de chaleur produite pendant la réaction par kg de solides secs et  $H_e$  est la quantité chaleur produite entre le début de torréfaction et l'instant considéré, par kg de café sec. En utilisant ces hypothèses, l'équation suivante a été obtenue :

$$Q_r = A \cdot \exp \left[ -\frac{H_a}{R_g(T_b (\text{°K}))} \right] \left( \frac{H_{et} - H_e}{H_{et}} \right) \quad (5.17)$$

$Q_r$  est la vitesse de production de chaleur exothermique en  $\frac{kJ}{kg_{M.S.} \cdot s}$  ;  $H_a$  est l'énergie d'activation,  $R_g$  est la constante de gaz parfait,  $A$  en  $\frac{kJ}{kg_{M.S.} \cdot s}$  est le coefficient de l'équation d'*Arrhenius*. Avec  $\frac{H_a}{R_g} = 5500 \text{°K}$ ,  $A = 116200 \frac{kJ}{kg_{M.S.} \cdot s}$  et  $H_{et} = 232 \frac{kJ}{kg}$ .

### 5.1.2 Solutions des équations du modèle

En récapitulant le système, nous avons quatre équations algébriques et deux équations différentielles d'ordre 1, couplées :

- $\alpha = \frac{h_e}{1+0,15 \cdot \frac{h_e d_b}{k_b}} \dots$  (éq. 5.13),
- $(T_{ae} - T_{as}) = (T_{ae} - T_b) \left( 1 - \exp \left[ -\frac{\alpha A_{ab}}{GC_{pa}} \right] \right) \dots$  (éq. 5.11),
- $(1 + X)C_{pb} = 1,099 + 0,0070 \cdot T_b + 5,0 \cdot X \dots$  (éq. 5.16),
- $Q_r = A \cdot \exp \left[ -\frac{H_a}{R_g(T_b (\text{°K}))} \right] \left( \frac{H_{et}-H_e}{H_{et}} \right) \dots$  (éq. 5.17),
- $-\frac{dX}{dt} = \frac{4,32 \times 10^9 X^2}{d_p^2} \exp \left[ -\frac{9889}{T_b (\text{°K})} \right] \dots$  (éq. 5.1),
- $\frac{dT_b}{dt} = \frac{GC_{pa}[T_{ae}-T_{as}] + m_{bs}(Q_r + Lv \frac{dX}{dt})}{m_{bs}(1+X)C_{pb}} \dots$  (éq. 5.4).

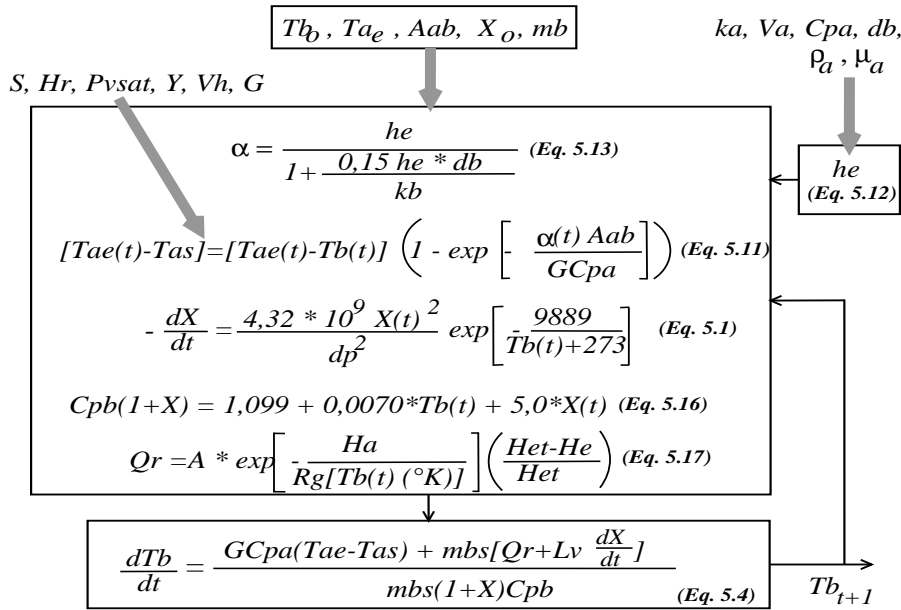


FIG. 5.6 – Résolutions des équations.

Pour résoudre le système d'équations ci-dessus, nous avons écrit un programme informatique en *Octave* [EATON, 2001]. Ce programme fonctionne de la manière suivante : à l'instant  $t = 0$ , on connaît

- la température initiale du grain  $T_b$  *initial*,
- le teneur en eau initiale des grains  $X$  *initial*,
- la température de l'air en entrée  $T_{ae}$ , mesurée en ligne.

Ces données permettent de calculer au temps  $t = 0$

- ▷ le coefficient de transfert de chaleur global  $\alpha$ ,
- ▷ la température de l'air en sortie  $T_{as}$ ,
- ▷ la vitesse de perte en eau  $\frac{dX}{dt}$ ,
- ▷ la chaleur massique globale du grain  $(1 + X)Cpb$ ,
- ▷ la vitesse de production de chaleur  $Q_r$ .

La méthode de *Runge-Kutta* d'ordre quatre appliquée à l'équation 5.1 nous a permis de déterminer la teneur en eau à l'instant suivant ( $t + \Delta t$ ). La quantité de chaleur produite par les réactions exothermiques  $H_e$  est calculée en additionnant à chaque étape du calcul les quantités produites  $H_e = \sum_{i=0}^n (Q_{r_i})$ . Ceci permet de calculer la température du grain à l'instant ( $t + \Delta t$ ) en intégrant l'équation 5.4 par la méthode d'Euler. À partir de ces valeurs, les variables  $(1 + X)Cpb$ ,  $Q_r$ ,  $T_{as}$ ,  $\alpha$ ,  $\frac{dX}{dt}$  sont recalculées pour le temps ( $t + \Delta t$ ). On peut ainsi calculer toutes les variables à chaque pas comme le montre la figure 5.6.

En récapitulant, les valeurs numériques des constantes utilisées pour résoudre le modèle sont regroupées dans le tableau 5.1. Les valeurs des constantes physiques de l'air utilisées

TAB. 5.1 – Constantes utilisées dans le modèle.

$L_v \left( \frac{kJ}{kg} \right)$	2790
$V_a \left( \frac{m}{s} \right)$	4
$d_b \text{ (m)}$	0.00685
$A \left( \frac{kJ}{kg_{M.S.} \cdot s} \right)$	116200
$\frac{H_a}{R_g} \text{ (}^\circ K\text{)}$	5500
$H_{et} \left( \frac{kJ}{kg} \right)$	232
$d_p \text{ (mm)}$	6

$Cp_a$ ,  $\rho_a$ ,  $\mu_a$  et  $k_a$  sont obtenues à partir de la littérature [LUIKOV, 1966] en considérant chaque température de l'air (190-300°C). Les valeurs des constantes, humidité absolue de l'air  $Y$ , volume d'air humide  $Vh$  (volume spécifique), pression de vapeur saturante  $P_{vsat}$ , flux massique de l'air  $G$ , sont obtenues comme l'indique TREYBAL [1980] à chaque expérience, en utilisant les valeurs de  $Hr$  (voir tableau 3.1). La valeur de  $A_{ab}$  est calculée comme le montre l'Annexe2.

### 5.1.3 Résultats et discussions du modèle

Une caractéristique importante du modèle proposé est qu'*aucun paramètre n'a été ajusté* pour décrire les cinétiques de température du grain. Le programme a été écrit afin de prédire la température du grain en fonction du temps, pour un torréfacteur en air chaud avec 25 g de café vert à différentes températures d'air (190 à 300°C). Les données expérimentales comme les données simulées sont obtenues à température d'air constante. Dans la modélisation nous avons supposé que la température du métal est la même que la température de l'air,  $\phi_{a \rightarrow m} = 0$  et  $\phi_{m \rightarrow b} = 0$ .  $X = 0.105 \frac{g \text{ d'eau}}{g \text{ M.S.}}$  et  $T_b$  initiales,  $A_{ab}$ ,  $T_{ae}$ ,  $m_{bs}$  sont utilisés.

L'évolution de la température expérimentale du grain et la valeur simulée en fonction du temps sont présentées dans la figure 5.7a pour une température d'air de 240°C. Le tracé des valeurs simulées en fonction des données expérimentales (fig. 5.7b) montre une répartition équilibrée des résidus à partir de 150°C et une légère dispersion autour de la première bissectrice. Un accord est obtenu entre les données expérimentales et celles simulées par le modèle. En outre, la figure 5.8 présente les cinétiques expérimentales de la température du grain et leurs simulations par le modèle en fonction du temps pour toutes les expériences de torréfaction, ce qui conforte la bonne capacité de généralisation du modèle. En revanche, la figure 5.8 montre que la petite déviation que nous avons déjà observé dans la partie expérimentale (§4.1.2) n'est pas prédite par le modèle. Comme

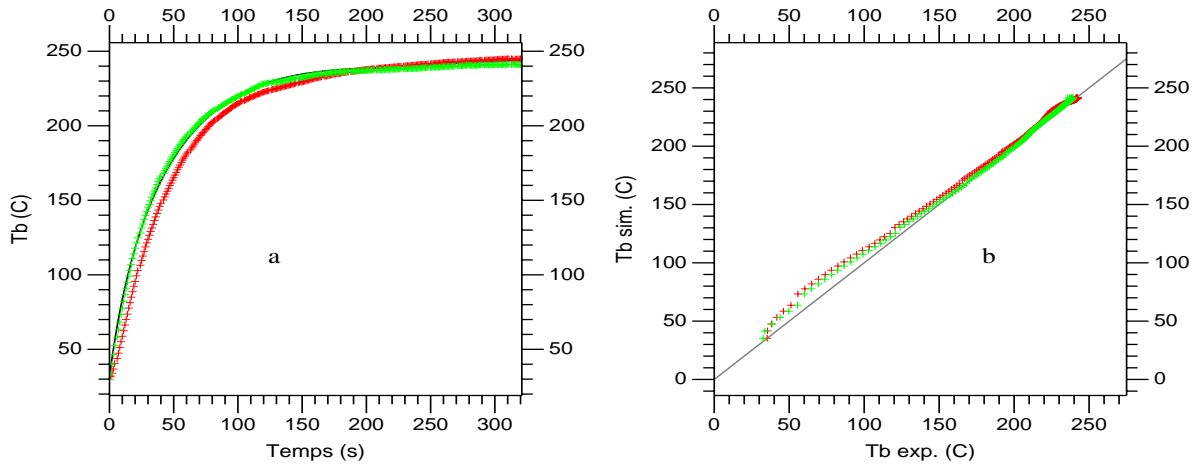


FIG. 5.7 – Évolution de la température du grain à une température d'air de  $240^{\circ}\text{C}$ . (a) les données expérimentales avec une répétition (\*) et le modèle (-); (b) corrélation entre les données expérimentales et simulées.

mentionné, ces déviations des courbes expérimentales ( $T_{ae} \geq 260^{\circ}\text{C}$  et  $t > 100$  s) peuvent être expliquées par un début d'une sur-torréfaction, la vitesse de réaction donnée par la littérature n'est alors plus valable quand les grains commencent à être carbonisés. Par conséquent, le modèle ne peut pas considérer cette perturbation puisqu'il ne tient pas en compte l'effet de carbonisation.

Nous avons vérifié que la simulation de la teneur en eau est acceptable en comparant le résultat expérimental d'enregistrement des variations de masse (§4.2) à la valeur simulée par l'équation 5.1, pour une température d'air de  $220^{\circ}\text{C}$  (fig. 5.9). Nous supposons implicitement ainsi que pendant les 360 secondes, la perte d'eau est seule responsable de la diminution de la masse du produit. Bien que non superposées, les deux courbes ont la même allure.

#### 5.1.4 Analyse de sensibilité du modèle

Dans le modèle 5.4, des variables opératoires sont utilisées ( $T_{ae}$ ,  $V_a$ ,  $Hr$ ) et des paramètres liés au produit ( $\alpha A_{ab}$ ,  $d_b$ ,  $X$ ,  $Cp_b$ ,  $Q_r$ ,  $m_{bs}$ ) sont considérés pour décrire principalement la température du grain en fonction du temps. La principale raison de cette analyse est de déterminer comment le comportement de  $T_b$  en fonction de  $t$  pourrait changer par des variations attendues des facteurs hors contrôle (p. ex. la taille du grain (diamètre), teneur en eau, etc). Pour cela, nous avons fait varier quelques facteurs :

1. taille du grain  $d_b = [0,004 ; 0,005 ; 0,006 ; 0,007]$  en (m),
2. teneur en eau initiale du produit  $X = [9 ; 11 ; 13]$  en (% b. s.),

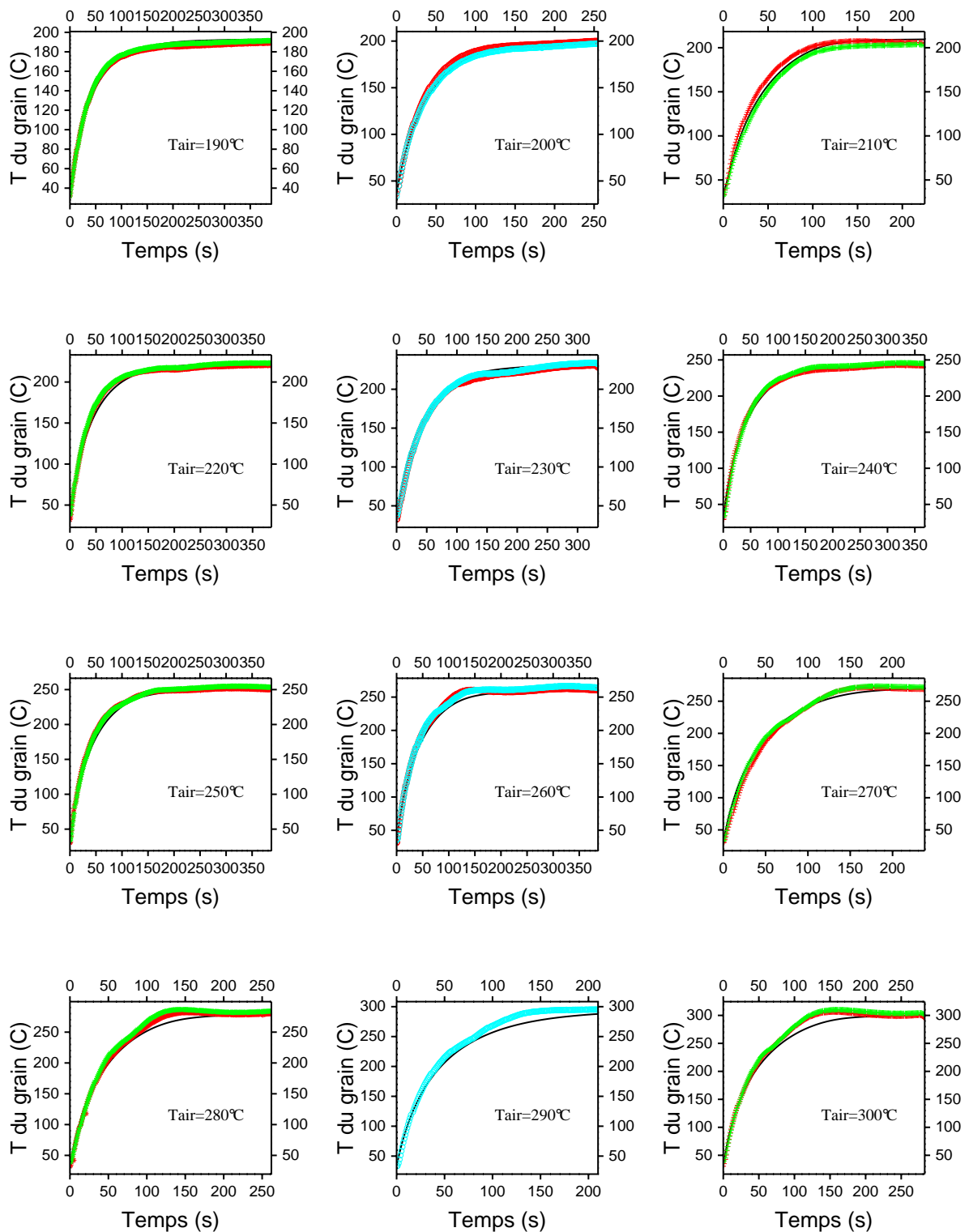


FIG. 5.8 – Évolution de la température du grain à différentes températures d'air. Les données expérimentales (\*) et le modèle (-) (5.4).

