

THESE

Présentée

à

**l'Ecole Nationale Supérieure des
Industries Agricoles et Alimentaires**

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

de l'ENSIA - Spécialité Génie des Procédés

par

Francis COURTOIS

Ingénieur ENSIA

sur

**AMELIORATION DE LA QUALITE AGRO-INDUSTRIELLE
DU MAIS PAR LA MODELISATION DYNAMIQUE DU SECHAGE**

Thèse soutenue le 27 septembre 1991 devant le jury composé de :

Professeur	RIBA J.P.	Président
Professeur	ARNAUD G.	Rapporteur
Professeur	BIMBENET J.J.	Rapporteur
Monsieur	LEBERT A.	Examineur
Monsieur	LASSERAN J.C.	Examineur
Monsieur	BLANDIN C.	Examineur

Travail réalisé au Service "Qualité et Débouchés Agro-Alimentaires" de
l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier André Lebert et Jean Claude Lasseran pour leur compétence, leur disponibilité et leur amitié. Je leur dois beaucoup.

A l'ENSIA, je remercie toute l'équipe du département GIA pour son support et plus particulièrement Jean Jacques Bimbenet et Albert Duquenoy pour leurs conseils toujours judicieux.

A l'ITCF, il me faut remercier tout le service "Qualité et Débouchés Agro-Alimentaires" et plus particulièrement G. Niquet, A. Lebras, P. Berhaut et C. Hasbrouck pour leur compétence et leur gentillesse.

Je remercie M. G. Arnaud, Directeur de recherche au CNRS, à la fois pour avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse et pour la discussion fructueuse que nous avons eue lors de la visite de son laboratoire.

Je remercie M. J.P. Riba, Professeur à l'ENSIGC de Toulouse, pour m'avoir fait l'honneur d'être membre de mon jury.

Je dois aussi remercier M. C. Blandin de la société Agro-Alliance, utilisateur potentiel de mes travaux, qui a accepté d'être membre de mon jury.

Je remercie également M. P. Fabry, de l'Université Bordeaux II et du LEPT de l'ENSAM, pour ses conseils en matière d'analyse numérique.

Enfin, je remercie ma femme Anne et ma fille Sophie pour avoir épargné mes heures de sommeil lors de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, que les organismes qui ont financé tout ou partie de ce travail trouvent ici mes remerciements : l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages et l'Association Nationale de la Recherche Technique (service CIFRE).

La poursuite des travaux en vue du pilotage automatique des séchoirs à maïs est financé par l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie.

NOTATIONS - SYMBOLES

AGPM	Association Générale des Producteurs de Maïs
AFRC	Agricultural and Food Research Council
CEMAGREF	Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts
ENSIA	Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires
ITCF	Institut Technique des Céréales et Fourrages
TPI	Thermodynamique des Processus Irréversibles

a	rapport surface / volume moyen d'un grain (m^{-1})
a_R	paramètre du régulateur AFRC*
A_g	surface de transfert d'un grain avec l'air (m^2)
A_w	activité de l'eau dans la zone 3 *
B_i	coefficient global d'échange d'eau entre les zones i et i+1 ($kg.s^{-1}.m^{-3}$)
c_p	capacité thermique massique à pression constante ($J.kg^{-1}.°C^{-1}$)
D_{ij}	débit d'eau entre les zones i et j ($kg.s^{-1}$)
E_a	énergie d'activation dans l'équation d'ARRHENIUS ($J.mol^{-1}$)
H	enthalpie (J)
KQ	coefficient de la cinétique de dégradation de la qualité (s^{-1})
K_{ij}	coefficient d'échange d'eau entre les zones i et j ($kg.s^{-1}$)
K_R	paramètre du régulateur AFRC ($kg^{-1}.m^2.s$)
L_v	chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$)
n	ordre de la cinétique de dégradation de la qualité *
P	pression (Pa)
Q	qualité amidonnaire : résultat du test de turbidité en absorbance *
R	constante des gaz parfaits ($8,31 J.M^{-1}.K^{-1}$)
S	section du séchoir (m^2)
t	temps (s)
T	température ($°C$)
V_a	vitesse de l'air ($m.s^{-1}$)
V_g	volume d'un grain (m^3)
X	teneur en eau du grain (kg d'eau/ kg de matière sèche) *
Y	teneur en eau de l'air (kg d'eau/ kg d'air sec) *
z	abscisse sur l'axe d'écoulement de l'air (m)

α	coefficient de transfert thermique grain / air par convection ($W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$)
β_p	coefficient de transfert d'eau grain / air relatif aux pressions ($kg.m^{-2}.Pa^{-1}.s^{-1}$)
ε	porosité = volume d'air dans 1 m ³ de séchoir rempli de grain *
Φ_m	densité de flux d'eau entre le grain et l'air ($kg\ d'eau.m^{-2}.s^{-1}$)
Φ_c	densité de flux de chaleur entre le grain et l'air, par convection ($W.m^{-2}$)
ρ	masse volumique réelle sèche ($kg.m^{-3}$)
τ_i	rapport du volume de la zone i au volume du grain *

* sans dimension

indices :

\emptyset	initial
1	zone centrale
2	zone médiane
3	zone périphérique
a	air
ahc	air hors couche
f	final
g	grain
t	à l'instant t
vsat	vapeur d'eau saturante
v	vapeur d'eau
w	eau liquide

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	5
INTRODUCTION.....	7
I - MODÉLISATION DE LA DÉGRADATION DE LA QUALITÉ	12
1 - Etude bibliographique.....	12
2 - Matériels et méthodes	15
a) Provenance du maïs.....	15
b) Réhumidification du maïs	16
c) Méthodes de détermination de la teneur en eau.....	16
d) Le "Test de turbidité"	16
e) Protocole expérimental	18
f) Méthodes numériques	19
3 - Etude expérimentale.....	19
a) Etude du paramètre temps.....	19
b) Etude du paramètre température	20
c) Etude du paramètre teneur en eau.....	21
d) Etude combinée des paramètres	22
4 - Ajustement du modèle, simulations.....	23
5 - Conclusion.....	26
II - MODÉLISATION DU SÉCHAGE EN COUCHE MINCE.....	28
1 - Etude bibliographique.....	28
a) Flux et forces en présence.....	28
b) Transferts grain / air	29
c) L'intérieur du grain	30
d) Les constantes relatives au maïs	31
2 - Matériels, méthodes.....	33
a) Préparation du maïs.....	33
b) Séchoir expérimental.....	34
c) méthode d'Euler	35
d) Simplex	35
3 - Description du modèle	36
4 - Résultats.....	39
a) Séchage en conditions constantes.....	39
b) Séchage en conditions variables	45
c) Séchage et dégradation de la qualité	48
5 - Conclusion.....	48
III - MODÉLISATION DU SÉCHAGE EN COUCHE ÉPAISSE.....	50
1 - Bibliographie, équations, hypothèses	50
2 - Résolution numérique.....	52
3 - Simulations.....	54
4 - Conclusion.....	59
IV - SIMULATIONS D'UN SÉCHOIR INDUSTRIEL.....	61
A - EN RÉGIME STATIONNAIRE	61
1 - Etude bibliographique.....	61
2 - Matériels, méthodes.....	65
a) Séchoir pilote.....	65
b) Résolution numérique.....	66
3 - Résultats.....	68
4 - Conclusion.....	74
B - EN RÉGIME TRANSITOIRE.....	75
1 - Etude bibliographique.....	75
2 - Matériels et méthodes	80
a) Instrumentation du séchoir ITCF	80
b) Méthode numérique.....	81

3 - Résultats.....	82
a) Etude du système en boucle ouverte.....	82
b) Etude du système en boucle fermée.....	85
4 - Conclusion.....	90
CONCLUSION.....	91
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	94

INTRODUCTION

LE CONTEXTE TECHNICO-ECONOMIQUE DU MAIS FRANCAIS

Deuxième production végétale française, le maïs représentait en 88/89 (figure 1) une production de $14,4 \cdot 10^9$ kg dont $7,8 \cdot 10^9$ kg à l'exportation (AGPM, 1989).

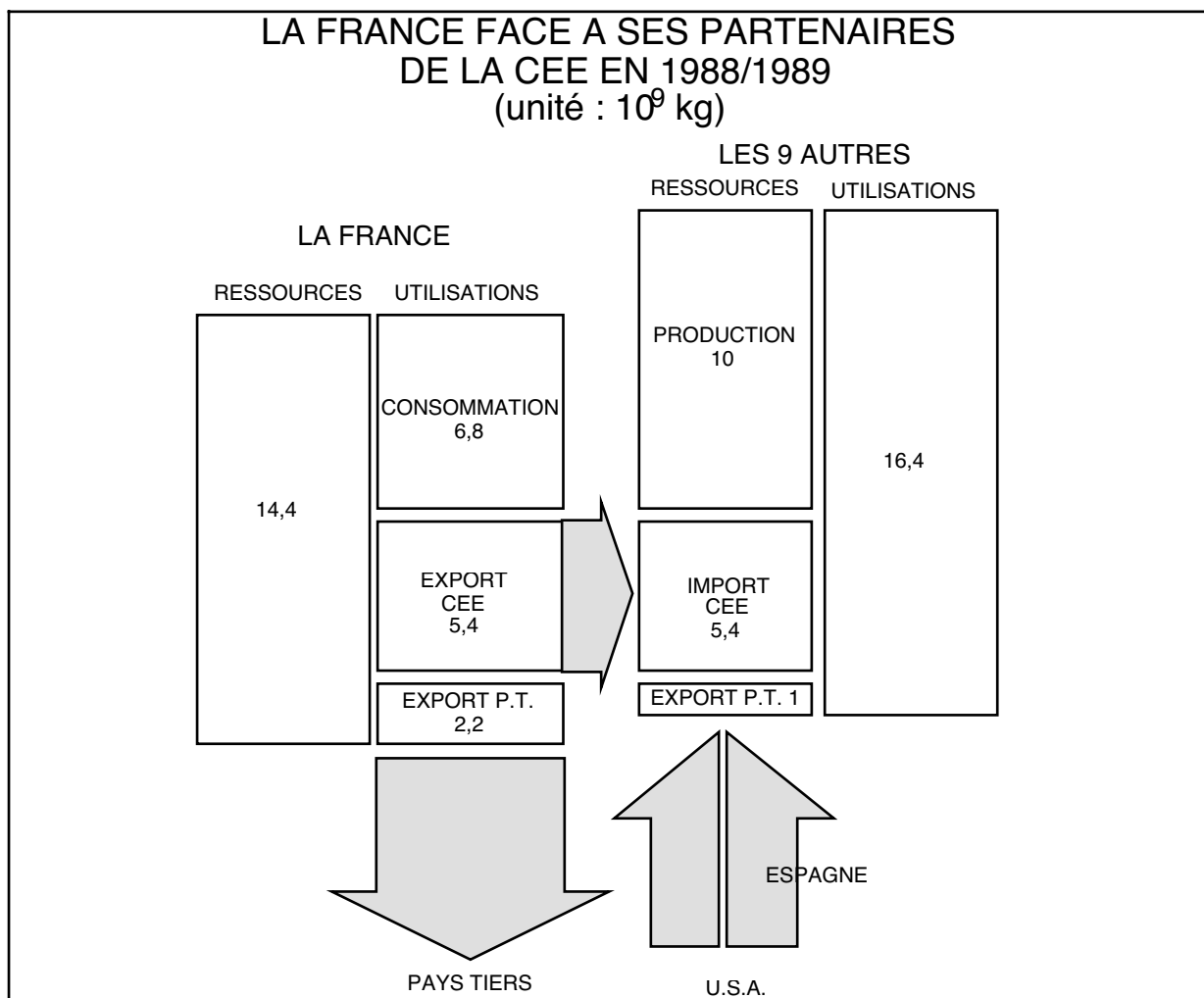


Figure 1 : Le maïs dans la CEE (AGPM, 1989).

