

Instrumentation, modélisation et commande des procédés agroalimentaires

Présentation par Francis Courtois
en vue d'obtenir l'Habilitation à
Diriger des Recherches

11 juin 2004

Plan de la présentation

- Présentation du candidat
- Quelques mots sur l'enseignement
- Recherche
- Discussion

Présentation

Cursus 1/2

- 1985-1988: élève ingénieur ENSIA
 - 3ème année à l'ENGREF en Mathématiques appliquées et Informatique avec Eric Parent.
- 1989: DEA Génie Chimique option GPA (ENSIA, INPT), Diplôme ISAA.
- 1988-1991: Ingénieur R&D à l'ITCF en thèse CIFRE (Laboratoire: GIA, ENSIA)

Amélioration de la qualité agro-industrielle du maïs par la modélisation dynamique du séchage

Cursus 2/2

- 1991:
 - Docteur ENSIA
 - Maître de Conférences à l'ENSIA « Automatique et procédés » au département GIA
- 1996: « Visiting Professor » à Wageningen (Hollande)
- 1998-1999: « Visiting Professor » à Davis (USA)

Responsabilités

- Membre du conseil général (1992-1995)
- Co-animateur du groupe « Automatique » de l'UMR
- Participation au groupe de réflexion « modélisation » de l'INRA avec J.P. Vila et G. Delavalle.
- Responsable de la dominante TI (3ème année)
- Diverses responsabilités informatiques
- Membre de plusieurs sociétés savantes
- Membre du comité de lecture du *Journal of Food Process Engineering* depuis 1999.
- Expert brevet, ANVAR, Ingénieur conseil, développeur indépendant.

Quelques chiffres

- 20 articles dans revues internationales à comités de lecture,
- 13 chapitres de livres,
- 55 communications (dont une dizaine invitée)
- 9 logiciels (dont 2 commerciaux)
- 8 thèses, 6 DEA et 1 postdoc co-encadrés

L'enseignement

L'automatique et le génie des procédés
dans une école d'ingénieurs en
industries alimentaires

Enseignement de l'automatique en Génie des Procédés Alimentaires

- Objectifs clés
 - Approche système
 - Systèmes dynamiques, systèmes séquentiels
 - Régulation PID, GRAFCET
 - Intérêts en IAA
- Contraintes
 - désintérêt des élèves pour les concepts abstraits
 - Volume horaire très limité (aller à l'essentiel)
 - Manque de moyens pour mettre en place de vrais TP
- Des solutions
 - Enseignement multi facettes (CM, TD, TP, projets)
 - Cours et logiciels disponibles en ligne
 - Utilisation des logiciels classiques en recherche type « Matlab »
 - Utilisation de simulateurs issus de travaux de recherche
 - Des TD très appliqués, des projets d'ingénierie très réalistes
 - Un TP disponible sur le réseau, sur place ou à distance
- Des résultats probants
 - Les étudiants « jouent » le jeu
 - Evaluations très positives

Modules enseignés

- ENSIA:
 - Tronc commun: séchage, automatique
 - DEA et 3ème année: informatique scientifique, informatique industrielle, modélisation, Identification, commande
 - Master européen « Food Studies »: Automation of food processes
- En France: ESTBA, INAPG, ISAB, CESIA, ENSTIMAC.
- A l'étranger: Liban, Maroc (OCP), Philippines, Thaïlande (MSc Asie).

Positionnement

Intégration dans les équipes

1988-1991 (thèse):

- ITCF: département « Qualité et débouchés »
- ENSIA, INRA: laboratoire associé de séchage



Depuis 1991

- ENSIA: département GIA
- INRA: département CEPIA (ex. TPA)

Depuis 1998

- UMR-GENIAL: groupe « Automatique »

Analyse des besoins industriels

- Faiblesse des moyens de mesure (et des moyens de commande)
- Manque d'outils d'aide à la conception, au réglage et à la conduite
- La vision purement « thermodynamique » est trop limitée : il faut intégrer la « qualité »
- Besoins soit d'approches génériques, soit d'experts clairement identifiés.

Limites des travaux existants

- Beaucoup d'études purement expérimentales, très spécifiques
- Peu de modèles suffisamment validés (et très rarement en dynamique)
- Très peu de modèles couplés procédé / qualité
- Effort expérimental souvent surdimensionné par rapport au modèle
- Réflexion très limitée sur les interactions entre instrumentation, expérimentation et modélisation.
- En dehors des bio réacteurs, peu de travaux sur les capteurs logiciels en alimentaires
- Peu de travaux en commande des procédés alimentaires (e.g. ICEF9)