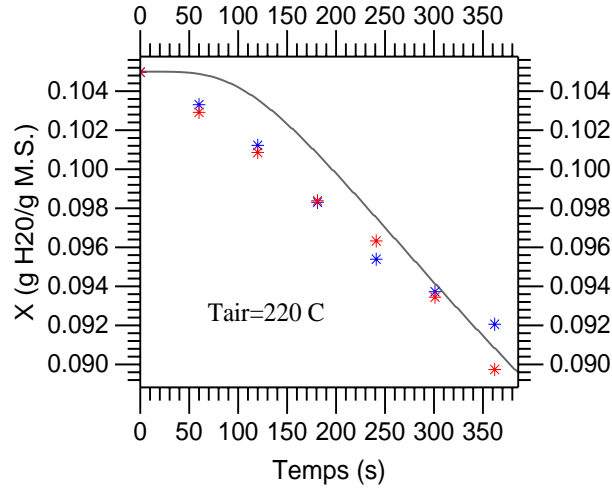


FIG. 5.9 – Évolution de la teneur en eau du grain pendant la torréfaction, données expérimentales (\*) et le simulé par le modèle (-) (éq. 5.1).

3. chaleur moyenne massique du grain, p. ex.  $Cp_b = 2,41$  en  $\left(\frac{kJ}{kg^\circ C}\right)$ ,
4. vitesse d'air  $V_a = [2 ; 4 ; 6]$  en  $\left(\frac{m}{s}\right)$ ,
5. humidité relative  $Hr = [20 ; 40 ; 60 ; 80]$  en (%).

En utilisant le modèle, nous avons simulé la température du grain à des températures de consigne pour l'air de  $240^\circ C$  et  $300^\circ C$  (suffisamment pour être validé), en considérant chaque valeur numérique des facteurs  $d_b$ ,  $X$ ,  $Cp_a$ ,  $V_a$  et  $Hr$ .

1. La Figure 5.10 montre l'effet de la taille du grain sur la température du grain en fonction du temps. On peut observer que la variation de  $d_b$  a un effet important sur la température du grain  $T_b$ . En fait, SCHWARTZBERG [2002] a aussi trouvé que la variation de la taille du grain a une influence sur la température du grain. En outre, SCHWARTZBERG [2002] a mentionné que  $h_e$  est approximativement proportionnel à  $\frac{1}{d_b^{0.5}}$  et  $\alpha A_{ab}$  est proportionnel à  $\frac{1}{d_b^{1.5}}$ . L'effet de la taille du grain sera petite sur  $T_b$  fonction de  $t$ , pour des torréfacteurs où  $\left(\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a}\right)$  est manifestement grande (p. ex.  $\exp\left[-\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a}\right] \approx 0$ ). Un cas où  $\left(\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a}\right)$  est manifesté grande, selon SCHWARTZBERG [2002], est le torréfacteur de coupe tournant.

2. La Figure 5.11 présente le résultat de la température du produit pour différentes  $X_0$  initiales. Ces courbes montrent qu'il existe un effet mineur sur les valeurs de  $T_b$ .

3. La Figure 5.12 compare les deux courbes de température du grain fonction du temps, en utilisant un  $Cp_b$  constant (2,41) et l'autre  $Cp_b$  variable  $f(X, T_b)$  (équation 5.16). Cette figure 5.12 montre aussi les données expérimentales (indiqué par \*) de la température

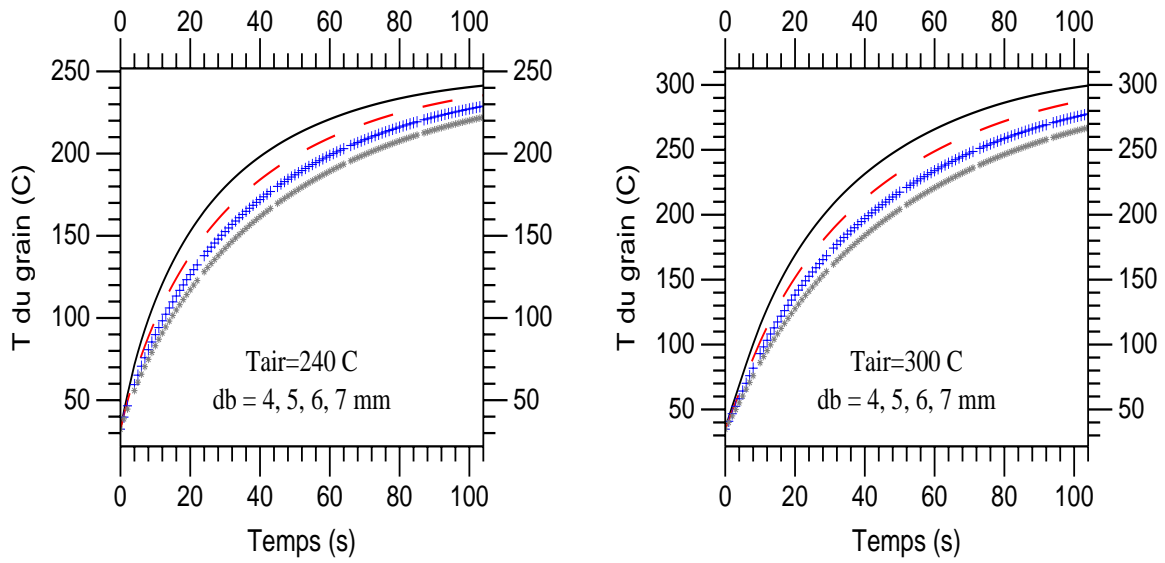


FIG. 5.10 – Évolution de la température du grain fonction du temps, (ligne continue) représente  $d=4$ , (ligne discontinue) est  $d=5$ , (+) est  $d=6$  et (\*) est  $d=7$  mm.

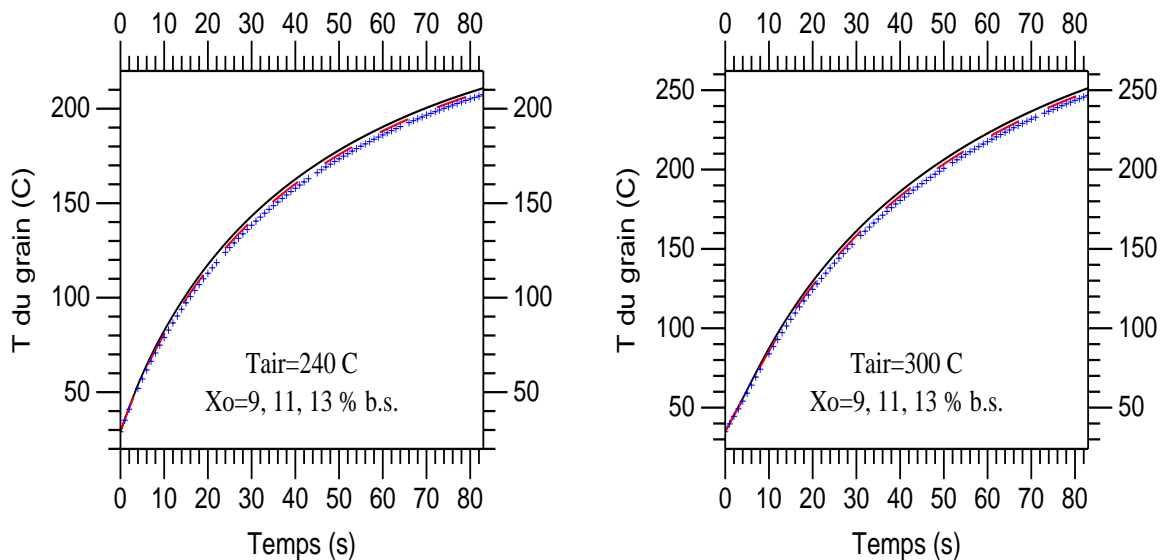


FIG. 5.11 – Résultat de la température du grain fonction du temps, (ligne continue) signifie  $X_o=9\%$ , (ligne discontinue) est  $X_o=11\%$  et (+) est  $X_o=13\%$  b. s.

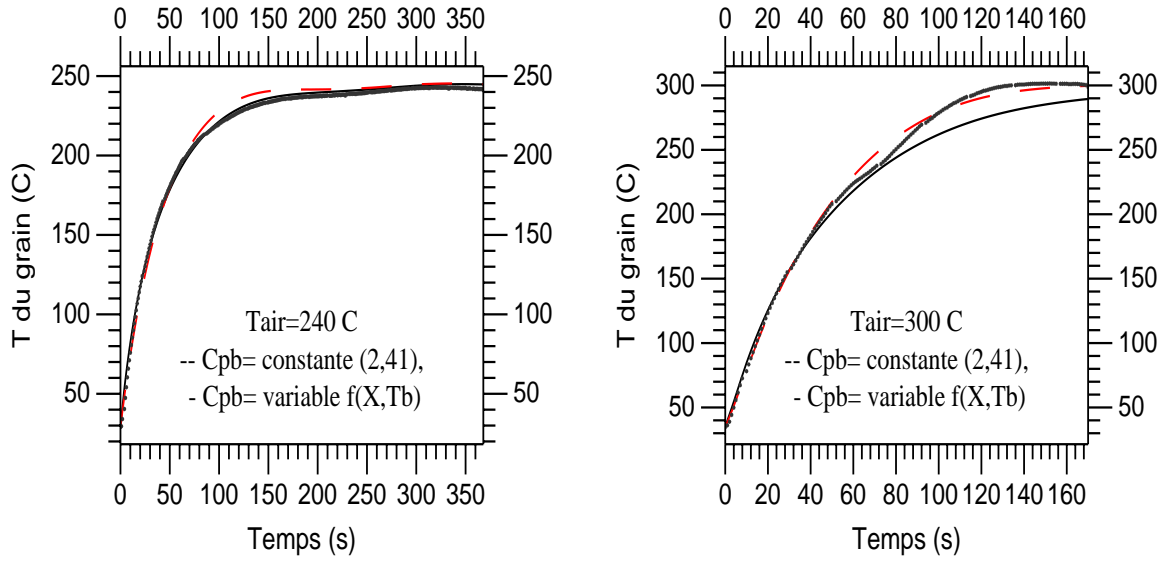


FIG. 5.12 – Température du grain fonction du temps, (ligne continue) représente la chaleur massique du grain variable (équation 5.16) et (ligne discontinue) est le  $C_{pb}$  constante  $C_{pb} = 2,41$ .

du grain. On peut observer que le chaleur massique du grain constante peut également simuler la température du grain mais d'une façon moins satisfaisante que si on utilise un  $C_{pb}$  variable pour la température du grain de torréfaction.

4. Dans le modèle, la variation de la vitesse d'air de 2 à 6  $\frac{m}{s}$  présente un changement important sur la  $T_b$  fonction de  $t$  (voir fig. 5.13), car la vitesse de l'air a un effet sur le coefficient de transfert de chaleur.

5. Une variation de l'humidité relative de 20 à 80% n'a pas montrée un effet sur la simulation de la température du grain, on peut l'observer dans la fig. 5.14.

Par ailleurs, le poids sec des grains  $m_{bs}$  a également montré un changement du comportement de  $T_b$  fonction de  $t$ . Donc, les changements de  $T_{ae}$ ,  $d_b$ ,  $X$ ,  $C_{pb}$ ,  $V_a$  et  $m_{bs}$  ont un effet sur  $T_b$  fonction de  $t$ .