Le grain, pour être stocké, doit d'abord être ramené à une humidité comprise entre 14 et 15% (base humide) : c'est le rôle du séchage. En effet, le stockage du grain humide provoque des altérations :

- perte du pouvoir germinatif,
- prolifération des moisissures dont certaines génèrent des substances toxiques,
- perte de matière sèche par respiration.

Ce dernier point est très important quand on sait que le maïs est payé, indirectement, au poids de matière sèche.

A titre d'exemple, un grain à 30% d'humidité a une intensité respiratoire 400 fois plus importante qu'à 15%.

Le séchage du maïs est effectué, en organismes collecteurs, sur de gros séchoirs industriels. Les débits élevés de ces séchoirs s'opposent bien souvent à la production d'un grain de qualité, utilisable par les industries de l'aval : amidonnerie et semoulerie principalement (figure 2), dont la demande est en constante croissance (25 à 50% selon la zone géographique considérée). Il en résulte une concurrence potentielle avec les maïs américains (importés directement ou via l'Espagne) et sud-européens (Italie, Grèce), moins séchés car étant récoltés à une humidité plus faible, donc a priori de meilleure qualité.

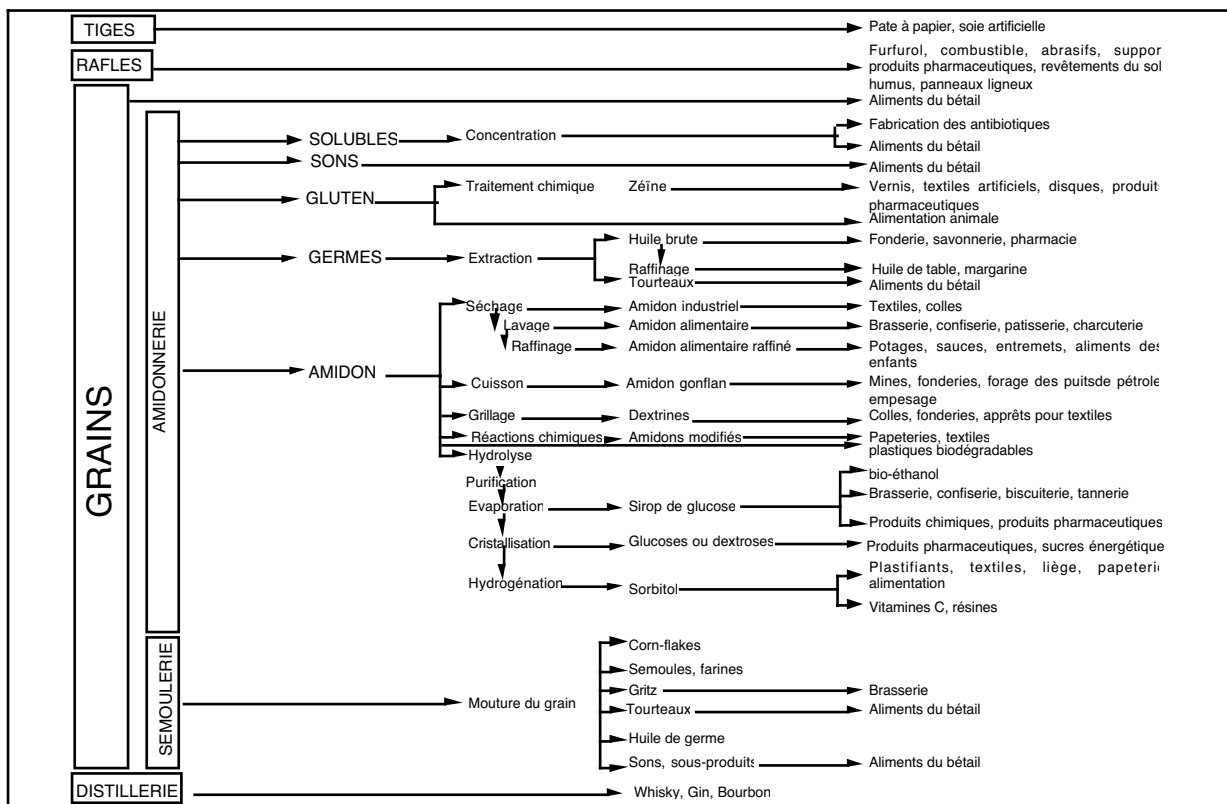


Figure 2 : Utilisations du maïs (AGPM, 1989)

La "qualité amidonnaire" du maïs séché est devenu un objectif et une contrainte pour toute la filière. Et il se trouve que le premier facteur de dégradation de la qualité amidonnaire du maïs est le séchage. C'est pourquoi, on demande maintenant aux séchoirs à maïs d'être économes en énergie, d'avoir un gros débit évaporatoire et de préserver la qualité du grain séché.

Les causes de la dégradation de la qualité amidonnaire sont examinées plus loin (chapitre 1). Mais le principal acteur de la dégradation est bien connu : c'est le couple temps de séchage - température du grain pendant le séchage ; on note aussi une forte influence de la teneur en eau du grain sur les effets du couple temps - température. N'ayant aucun outil de prévision quantitative, on considère généralement qu'il faut baisser la température de l'air chaud de séchage pour obtenir

une qualité amidonnière acceptable, mais c'est au détriment de la capacité de production.

Un des problèmes est dû au fait que les agriculteurs récoltent tous au même moment : l'organisme collecteur est alors soumis à un afflux massif de grains qu'il ne peut pas toujours sécher immédiatement. C'est pourquoi on observe souvent un préstockage humide, dans des conditions allant du simple tas dans la cour jusqu'à l'inertage en cellule hermétique, qui provoque toujours une dégradation du maïs (baisse de la qualité amidonnière, perte de matière sèche, moisissures...).

La qualité du grain c'est donc aussi, dans une moindre mesure, la rapidité du passage de la récolte au séchoir.

Et, pour faire face à l'afflux massif de grains qui en résulte, en pratique plusieurs solutions sont utilisées :

- augmenter la capacité de séchage par ajout de séchoir(s) supplémentaire(s) ou remplacement par un plus gros modèle, mais le surcoût n'est pas toujours amorti,
- changer la disposition des séchoirs (fonctionnement en série plutôt qu'en parallèle...), faire du ressuage (repos du grain en cellule sans ventilation)...
- préstocker en cellule avec ventilation de maintien mais la qualité du grain baisse,
- augmenter la température de séchage pour accroître le débit de grain séché, malheureusement la qualité amidonnière diminue très rapidement alors que les risques d'incendie croissent,
- sortir le grain du séchoir entre 18 et 19% d'humidité pour terminer son séchage en "dryeration" (ventilation du grain en cellule après une phase de relaxation), c'est très avantageux mais pas toujours possible.

En effet, des études faites à l'ITCF (LASSERAN, 1977) ont montré que l'utilisation de la dryeration ou du ressuage diminuait la dégradation du grain tout en augmentant le rendement. Car le repos du grain s'accompagne d'un rééquilibrage de son humidité accélérant le séchage suivant ; il faut donc tenir compte des gradients internes au grain.

Le défi pour la France est donc triple : il faut concevoir des séchoirs dont :

- les coûts de fonctionnement restent les plus faibles,
- les débits évaporatoires soient maintenus,
- la qualité du grain en sortie soit améliorée.

Or l'amélioration des séchoirs ou l'expérimentation d'idées nouvelles sont coûteuses. En outre, la faible durée des campagnes de récolte (et donc de séchage), 4 à 6 semaines selon les régions, limite les possibilités d'essais.

On comprend mieux l'intérêt d'avoir un modèle de simulation de séchoirs répondant aux problèmes :

- de dimensionnement et d'agencement des éléments d'un séchoir,
 - d'optimisation du fonctionnement du séchage au sens large (ressuage...);
- et cela sous 2 angles : productivité et qualité.

Du fait de la conception des séchoirs français (détaillée dans le chapitre 4), les phénomènes suivants devraient, en plus de la dégradation de la qualité, être pris en compte :

- phases transitoires (sauts de température d'air)
- phases de relaxation,
- phases de refroidissement,

- recyclage d'air,
- recondensations.

Notre étude fait suite à celle de DAUDIN (1982) car sur tous les points précédemment annoncés, seul le recyclage d'air est pris en compte par son modèle.

Très peu de modèles de séchage intègrent la qualité, quelle qu'elle soit, et en fait, aucun pour le maïs. L'étude la plus proche concerne le pouvoir germinatif du blé (NELLIST, 1981) sur des séchoirs anglais produisant des semences. Par ailleurs, il n'existe aucune étude expérimentale approfondie relative à l'influence du séchage sur la qualité amidonnaire d'un grain de maïs. L'essentiel de la connaissance sur ce sujet est concentré à l'ITCF. En fait, au cours de cette étude, STEINMETZ, à l'ENSIGC de Toulouse, a entamé une recherche concernant l'impact du séchage sur la qualité amidonnaire du maïs avec un critère de qualité et une méthodologie différents.

Par ailleurs, il n'existe pas de modèle réellement dynamique (valable en régime transitoire). Généralement, les modèles sont basés sur une équation empirique ajustée sur des cinétiques en conditions constantes (BAKKER ARKEMA et *al.*, 1974). Ils sont donc inadaptés pour simuler un séchoir industriel français, à maïs, à flux mixtes.

Ceci explique qu'il n'y ait pratiquement pas de modèle de séchage capables de simuler les arrêts et sauts de séchage.

De plus, les modèles intégrant le gradient de teneur en eau au sein du grain sont généralement longs à calculer et complexes à identifier (ABID et *al.*, 1988). Leur utilisation pour simuler un séchoir requiert un puissant ordinateur.

Au début de cette étude, il existait très peu de recherches théoriques sur les problèmes d'écoulement de grains et d'aérodynamique (TOFTDAHL OLESEN, 1987). Depuis, les travaux d'ARNAUD et FOHR à Poitiers et ceux de FLICK et CHAABOUNI à Antony ont permis d'éclairer nos connaissances sur ces problèmes. Cependant, leur approche ne vise pas, pour le moment, à simuler complètement le fonctionnement d'un séchoir.