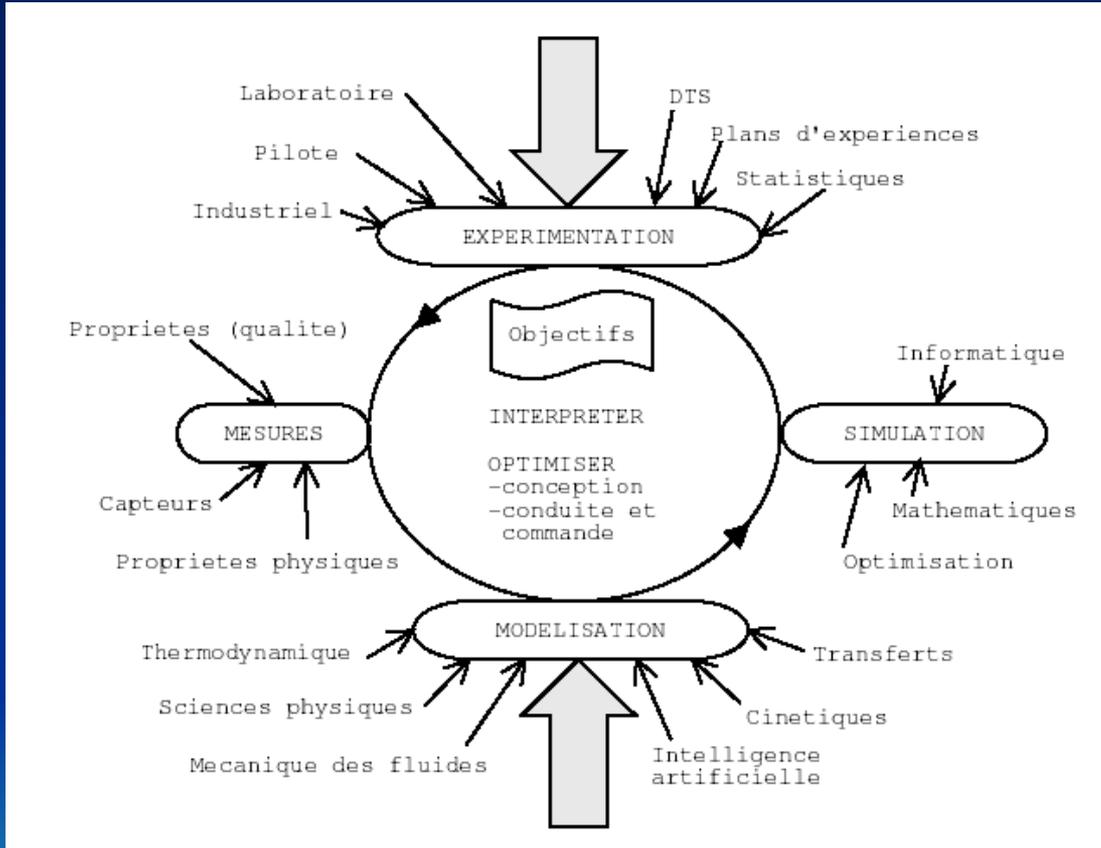
Le point de vue de l'unité

- Le modèle au cœur de la démarche
- Confluence du Génie des Procédés, du Génie de la Réaction et de l'Automatique
- Choix de la meilleure échelle de représentation par rapport aux objectifs
- Développement d'outils utilisables par l'industrie

Objectifs globaux

- Améliorer la compréhension des mécanismes, la conception, le réglage et la conduite des procédés alimentaires.
- Intégrer, le plus souvent, les qualités secondaires en sus de la qualité primaire et aspects énergétiques.
- Apporter des réponses concrètes aux questions des industriels.

Méthodologie



En boucle:

- Comprendre
- Instrumenter
- Expérimenter
- Mesurer
- Comprendre
- Modéliser
- Valider
- Optimiser

Vue globale des applications

Procédés

- Séchage
- Friture
- Réfrigération
- Filtration
- Décantation

Produits

- Lait
- Maltodextrines
- Céréales
- Luzerne
- Pomme de terre
- Banane plantain
- Noix de coco
- Viandes
- Fruits
- Solutions sucrées
- Levures en solution
- Boues d'épuration

Critères

- Énergie
- Humidité
- Qualité amidonnière, fissuration, prise d'huile
- Température
- Collage
- Capacité de production
- Concentration en Matières En Suspension (MES)

Résultats

- Bases de données expérimentales
- Modèles dynamiques validés
- Incluant la qualité
- Simulateurs dynamiques
- Logiciels CAO
- Capteurs logiciels
- Lois de commande
- Profils optimaux

Illustration de la démarche

Exemple du séchage du riz

- Objectif: optimiser la conception, le réglage et la conduite des séchoirs industriels à riz
- Critères: énergie, teneur en eau et qualité mécanique (taux de grains entiers)
- Partenariat scientifique: CIRAD
- Partenariat industriel: SATIG, SUD-CEREALES, FRANCE-RIZ.
- Projet initié avec André Lebert (INRA) puis conduit avec Catherine Bonazzi (INRA).