### 5.1.5 Conclusions

Le modèle proposé peut être utilisé de façon satisfaisante, pour décrire le comportement de la température du grain en fonction du temps pour la torréfaction du café, en utilisant l'air chaud. Ce modèle a montré une validation acceptable pour toutes les cinétiques de température du grain. Il faut noter qu'aucun paramètre n'est ajusté dans le



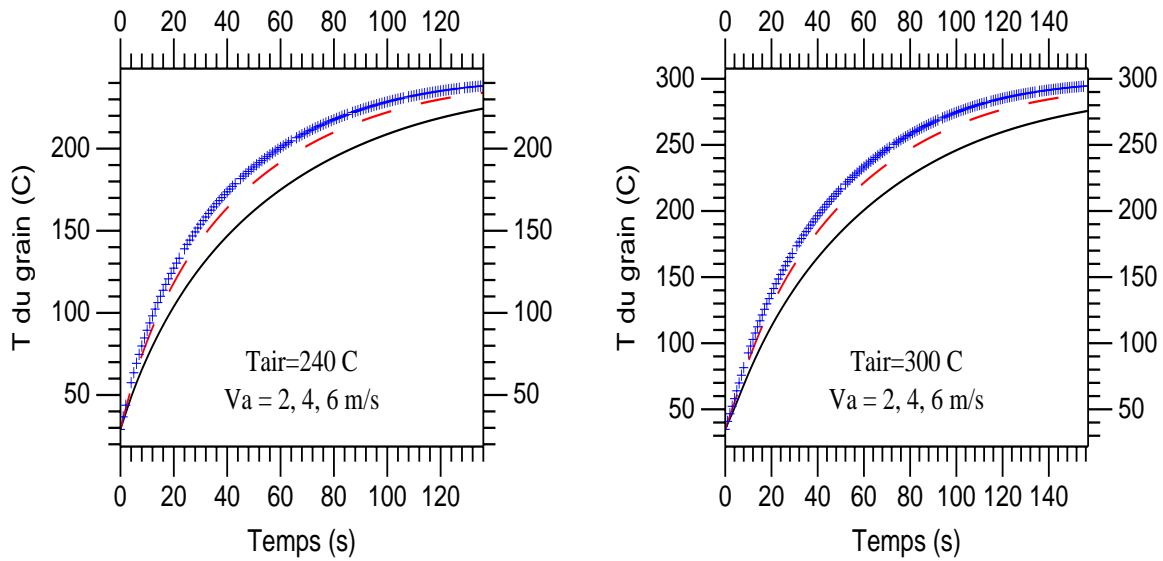


FIG. 5.13 – Courbe de température du grain fonction du temps, (ligne continue) est  $V_a=2$ , (ligne discontinue) est  $V_a=4$  et (+) est  $V_a=6\frac{m}{s}$ .

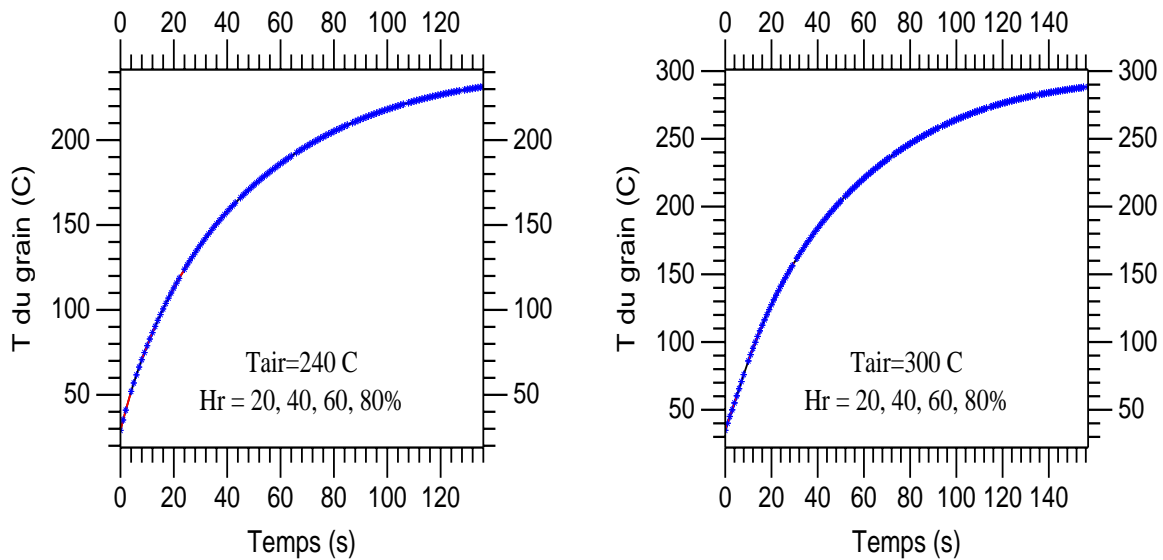


FIG. 5.14 – Évolution de la température du grain fonction du temps, (ligne continue) équivalente à  $H_r=20\%$ , (ligne discontinue) est  $H_r=40\%$ , (+) est  $H_r=60\%$  et (\*) est  $H_r=80\%$ .

modèle. De plus, il peut être utilisé pour déterminer comment le comportement peut être affecté par la variation de facteurs qui ne sont pas contrôlés au cours de la torréfaction. Si les paramètres sont corrects ( $\alpha A_{ab}$ ,  $m_{bs}$ ,  $X$ ,  $d_b$ ,  $Cp_b$ ,  $V_a$  et  $T_{ae}$ ), le modèle peut être employé directement ou avec des petites modifications pour d'autres torréfacteurs où le transfert de chaleur a lieu entre l'air et le métal, et/ou un transfert de chaleur du métal vers le grain et du grain vers le métal. Dans l'industrie de la torréfaction du café, la distribution de la chaleur des grains est limitée par la vitesse du flux d'air chaud et la température d'air qui passe de l'air aux grains. Ce travail utilise un flux massique élevé  $\approx 0,4 \frac{\text{kg } d'air}{\text{s}}$  par kg de grains, tandis qu'ils utilisent approximativement  $0,003 \frac{\text{kg } d'air}{\text{s.kg}}$  de grains pour un torréfacteur à tambour tournant, avec un temps de 12 minutes et normalement une température de 480°C et 400 kg des grains verts.  $\approx 0,04 \frac{\text{kg } d'air}{\text{s.kg}}$  est utilisé pour un torréfacteur de type RFG-G (Neuhaus Neotec GmbH)  $t = 3 \text{ min}$  et  $T_{ae} = 310^\circ\text{C}$ .

## 5.2 Modèles de représentation pour le niveau de gris et la surface du grain

Nous avons tout d'abord essayé d'utiliser des modèles cinétiques rapportés dans la littérature [BROYART et al., 1998, KROKIDA et al., 2001] afin de modéliser les cinétiques de niveau de gris du grain de café. Cependant, nous avons constaté que ces modèles cinétiques ne modélisent pas correctement les cinétiques expérimentales. Si l'on regarde la courbe expérimentale du niveau de gris en fonction du temps (fig. 4.17), on observe qu'elle suit une tendance compliquée avec plusieurs phases. Plutôt que de construire un modèle combinant différentes lois, nous proposons une approche par réseaux de neurones.

Avant de décrire les modèles proposés pour décrire le niveau de gris et la surface projetée, voyons brièvement le fonctionnement des réseaux de neurones artificiels.

### 5.2.1 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels ont été inspirés par l'étude des neurosciences. De nos jours, ils ont des applications dans l'industrie alimentaire [THERDTHAI and ZHOU, 2001] et notamment dans la spécialité de l'analyse d'image pour définir la qualité du produit en temps réel [PARK and CHEN, 2000]. Les réseaux sont capables d'apprendre la dynamique du processus à partir des données expérimentales, en considérant la non linéarité du système et l'interaction entre variables [TRELEA et al., 1997]. Comme les neurones naturels, ils sont déterminés en grande partie par la connexion entre deux éléments, chaque connexion entre deux neurones a un coefficient (poids). Cette notion de poids permet de moduler le signal transmis entre deux neurones suivant l'état de la liaison synaptique in-

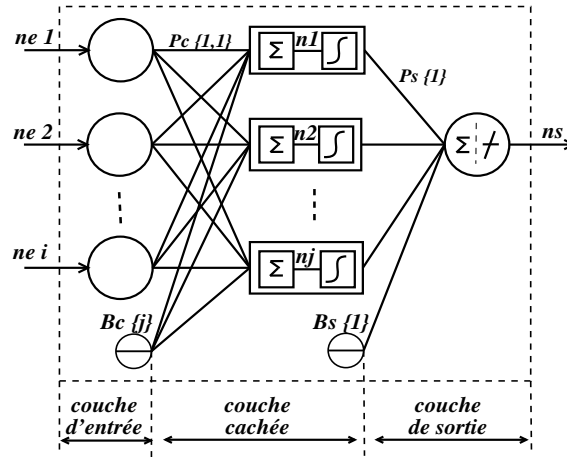


FIG. 5.15 – Architecture d'un réseau de neurones. (-) sont les poids et biais.

formatique qui les relie [MANSON, 1992]. Les neurones sont groupés en plusieurs couches inter-connectées selon une architecture donnée. Nous avons utilisé des réseaux des neurones classiques du type «perceptron multicouche» formés de trois éléments (fig. 5.15), typique pour l'approximation de fonctions. La meilleure architecture est habituellement déterminée par *essais et erreurs*. Le nombre de neurones dans la couche d'entrée  $n_e$  et de sortie  $n_s$  sont les nombres de variables d'entrée et de sortie du procédé à étudier. Le nombre de neurones dans la couche cachée est difficile à déterminer, il dépend de la complexité du problème, et est également défini par *essais et erreurs*.

Pour calculer la stimulation  $S_j$  d'un neurone de la couche cachée, on additionne les activations  $A_i$  de chaque neurone de la couche d'entrée pondérée par le poids correspondant  $P_{ij}$ . Le biais  $B_j$  est ensuite ajouté afin de régler le seuil d'activation du neurone [DEMUTH and BEALE, 1998].

$$S_j = \sum_{i=1}^{n_e} (P_{ij} \cdot A_i) + B_j$$

La fonction d'activation est ensuite appliquée pour calculer  $A_j$ ,

$$A_j = \frac{1}{1 + \exp(S_j)} \quad (5.18)$$

Ces calculs sont plus simples sous forme matricielle [DORNIER et al., 1998]:

$$S_c = A_e \cdot P_c + B_c$$

$$A_c = f_c(S_c)$$

$$S_s = A_c \cdot P_s + B_s$$

$$A_s = f_s(S_s)$$

avec  $A_e$ , entrées standardisées du modèle;  $S_c$ , stimulation de la couche cachée;  $f_c$ , fonction d'activation : tangente hyperbolique (5.18);  $A_c$ , activation de la couche cachée;  $S_s$ , stimulation de la couche de sortie,  $f_s$  étant choisie linéaire pour laisser au réseau une possibilité d'extrapolation,  $A_s = f_s$ .

Les coefficients du réseau (poids  $P$  et biais  $B$ ), le nombre de neurones dans la couche cachée et le nombre d'itérations de l'algorithme d'optimisation sont calculés dans la phase d'apprentissage, en minimisant une norme quadratique des erreurs de modélisation par rapport aux données expérimentales. Le modèle optimal est celui qui présente l'erreur minimale. Dans ce travail, nous avons utilisé la boîte à outils pour réseaux de neurones du logiciel *Matlab* [DEMUTH and BEALE, 1998], en utilisant un algorithme d'optimisation de type Levenberg-Marquardt, considéré par HAGAN and MENHAJ [1994] comme étant le plus efficace. Afin de tester la pertinence de notre modèle, nous avons partagé nos données expérimentales en deux bases. Deux tiers dans une base d'apprentissage qui permettra de calculer les poids et le biais optimaux et un tiers dans une base de test qui permettra de valider le modèle en testant ses capacités de généralisation. L'erreur sur la base d'apprentissage diminue quand le nombre d'itérations augmente. Elle diminue aussi lorsque on augmente le nombre de neurones dans la couche cachée. Mais quand le réseau apprend trop bien les données de cette base, il perd ses capacités de généralisation sur la base de test. Ce phénomène est appelé «sur-apprentissage». La comparaison entre la valeur de l'erreur quadratique moyenne sur la base d'apprentissage et sur la base de test est un critère clé pour éviter ce phénomène.

### 5.2.2 Modèles à base de réseaux de neurones pour le niveau de gris et la surface projetée

Comme nous l'avons vu (§3.4.2), nous disposons de 36 résultats expérimentaux en comptant les répétitions pour le niveau de gris (fig. 4.17) et pour la surface projetée (fig. 4.12). Nous avons utilisé deux modèles, l'un calculant les cinétiques de niveau de gris et l'autre pour les courbes de surface projetée. Pour éviter de tenir compte de la variabilité du produit de départ, les modèles s'appliquent à des variables standardisées comme suit :

$$\text{gris réduit } (t) = \frac{ng_t - ng_{t=0}}{ng_{t=0}} \quad \text{surface réduite } (t) = \frac{s_t - s_{t=0}}{s_{t=0}} \quad (5.19)$$

$ng_t$  et  $ng_{t=0}$  sont le niveau de gris dans le temps et la valeur initiale, de la même façon pour la surface  $s_t$  et  $s_{t=0}$ .

La Figure 5.16 montre l'influence de quelques paramètres sur l'évolution du niveau de

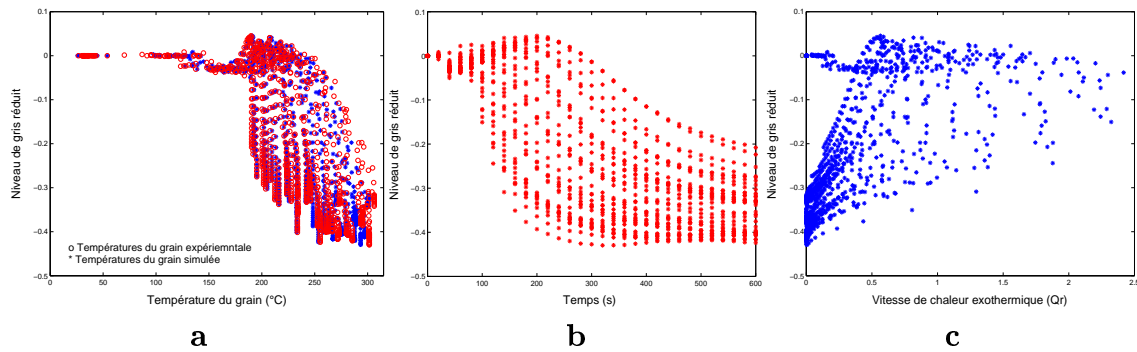


FIG. 5.16 – *Comportement du niveau de gris fonction: de la température du grain (expérimentale et simulée), du temps et de la vitesse de production de chaleur exothermique.*

gris du café lors de la torréfaction. Nous avons envisagé d'utiliser la température du grain ou la température de consigne pour l'air comme entrée du modèle. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la température du grain simulée par le modèle dynamique  $T_{bsim}$  et le temps de torréfaction  $t$  (voir fig. 5.17a). On peut également envisager d'utiliser la température du grain expérimentale, mais cette solution n'est pas réaliste au niveau industriel car elle est très difficile à obtenir dans un torréfacteur.

Dans le modèle de surface réduite, nous avons considéré la température de consigne pour l'air  $T_a$  et le temps de torréfaction  $t$  (fig. 5.17b).

Pour identifier les coefficients du modèle et le valider, nous avons partagé les résultats expérimentaux en une base d'apprentissage composée de huit expériences (faites à 190, 210, 220, 240, 250, 270, 280 et 300°C) et une base de test constituée de quatre cinétiques (200, 230, 260 et 290°C). Chaque expérience est composée de trois répétitions.

