

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. Des lois de la nature aux modèles dynamiques de procédés</b> . . . . .	9
1.1. Introduction. . . . .	9
1.2. Modèle physique : exemple du séchage . . . . .	10
1.2.1. Modèle de séchage à l'échelle du grain individuel ou de la « couche mince » . . . . .	11
1.3. Modèle biologique : exemple de la fermentation brassicole . . . . .	27
1.3.1. Modèle de fermentation alcoolique . . . . .	27
1.3.2. Modèle de production de composés aromatiques . . . . .	40
1.4. Conclusion sur l'écriture des modèles . . . . .	44
<b>Chapitre 2. Les modèles et leurs paramètres</b> . . . . .	49
2.1. Les différentes grandeurs : constantes et variables. . . . .	49
2.2. Comment trouver les paramètres ? Une ébauche de méthodologie . . . . .	52
2.3. Un premier jeu de paramètres plausibles . . . . .	53
2.3.1. Exemple du séchage en couche mince. . . . .	53
2.3.2. Exemple de la fermentation brassicole . . . . .	63
2.4. Une première simulation . . . . .	71
2.4.1. Exemple du séchage en couche mince. . . . .	71
2.4.2. Exemple de la fermentation brassicole . . . . .	74
2.5. Trouver les paramètres importants : une analyse de sensibilité . . . . .	77
2.5.1. Sensibilité absolue, sensibilité relative . . . . .	78

2.5.2. Sensibilité locale, sensibilité globale . . . . .	79
2.5.3. Échelle linéaire, échelle logarithmique . . . . .	82
2.5.4. Exemple du modèle de séchage. . . . .	84
2.5.5. Exemple du modèle de fermentation brassicole . . . . .	90
2.6. Comment planifier de bonnes expériences dynamiques ? . . . . .	100
2.6.1. Exemple du modèle de séchage. . . . .	102
2.6.2. Exemple du modèle de fermentation brassicole . . . . .	106
2.7. Réaliser les expériences . . . . .	111
2.7.1. Exemple du procédé de séchage . . . . .	112
2.7.2. Exemple du procédé de fermentation brassicole. . . . .	114
2.8. Calibrer les paramètres à partir des données . . . . .	118
2.8.1. Une mesure pour la précision effective du modèle . . . . .	119
2.8.2. Une mesure pour la précision souhaitée du modèle . . . . .	120
2.8.3. Un critère pour la calibration du modèle . . . . .	121
2.8.4. Données pour calibration, données pour validation . . . . .	122
2.8.5. Exemple du modèle de séchage. . . . .	124
2.8.6. Exemple de la fermentation brassicole . . . . .	134
2.9. Que faire en cas de difficulté ? Écueils et pièges classiques . . . . .	163
2.9.1. Paramètres peu sensibles. . . . .	163
2.9.2. Paramètres fortement corrélés . . . . .	164
2.9.3. Ordres de grandeur très différents pour les paramètres . . . . .	165
2.9.4. Ordre de grandeur très grand ou très petit pour le critère de calibration . . . . .	167
2.9.5. Optimums locaux lors de l'optimisation des paramètres . . . . .	167
2.9.6. Un critère optimisé inadapté . . . . .	170
2.10. Conclusion sur la calibration des paramètres . . . . .	171

### **Chapitre 3. Optimisation dynamique de procédés à l'aide de modèles. . . . .**

3.1. Introduction. . . . .	173
3.2. Optimisation graphique : construction d'abaques sur mesure . . . . .	174
3.2.1. Exemple du modèle de séchage. . . . .	175
3.2.2. Exemple du modèle de fermentation brassicole . . . . .	179
3.3. Optimisation multi-objectif : gérer plusieurs souhaits contradictoires et plusieurs variables de décision. . . . .	181
3.3.1. Comment comparer des solutions selon plusieurs critères à la fois ? . . . . .	182
3.3.2. Comment représenter un problème d'optimisation dynamique ? . . . . .	184

3.3.3. Exemple du procédé de séchage . . . . .	187
3.3.4. Exemple du procédé de fermentation brassicole. . . . .	197
3.4. Décision multicritère : comment choisir une solution unique ? . . . . .	209
3.4.1. Choix humain . . . . .	210
3.4.2. Choix automatisé . . . . .	210
3.4.3. Exemple du procédé de séchage . . . . .	216
3.4.4. Exemple du procédé de fermentation brassicole. . . . .	220
3.5. Conclusion . . . . .	224

## **Chapitre 4. Aperçu de quelques méthodes numériques . . . . . 227**

4.1. Introduction. . . . .	227
4.2. Résolution numérique des équations différentielles . . . . .	228
4.2.1. Schémas explicites . . . . .	230
4.2.2. Schémas implicites . . . . .	230
4.2.3. Forme implicite des équations différentielles . . . . .	231
4.2.4. Gestion automatique du pas de temps . . . . .	231
4.2.5. Précision de la solution. . . . .	232
4.2.6. Équations raides. . . . .	233
4.2.7. Systèmes d'équations algèbro-différentielles. . . . .	235
4.3. Approximation numérique des dérivées . . . . .	237
4.3.1. Différences finies unilatérales . . . . .	238
4.3.2. Différences finies centrées. . . . .	240
4.3.3. Approximation polynomiale . . . . .	242
4.4. Optimisation numérique . . . . .	244
4.4.1. Une formalisation du problème d'optimisation . . . . .	245
4.4.2. Quelques types de problèmes . . . . .	247
4.4.3. Quelques types de méthodes . . . . .	250
4.4.4. Cas particuliers importants . . . . .	254
4.4.5. Quelques méthodes . . . . .	257
4.4.6. L'optimisation et les modèles. . . . .	259
4.5. Estimation des intervalles de confiance sur les paramètres du modèle . . . . .	263
4.5.1. Estimation rapide basée sur une approximation locale . . . . .	263
4.5.2. Estimation basée sur un échantillonnage aléatoire. . . . .	265
4.5.3. Quelle confiance dans l'intervalle de confiance ? . . . . .	268
4.5.4. Effet d'une transformation logarithmique des paramètres . . . . .	269
4.5.5. Vivre avec des paramètres très incertains . . . . .	269
4.6. Bibliothèques numériques. . . . .	271
4.7. Conclusion . . . . .	274

<b>Conclusion</b> . . . . .	277
<b>Bibliographie</b> . . . . .	287
<b>Liste des auteurs</b> . . . . .	293
<b>Index</b> . . . . .	295