Analyse du problème

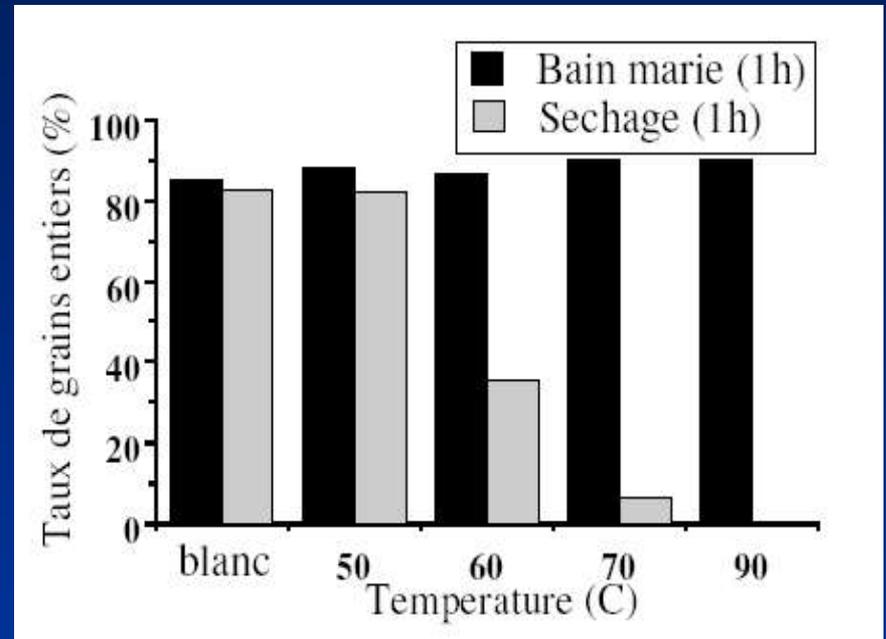
- Problème économique: comment sécher le riz rapidement, à moindre coût et sans fissurer le grain ?
- Problème industriel: comment prédire la conception, le réglage ou la commande optimale pour un riz donné ?
- Problèmes scientifiques:
 - quels sont les mécanismes de dégradation mécanique du produit lors du séchage ?
 - Quelles sont les variables clés et les stratégies de contrôle commande ?

Décomposition du problème

- Identifier la relation macroscopique entre séchage et fissuration
- Identifier le comportement au séchage dans tout le domaine couvert industriellement, en tenant compte des comportements transitoires (avec A. Duquenoy)
- Combiner les 2 modèles en un, valider à plusieurs échelles le simulateur, en statique et en dynamique
- Proposer un logiciel de « CAO » dédié
- Tester par simulation un algorithme de commande, valider sur séchoir semi-industriel (thèses M. Abud, 2000 ; I.C. Tréléa, 1997)
- Tester par simulation, un profil de séchage optimal pour le riz (thèse A. Olmos, 2003 ; MSc Sun, 1995)

Approche « Génie de la Réaction »

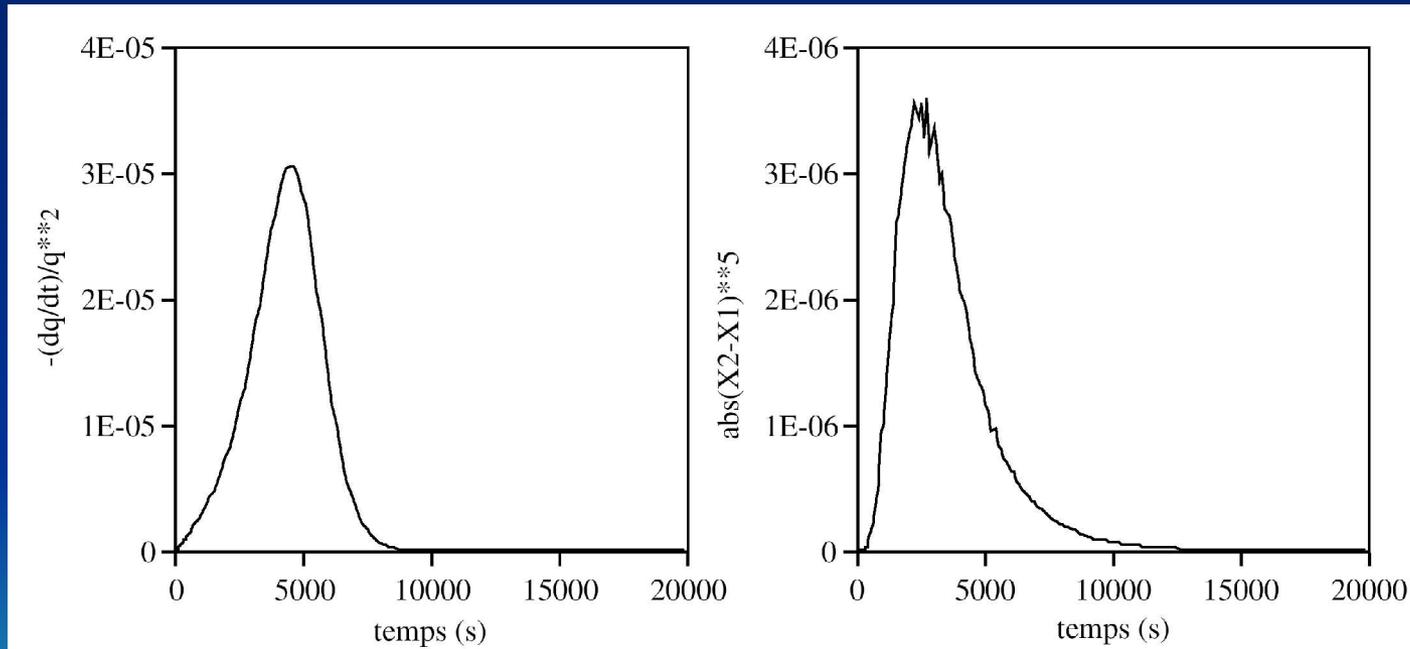
- *Taux de grains entiers = kg de grains intacts après usinage / kg de grains usinés (en %)*
- Envisager une réaction équivalente d'ordre n avec une relation d'Arrhénius et un lien avec la perte d'eau