Enfin, il existe très peu de travaux visant à utiliser un modèle de séchage pour réguler le fonctionnement du séchoir (WHITFIELD, 1987a). Cela est dû au fait qu'un modèle dynamique soit pratiquement indispensable.

Notre étude avait pour objectif la mise au point d'un outil d'optimisation, statique ou dynamique, de conception, de réglage et de conduite des séchoirs. Le modèle devait permettre, en plus des critères classiques de débit évaporatoire, de consommation énergétique et d'humidité du produit, de tenir compte du facteur qualité.

Notre travail a débuté par la mise au point d'une équation de dégradation de la qualité. Cette équation est ensuite reprise dans un modèle dynamique de séchage du maïs en couche mince basé sur une méthode compartimentale. Les coefficients d'échange sont identifiés à l'aide de cinétiques en conditions constantes.

La résolution numérique du séchage en couche épaisse a nécessité la mise en œuvre de méthodes sophistiquées. Toutefois, plusieurs hypothèses simplificatrices ont permis d'obtenir une méthode rapide dont les résultats sont identiques.

La méthode de décomposition du séchoir en couches épaisses est ensuite décrite. L'application est réalisée sur le séchoir expérimental de l'ITCF que l'on peut considérer comme un séchoir industriel à l'échelle 1/4. Les données simulées sont analysées sous forme de courbes.

Enfin, le modèle dynamique est utilisé pour étudier le comportement dynamique d'un séchoir et pour régler et tester un algorithme de conduite automatique. Cet algorithme est adapté de celui mis au point par l'AFRC pour la conduite des séchoirs à blé.

Pour chaque chapitre, les résultats obtenus à l'aide des modèles successifs sont comparés, autant faire que possible, aux résultats expérimentaux.

Ces travaux ont déjà amené les publications et communications suivantes :

F. COURTOIS, A. LEBERT, A. DUQUENOY, J.C. LASSERAN, J.J. BIMBENET
Modelling of drying in order to improve processing qualities of maize.
à paraître dans *Drying Technology* en 1991, N°4.

F. COURTOIS, A. LEBERT, A. DUQUENOY, J.C. LASSERAN, J.J. BIMBENET
Modélisation du séchage du maïs.
Proceedings du 4ème Colloque Université-Industrie, Marseille, juin 1989.

F. COURTOIS, A. LEBERT, A. DUQUENOY, J.C. LASSERAN, J.J. BIMBENET
Modelling of drying in order to improve processing qualities of maize.
Seventh International Drying Symposium, Prague (Tchécoslovaquie), août 1990.

Note Importante :

Ce mémoire comporte 4 chapitres s'enchaînant logiquement. Chacun a une structure du type article et est, dans une certaine mesure, autonome : la bibliographie, la numérotation des figures, tableaux et équations sont propres à chaque chapitre.

I - MODÉLISATION DE LA DÉGRADATION DE LA QUALITÉ

1 - Etude bibliographique

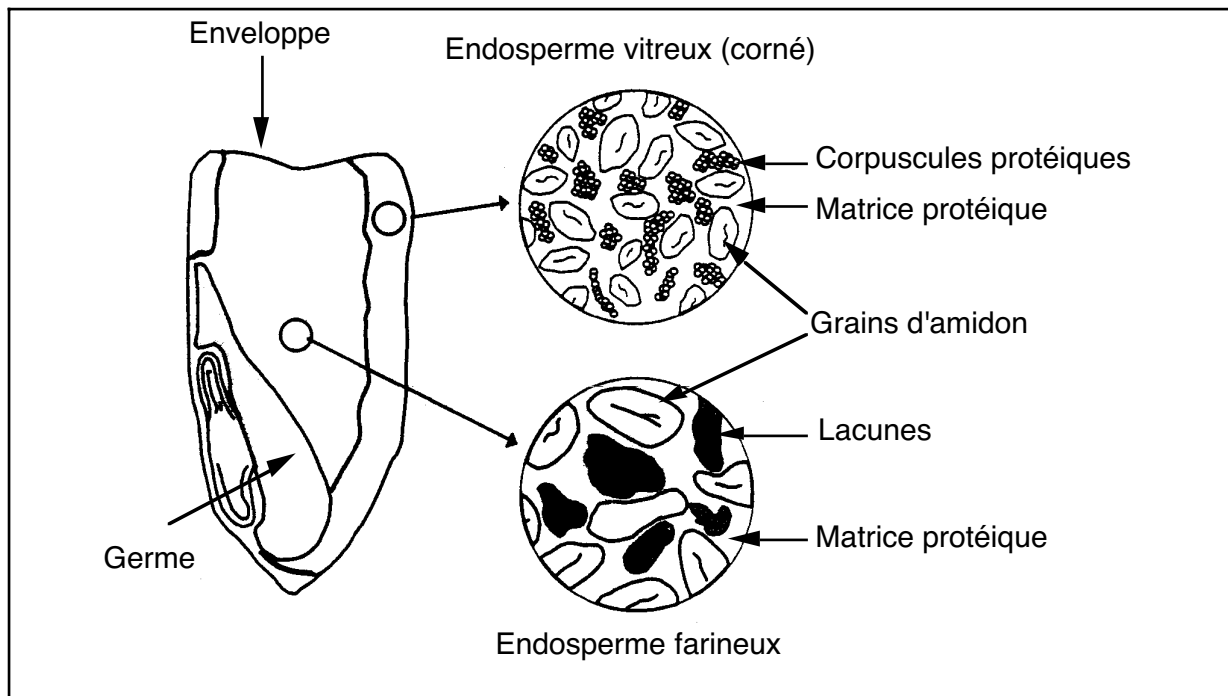


Figure 1 : constitution d'un grain de maïs d'après LE BRAS (1989)

Le grain de maïs est décomposable en 3 éléments (figure 1) :

- l'enveloppe (environ 5% de la matière sèche),
- l'endosperme ou albumen (environ 85% de la matière sèche) qui contient l'essentiel de l'amidon et des protéines de réserve du grain,
- le germe (environ 10% de la matière sèche) contenant l'essentiel des lipides et des protéines fonctionnelles du grain.

L'endosperme, ou albumen, peut-être décomposé en 2 parties distinctes (LE BRAS, 1989) :

- l'endosperme corné ou vitreux constitué d'un réseau dense de grains d'amidon et de corpuscules protéiques ; situé en périphérie, il est le plus exposé au séchage,
- l'endosperme farineux constitué d'un réseau lâche de gros grains d'amidon enchâssés dans une matrice protéique comportant des lacunes ou vacuoles remplies d'eau à l'état humide.

Les proportions de ces 2 parties varient d'une variété à l'autre.

LE BRAS (1989) considère d'une part que la combinaison chaleur+deshydratation au sein de l'endosperme vitreux est propice à la contraction du réseau protéique (emprisonnement des grains d'amidon) et à la coagulation des protéines qui verraient évoluer leur densité de 1,3 vers 1,4. Et, d'autre part, que la combinaison chaleur+humidité au sein de l'endosperme farineux est propice à la gélatinisation de l'amidon (à partir de 60°C) qui verraient évoluer sa densité de 1,5 vers 1,4.

En fait d'autres phénomènes interviennent au cours du séchage :

- dégradation de la lysine et de certains autres acides aminés, formation de ponts di-sulfure... (WALL *et al.*, 1975 ; LUPANO et ANON, 1987)
- migration de l'huile du germe vers la périphérie de l'endosperme, brunissement du grain (LENOIR et ALAIN, 1988)...
- décollement des membranes et formation de fissures liées au stress mécanique subi par le grain (FARBER, 1976 ; GUNASEKARAN et PAULSEN, 1985)

Il faut noter que ces fissures accélèrent la pénétration du flux de chaleur au sein du grain et donc sa dégradation.

Dans la mesure où la qualité marchande du maïs est affectée par la présence de fêlures ou de grains brisés, certains auteurs ont cherché à étudier l'évolution des tensions mécaniques au sein d'un grain de maïs soumis à un séchage à haute température. Les études sont expérimentales (GUSTAFSON et MOREY, 1979 ; GUNASEKARAN et PAULSEN, 1985 ; ITUEN *et al.*, 1986) ou bien théoriques (GUSTAFSON *et al.*, 1979 ; HAGHIGHI et SEGERLIND, 1988a ; LITCHFIELD et OKOS, 1988) par l'utilisation d'un modèle souvent très complexe. Et malheureusement, il y a peu de comparaisons entre simulations et expériences. La température de l'air semble cependant le facteur prépondérant de cette dégradation mécanique.

La qualité amidonnaire du maïs se définit très simplement par le rendement de la séparation amidon/protéines de l'endosperme. La figure 2 représente le schéma fonctionnel d'une amidonnerie : le procédé opère uniquement en milieu liquide, essentiellement sur des suspensions. Les séparations sont basées sur les différences de densité entre les constituants, particulièrement dans le cas de la centrifugation de la suspension amidon+protéines dans une batterie d'hydrocyclones (LE BRAS, 1989).

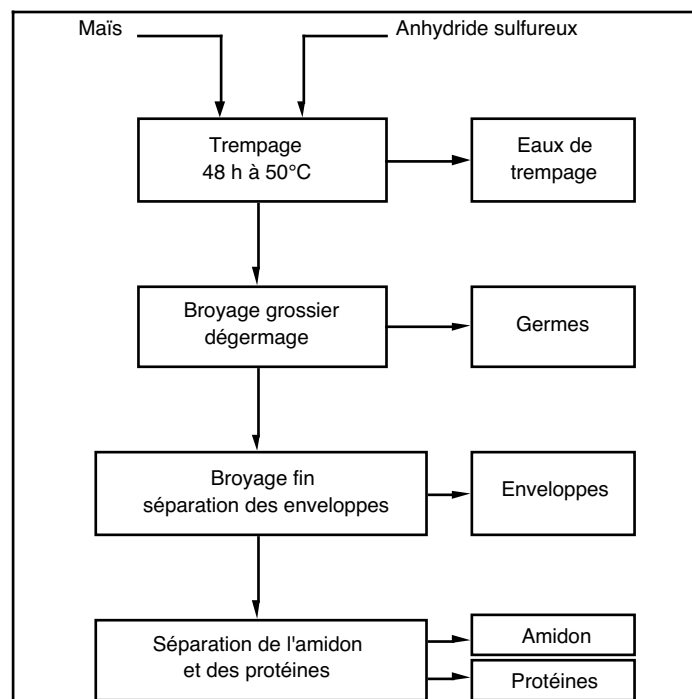


Figure 2 : Schéma fonctionnel de l'amidonnerie d'après LE BRAS (1989)

Un premier test de qualité amidonnaire d'un échantillon de maïs séché consisterait donc à mesurer le rendement de la séparation amidon / protéines ou la pureté de la fraction d'amidon, à l'aide d'une amidonnerie pilote permettant de traiter des lots de petite quantité. Ce test est en cours de développement au sein de l'ITCF (laboratoire d'A. LE BRAS). On peut considérer que c'est la méthode de référence pour mesurer la qualité amidonnaire du maïs.