### ▷ Résultats et validation des modèles

Un modèle de réseaux de neurones est utilisé pour prédire les variations de niveau de gris à partir de la température du grain simulée et du temps explicite. Un autre prédit l'accroissement de la surface du grain, en fonction de la température de consigne pour l'air et du temps explicite.

#### • Modèle pour le niveau de gris

Dans la phase d'apprentissage, nous avons déterminé que le meilleur réseau pour prédire le niveau de gris réduit comporte 3 neurones dans couche cachée. Il a donc 13 coefficients (9 poids et 4 biais). Pour valider ce modèle, nous avons simulé les cinétiques

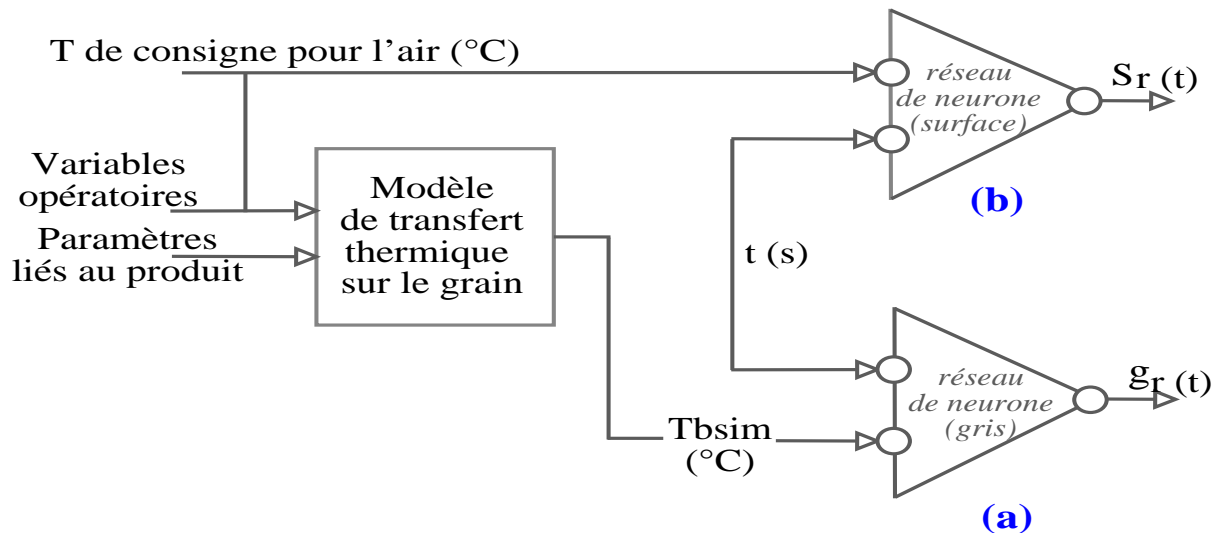


FIG. 5.17 – Réseaux de neurones, en considérant le temps explicite en entrée.

contenues dans la base de test. L'évolution du niveau de gris réduit expérimental pour une température de consigne d'air de  $260^{\circ}\text{C}$  est comparée figure 5.18a à la réponse simulée. La même comparaison est faite figure 5.18b, en étudiant la cinétique de niveau de gris. Ce modèle prédit de façon satisfaisante toutes les courbes du niveau de gris au cours de la torréfaction avec un coefficient de corrélation  $r^2 = 0,987$ . Il faut noter que le modèle prédit bien les premières phases de la courbe (entre 0 et 100 secondes) qui est complexe. En outre, le tracé de toutes les valeurs simulées en fonction des données expérimentales de la base de test (fig. 5.18c) montre une répartition équilibrée des résidus. L'écart-type pour la base de test est de 0,0229 et pour l'apprentissage de 0,0256. La similarité de ces deux valeurs montre la capacité prédictive de ce modèle.

#### • Modèle pour la surface du grain

Pour prédire la cinétique de surface du grain, le meilleur réseau est similaire au précédent. Les Figures 5.19a et 5.19b présentent, l'évolution d'accroissement de la surface expérimentale et simulé en fonction du temps pour une cinétique contenue dans la base de test ( $260^{\circ}\text{C}$ ). On peut constater la variation de la surface du grain au cours de la torréfaction (fig. 5.19b). La précision du modèle est jugée satisfaisante, car le coefficient de corrélation est de  $r^2 = 0,993$  si on considère les expériences des deux bases. Comme pour le niveau de gris, la figure 5.19c compare les valeurs simulées aux valeurs expérimentales pour toute la base de test, elle montre la capacité de prédire les courbes d'accroissement de la surface non apprises. Ceci est confirmé par l'écart-type comparable sur la base de test (0,022) d'apprentissage (0,030).

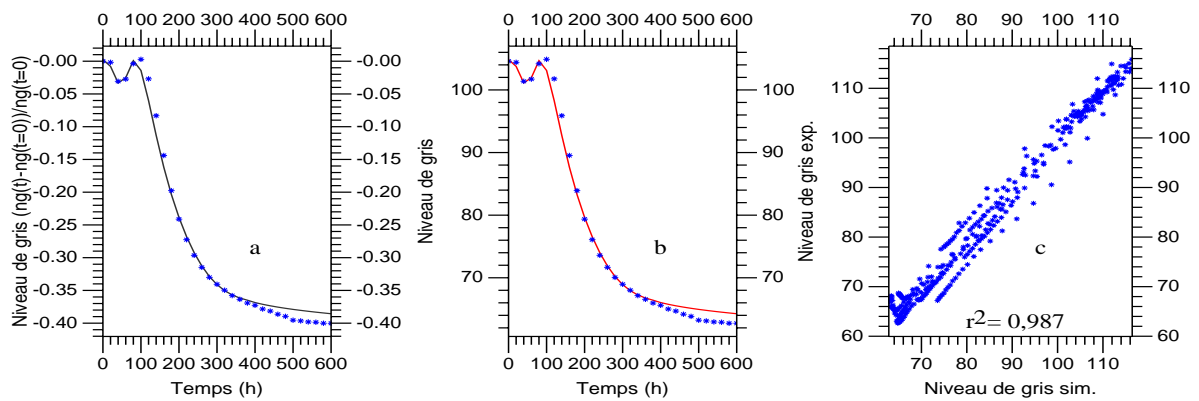


FIG. 5.18 – Vérification et validation du modèle neuronal pour le niveau de gris. (a) niveau de gris réduit fonction du temps à une température d'air de  $260^{\circ}\text{C}$ : (\*) points expérimentaux (-) simulé avec les trois répétitions. (b) le même niveau de gris réduit converti en niveau de gris : expérimental (\*) et simulé (-). (c) points expérimentaux fonction des valeurs simulées pour toute la base de test.

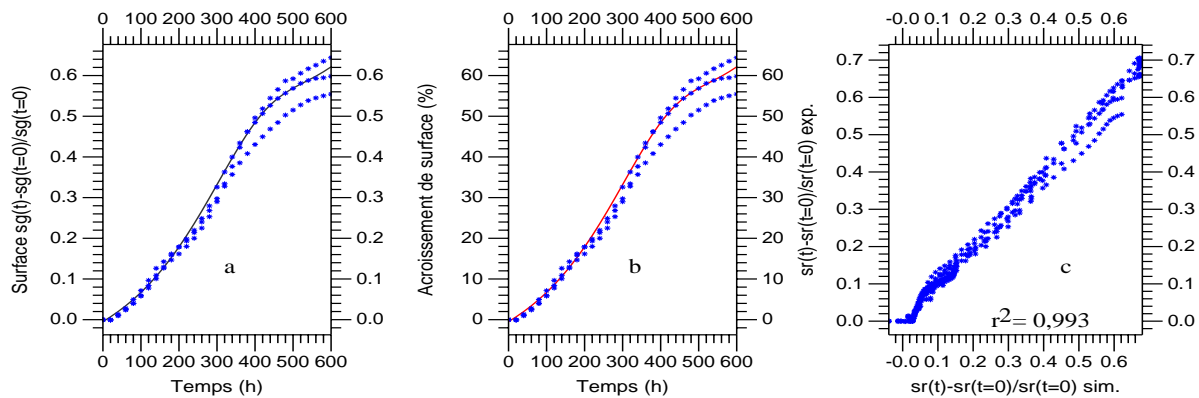


FIG. 5.19 – Vérification et validation du modèle neuronal pour l'accroissement de la surface du grain au cours de la torréfaction. (a) surface réduite fonction du temps à une température d'air de  $260^{\circ}\text{C}$ : (\*) points expérimentaux (avec deux répétitions) et (-) simulés. (b) la même surface réduite convertie en accroissement de surface (%): expérimentale (\*) et simulée (-). (c) points expérimentaux fonction des valeurs simulées pour toute la base de test.

### 5.2.3 Modèle de réseaux de neurones récurrents pour le niveau de gris

Pour estimer en ligne la valeur du niveau de gris au temps suivant en bénéficiant de l'information acquise depuis le début de l'expérience jusqu'à l'instant présent, nous avons appliqué un modèle de réseaux de neurones récurrents. Une difficulté des réseaux de neurones à temps explicite est l'impossibilité de simuler un procédé en conditions variables. Les réseaux de neurones récurrents permettent de tenir compte de l'évolution du procédé et des conditions expérimentales au temps considéré. Ils permettent donc d'ajuster en ligne le modèle en fonction de l'expérience acquise. Le calcul des poids se fait de la même façon que pour les réseaux de neurones classiques.

La Figure 5.20 montre trois modèles différents de réseaux récurrents pour calculer le niveau de gris à l'instant suivant ( $t+1$ ) :

1. le modèle 1, fig. 5.20a, utilise comme variables d'entrée le niveau de gris réduit (récurrence d'ordre 1) et la température du grain simulée par le modèle  $T_{bsim}$  dans le temps  $t$ ,
2. la fig. 5.20b montre le deuxième modèle qui présente une récurrence d'ordre 1 avec deux variables d'entrée (la température du grain simulée par le modèle dynamique  $T_{bsim}$  et la température de consigne de l'air au temps  $t$ ). Ceci afin d'observer si l'ajout d'une autre variable peut aider à mieux prédire la cinétique de niveau de gris au pas de temps suivant,
3. le modèle 3 est présenté (fig. 5.20c). Il permet de simuler le niveau de gris réduit à  $t + 1$ , en prenant en compte une récurrence d'ordre 2 et la température du grain simulée par le modèle  $T_{bsim}$ . Ceci afin de mieux modéliser le début de torréfaction dont la cinétique n'est pas monotone.

Les données expérimentales de la base de l'apprentissage et de test présentées §5.2.2 sont utilisées pour calculer les coefficients du modèle et le valider. Pour la phase d'apprentissage, nous avons employé le logiciel créé par TRELEA et al. [1997], ce logiciel utilise un algorithme de Levenberg-Marquardt [DEMUTH and BEALE, 1998] pour minimiser les sommes de carrés des erreurs.

#### ▷ Résultats et validation des modèles

Les trois réseaux récurrents présentés sont utilisés pour calculer la valeur du niveau de gris réduit au pas de temps suivant. Pour les trois modèles, le nombre de neurones optimal pour la couche cachée est 3. Ils présentent des performances équivalentes.



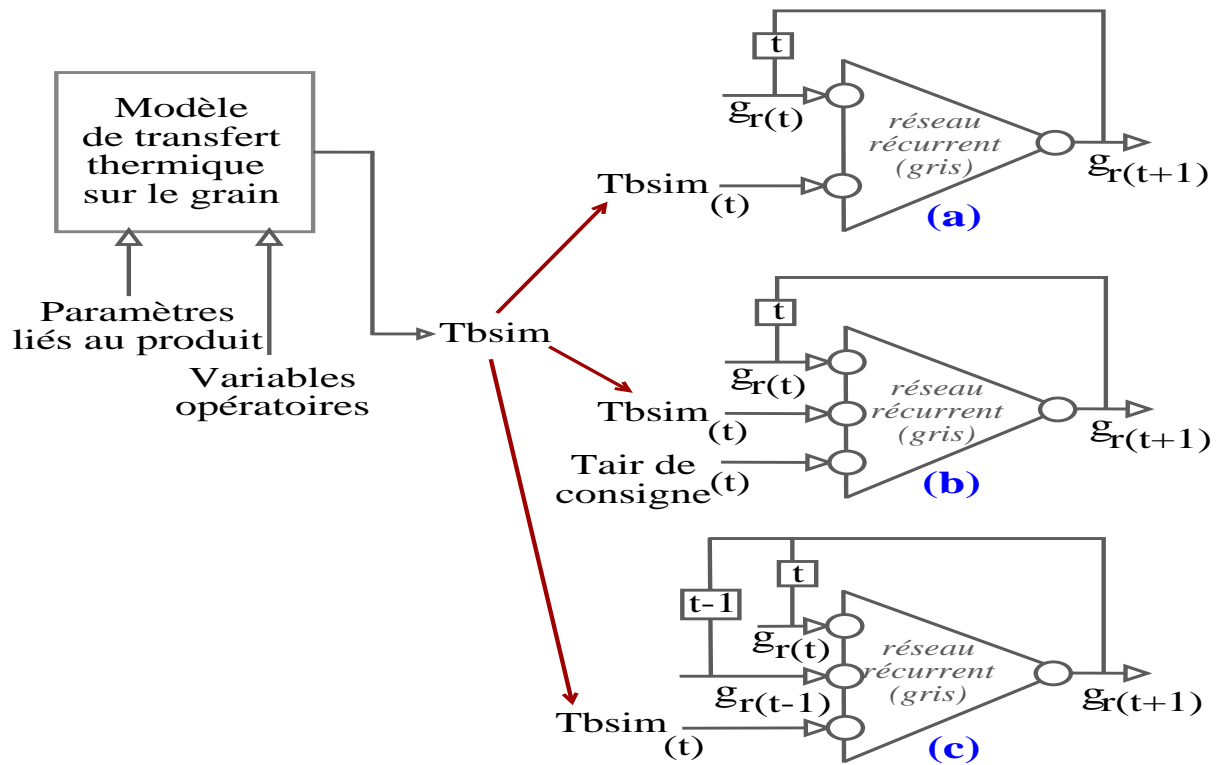


FIG. 5.20 – Réseaux de neurones récurrents : (a) d'ordre 1 avec une variable, (b) d'ordre 1 avec deux variables et (c) d'ordre 2 avec une variable.