Extrait d'un article co-écrit avec C. Bonazzi, J.J. Bimbenet et le CIRAD (1994)

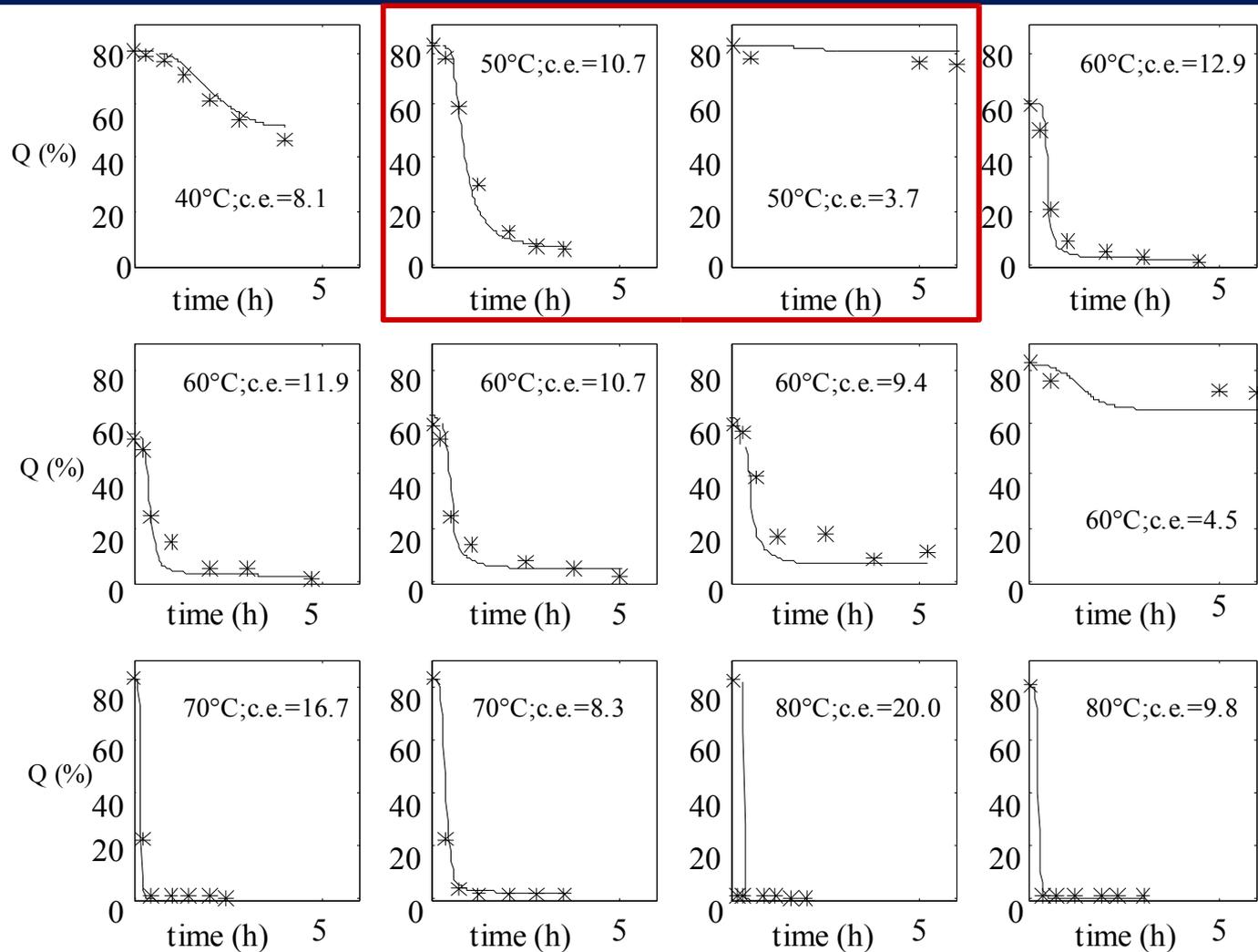
Inversion de l'équation qualité

Identification d'une corrélation entre le gradient de teneur en eau dans le grain et le coefficient k de $\frac{dQ}{dt} = k \cdot Q^n$



Extrait de la thèse de Miguel Abud (2000).

Validation du modèle « Qualité »



thèse de Miguel Abud (2000).