Plus simplement, il existe un test appelé "test de sédimentation" qui présente l'avantage de pouvoir traiter de plus petites quantités (200 g) mais nécessite tout de même 4 h pour obtenir le résultat et est d'une précision moyenne (lecture visuelle). Le principe, simple, consiste à laisser décanter dans un cylindre gradué une suspension d'amidon et de protéines extraite d'un broyat de maïs. STEINMETZ (1990) et son équipe ont retenu ce test comme critère de qualité amidonnaire pour leur étude sur le maïs mais semblent confrontés à des problèmes pratiques de mise en œuvre.

Un test indirect, mais d'une mise en œuvre plus aisée : le "test de turbidité", témoigne du passé thermique des grains. Il est basé sur la mesure de la solubilité des protéines salino-solubles et thermosensibles par spectrophotométrie. Le principe, simple, consiste à extraire dans une solution saline ces protéines du broyat puis à les coaguler à 100°C et à mesurer l'opacité de la solution. Il faut noter que le mot "turbidité" est impropre dans la mesure où l'on considère le pourcentage de lumière transmise à travers la solution. Ce test est très populaire car il nécessite peu de produit (25 g) et s'effectue en 15 minutes environ.

Bien que les protéines salino-solubles, albumines et globulines principalement, ne représentent que 15% des protéines totales du grain et soient situées pour 70% dans le germe (LANDRY, 1979), elles permettent assez bien de discriminer les maïs et de les classer en terme de rendement, ou mieux, de taux de recouvrement en amidon et donc de "qualité amidonnaire".

Dans la mesure où notre travail est centré sur la modélisation et non sur la sélection ou la mise au point d'un test de qualité, c'est ce test que nous avons retenu et, par la suite, "qualité" sera assimilé à "résultat du test de turbidité".

Il faut remarquer qu'il existe d'autres tests plus ou moins rapides et fiables (LASSERAN, 1991) mais que celui-ci est le plus utilisé.

La plupart des auteurs s'accordent à reconnaître que le premier facteur de dégradation du maïs est la température de l'air de séchage, allant même jusqu'à préconiser des températures maximales selon la qualité désirée : LE BRAS (1989), NELLIST (1981) pour le pouvoir germinatif du blé (production de semences). FREEMAN (1973) affirme, quant à lui, avoir observé qu'un maïs était d'autant plus dégradé qu'il est plus humide mais il faut rappeler que la durée du séchage, et donc d'exposition à la chaleur, s'allonge, pour un même objectif, avec l'humidité initiale du produit.

Finalement, il est apparu intéressant de pouvoir étudier séparément l'influence de chacune des variables importantes : qualité Q, temps t, température du grain Tg, teneur en eau du grain X, sur la dégradation de la qualité. C'est justement l'intérêt de la méthodologie de NELLIST et BRUCE (1987) utilisée pour modéliser la dégradation du pouvoir germinatif et de la valeur boulangère du blé au cours de son séchage. Le principe et la mise en œuvre sont très simples : une couche mono-granulaire de produit est enfermée dans un sachet hermétique vidé de son air, ce sachet est soumis à un choc thermique à teneur en eau constante par immersion dans un bain-marie.

Cette méthode permet de ne faire varier qu'un paramètre à la fois puisque le produit ne sèche pas, et facilite donc l'analyse des résultats. On retiendra que son principal défaut est de faire l'hypothèse que les phénomènes sont identiques- au moins d'un point de vue qualitatif- lors d'un choc thermique avec ou sans séchage. Mais de toute manière, c'est le moyen le plus simple d'obtenir la base de connaissances indispensable à l'établissement du modèle.

Le résultat du test, noté Q , s'il est exprimé en absorbance, est donc corrélé avec la concentration des protéines extraites dans la solution saline. On peut donc écrire a priori :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -K_Q \cdot Q^n \quad [1]$$

où

K_Q est le coefficient de la cinétique de dégradation assimilée à une réaction chimique unique. Généralement, ce coefficient est relié à la température T_g par une loi d'Arrhenius dépendant de la teneur en eau X . Et

n est l'ordre de la cinétique : généralement 0, 1 ou 2.

C'est la façon la plus usitée pour modéliser les courbes expérimentales de dégradation de la qualité au cours du séchage : KAREL et *al.* (1987) pour la vitamine C dans les pommes de terre, NELLIST et BRUCE (1987) pour la qualité boulangère du blé, SOKHANSANJ et *al.* (1985) pour le pouvoir germinatif du blé...

Notons que l'approche de SOKHANSANJ et *al.* (1985) est intéressante en ce sens qu'elle vise, par une approche stochastique, à exprimer la dispersion des résultats simulés autour de la moyenne en tenant compte de la variabilité naturelle des caractéristiques des grains (teneur en eau, pouvoir germinatif...).

NELLIST (1981), LESCANO et TYRRELL (1987), ainsi que de nombreux autres auteurs, ont utilisé une méthode probabiliste pour rendre compte de la dégradation du pouvoir germinatif des grains au cours du séchage. Le pourcentage de germination d'un lot de grains séchés est représenté par une loi normale dépendant du temps de séchage et d'un écart-type de dégradation qui est lui-même relié aux conditions de séchage (ajustement numérique).

On retiendra que les méthodes stochastiques ont l'avantage d'apporter la notion de dispersion des résultats autour de leur moyenne ce qui est parfaitement adapté aux produits biologiques, mais qu'elles nécessitent généralement plus d'expériences et de temps de calcul que les modèles déterministes. C'est pourquoi nous avons préféré mettre au point un modèle déterministe.

2 - Matériels et méthodes

a) Provenance du maïs

C'est essentiellement le maïs de l'ITCF-Boigneville de la variété DEA (corné-denté) récolté et égrené à la main, qui a été utilisé, mais aussi :

- le maïs de la Coopérative de Dormans (51), variété DEA (corné-denté),
- le maïs de la Coopérative Agricole de Haute Normandie (27), variété DEA,
- le maïs du sud-ouest de la France, variété VOLGA (denté).

La conservation s'est faite en chambre froide (en épi ou en grain) et l'obtention d'une humidité donnée, ou conditionnement, par un séchage lent dans un conditionneur : séchoir à température basse (inférieure à 30°C).

Des études ITCF antérieures avaient, en effet, montré que le stockage en chambre froide sur de courtes périodes et le conditionnement n'avaient pas d'influence sur la qualité des grains.

b) Réhumidification du maïs

Pour certaines expériences, en particulier pour obtenir des grains d'une teneur en eau supérieure à 0,430 (30%, base humide), il a été nécessaire de réhumidifier des maïs de deux types :

- maïs récolté à faible humidité pendant la campagne,
- maïs stocké et séché naturellement en épi à l'air libre (crib) pour les expériences hors campagne.

On laisse tremper les grains dans de l'eau déminéralisée pendant environ 24 h, à température ambiante (0 à 20°C), en remuant de temps à autre. Le maïs est ensuite égouté et laissé au repos pendant au moins 24 h pour permettre une ré-homogénéisation de sa teneur en eau et un séchage superficiel léger : le maïs doit reprendre l'apparence et la consistance d'un maïs naturellement humide. On peut approcher une teneur en eau particulière par un séjour au conditionneur et un contrôle régulier de l'évolution de ce paramètre.

En fait la méthode de réhumidification, que peu d'auteurs précisent, varie sensiblement avec les contraintes pratiques rencontrées.

c) Méthodes de détermination de la teneur en eau

La méthode de précision (dite "méthode pratique sur grains entiers", norme AFNOR V03-708), utilisée à l'ITCF, est basée sur la mesure de la perte de poids consécutive à un séjour de 38 h à 130°C (étuve multicellulaire CHOPIN) d'environ 15 g de grains entiers dans une coupelle ouverte.

On obtient alors la teneur en eau du maïs en en kg d'eau par kg de maïs sec :

$$X = \frac{\text{Pesée avant étuve} - \text{Pesée après étuve}}{\text{Pesée après étuve} - \text{Tare}}$$

L'appareil "CHOPIN rapide" reprend le même principe mais avec environ 5 g de grains de maïs broyés, à 210°C pendant 5 à 10 minutes. L'eau vaporisée passe à travers un cylindre contenant du carbure de calcium et réagit avec lui pour donner un gaz inflammable. La disparition de la flamme correspond donc à la fin de la vaporisation. Cette méthode est presque aussi fiable que la précédente pour un temps complet d'exécution de moins de 15 minutes.

Pour le conditionnement à une humidité précise, on utilise aussi des appareils électroniques, moins précis mais très rapides, basés sur le principe d'une mesure capacitive (SUPERMATIC de FOSS-ELECTRIC, MULTIGRAIN de DICKEY-JOHN...).

d) Le "Test de turbidité"

La figure 3 rappelle le principe général du mode opératoire décrit dans LE BRAS et BEAUX (1984) avec ses 2 échelles de notation. On retiendra que (LE BRAS et CHARENTON, 1989) :

- Le résultat est exprimé en pourcentage de lumière transmise à travers la solution (%T).
- La teneur en eau du maïs doit être comprise entre 0,150 et 0,205 sans quoi le broyage fin ne peut s'effectuer correctement (refus élevé au tamis).
- L'extraction s'opère en milieu non tamponné ce qui semble très gênant pour des protéines ; de plus la qualité de la gomme arabique n'est pas stable.
- Le résultat du test est très sensible au respect des durées du broyage fin, de l'extraction et de l'immersion à 100°C.
- Le résultat du test est très sensible à la qualité du refroidissement après immersion à 100°C.

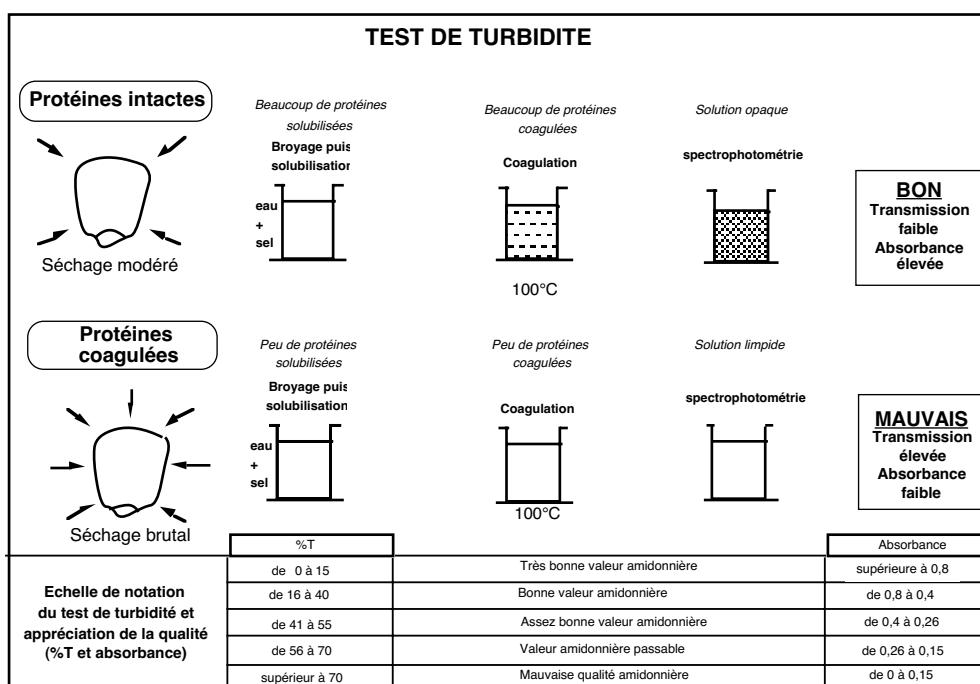


Figure 3 : Principe général du test de turbidité et échelles de notation d'après LE BRAS (1989).