- Pour le premier modèle, nous obtenons un coefficient de corrélation  $r^2 = 0,963$  pour la comparaison entre les cinétiques simulées et les cinétiques expérimentales. Pour valider ce modèle, nous avons simulé les cinétiques de la base de test. L'évolution expérimentale du niveau de gris réduit est comparée à la cinétique simulée fig. 5.21a pour une expérience à 260°C. La même courbe est montrée fig. 5.21b, mais elle montre l'évolution du niveau de gris. On peut observer que dans les premières phases du procédé (cent premières secondes), les valeurs expérimentales sont mal modélisées. Cependant, le modèle simule bien la dernière phase de la courbe. La Figure 5.21c compare les valeurs simulées aux valeurs expérimentales pour toute la base du test. Elle confirme la capacité de prédiction du modèle qui prédit 96.3% de la variance des points expérimentaux. L'écart-type pour les deux bases (0,0285 pour la base de test et de 0,0297 pour la base d'apprentissage) est comparable.

- Avec le deuxième modèle, nous avons obtenu un coefficient de corrélation  $r^2 = 0,966$ . Pour valider ce modèle, nous présentons l'évolution du niveau de gris expérimentaux et simulés pour une cinétique de la base de test (fig. 5.22a et fig. 5.22b). Comme pour le premier modèle, les valeurs expérimentales des 100 premières secondes ne sont pas prises en compte. La Figure 5.22c montre aussi la capacité de simuler les valeurs expérimentales de la base de test. On peut observer qu'il n'existe pas de différence marquée entre les coef-

ficients de corrélation pour les deux premiers modèles. L'ajout d'une variable d'entrée supplémentaire (température de consigne de l'air) n'améliore pas significativement la prédiction du modèle. L'écart-type est respectivement de 0,0265 et 0,0283 pour la base de test et d'apprentissage.

- Le troisième modèle présente un coefficient de corrélation  $r^2 = 0,967$ , comparable au deux précédents. Pour le valider, nous avons simulé les courbes de la base de test. Comme précédemment, les données expérimentales sont comparées au modèle (fig. 5.23a et b). En outre, la tracé de toutes les valeurs simulées en fonction des toutes les valeurs expérimentales de la base de test (fig. 5.23c) montre une répartition équilibrée des résidus. L'écart-type du test est de 0,0265 et de l'apprentissage 0,0271. Ces données ne permettent pas de conclure à la supériorité du troisième modèle malgré l'ajout d'un niveau de récurrence. On remarque pourtant que le troisième modèle est le seul à prédire de façon satisfaisante les courbes du niveau de gris pendant les premières phases de torréfaction. C'est malheureusement durement au détriment de la quatrième phase, qui est la plus importante pour la prédiction de la qualité.

#### 5.2.4 Conclusion et discussions

La modélisation du niveau de gris et de l'accroissement de surface est globalement satisfaisante pour les modèles de réseaux de neurones avec temps explicite, car l'erreur de modélisation ne dépasse jamais 1,3% de la valeur calculée. La modélisation du niveau de gris par les réseaux récurrents est jugée bonne, une erreur de 3,7% est possible pour simuler le niveau de gris en appliquant un récurrent d'ordre 1. Elle baisse à 3,3% pour un récurrent d'ordre 2 avec un nombre de paramètres à calculer comparables. Ces valeurs sont moins bonnes que pour les réseaux à temps explicite, mais les réseaux récurrents restent les seuls utilisables si on veut tenir compte d'une variation des conditions opératoires au cours du procédé.

### 5.3 Conclusion

Nous disposons ainsi de modèles permettant :

- de prédire de façon satisfaisante la température du grain en fonction du temps, malgré les hypothèses simplificatrices faites (p. ex. considérer la température du grain homogène et supposant la température du grain momentanément constante). Nous pouvons mentionner que le modèle est très sensible à la taille du grain  $d_b$  (diamètre) et moins sensible à la teneur en eau initiale du produit  $X_0$  quand on torréfie dans une cellule du type de celle que nous avons utilisée (fig. 3.1). La chaleur

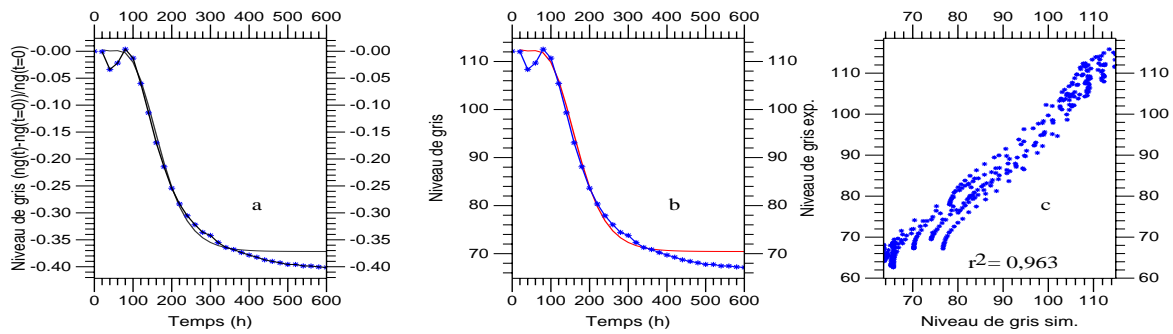


FIG. 5.21 – Vérification et validation du premier modèle récurrent pour le niveau de gris d'ordre 1. (a) niveau de gris réduit fonction du temps à une température de consigne pour l'air de  $260^{\circ}\text{C}$  : (-\*-) points expérimentaux (-) simulés. (b) le même niveau de gris réduit converti en niveau de gris : expérimentaux (-\*-) et simulés (-). (c) points expérimentaux fonctions des valeurs simulées pour toute la base de test.

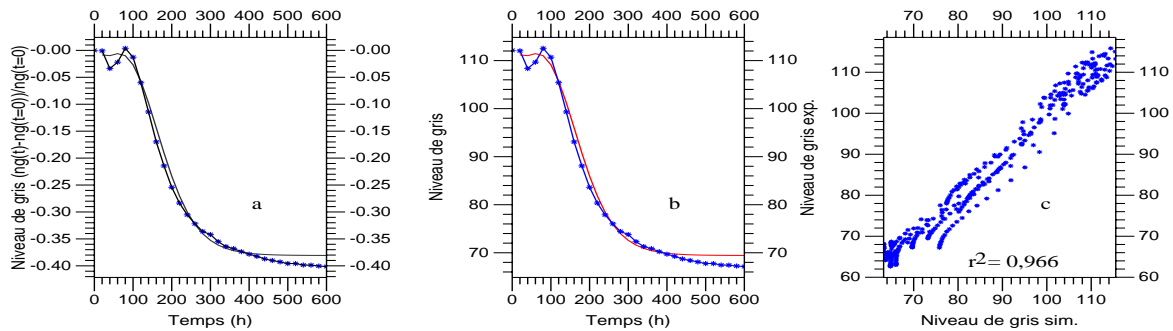


FIG. 5.22 – Vérification et validation du deuxième modèle récurrent pour le niveau de gris. (a) niveau de gris réduit fonction du temps à une température de consigne pour l'air de  $260^{\circ}\text{C}$  : (-\*-) points expérimentaux (-) simulés. (b) le même niveau de gris réduit converti en niveau de gris : expérimentaux (-\*-) et simulés (-). (c) points expérimentaux fonctions des valeurs simulées pour toute la base de test.

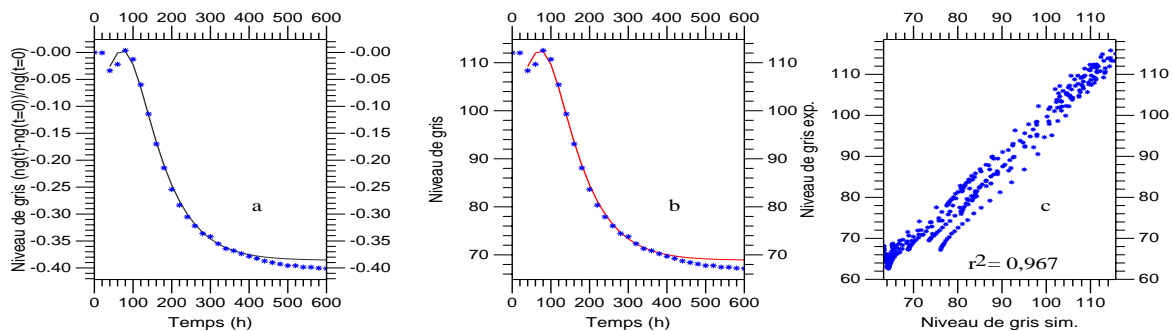


FIG. 5.23 – Vérification et validation du troisième modèle récurrent pour le niveau de gris d'ordre 2. (a) niveau de gris réduit fonction du temps à une température de consigne pour l'air de  $260^{\circ}\text{C}$  : (-\*-) points expérimentaux (-) simulés. (b) le même niveau de gris réduit converti en niveau de gris : expérimentaux (-\*-) et simulés (-). (c) points expérimentaux fonctions des valeurs simulées pour toute la base de test.

massique du grain  $Cp_b$ , le poids sec du produit  $m_{bs}$ , la température d'entrée  $T_{ae}$ , la vitesse de l'air  $V_a$  et la surface de contact entre l'air et le grain  $A_{ab}$  sont également des paramètres sensibles pour le modèle. Si ces paramètres sont corrects, le modèle peut être appliqué de façon satisfaisante à d'autres conditions opératoires et/ou à d'autres matériels. La température en sortie  $T_{as}$  est toujours prédite, mais, étant donnée la faible charge en café, il est difficile d'enregistrer des variations pour la cellule employée. Il faut noter que la différence des températures ( $T_{ae} - T_{as}$ ) est très importante dans ce modèle car le transfert de chaleur par convection est le plus important dans ce pilote.

- de prédire près de 99 % des variations le niveau de gris en utilisant le temps et la température du grain simulée par le modèle dynamique comme entrée. Les modèles récurrents, très utiles pour une éventuelle phase d'automatisation car ils sont capables d'intégrer des changements de conditions opératoires, prédisent plus de 96 % des variations expérimentales. On peut donc les utiliser pour simuler en ligne le degré de torréfaction du grain de café au cours de la torréfaction au pas de temps suivant.
- d'évaluer la surface projetée du grain avec une précision proche de l'erreur expérimentale ( $r^2 = 99,3\%$ ). Ce modèle nécessite uniquement la température de consigne de l'air et le temps pour simuler la surface du grain. Il faut noter que le gonflement du grain est un paramètre très important au point de vue commercial, car le consommateur est attiré par de beaux grains volumineux [COSTE, 1968]. Il peut également être pris en compte pour affiner le modèle dynamique de température du grain.

# Chapitre 6

## Utilisation du modèle : Réflexion sur la conduite de l'opération /Estimation

Comme nous l'avons vu au cours de ce travail, la torréfaction de café est un procédé difficile à maîtriser, car la quantité de chaleur transférée au grain va :

- ★ développer les réactions chimiques, la chaleur massique, le gonflement du grain et le signal sonore émit par le grain,
- ★ modifier la teneur en eau, la masse, la couleur, ainsi que d'autres variables qui ne sont pas décrites dans ce mémoire, telles que le  $pH$ , le volume,
- ★ libérer du gaz et des arômes au cours du procédé.

Notre objectif est de maîtriser la qualité du produit en temps réel, nous avons identifié une de ces variables comme étant clé pour déterminer le degré de torréfaction, à savoir la couleur du grain. De plus, nous avons montré que le niveau de gris (obtenu par l'équation 4.1) peut également être utilisé pour mesurer la qualité du produit pendant le procédé, en utilisant le système d'analyse d'images développé dans le chapitre 4.

Dans l'industrie du café, le niveau de gris est difficile à mesurer, car les grains se trouvent en constante agitation, les capteurs sont fragiles, et de plus, les torréfacteurs à échelle industrielle sont difficiles à instrumenter. Afin d'optimiser en ligne ce critère, il est envisageable de le mesurer de façon indirecte par l'intermédiaire d'un capteur robuste (facile à appliquer, fiable et de faible coût) et d'algorithmes appropriés. La température du grain n'est pas mesurable dans l'industrie mais nous avons développé un modèle prédisant cette grandeur.

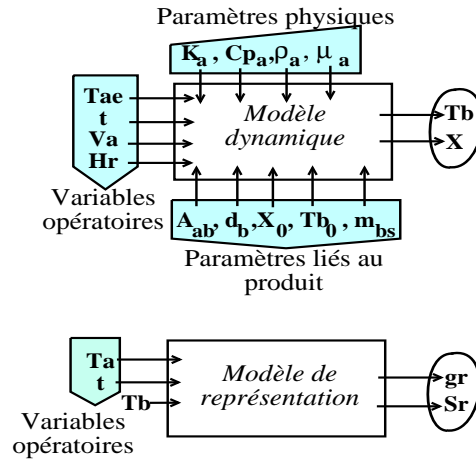


FIG. 6.1 – Modèles : dynamique et de représentation

Dans le chapitre précédent, nous avons obtenu des modèles prédisant des grandeurs comme la température interne  $T_b$ , la teneur en eau  $X$  (modèles dynamiques), le niveau de gris  $gr$  et la surface  $Sr$  des grains de café (modèles de représentation). Les grandeurs  $T_b$  et  $X$  sont calculées à partir des variables opératoires, des paramètres liés au produit et des paramètres physiques. La grandeur simulée  $T_b$  et la variable opératoire  $t$  sont appliquées comme variables d'entrée pour prédire le niveau de gris. Les variables opératoires  $T_a$  et  $t$  sont utilisées pour estimer la surface du grain (fig. 6.1).

Afin d'aider à reconstituer les grandeurs  $gr$  et  $Sr$ , nous allons, tout d'abord, étudier la sensibilité du modèle dynamique lorsqu'il est confronté à des variations des paramètres liés au produit ou aux variables opératoires (section 6.1). Ensuite, section 6.2, nous allons essayer de reconstituer ces informations à partir des modèles (dynamique et de représentation). Finalement la section 6.3, est dédiée à l'estimation de la valeur de niveau de gris lorsque des perturbations se présentent.

## 6.1 Simulation pour étudier le rôle des conditions opératoires

Avant d'analyser et d'observer la sensibilité du modèle dynamique (équations 5.1 et 5.4), nous allons étudier ces équations.

$$-\frac{dX}{dt} = \frac{4,32 \times 10^9 \cdot X^2}{d_p^2} \exp\left[-\frac{9889}{T_b \text{ (}^\circ\text{K)}}\right] \dots(\text{éq.5.1})$$

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{GCp_a [T_{ae} - T_{as}] + m_{bs} \left(Q_r + Lv \frac{dX}{dt}\right)}{m_{bs}(1 + X)Cp_b} \dots(\text{éq.5.4})$$

### Étude du modèle dynamique

Les équations 5.1 et 5.4 montrent bien que la température de l'air de sortie tend vers la température de l'air d'entrée lorsque les variations de température du grain, de teneur en eau et de production de chaleur tendent vers zéro ( $\frac{dT_b}{dt} = 0$ ,  $\frac{dX}{dt} = 0$  et  $Q_r = 0$ ).

$$[T_{ae} - T_{as}] = 0 \quad (6.1)$$

Si on utilise l'équation 5.11 dans l'équation 6.1, on obtient :

$$(T_{ae} - T_b) \left( 1 - \exp\left[-\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a}\right] \right) = 0 \quad (6.2)$$

Cette équation 6.2 montre bien que la température du grain  $T_b$  est égale à la température de l'air d'entrée  $T_{ae}$ , quand  $\frac{dT_b}{dt} = 0$ ,  $\frac{dX}{dt} = 0$  et  $Q_r = 0$ .