Modèle de séchage

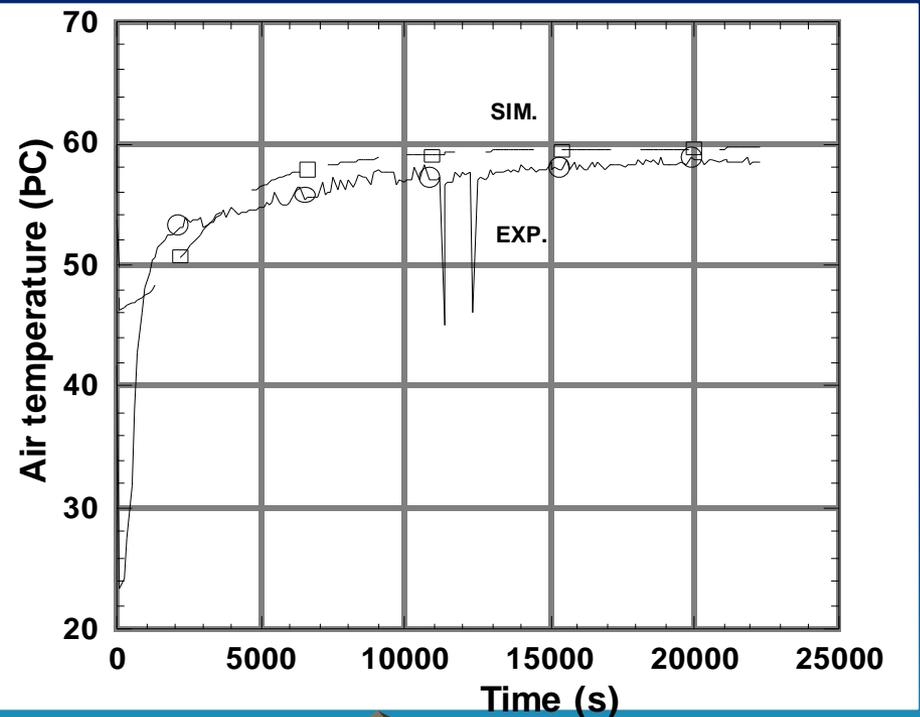
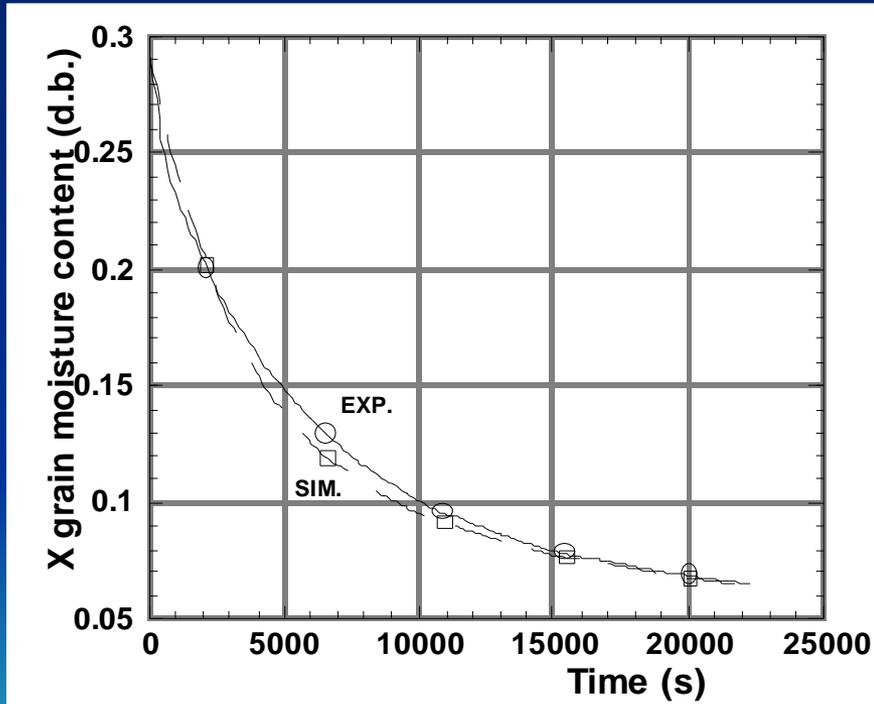
- Modèle « maïs » amélioré (initié avec A. Duquenoy, 1988), tire parti des résultats de la thèse de R. Lemaire (1997):
 - Comparaison modèles diffusifs / compartimentaux
 - Identifiabilité structurelle
- Identification des coefficients internes avec des expériences en conditions constantes.
- Validation sur des expériences couvrant tout le domaine observé dans un séchoir industriel, dont conditions non constantes.

Validation en couche épaisse

Note: le modèle est écrit et identifié en couche mince

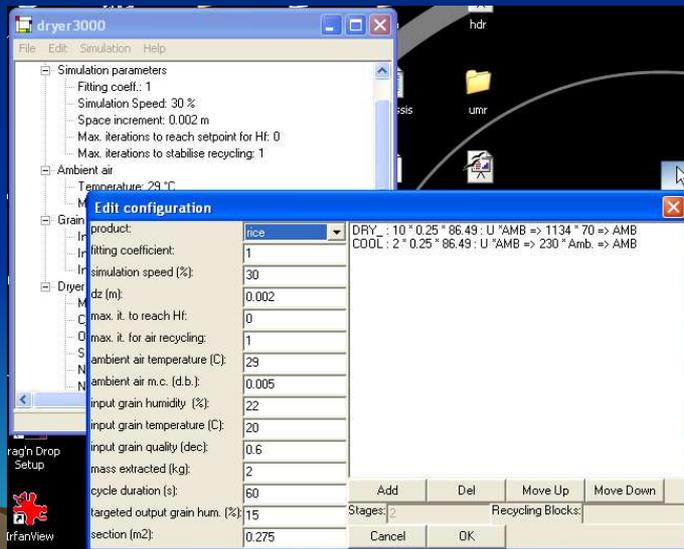
Humidité moyenne de toute la couche

Température de l'air sortant de la couche



Logiciel de simulation (CAO)

- Vendu à un fabricant
- Intègre le riz et le maïs (vers la généralité par l'approche orientée objet)
- Version en ligne sur internet dédiée au réglage uniquement
- Version « dynamique » pour le test de lois de commande.