Une étude (LE BRAS, 1982) a montré que si l'écart-type de répétabilité (sur le résultat exprimé en pourcentage de lumière transmise) n'est pas mauvais (entre 0,6 et 1,7 points pour un opérateur expérimenté), l'écart-type de reproductibilité, lui, est assez médiocre (de 1 à 5 points selon les laboratoires). Cela signifie que trouver 10 points d'écart dans les résultats du test pour un même échantillon, sur une échelle qui en compte 100, n'est pas aberrant. Ceci peut aboutir, quand le résultat est exprimé en absorbance, à un pourcentage d'erreur très élevé (qualité faible).

Par ailleurs, LASSERAN (1991) constate que, quand le test indique une mauvaise qualité, dans un cas sur deux, l'échantillon présente une bonne qualité amidonnaire presque toujours confirmée par le test de sédimentation. Inversement, un échantillon jugé bon par le test l'est réellement dans 90% des cas.

Dans les transactions commerciales basées sur le test de turbidité, l'acheteur apparait donc plus favorisé que le vendeur.

Il s'agit bien d'un test rapide et non d'une analyse chimique fine.

e) Protocole expérimental

Le protocole expérimental est adapté de la méthode utilisée par NELLIST et BRUCE à l'AFRC, en Angleterre, pour l'étude de la dégradation du pouvoir germinatif et de la qualité boulangère du blé lors de son séchage.

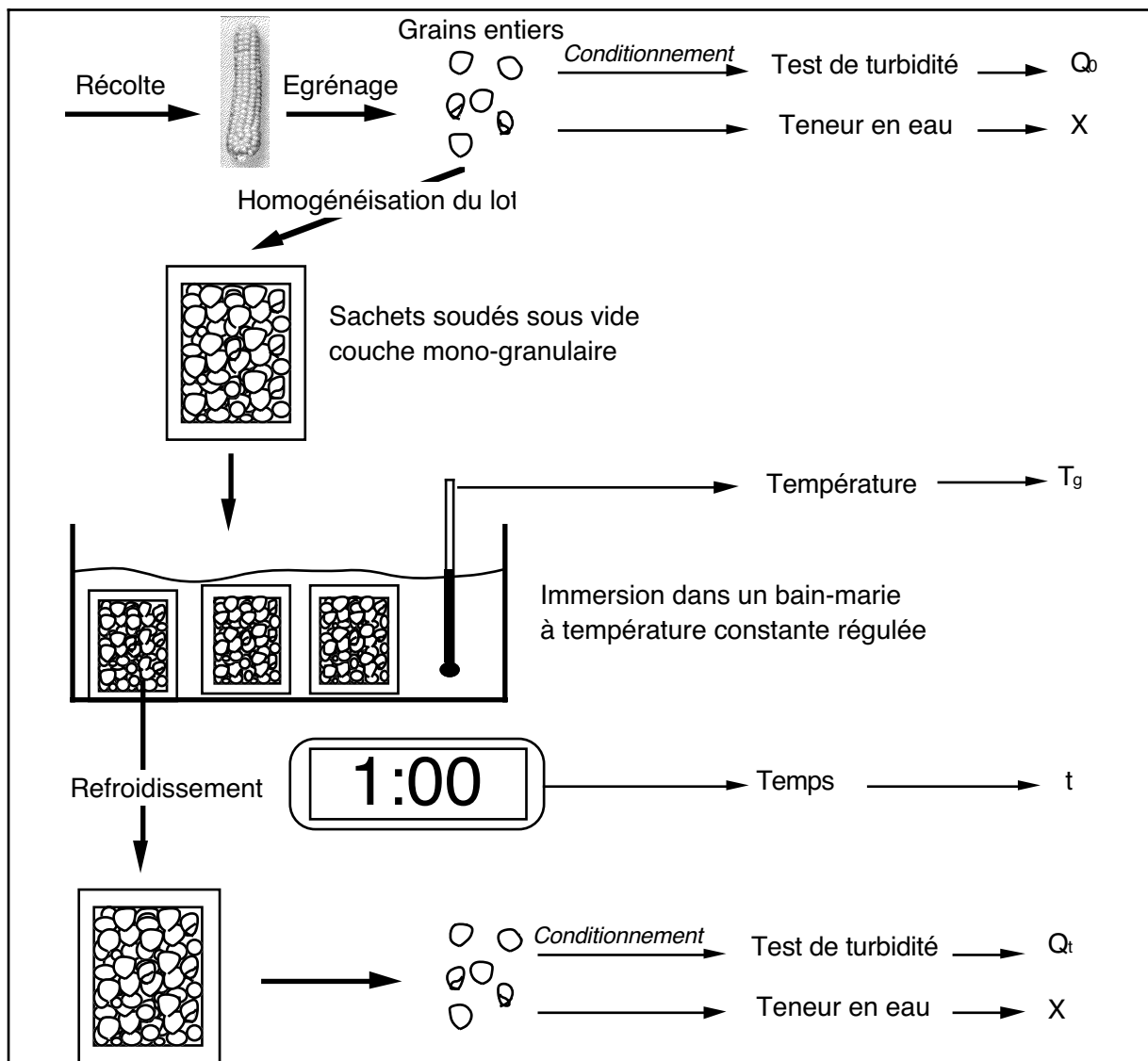


Figure 4 : Principe d'une expérience

Le principe expérimental est schématisé sur la figure 4. Les sachets en plastique fin sont remplis d'une couche mono-granulaire d'environ 60 g de grains entiers de maïs dont on connaît la teneur en eau X et la qualité Q_0 (résultat du test de turbidité exprimé en absorbance). Les sachets sont ensuite soudés sous vide d'air, immergés dans un bain-marie (température réglée) pendant une durée t donnée. On refroidit le sachet en sortie du bain-marie puis on conditionne le grain à une teneur en eau voisine de 0,17 (nécessaire à l'analyse) avant de mesurer sa qualité Q_t .

La teneur en eau X du grain est mesurée, en fait, avant et après l'immersion afin de vérifier l'absence de séchage pendant l'expérience.

Une expérience avec un thermocouple placé au centre d'un grain, lui-même situé au centre du sachet, a permis d'observer l'équilibre thermique du grain en moins de 5 minutes malgré la présence d'air dans le sachet (mauvaise étanchéité au niveau du passage du thermocouple dans le sachet). Nous avons donc assimilé, par la suite, la température T_g du grain à celle du bain-marie.

En liaison avec le service statistique de l'ITCF, nous avons prévu d'utiliser 3 sachets pour un point d'une courbe : juste compromis entre diminution des bruits (expérimentaux, naturels) et limitation du nombre d'expériences. En fait, au vu de la surcharge de travail que cela entraînait, nous ne l'avons fait que pour quelques courbes, pendant la phase exploratoire.

f) Méthodes numériques

L'ajustement des paramètres a été réalisé avec un algorithme combinant successivement les méthodes :

- ALIENOR (CHERRUAULT, 1986),
- Hooke & Jeeves (LEBERT, 1991),
- Simplex (LEBERT, 1991).

3 - Etude expérimentale

a) Etude du paramètre temps

En immergeant, dans le bain marie, autant de sachets que de points expérimentaux désirés et en les retirant chacun à un temps donné, on peut tracer la cinétique de dégradation d'un maïs donné à une température donnée. On a ainsi représenté des cinétiques à basses et hautes températures (figures 5 et 6). On observe que pour des absorbances inférieures à 0,05 (i.e. 95 % de transmission) la courbe expérimentale est très bruitée et d'interprétation difficile. Ceci est probablement dû à la mesure au spectrophotomètre.

En fait, cette zone de qualité $[0, 0,05]$ représente des grains très abîmés que le test ne sait pas discriminer. Elle ne présente donc pas d'intérêt pratique.

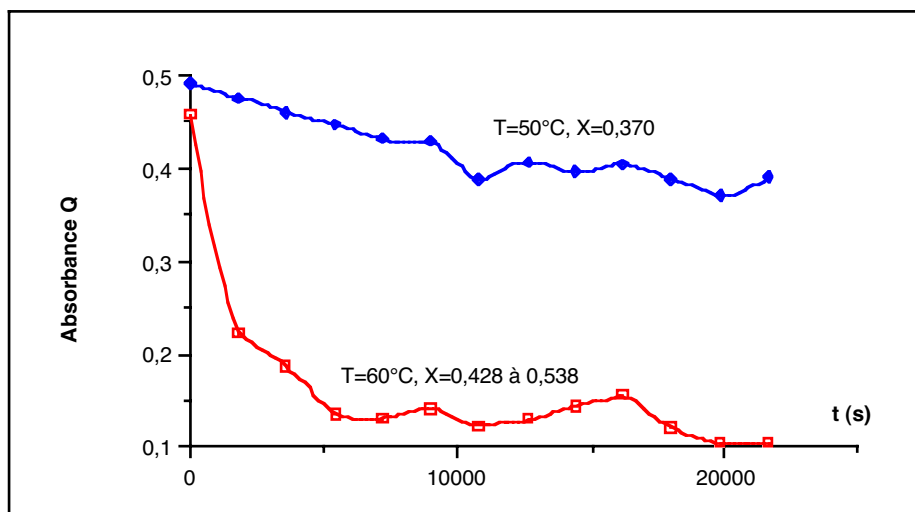


Figure 5 : Cinétiques de dégradation de la qualité du maïs à basse température. A 60°C, la teneur en eau du maïs n'est pas uniforme sur toute la courbe.