Pour la simulation de la température du grain, le modèle requiert la température de l'air d'entrée (laquelle est mesurée par un capteur en ligne) et de la température de l'air de sortie qui est calculée par un modèle statique :

$$T_{as} = T_{ae} - (T_{ae} - T_b) \left( 1 - \exp\left[-\frac{\alpha A_{ab}}{GCp_a}\right] \right) \quad \dots(\text{éq.5.11})$$

D'après le bilan thermique sur l'air §5.1, les dimensions du grain semblent être un facteur très influent sur la température du grain donc sur son niveau de gris, car les dimensions du grain influence à  $T_{as}$ , et  $\alpha$  est directement lié à  $A_{ab}$ . Ces dimensions peuvent varier en fonction du lot de café à torréfier, à l'intérieur d'un lot et même au cours du procédé comme nous l'avons vu §5.2.2. Quand un mélange de variétés est torréfié, ces dimensions sont délicates à déterminer. Il nous paraît donc intéressant d'étudier la sensibilité du modèle dynamique à ce facteur.

Pour l'analyse de sensibilité du modèle dynamique, nous avons fait des simulations des cinétiques de température  $T_b$  et de teneur en eau du produit  $X$  (équations 5.1 et 5.4) en faisant varier les valeurs des paramètres liés au produit et les valeurs des variables opératoires :

#### • Sensibilité à des paramètres liés au produit

Pour une teneur en eau initiale nulle, on remarque bien, figure 6.2, que la température du grain croit rapidement, ce qui est normal, car la phase de séchage n'a pas lieu. La teneur en eau initiale est donc une grandeur importante qui doit être considérée dans le modèle pour prédire la température du grain, mais l'analyse de sensibilité réalisée dans la section

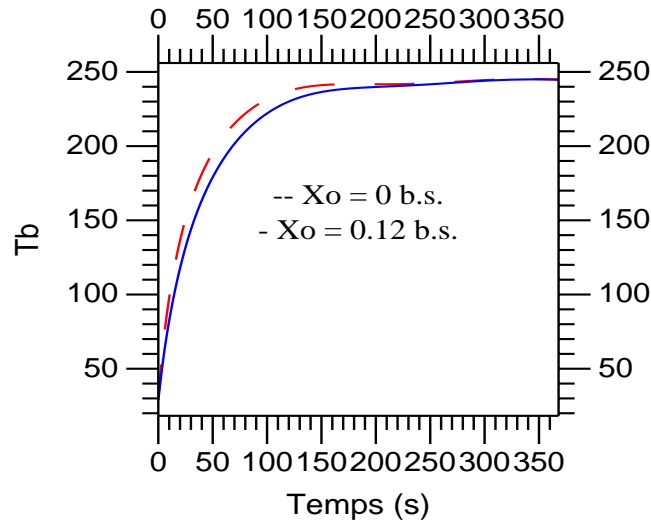


FIG. 6.2 – Sensibilité de la température du grain  $T_b$  au paramètre  $X_0 = 0$  et  $X_0 = 12\%$  b.s.

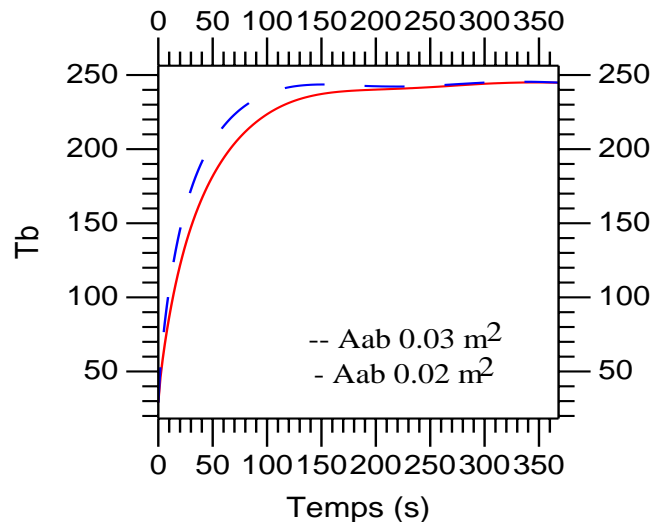


FIG. 6.3 – Variations des valeurs de  $A_{ab}$  dans l'équation 5.4

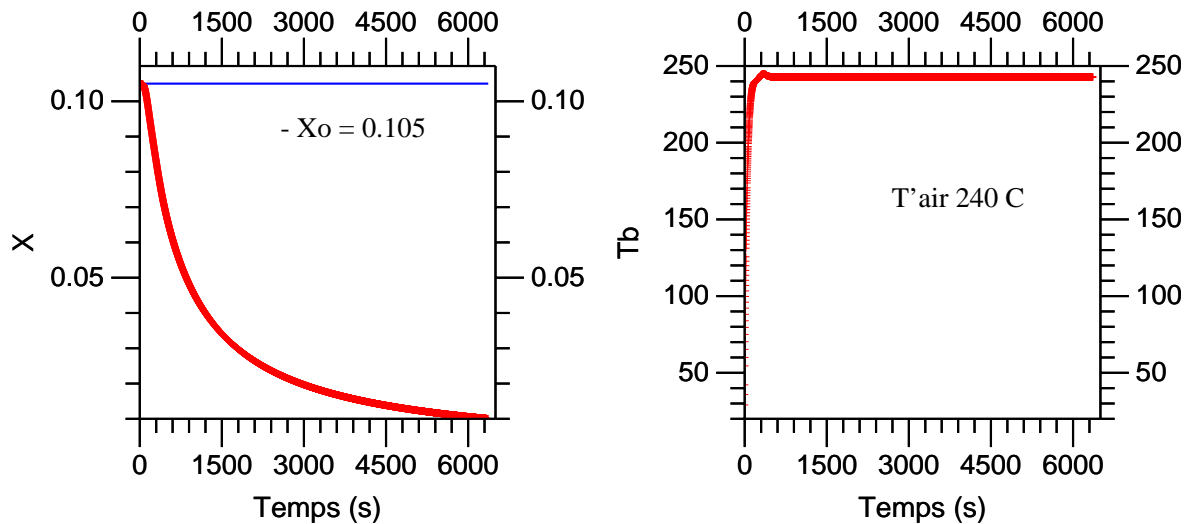
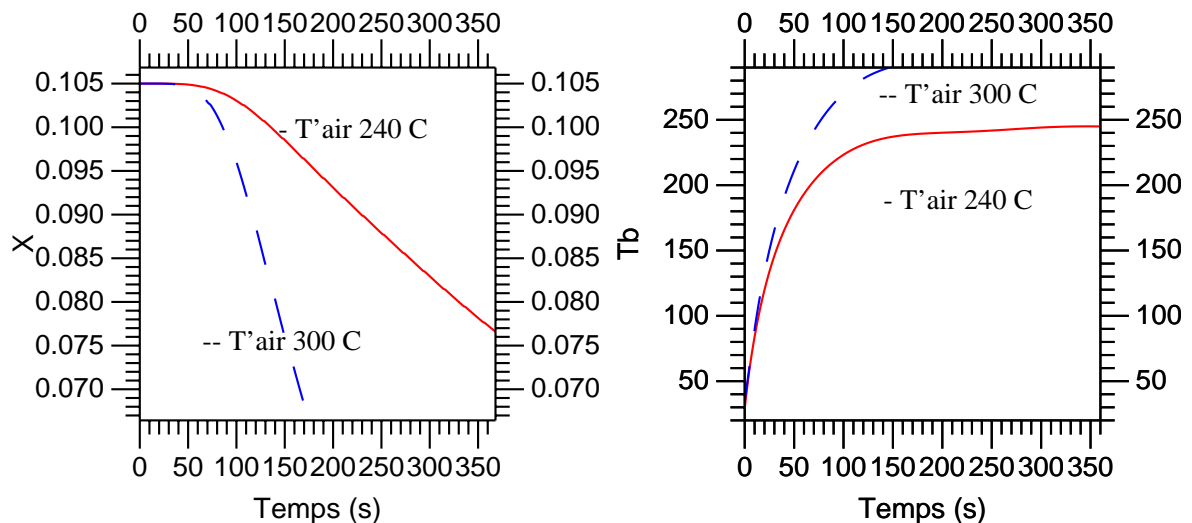
5.1.4, pour des valeurs de teneur en eau initiale  $X_0$ , de 9, 11 et 13% en b.s., a montré que l'effet de ce paramètre sur les cinétiques de température est assez faible (voir fig. 5.11).

Par contre, quand on considère des variations relativement faibles de dimension, la prédiction de la température du produit varie sensiblement (fig. 6.3), ce paramètre  $A_{ab}$  doit donc être connu avec précision, car cette valeur va se répercuter sur les résultats  $T_b$ .

#### • Sensibilité à des variables opératoires

Si on extrapole  $X$  et  $T_b$  pour un temps de 6000 secondes avec une teneur initiale de  $X_0 = 10,5\%$  en b.s, on remarque (fig. 6.4) que la teneur en eau du produit tend vers zéro et la température du grain est toujours de  $242^\circ\text{C}$ , pour une température de consigne



FIG. 6.4 – Variation de  $X$  et  $T_b$  en considérant une durée longue ( $t = 6300$  s)FIG. 6.5 – Effet de la température de l'air sur  $X$  et  $T_b$ 

pour l'air de  $240^{\circ}\text{C}$ . La température de l'air d'entrée à 2 cm des grains étant de  $242^{\circ}\text{C}$  (voir §4.1.1). Le modèle développé, est donc encore valide pour des temps de simulation importants, si nécessaire.

La Figure 6.5 montre également que la température de l'air a un effet important sur les cinétiques de teneur en eau et de température du grain.

Pour récapituler cette analyse de sensibilité succincte du modèle dynamique (sections 5.1.4 et 6.1), nous avons montré que si l'on modifie des variables opératoires et de paramètres liés au produit comme :

- la température de l'air d'entrée  $T_{ae}$ ,

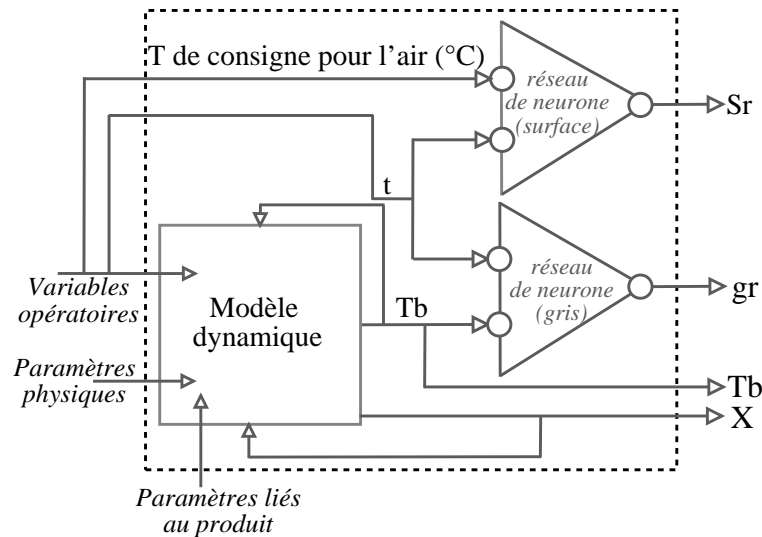


FIG. 6.6 – Prédiction de la surface du grain, du niveau de gris, de la température du grain et de la teneur en eau

- la chaleur massique du grain  $Cp_b$ ,
- la masse du produit  $m$ ,
- la vitesse de l'air  $V_a$ ,
- la durée  $t$ ,

le modèle prend en compte ces perturbations afin de prédire la température du grain d'une façon satisfaisante. Pour les variables non contrôlées par le modèle comme :

- les dimensions du grain  $d_b$  (diamètre) et  $A_{ab}$  (surface du grain)
- la teneur en eau initiale  $X_0$ ,

il faut indiquer au modèle les valeurs correctes pour calculer d'une façon acceptable la courbe de température. Néanmoins, il existe des variations comme :

- l'humidité relative  $Hr$  au cours du procédé.

qui, dans les conditions étudiées, n'influencent pas la sortie du modèle.

## 6.2 Prédiction

Comme nous l'avons vu (section 5.2), il est possible de reconstituer le niveau de gris au cours du procédé, à partir d'un modèle dynamique qui décrit l'évolution de la température du grain  $T_b$ . La valeur simulée  $T_b$  est appliquée comme variable d'entrée tout comme le temps, afin d'estimer le niveau de gris (fig. 6.6). Les valeurs simulées de  $T_b$  et  $X$  au temps  $t$  sont utilisées pour simuler  $T_b$  et  $X$  à  $t + 1$  (voir 5.1.2). Pour estimer la surface projetée des grains de café, c'est le temps et la température de consigne pour l'air qui sont utilisés comme variables d'entrée (fig. 6.6).

Nous avons simulé les grandeurs suivantes :

- ▷ température,
- ▷ teneur en eau,
- ▷ niveau de gris,
- ▷ surface du grain,

à partir des conditions opératoires de la troisième répétition pour l'expérience avec une température de consigne pour l'air de  $240^{\circ}\text{C}$  (voir tableau 3.1) :  $m = 25\text{ g}$ ,  $X_0 = 0,105$ ,  $d_b = 0,0068\text{ m}$ ,  $A_{ab} = 0,0207\text{ m}^2$ . Les figures 6.7a, 6.7b, 6.7c, 6.7d présentent les cinétiques calculées de la température, de la teneur en eau, du niveau de gris et de la surface du produit.

Si on utilise les mêmes conditions opératoires que la précédente, mais en modifiant la valeur des dimensions des grains ( $A_{ab} = 0,01\text{ m}^2$  et  $d_b = 0,014\text{ m}$ ), le modèle dynamique va simuler la température du grain et la teneur en eau d'une façon non acceptable (fig. 6.7e et 6.7f). Le calcul du niveau de gris sera donc faux (fig. 6.7g), mais la surface du grain ne sera pas modifiée car les valeur du temps et la température de consigne sont les mêmes et le calcul de surface ne requiert pas la température du grain (fig. 6.7h). La simulation du niveau de gris est donc uniquement satisfaisante lorsque les valeurs des dimensions sont connues.

Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, dans l'industrie, on travaille toujours avec des variations liées au produit, principalement la matière première (café vert), entre autres, les altérations du produit et des conditions de torréfaction.

Or, si l'on veut modéliser le niveau de gris d'un café ayant des caractéristiques différentes (par exemple le café vert *Robusta*), nous pouvons proposer deux solutions :

1. la première est de mesurer les dimensions des grains et la teneur en eau initiale moyenne pour tout le lot de café vert *Robusta*. Il est alors important que le lot soit homogène. Ces paramètres connus peuvent être introduits dans le modèle afin de simuler la température du grain en utilisant la température de l'air d'entrée en ligne. Le modèle de représentation sera appliqué pour déterminer le degré de torréfaction en temps réel, en supposant que le modèle obtenu pour *Arabica* décrit bien les cinétiques de niveau de gris pour cette espèce de café *Robusta*.
2. Si on n'a pas facilement accès à la dimension des grains, il est possible de corriger la température du grain calculée à partir d'une mesure directe, facilement mise en place et dépendant également des dimensions du grain. Nous proposons d'utiliser la température d'air de sortie dans ce but. Les capteurs de température étant robustes

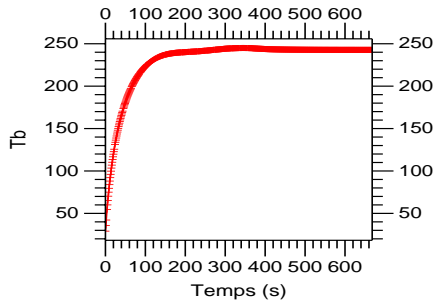
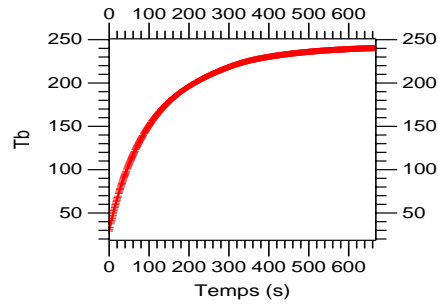
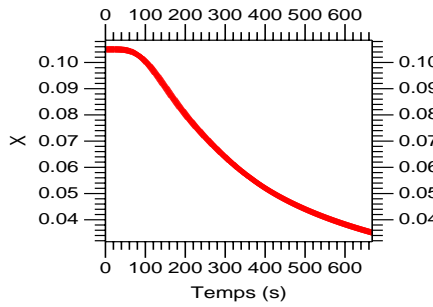
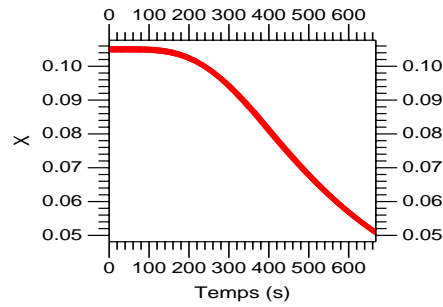
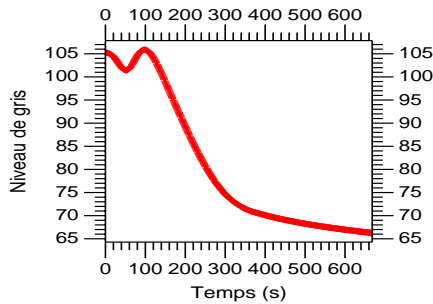
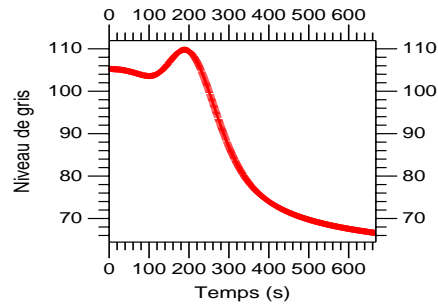
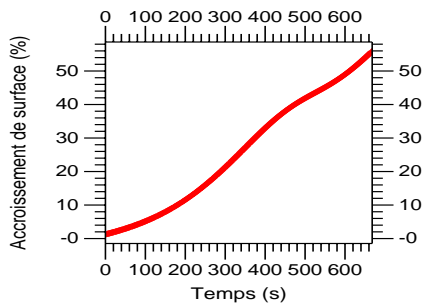
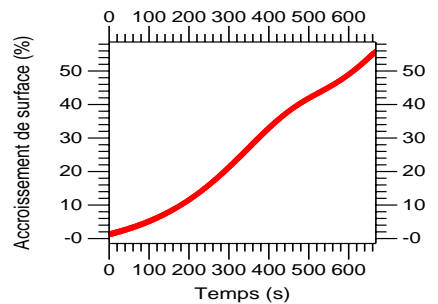
(a)  $A_{ab} = 0,0207m^2$   $d_b = 0,0068m$ (e)  $A_{ab} = 0,01m^2$   $d_b = 0,014m$ (b)  $A_{ab} = 0,0207m^2$   $d_b = 0,0068m$ (f)  $A_{ab} = 0,01m^2$   $d_b = 0,014m$ (c)  $A_{ab} = 0,0207m^2$   $d_b = 0,0068m$ (g)  $A_{ab} = 0,01m^2$   $d_b = 0,014m$ (d)  $A_{ab} = 0,0207m^2$   $d_b = 0,0068m$ (h)  $A_{ab} = 0,01m^2$   $d_b = 0,014m$ 

FIG. 6.7 – Prédiction de  $T_b$ ,  $X$ ,  $gr$  et  $Sr$  des grains pour une température de consigne pour l'air de  $240^\circ C$  en considérant différentes valeurs de  $d_b$  et  $A_{ab}$ .

et peu coûteux, et leur mise en place étant aisée. L'équation 5.11 montre que cette température est autant affectée par les dimensions des grains que la température du grain qui elle est difficile à mesurer. La température de grain sera donc estimée à partir d'un modèle dynamique entaché d'erreur (les dimensions sont fausses pour le café *Robusta*) et d'une mesure fiable, la température de l'air de sortie.

## 6.3 Estimation

Pour corriger la température du grain de café *Robusta* calculée au cours du procédé, deux solutions sont envisageables :

1. Si l'on mesure directement les températures de l'air d'entrée ( $T_{ae}$ ) et de sortie ( $T_{as}$ ) dans le torréfacteur, on peut déterminer la différence de température de l'air. Cette valeur est ensuite entrée dans le modèle dynamique 5.4, afin de calculer la température du grain de café *Robusta*, en supposant que les mesures des températures de l'air sont correctes et sans bruit.
2. Une autre solution est d'estimer  $\alpha A_{ab}$  à chaque pas, à partir de l'équation 5.11 et des mesures  $T_{ae}$  et  $T_{as}$  obtenues en temps réel. Cette valeur de  $\widehat{\alpha A_{ab}}$  estimée à chaque pas de temps peut être introduite dans le modèle dynamique 5.4, afin de déterminer la température du grain de café *Robusta*.

Nous considérons qu'à temps égal à zéro, la température du grain initiale est égale à la température du grain estimée ( $t = 0$ ,  $T_{b0} = \widehat{T}_{b0}$ ). Pour pouvoir estimer la température du grain au pas suivant ( $t + \Delta t$ ) en temps réel, nous connaissons au temps zéro :

- la température du grain initiale ( $T_{b0}$ ),
- la température de l'air d'entrée mesurée ( $T_{ae}$ ),
- la température de l'air de sortie mesurée ( $T_{as}$ ),
- la teneur en eau initiale des grains ( $X$ ),

Ces données permettent de calculer,

- ▷ le coefficient de transfert de chaleur et la surface de contact entre l'air et le grain  $\widehat{\alpha A_{ab}}$  en utilisant l'équation 5.11,
- ▷ la vitesse de perte en eau  $\frac{dX}{dt}$  en considérant l'équation 5.1,
- ▷ la vitesse de production de chaleur  $Q_r$  en utilisant l'équation 5.17,
- ▷ la chaleur massique du grain  $Cp_b$  en appliquant l'équation 5.16.

Ensuite, ces valeurs  $T_{b0}$ ,  $X_0$ ,  $T_{ae}$ ,  $T_{as}$ ,  $\widehat{\alpha A_{ab}}$ ,  $\frac{dX}{dt}$ ,  $Q_r$ ,  $Cp_b$  sont utilisées pour pouvoir simuler la température du grain  $\widehat{T}_b$  au temps suivant  $t + \Delta t$  (voir solution §5.1.2). On

peut ainsi calculer toutes les variables à chaque étape dans le temps, en considérant  $T_{ae}$  et  $T_{as}$ . Cette simulation de température du grain est connue comme une estimation de  $\hat{T}_b$ .

Cheruy, A. et Flaus, J. [BOUDRANT et al., 1994] ont appelé cette méthode d'estimation «mesure indirecte dynamique», car elle s'appuie sur un modèle de mesure (dans notre cas  $T_{ae}$  et  $T_{as}$ ) associé à un autre modèle de procédé (modèle dynamique). Le principe étant d'éliminer les paramètres cinétiques du modèle de procédé, en les écrivant en fonction de la mesure choisie. Le modèle du procédé ne comporte ainsi que les variables du procédé et des paramètres connus, permettant de simuler l'évolution du procédé. Il faut noter que les modèles de mesure et du procédé sont considérés exacts (approche déterministe) et que les conditions initiales sont parfaitement connues.

L'avantage de cette méthode est qu'elle n'a pas besoin des paramètres cinétiques pour estimer la variable d'état, Cheruy, A. et Flaus, J. [BOUDRANT et al., 1994]. Par ailleurs, Cheruy, A. et Flaus, J. ont également mentionné que si la mesure obtenue par le capteur est entachée d'une certaine erreur (bruit de mesure), un filtre peut alors être appliqué à la mesure avant d'être utilisé dans l'estimateur, afin de minimiser le bruit.

Les deux solutions présentées doivent maintenant être validées au niveau industriel pour confirmer qu'il est possible d'estimer en ligne la qualité des grains en utilisant les modèles développés et les mesures de la température de l'air d'entrée et de sortie.

## 6.4 Conclusions

Nous avons donc montré qu'à partir des dimensions du grain (parfaitement connues), de la mesure de la température de l'air d'entrée, de la teneur en eau initiale des grains et du modèle dynamique, il est possible de déterminer la température du grain de café pour les espèces *Arabica* et *Robusta*. Par ailleurs, si l'on peut également obtenir la température de l'air de sortie mesurée au cours du procédé, il est également possible d'estimer en temps réel la température du grain de café *Robusta*, sans utiliser le modèle qui prédit le coefficient de transfert de chaleur ou le modèle qui prédit la température de l'air de sortie. Il faut noter qu'on considère que les conditions initiales sont parfaitement connues et que les modèles (mesure et dynamique) sont exacts.

# Chapitre 7

## Conclusion générale et perspectives

Nous avons, tout d'abord, mis en place un outil expérimental (capteur-algorithme) basé sur l'analyse d'images, l'acquisition des températures et de masse du produit, permettant le suivi de la couleur, la surface, la masse et la température des grains de café en temps réel. Ceci en vue de l'optimisation en ligne de la qualité finale du café torréfié.

Dans la partie expérimentale, l'évolution des courbes fournies par les capteurs de mesure est acceptable pour décrire une partie de la torréfaction du café. Nous pouvons mentionner que l'information livrée par ces capteurs nous a permis de mieux comprendre les phénomènes qui ont lieu au cours du procédé. Par exemple :

- l'analyse des images nous a permis de montrer qu'il existe 4 phases de changement de couleur au cours du procédé.
- le gonflement du grain commence lorsque la température du grain atteint les 100°C, on suppose donc qu'il est principalement dû à la pression de vapeur d'eau.
- quand la température du grain dépasse 260°C, on remarque une petite déviation de la cinétique expérimentale qui peut être due à un début de carbonisation qui suit les réactions exothermiques classiques. En outre, il est aussi probable qu'à cette température ( $\pm 260^\circ\text{C}$ ), chaque grain présente un sillon longitudinal largement ouvert, favorisant ainsi le transfert de chaleur,
- à des températures du grain supérieures à 280°C et après 300 s, le gonflement n'est plus observé. Ce phénomène est également mentionné par COSTE [1968],
- dans les premières minutes de torréfaction, la température interne est différente de la température de surface du grain. Environ 90 s sont nécessaires pour que la température du grain soit homogène.

L'artisan maîtrise la qualité de son produit final en contrôlant principalement la couleur des grains. Nous avons montré qu'il est possible de maîtriser automatiquement cette

qualité, en arrêtant la torréfaction quand le capteur mesure un niveau de gris proche de celui déterminé *a priori* par le maître torréfacteur. La couleur étant difficile à estimer en ligne, particulièrement pour des installations industrielles, les modèles développés ici permettent de prédire la luminance des grains en fonction de leur température. La température des grains étant également difficilement mesurable, nous la calculons à l'aide d'un modèle physique. On peut ainsi optimiser indirectement la qualité du produit fini.

Cette étude nous a conduit à mesurer en ligne d'autres grandeurs (masse, signal sonore, températures, surface) qui permettront d'affiner la mesure indirecte, et qui interviennent dans les modèles développés.

Dans la partie modélisation, nous avons appliqué un modèle dynamique prédisant l'évolution de la température du grain au cours de la torréfaction du café. Ce modèle simule de façon correcte la température du grain sans qu'aucun paramètre n'ait été ajusté. Il présente l'avantage de décrire le comportement du produit que les conditions expérimentales soient constantes ou non. Ce modèle a été validé sur les données expérimentales, il rend compte des cinétiques d'une façon satisfaisante. Comme nous l'avons mentionné, si les paramètres du modèle  $\alpha A_{ab}$ ,  $d_b$ ,  $m_b$ ,  $X_o$ ,  $Cp_b$ ,  $T_{ae}$ ,  $V_a$  sont valides, le modèle peut être utilisé directement pour ce système de torréfaction. Il peut facilement être adapté à d'autres types de torréfacteur. Par exemple la prise en compte du transfert de chaleur du grain vers le métal et du métal vers le grain permet de modéliser les températures dans un torréfacteur de type tambour.