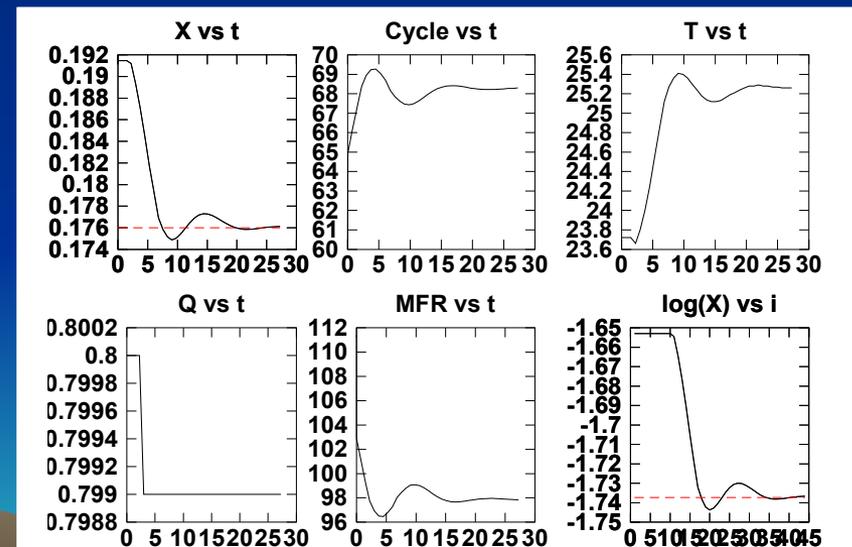
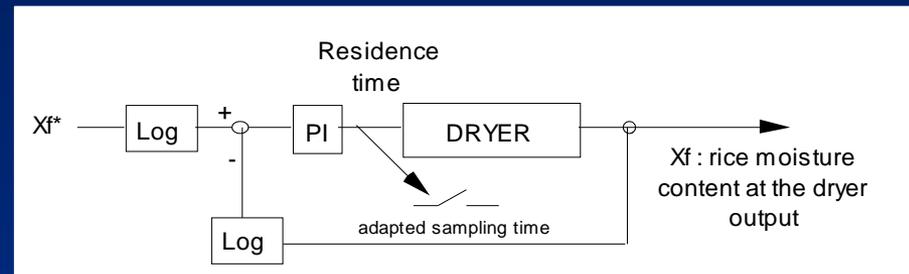


	Results (humidity, temperature, quality of dry grain)	
Experiments	Experimental	Simulated
200 kg/h, 50°C, Grain 15.9%, 21°C	13.5-14%, 26° C	13.7%, 27.4° C
155 kg/h, 65°C, Grain 16%, 19°C	11.9-12.6%, 30°C	12.5%, 32°C
260 kg/h, 65°C, Grain 16%, 19°C, 0.63	13.2-13.5%, 28°C, 0.62	13.3%, 31°C, 0.63
250 kg/h, 80°C, Grain 22%, 23°C, 0.58	17%, 32°C, 0.57	17.5%, 26°C, 0.58
120 kg/h, 70°C, Grain 22%, 25°C, 0.60	15%, 31°C, 0.52	14.8%, 25°C, 0.54

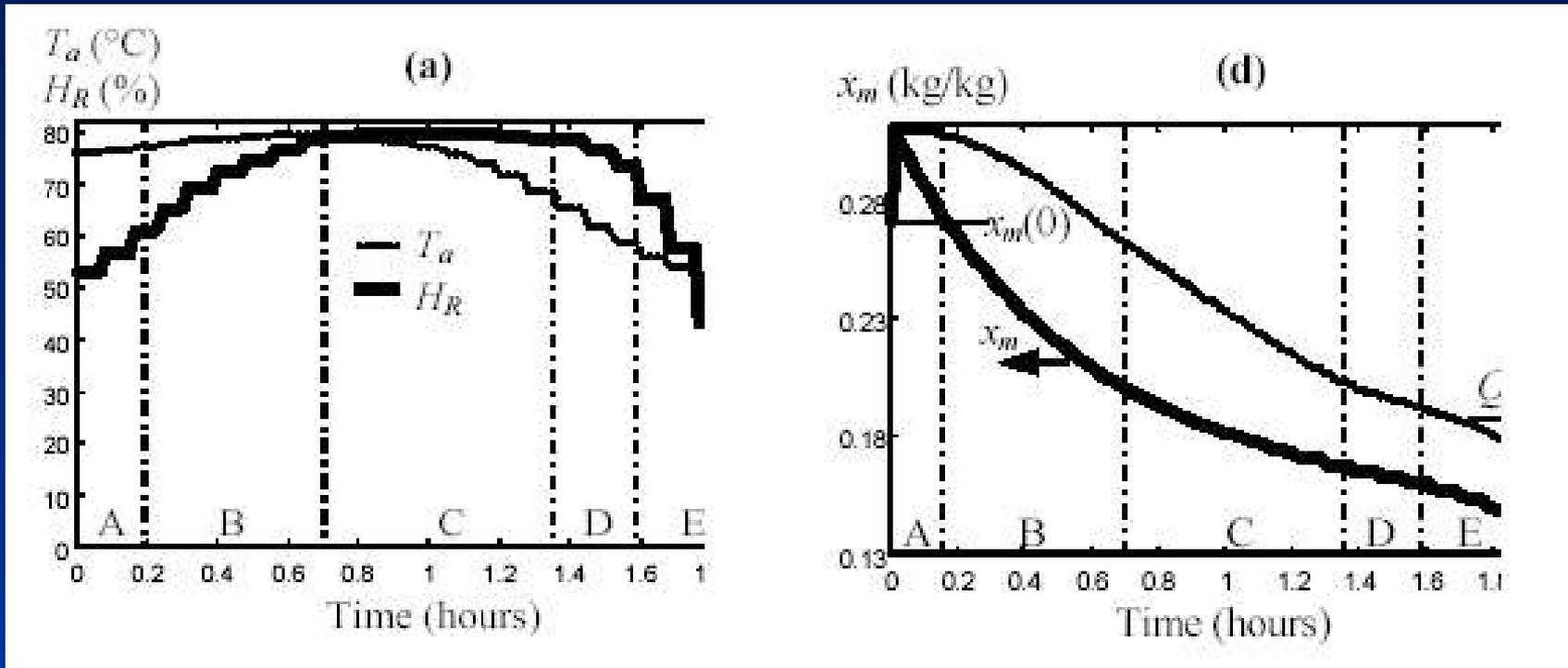
Extrait d'un article ENSIA / CIRAD (2001) sur le riz.