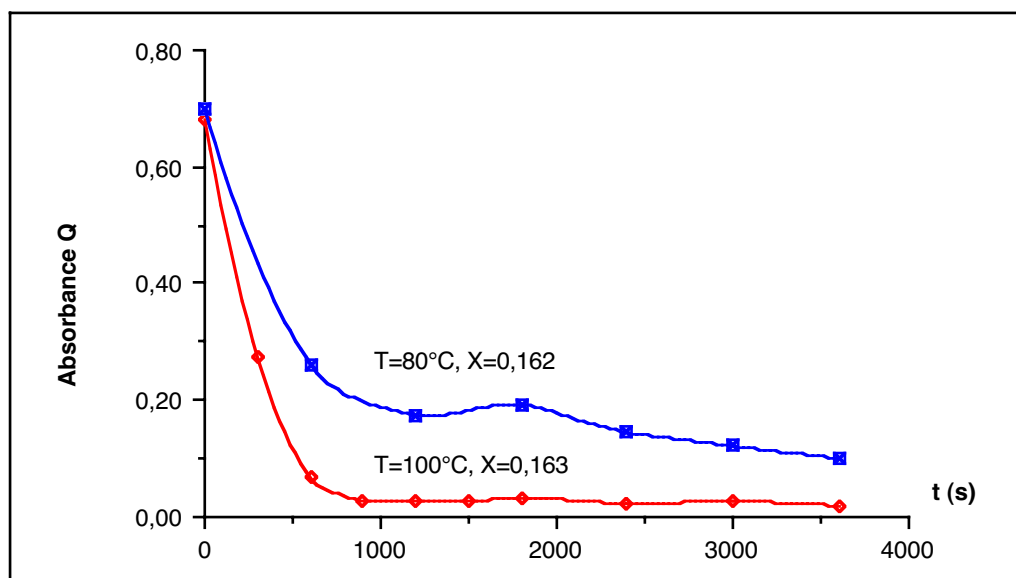


Figure 6 : Cinétiques de dégradation de la qualité du maïs à haute température.

b) Etude du paramètre température

La seule connaissance a priori sur le sujet est que plus le grain est chaud plus il est dégradé. En utilisant un lot de maïs homogène dont on immerge les sachets dans des bains-marie de températures différentes, on obtient la courbe de la figure 7. L'allure sigmoïde traduit deux faits :

- tant que la température du grain reste inférieure à 50°C, la dégradation reste imperceptible à l'échelle d'un temps de séchage,
- au dessus de 100°C, des problèmes d'ordre pratique empêchent d'observer des différences de qualité.

Des mesures sur séchoirs industriels menées par l'ITCF ont montré que la température des grains, au cours de leur séchage, varie essentiellement entre 50 et

70°C, zone sensible de la courbe. Il apparaît donc clairement que la moindre erreur dans l'estimation de la température du grain se répercute fortement dans la prédiction de sa qualité.

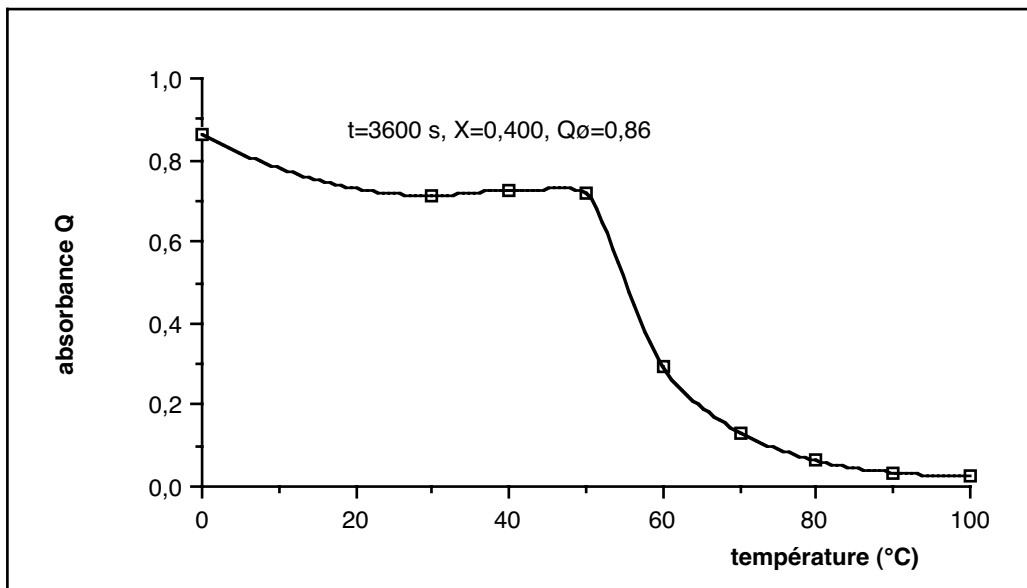


Figure 7 : Influence de la température du bain sur la qualité finale du maïs après 1 heure d'immersion.

c) Etude du paramètre teneur en eau

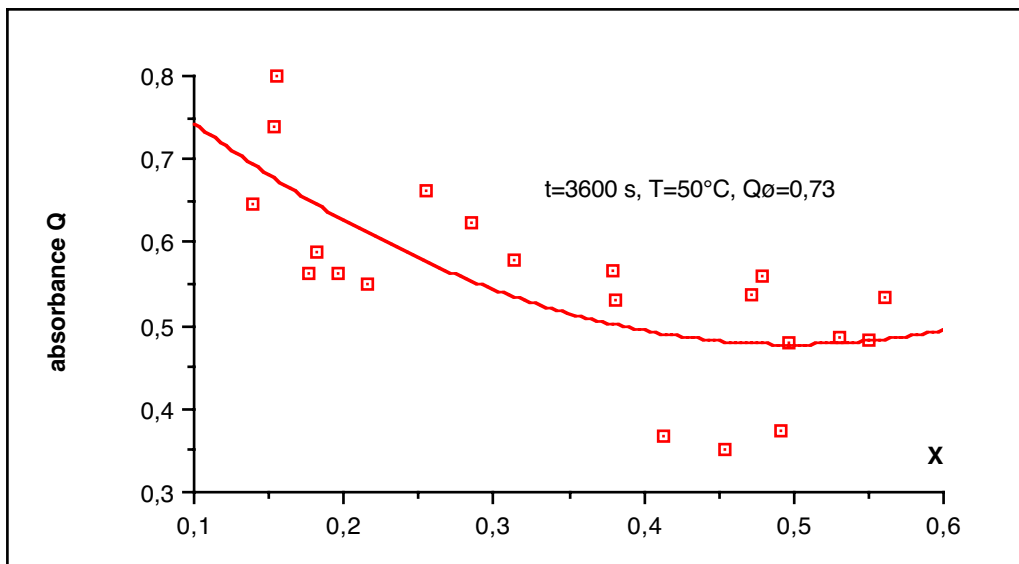


Figure 8 : Influence de la teneur en eau des grains sur la qualité finale du maïs après 1 heure d'immersion à 50°C.

En conditionnant un lot homogène de maïs à plusieurs teneurs en eau et en immergeant chacun des sachets correspondants dans un même bain marie pendant

une heure, on obtient les courbes des figures 8 et 9. On remarque qu'elles présentent toutes deux une allure parabolique sans que l'on puisse confirmer la présence d'un extremum vers 0,5 kg d'eau par kg de maïs sec.

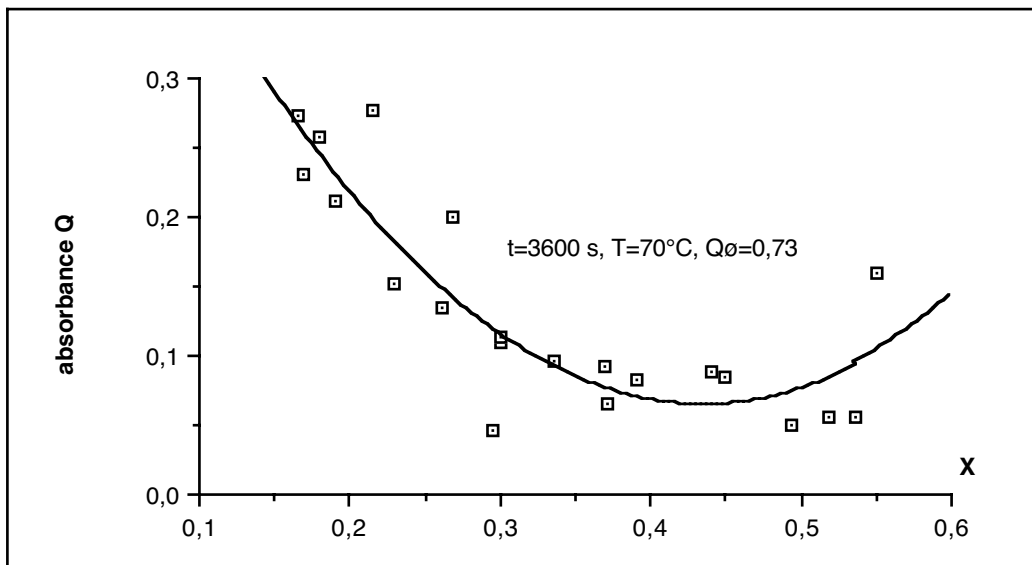


Figure 9 : Influence de la teneur en eau des grains sur la qualité finale du maïs après 1 heure d'immersion à 70°C.

En fait, durant les deux années de cette étude, la sécheresse a empêché d'étudier la dégradation des maïs très humides. De plus il est pratiquement impossible d'avoir un maïs réhumidifié à plus de 0,6 de teneur en eau sans qu'il soit mouillé en surface.

d) Etude combinée des paramètres

A partir des résultats précédents, afin de permettre un ajustement numérique consistant du modèle, une série d'expérimentations a été réalisée pour couvrir de la meilleure façon possible le domaine de fonctionnement des séchoirs. Du fait de nombreuses contraintes pratiques et climatiques en particulier, aucun plan d'expérience n'a pu être utilisé.

Sur la figure 10 qui regroupe une centaine d'expériences, on retrouve les résultats des 2 effets précédents, de manière combinée. Ce graphique représente l'influence de la température du bain T et de la teneur en eau des grains X sur leur qualité finale Q_f après immersion d'une heure (Q_0 variable selon les expériences). Il apparaît clairement que Q_f est d'autant plus basse que température et teneur en eau sont élevées.