Pour les cinétiques du niveau de gris des grains de café, nous avons développé un modèle de représentation à base de réseaux de neurones artificiels. Ce modèle peut simuler de façon satisfaisante l'intensité du niveau de gris au cours de la torréfaction, en utilisant la température du grain et le temps comme entrée. Nous pouvons mentionner que ce modèle a été validé avec différentes courbes et il a été jugé acceptable avec un coefficient de corrélation de  $r^2 = 0,987$ . En outre, nous avons développé trois modèles différents à base de réseaux de neurones récurrents afin de pouvoir prédire le niveau de gris au temps suivant ( $t + 1$ ), en considérant des valeurs précédentes de niveau de gris. Ces modèles ont bien simulé la valeur à l'étape suivante, mais, il faut noter que les valeurs simulées dans les 100 premières secondes sont moins bonnes que pour les réseaux à temps explicite. Cependant, les réseaux récurrents restent les seuls utilisables si on veut tenir compte d'une variation des conditions opératoires au cours du procédé. Ces modèles récurrents ont aussi été validés sur les résultats expérimentaux, montrant leur capacité de généralisation.



Pour les courbes d'accroissement de la surface du grain, nous avons calculé un modèle de représentation à base de réseaux de neurones employant comme variables d'entrée le temps et la température de consigne pour l'air au cours de la torréfaction. Le modèle permet de bien prédire l'augmentation de la surface du grain avec un coefficient de corrélation de  $r^2 = 0,993$  proche de l'erreur expérimentale. Ce modèle a aussi été validé avec des données expérimentales démontrant la capacité de simuler les courbes du gonflement du grain.

Si les caractéristiques (dimensions) des grains de café (p. ex. *Robusta*) sont différents de celles étudiées dans ce travail, nous proposons d'utiliser le modèle dynamique considérant les mesures de température de l'air d'entrée et de sortie en temps réel, afin d'estimer la température du grain au cours du procédé. Ensuite, nous pouvons appliquer le modèle de représentation pour prédire le niveau de gris au temps  $t$  ou au temps suivant ( $t + 1$ ). En outre, si l'on veut torréfier du café vert *Robusta* avec un autre type de torréfacteur, par exemple un torréfacteur de tambour avec des parois solides et utilisant l'air chaud, une possibilité est d'appliquer le principe que nous avons développé en lui appliquant les nouvelles conditions opératoires (vitesse de l'air, flux massique, dimensions du torréfacteur, ...) et d'effectuer quelques modifications dans le modèle dynamique (en considérant le transfert de chaleur entre le métal et les grains, et des grains vers le métal par exemple).

Par la suite, il faudrait appliquer et valider la stratégie de contrôle proposée, afin de déterminer en ligne la qualité d'un café (*Arabica*, *Robusta*, ...) en utilisant un autre type de torréfacteur. De plus, il faudrait également appliquer dans la stratégie, d'autres algorithmes d'estimation (*Filtre de Kalman*, *Luenberger*, *Horizon glissant avec indicateur de qualité*, ...) afin de corriger les erreurs possibles de perturbations ou de variations sur le modèle si nécessaire. Par ailleurs, il est possible d'introduire à la stratégie d'autres variables pour garantir la qualité du produit, par exemple de considérer le signal sonore ou l'émission de fumées.

La stratégie développée ici pourra également être appliquée à d'autres procédés alimentaires aussi divers que la torréfaction de cacao, ou l'affinage de fromage.

# Bibliographie

- M. ABUD. *Modélisation simultanée des transferts et de l'évolution de la qualité technologique du riz raddy en vue d'optimiser les conditions de séchage*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, 2000.
- Gaiker ACILU, Marta. New technologies for control processing manufacture roasted coffee. *Alimentation, Equipos y Tecnologia*, 16:85–90, 1997.
- Afnor. *Café Vert en Grains, Détermination de la teneur en eau, norme NF V03-310 et NF V03-311*. France, 1976.
- J. J. BIMBENET and M. LONCIN. *Bases du génie des procédés alimentaires*. Masson, Paris, 1995.
- Lionel. BOILLEREAUX. *Estimation d'Etat de Procédés Non-linéaires: Méthode à Horizon Glissant avec Indicateur de Qualité*. PhD thesis, Ecole Doctorale en Sciences de l'Ingénieur de Grenoble, 1996.
- J. BOUDRANT, G. CORRIEU, and P. COULET. *Capteurs et mesures en biotechnologie*, chapter capteurs physiques; traitement des signaux et des données; application de analyse d'images; des mesures indirectes à l'estimation en ligne. Lavoisier TEC et DOC, 11, rue Lavoisier Paris, 1994.
- B. BROYART, G. TRYSTRAM, and A. DUQUENOY. Predicting colour kinetics during cracker baking. *Journal of Food Engineering*, 35:351–368, 1998.
- MUNSELL color. Color order system. In *Munsell color the universal language*, New Windsor, NY, consulté le 08 nov. 2001. [On-line] Available from internet <http://www.munsell.com/>.
- R. COSTE. *Le caféier*. G. P. Maisonneuve et Larose, 11, rue Victor-Cousin, Paris (V<sup>e</sup>), xiv edition, 1968.
- C. DA PORTO, M. C. NICOLI, C. SEVERINI, A. SENSIDONI, and C. R. LERICI. Study on physical and physico-chemical changes of coffee beans during roasting. note 2. *Italian Journal of Food Science*, 3:197–207, 1991.
- H. DEMUTH and M. BEALE. *Neural Network Toolbox for Matlab, user's guide version 3*. The MathWorks Inc, USA, 1998.
- M. DORNIER, B. HEYD, and M. DANZART. Evaluation of the simplex method for training

- simple multilayer neural networks. *Neural Computing and Applications*, 7:107–114, 1998.
- E. R. DUTRA, L. S. OLIVEIRA, A. S. FRANCA, V. P. FERREZ, and R. J. C. F. AFONSO. A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast. *Journal of Food Engineering*, 47: 241–246, 2001.
- John W EATON. Octave (free software). In *GNU Octave*, University of Wisconsin, consulté le 08 nov. 2001. [On-line] Available from internet <http://www.octave.org/octave.html>.
- C. GUIZARD. *Visualisation-Image-Modelisation*, volume 78, chapter Performances et limites de la vision industriel, pages 203–211. Lavoisier Technique et Documentatio Paris, 2001.
- C. GUIZARD, V. BELLON, and F. SEVILA. *Vision artificielle dans les industries Agro-alimentaires: Méthodes, Techniques, Choix*. Cemagref, Montpellier, 1992.
- G. GUYOT. *Torréfaction: mecanismes, transformation physiques et chimiques*. Journées du CAFE, CIRAD-CP à Montpellier, 1993.
- M. HAGAN and M. MENHAJ. Training feedforward networks with the marquardt algorithm. *IEEE transactions on neural networks*, 5(6):989–993, 1994.
- J. A. HERNÁNDEZ, B. HEYD, and G. TRYSTAM. *Visualisation-Image-Modelisation*, volume 78, chapter Prediction en ligne de la couleur et des dimensions des grains de café pendant la torréfaction, pages 235–240. Lavoisier Technique et Documentatio Paris, 2001.
- J. A. HERNÁNDEZ, B. HEYD, and G. TRYSTRAM. On-line image analysis of swell and color during roasting of coffee beans. In *Eighth international congress on engineering and food*, volume 8, pages 74–77, Puebla, México, April 2000. International Association for Engineering and Food.
- A. ILLY and R. VIANI. *Espresso Coffee*. Academic press, San Diego, CA 92101, U.S., 1998.
- A. KAR and S. K. DASH. Application of image processing techniques in food processing industries. *Indian Food Industry*, 18:223–228, 1999.
- D. H. KERN. *Process heat Transfer*. McGraw-Hill, 1965.
- F. KREITH. *Transmission de la chaleur et thermodynamique*. Masson et C<sup>ie</sup> éditeurs, 120 Boulevard Saint Germain Paris VI<sup>e</sup>, 1967.
- M. K. KROKIDA, Z. B. OREOPOULOU, and D. MARINOS. Colour changes during deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 48:219–225, 2001.
- S. David LAWYER. Serial-howto. In *The Linux Serial HOWTO*. [On-line] Available from internet <http://www.linuxdoc.org/HOWTO/Serial-HOWTO.html>, consulté le 09 janvier 2000.

- A. V. LUIKOV. *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. Pergamon Press, New York, 1966.
- B. LUISETTI. *Café Show*. Kraft Foods France, 2ème edition, 2002.
- N. MANSON. Publications scientifiques et techniques d'ibm france. IBM, 1992.
- R. MASSINI, M. C. NICOLI, A. CASSARA, and C. R. LERICI. Study on physical and physico-chemical changes of coffee beans during roasting. note 1. *Italian Journal of Food Science*, 2:123–130, 1990.
- L. C. MENDES, H. C DE MENDES, M. APARECIDA, and A. P. DA SILVA. Optimization of the roasting of robusta coffee (*C. canephora conillo*) using acceptability test and rsm. *Food Quality and Preference*, 12:153–162, 2001.
- V. D. NAGARAJU, C. T. MURTHY, K. RAMALAKSHMI, and R. P. N. SRINIVASA. Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. *Journal of Food Engineering*, 31:263–270, 1997.
- Nestlé. Le café. In *Coté Cuisine*, Marne la vallée cedex 2, France, consulté le 08 nov. 2001. [On-line] Available from internet <http://nestle.fr/cuisine/boissons/index.asp>.
- J. M. NJOROGE. Agronomic and processing factors affecting coffee quality. *Outlook on AGRICULTURE*, 27:163–166, 1998.
- M. D. ORTOLÀ, L. LONDOÑO, C. L. GUTIÉRREZ, and A. CHIRALT. Influence of roasting temperature on physicochemical properties of different coffees. *Food Science and Technology International*, 4:59–66, 1998.
- B. PARK and Y. CHEN. Real-time dual-wavelength image processing for poultry safety inspection. *Journal of Food Process Engineering*, 23:329–351, 2000.
- G. PAVÓN, J. A. HERNÁNDEZ, M. A. SALGADO, and M. A. GARCÍA. Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. *Journal of Food Engineering*, 51(4):347–353, 2002.
- Nelson H. G PEZOA. *Contribution a l'étude d'un capteur pour contrôler en continu le procédé de torréfaction*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 1989.
- Georgatos PHOTIS. Coffee-howto.txt. In *Software coffee-HOWTO*, University Cambridge, consulté le 08 janv. 1999. [On-line] Available from internet <http://www.cl.cam.ac.uk/coffee/coffee.html>.
- P. PITTIA, M. DALLA, G. PINNAVAIA, and R. MASSINI. Evoluzione di alcune caratteristiche fisiche del caffè durante la torrefazione. *Industrie Alimentari*, pages 945–950, 1996.
- S. PIZZIRANI, S. ROMANI, M. ANESE, and D. BARBATI. Studio sulle caratteristiche chimique e chimico-fisiche del caffè torrefatto e della bevanda di estrazione. *Industrie Alimentari*, 35:658–663, 1996.

- A. RAEMY. Differential thermal analysis and heat flow calorimetry of coffee and chicory products. *Thermochimica Acta*, 43:229–236, 1981.
- A. RAEMY and P. LAMBELET. A calorimetric study of self-heating in coffee and chicory. *Journal of Food Technology*, 17:451–460, 1982.
- M. T. ROCHA. *Influence des prétraitements et des conditions de séchage sur la couleur et l'arôme de la menthe (Mentha Spicata Huds) et du basilic (Ocimum basilicum)*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, 1993.
- Henry G. SCHWARTZBERG. *Engineering and Food for the 21<sup>st</sup> Century*, chapter Modelling bean heating during batch roasting of coffee beans. CRC Press LLC, London, New York, Boca Raton, 2002.
- P. SINGH, R. SINGH, S. BHAMIDIPATI, S. SINGH, and P. BARONE. Thermophysical properties of fresh and roasted coffee powders. *Journal of Food Process Engineering*, 20: 31–50, 1997.
- M. SIVETZ and N. W. DESROSIER. *Coffee technology*. AVI Publishing Co., westport edition, 1979.
- L. E. SMALL and R. S. HORRELL. High yield coffee technology. In *ASIC*, pages 719–726. 15e Colloque, 1993.
- N. THERDTHAI and W. ZHOU. Artificial neural network modelling of the electrical conductivity property of recombinend milk. *Journal of Food Engineering*, 50:107–111, 2001.
- J. TRANTER. Sound-howto.txt. In *The Linux Sound HOWTO*. [On-line] Available from internet <http://www.freenix.org/unix/linux/HOWTO/>, consulté le 08 janv. 2000.
- I. C. TRELEA. *Commande predictive optimale sous contraintes des procedes discontinus non lineaires utilises dans l'industrie alimentaire*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, 1997.
- I. C. TRELEA, F. COURTOIS, and G. TRYSTRAM. Dynamic models for drying and wet-milling quality degradation of corn using neural networks. *Drying Technology*, 15(3&4): 1095–1102, 1997.
- R. E. TREYBAL. *Mass transfer operations*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- G. TRYSTRAM. Les capteurs de mesure en industries alimentaires. *La bretagne agroalimentaire*, 1:4–11, Janvier Février 1994.
- G. TRYSTRAM and F. COURTOIS. Food processing control reality and problems. *Food Research International*, 27:173–185, 1994.
- Michel. VANIER. *Les cafés précieux*. Robert Laffont, 1983.
- Joerg WALTER. *bttvgrab-0.15.10.tar.gz* (free logiciel). In *bttvgrab*. [On-line] Available from internet <http://ich.bin.kein.hoschi.de/bttvgrab/>, consulté le 08 nov. 2001.

# Annexes

## ANNEXE1. FICHIERS DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES DU TABLEAU 3.1

Température de l'air (°C)	Fichier $\diamond$	Fichier $\bullet$	Fichier $\star$
190	000622007	000707026	000717036
200	000622006	000705020	000707025
210	000622008	000705019	000707024
220	000705018	000711027	000717037
230	000627009	000704017	000711028
240	000704016	000711029	000717038
250	000627010	000704015	000712030
260	000607003	000628014	000712031
270	000627011	000706023	000712032
280	000613004	000628013	000713033
290	000628012	000706022	000713034
300	000613005	000706021	000713035

- $\diamond$  = première répétition,
- $\bullet$  = deuxième répétition,
- $\star$  = troisième répétition.

## ANNEXE2. DÉTERMINATION DE $A_{ab}$

D'après SCHWARTZBERG [2002], la surface de contact entre l'air et le grain de café est déterminée par l'équation suivante :

$$A_{ab} = \frac{\pi}{4} \cdot a \cdot b + \frac{\pi}{4} \left[ b^2 + ab \left( \frac{\arcsin(e)}{e} \right) \right] \quad \text{où} \quad e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

En utilisant les valeurs mesurées des dimensions du grain de café (§3.3.1), nous avons obtenu  $A_{ab} = 1,4 \cdot 10^{-04} \text{ m}^2$  pour un grain.