Test par simulation de lois de commande

- Pseudo-linéarisation du système par transformation des variables et adaptation de la fréquence d'échantillonnage
- Impossibilité de découpler X et Q (DEA de J.L. Nouafo et D. Jennane, 1993)



Recherche d'un profil optimal



Thèse d'Alejandra Olmos (2003), Coopération avec I.C. Tréléa (INAPG).

Perspectives de recherche

Modélisation – 1/2

Question

- Comment sélectionner le meilleur modèle parmi un jeu de modèles possibles concurrents ? Quelles expériences réaliser et avec quelle instrumentation ?

Objectifs

- En commençant par le cas du séchage, développer des méthodes d'étude sur l'identifiabilité structurelle et sur la planification d'expériences (avec le L2S, SUPELEC)

Principe:

- Plusieurs modèles concurrents [M1], [M2], etc. disponibles
- Outil expérimental instrumenté disponible
- Certain coefficients sont non disponibles dans la littérature
 - Quelle instrumentation rend le système structurellement identifiable ?
 - Quelles expériences vont discriminer et identifier le meilleur modèle ?

Modélisation – 2/2

Question

- Comment valoriser le savoir faire en modélisation et la richesse de la base de données expérimentales du laboratoire de séchage ?

Objectifs

- Construire une bibliothèque de modèles de séchage multi-produits utilisable dans des logiciels de simulation. Avoir une démarche la plus générique possible. Envisager une méthodologie optimale pour ajouter un nouveau produit. (avec C. Bonazzi, INRA)

Méthode:

- Identification systématique
 - Création d'une bibliothèque de modèles de séchage air chaud
 - Mise au point d'un critère de validation
 - Traitement informatisé par lot (discrimination / identification)
 - Création d'une librairie de simulation en C++ (programmation orientée objet)
 - Intégration dans des logiciels de simulation de séchoir

Mesure

Question

- Comment suivre des variables que l'on ne sait pas mesurer ?

Objectifs

- Développement du savoir-faire en analyse d'image (avec B. Heyd et équipe « instrumentation »)

Quelques projets

- Mesures dimensions 3D, estimation globale de la qualité par fusion des mesures
- Suivi de la distribution des tailles de bulles en foisonnement
- Suivi de la fissuration des grains de riz en séchage

Estimation

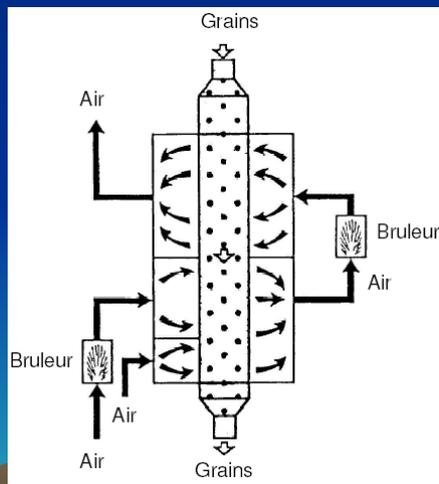
Question

- Comment suivre des variables que l'on ne sait pas mesurer ?

Objectifs

- En commençant par le cas du séchage, envisager une méthode générique de construction d'estimateurs. (avec le L2S, SUPELEC)

Principe



- Températures d'air mesurées aux entrées et aux sorties
- Teneur en eau de l'air constante en entrée
- Modèle de séchage connu
- Si l'humidité initiale du produit est connue, peut on prédire son humidité en sortie ?

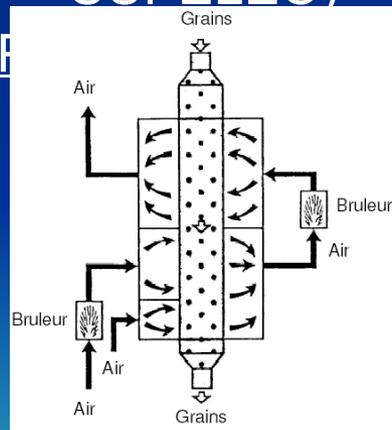
Commande

Question

- Comment améliorer la conduite en distribuant l'énergie de commande sur plusieurs actionneurs ?