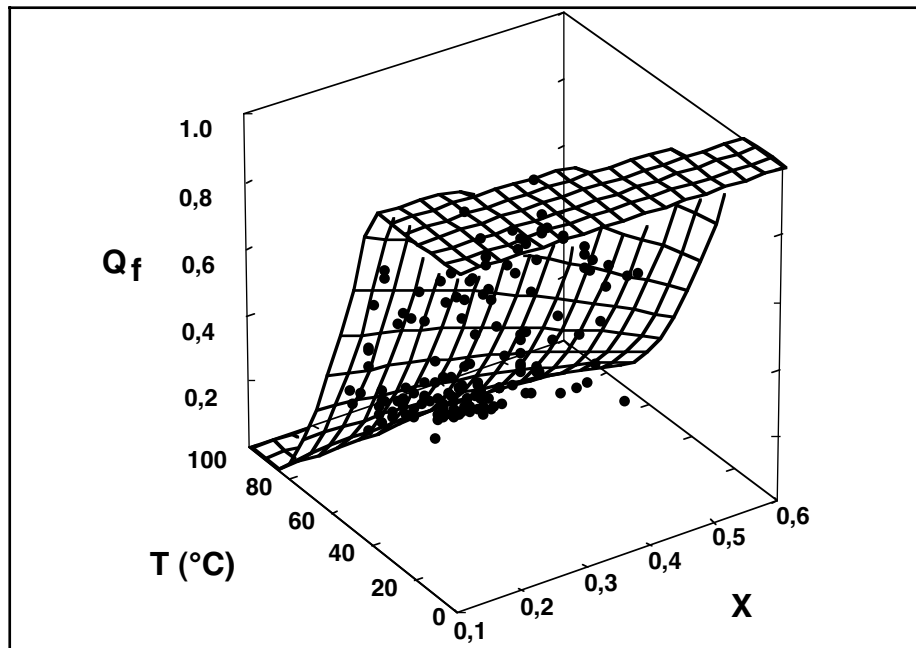


Figure 10 : Influence de la teneur en eau des grains et de la température du bain sur la qualité finale du maïs après 1 heure d'immersion.

4 - Ajustement du modèle, simulations

On pose les hypothèses suivantes :

- les phénomènes relatifs à la dégradation de la qualité sont identiques, au moins qualitativement, qu'il y ait séchage ou non,
- la dégradation de la qualité amidonnaire est assimilée à une réaction chimique unique d'ordre entier,
- la teneur en eau des grains est constante au cours de l'expérience,
- le temps d'échauffement du grain au début de l'immersion est négligeable (T_g constante au cours de l'expérience et égale à la température réglée du bain),
- le temps de refroidissement du grain en fin d'immersion est négligeable (pas de dégradation),
- les sachets expérimentaux sont homogènes et uniformes en température, teneur en eau et qualité (chaque grain est identique aux autres),
- les lots de maïs sont homogènes et uniformes en température, teneur en eau et qualité (variabilité nulle).

Le premier point n'a pu être étudié expérimentalement mais sera vérifié numériquement au cours des prochains chapitres. C'est le dernier point, ajouté aux incertitudes du test, qui est le plus discutable : en sortie du champ, la teneur en eau des grains peut varier de plus de 10 points d'humidité (jusqu'à 50% de la teneur en eau moyenne), la qualité initiale peut, elle aussi, varier d'environ 10%. De plus l'eau n'est pas répartie uniformément dans le grain, sa maturité est variable et donc ses caractéristiques biochimiques aussi.

Pour avoir le meilleur ajustement possible, en dépit de ces problèmes, les expériences ont été multipliées.

Afin de déterminer n , l'ordre de la cinétique, les courbes :

- $\text{Log}(Q)$ fonction de t (ordre 1),
- Q^{-1} en fonction de t (ordre 2),
- Q^{-2} en fonction de t (ordre 3),

ont été tracées pour chaque fichier cinétique (Q exprimé en absorbance). Il est apparu clairement (figure 11a et 11b) que c'est la courbe Q^{-1} fonction de t (réaction d'ordre 2) qui est la plus linéaire.

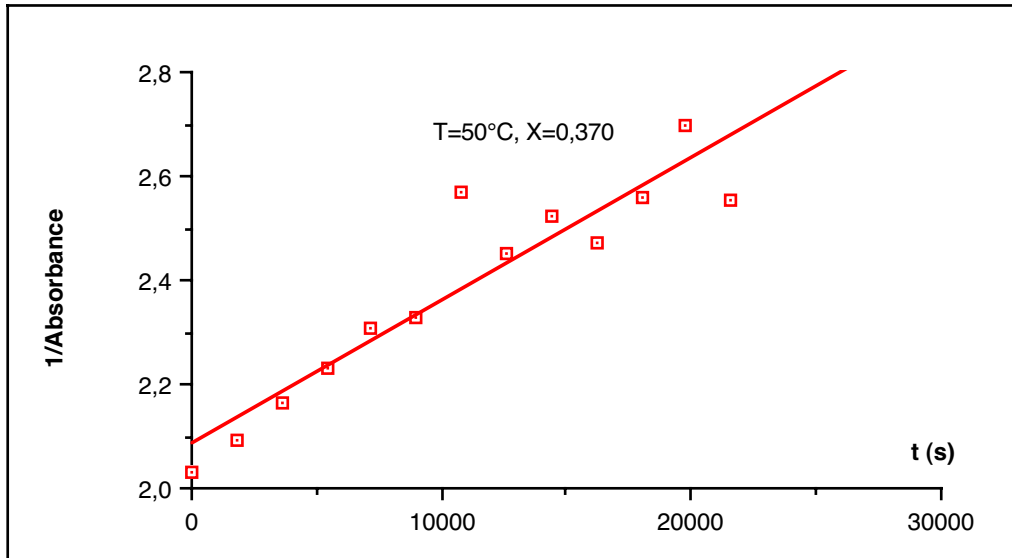


Figure 11a : Linéarisation d'une cinétique à 50°C (ordre 2).

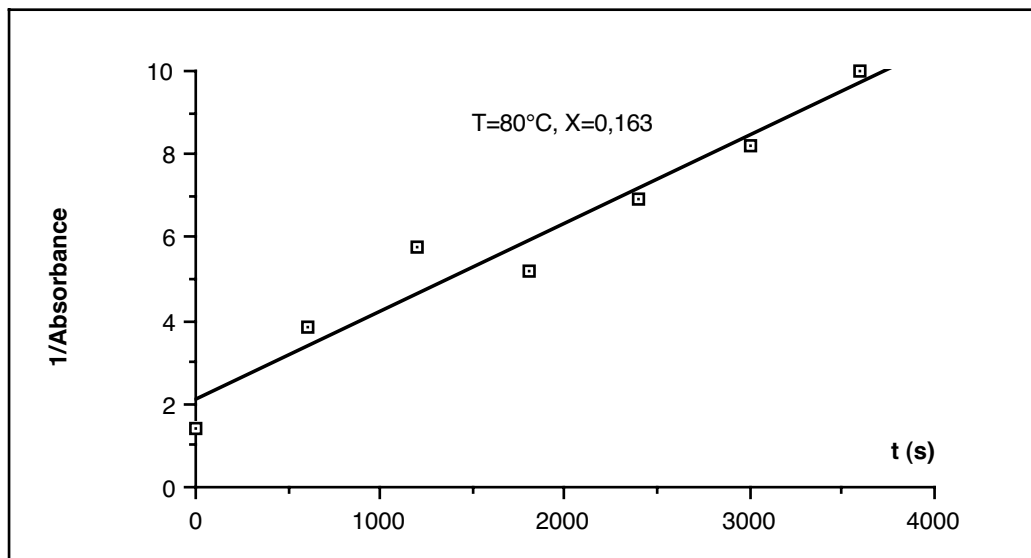


Figure 11b : Linéarisation d'une cinétique à 80°C (ordre 2).

La cinétique est donc d'ordre 2 car en dérivant :

$$\frac{1}{Q} = K_Q \cdot t + \text{constante}$$

on obtient bien :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -K_Q \cdot Q^2 \quad [2]$$

Connaissant l'ordre de la cinétique, on calcule, pour chaque expérience, le coefficient K_Q constaté, selon l'équation :

$$K_Q = \frac{\frac{1}{Q_f} - \frac{1}{Q_0}}{t} \quad [3]$$

On constate que K_Q varie avec les conditions opératoires et plus particulièrement avec la température (figure 12).

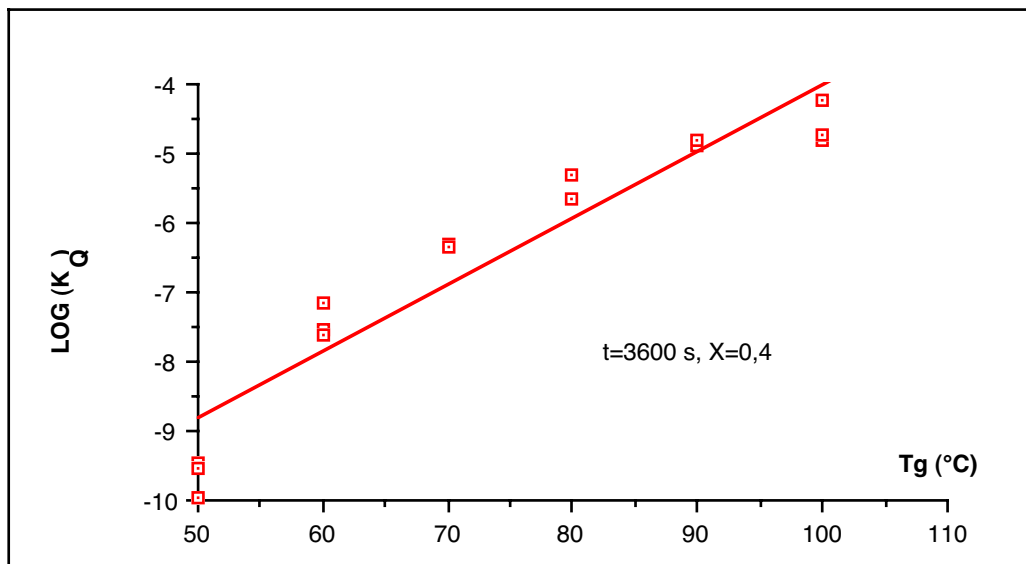


Figure 12 : Relation entre K_Q et température.

Une loi d'Arrhenius est utilisé pour en rendre compte :

$$K_Q = K_{Q0} \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{R \cdot (T_g + 273.16)}\right] \quad [4]$$

avec $K_{Q0} = -1.9561 \cdot 10^{16} + 5.4287 \cdot 10^{17} \cdot X + 6.8210 \cdot 10^{17} \cdot X^2$ [5]

$$E_a = -133.2 \cdot 10^3 \text{ J.mol}^{-1} \quad [6]$$

Les valeurs numériques des paramètres de [5] et [6] ont été déterminées à l'aide d'un ajustement numérique opéré sur les expériences de l'automne 1989 (462 données). La méthode consiste en une combinaison des algorithmes ALIENOR, SIMPLEX et HOOKE & JEEVES.