Objectifs

- En commençant par le cas du séchage, envisager le développement d'une méthode de calcul de loi de commande multi-variable pour système à paramètres distribués (avec le L2S, SUPELEC)



- humidités initiale et finale du produit mesurées
- Températures d'air chaud et débit de produit réglables
- Modèle de séchage connu
- Peut on recalculer, en temps réel, les températures de séchage et le débit de produit optimaux ?

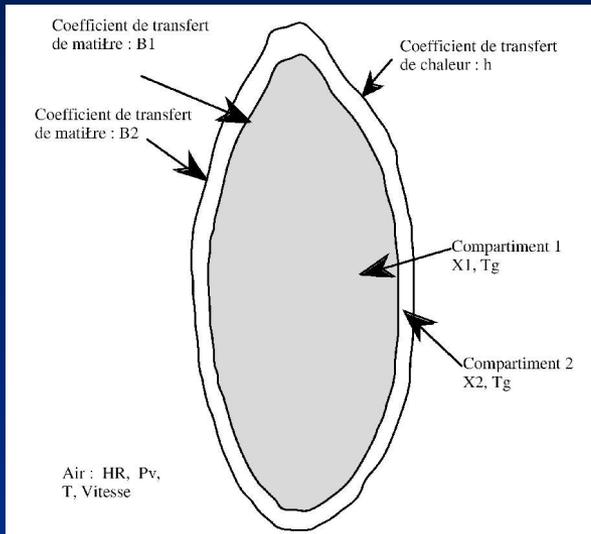
Sentiment général

- Le fait de travailler à l'interface entre 3 grandes disciplines est très motivants
 - On combine le meilleur de chaque discipline
 - On aborde des problèmes théoriques très complexes
 - On apporte des solutions avancées très concrètes aux industriels

Merci de votre attention

La discussion est ouverte.

Modèle « RIZ »



notation	signification	valeur	unités
ρ_{dm}	masse volumique anhydre	1500	$kg.m^{-3}$
Cp_{dm}	capacité calorifique (matière sèche)	1300	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Cp_w	capacité calorifique de l'eau	4180	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
L_v	chaleur latente de vaporisation de l'eau	2357000	$J.kg^{-1}$
a	surface spécifique	2000	m^{-1}
A_w	activité de l'eau	$e^{\frac{0,3190 - X_2}{0,0493} - 1,8994.(T_p - 2,5457)}$	-
P_{vsat}	Pression de vapeur saturante	$10^{7.5.T/(T+237.3)+2.7858}$	-

$$\bar{X} = \tau_1.X_1 + \tau_2.X_2$$

$$P_{vp} = A_w.P_{vsat}$$

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{B_1}{\rho_{dm}.\tau_1}.(X_2 - X_1)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{B_1}{\rho_{dm}.\tau_2}.(X_1 - X_2) + \frac{B_2.a}{\rho_{dm}.\tau_2}.(P_{va} - P_{vp})$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{h.a.(T_a - T_p) + B_2.a.(P_{va} - P_{vp}).L_v}{\rho_{dm}.(Cp_{dm} + \bar{X}.Cp_w)}$$

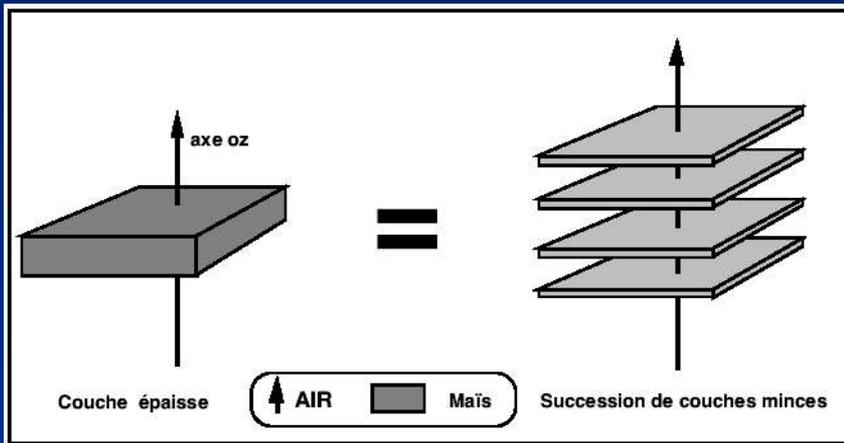
$$B_1 = 0,0132.e^{0,3083.T_p.\bar{X}}$$

$$B_2 = 2,304.10^{-9}.e^{0,0442.T_a}$$

$$h = 65.B_2.L_v$$

$$\frac{dQ}{dt} = -1,0316.10^{27}.(X_1 - X_2)^5.e^{\frac{-165470,0}{R.(T_p + 273,16)}}.Q^2$$

Intégration dans la couche épaisse



$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -V_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{a \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\Phi_m \cdot c_{pv} \cdot (T_g - T_a) + \Phi_c}{\rho_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -V_a \cdot \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\Phi_m \cdot a \cdot (1-\varepsilon)}{\rho_a \cdot \varepsilon}$$