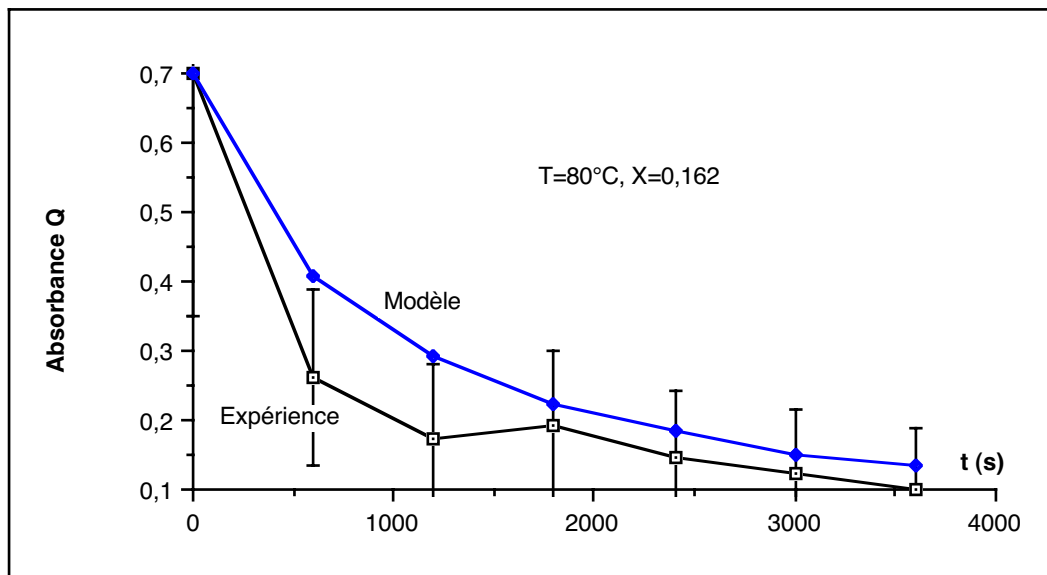


Figure 13 : Comparaison entre cinétiques expérimentale et calculée avec barres d'incertitude sur les mesures. L'incertitude est calculée à partir d'une valeur de ± 7 points, sur la valeur exprimée en % de transmission, puis convertie en absorbance.

Le démarche inverse consistant à comparer la qualité finale d'une expérience avec le calcul donne une erreur inférieure à 10 points de transmission pour 75% des données de l'ajustement (campagne 89), avec une erreur moyenne de 7,5 points. Sur les données expérimentales de la campagne 1990 (non utilisées pour l'ajustement), l'erreur moyenne est descendue à 5,5 points de transmission. Les courbes de la figure 13 donnent une idée de la précision moyenne de la simulation à comparer à l'incertitude élevée sur les résultats expérimentaux.

Les résultats concernant les expériences de séchage seront discutés dans les chapitres suivants.

5 - Conclusion

Malgré la sécheresse, deux années de suite, empêchant d'avoir du maïs très humide et raccourcissant la durée de l'étude, de nombreux résultats ont pu être obtenus. Ces données représentent d'ores et déjà une base qualitative d'intérêt pratique non négligeable pour la conception et le réglage des séchoirs industriels. Les problèmes de précision rencontrés ont déjà été améliorés en partie lors de la deuxième campagne d'expérimentation par acquisition d'un savoir-faire. Néanmoins on peut s'attendre à un meilleur ajustement numérique du modèle en remplaçant le test de turbidité, mal adapté à la modélisation, par le PROMATEST dont la mise au point vient de s'achever à l'ITCF. Ce test repose en particulier sur une mesure d'intensité de coloration sur spectrophotomètre, directement en absorbance, dont la correspondance est aisée avec une concentration équivalente en albumine.

Le résultat de cette étude est une équation bilan instantanée (ou modèle de dégradation de la qualité) insérable dans tout modèle de séchage du maïs. Mais selon

l'acuité de la simulation de la température du grain, une perte de précision est à craindre dans la gamme 60 - 80°C (température de grain) et un réajustement peut être utile.

II - MODÉLISATION DU SÉCHAGE EN COUCHE MINCE

1 - Etude bibliographique

La couche mince, base du modèle d'un séchoir, en est néanmoins indépendante ; sa spécificité est liée au seul produit séché.

De par cette spécificité, de nombreux produits agricoles et alimentaires ont été étudiés (BIMBENET *et al.*, 1984). Pour un même produit, la variété, l'âge à la récolte, le type de récolte etc. ont eux aussi leur importance sur son comportement (LEVESQUE *et al.*, 1986 ; STROSHINE *et MARTINS*, 1986).

La couche mince est, par définition (DAUDIN, 1982), une couche de produit suffisamment peu épaisse pour que l'on puisse considérer que les caractéristiques de l'air (V_a , T_a , Y) en tous points de la couche soient identiques. Ceci implique l'absence de gradients inter-grains et donc, dans notre cas, l'identité des grains.

Finalement, l'étude du séchage en couche mince c'est l'étude du séchage d'un "grain moyen".

a) Flux et forces en présence

Il existe plusieurs principes de séchage : entraînement et ébullition (BIMBENET, 1984). Les séchoirs à maïs sèchent par entraînement, avec un air qui sert à la fois de fluide caloporteur (il apporte les calories nécessaires au chauffage des grains) et de gaz vecteur (il évacue l'humidité du grain).

Quelques auteurs se sont essayés à mettre en évidence, par l'expérimentation ou à l'aide de la théorie (WHITAKER, 1988), les phénomènes qui interviennent au cours du séchage. Mais, et c'est une des grandes difficultés pour les chercheurs, chaque produit réagit différemment au séchage, et de façon particulièrement complexe dans le cas des produits biologiques. La diversité des courbes expérimentales de séchage et l'abondante littérature qui l'illustre (BIMBENET *et al.*, 1984), en est un parfait exemple.

DAUDIN (1982) passe en revue les phénomènes mis en évidence au cours du séchage. Globalement on observe :

- un gradient de teneur en eau croissante vers l'intérieur du produit,
- un gradient de température croissante vers l'extérieur du produit.

A ces phénomènes, on peut rajouter des gradients de pression, pression partielle de vapeur, tension superficielle...sans compter la migration des solutés et son influence sur celle de l'eau (BIMBENET *et al.*, 1970) ou l'influence de la gravité (PUIGGALI *et al.*, 1988).

De plus, ces gradients imposent un stress mécanique ou tenseur de contraintes qui aboutit généralement à une modification du volume et de la forme du produit (LITCHFIELD *et OKOS*, 1988 ; CHEN, 1973) donc de certains critères de qualité.

Une difficulté réside dans la quasi-impossibilité à chiffrer l'influence de chacun des gradients. ABID *et al.* (1988) ont montré, dans le cas du séchage de grains de maïs en lit fluidisé, par une étude de sensibilité sur le coefficient de thermomigration dans leur modèle (approche TPI simplifiée), que la thermodiffusion de l'eau était négligeable devant la diffusion de l'eau.

La plupart des auteurs simplifie leur modèle en supposant que l'eau migre sous forme liquide par diffusion et s'évapore à la surface, alors que la chaleur se transmet par conduction à l'intérieur du grain.

b) Transferts grain / air

Pendant longtemps, et pour des raisons de puissance de calcul, on a considéré le grain comme une unité homogène, sans aucun gradient interne. La démarche classique consistait à écrire les bilans de masse et de chaleur dans le grain, puis de substituer à dX/dt une loi empirique fonction de t, T_a, Y et V_a tirée des expériences en couche mince. C'est le cas de DAUDIN (1982) qui a cherché la transformation la plus judicieuse afin de regrouper sur une même courbe toutes les cinétiques.

Mais FOHR et *al.* (1988) ont montré les limites de ce type de démarche dans le cas de variation brusque des caractéristiques de l'air en entrée, cas général dans les séchoirs industriels où le grain change de niveau et donc de conditions de séchage toutes les minutes environ !

Cette démarche a quand même permis de mieux comprendre l'influence des différents paramètres du séchage : en particulier l'importance primordiale de la température de l'air T_a (ABID et *al.*, 1988 ; DAUDIN, 1982) qui influence toute la durée du séchage en jouant, au travers de T_g (température du grain), sur les constantes de transfert dans le grain. Les paramètres V_a et Y (vitesse et teneur en eau de l'air), quant à eux, restent des facteurs externes et jouent essentiellement au début du séchage au moment où les échanges air/grain constituent le facteur limitant.

Des expérimentations en couche mince, il a été tiré un grand nombre de lois empiriques utilisées dans les modèles pour décrire le transfert d'eau entre le grain et l'air (SOKHANSANJ et CENKOWSKI, 1988 ; DAUDIN, 1982).

On peut toutefois les résumer comme suit :

- les lois donnant la teneur en eau du grain en fonction du temps

$$X = \text{fonction}(t, T_a, Y, V_a)$$

la fonction est généralement une exponentielle ; ce type de loi est dédié au séchage en couche mince et en conditions constantes et n'est pratiquement plus usité pour la modélisation,

- les lois donnant la variation de teneur en eau du grain en fonction du temps

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{fonction}(t, T_a, Y, V_a)$$

elles sont définies pour un produit et un domaine donné, elles ne marchent qu'en séchage à conditions constantes (régime stable) et rendent difficilement compte des recondensations éventuelles, sauf au niveau des bilans (BAKKER ARKEMA et *al.*, 1974 ; WILSON et NGUYEN, 1988),

- les lois donnant la variation de teneur en eau du grain comme une fonction de l'écart à l'équilibre

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{Coefficient} \cdot (X - X_{eq})$$

avec $X_{eq} = \text{fonction}(T_a, Y, V_a)$ et $\text{Coefficient} = \text{fonction}(T_a, Y, V_a)$
 ce sont des lois "performantes" qui peuvent rendre directement compte des recondensations et, éventuellement, des régimes transitoires.

Une version plus "physique" est donnée par la loi de transfert de matière entre 2 phases (LONCIN, 1985) :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \beta_p \cdot A_g \cdot (P_v - P_{va}) \text{ avec } P_v = A_w \cdot P_{vsat}$$

ce qui semble plus logique dans la mesure où l'eau est transférée sous forme gazeuse.

c) L'intérieur du grain

Les expériences en couche mince ont permis de faire avancer l'état des connaissances sur le séchage des produits biologiques, en particulier en montrant l'existence d'une "mémoire" ou inertie (LAGUERRE et *al.*, 1989) que l'on peut observer au cours d'une expérience de saut de séchage (température de l'air passant brutalement d'une consigne à une autre).

De même, de nombreux auteurs (LASSERAN, 1989 a ; ABID et *al.*, 1988) ont constaté expérimentalement, à l'aide de micro-thermocouples que le gradient de température existant entre le centre et la surface du grain devenait négligeable au bout de quelques minutes. Toutefois, vu la difficulté de mesurer la température du centre sans créer un pont thermique, on peut se poser la question de la validité de ce résultat. Quoiqu'il en soit, c'est une hypothèse de base pour de nombreux chercheurs.

Pour bien simuler les régimes transitoires et, en particulier, "l'effet mémoire" que l'on observe au cours des périodes de relaxation ou de sauts, il est apparu nécessaire de considérer les gradients internes au grain.

On peut regrouper les méthodes retenues de la manière suivante :

- modèles diffusionnels où le grain est assimilé à une forme connue (sphère ou cylindre fini, généralement), supposée homogène et isotrope,

- résolus a priori en séries infinies par CRANK (1967), en supposant la diffusivité et la teneur en eau à la surface constantes (INGRAM, 1976 ; SILVA et NEBRA, 1988), ils sont limités aux régimes stables ; on peut noter la tentative de NISHIYAMA (1987) de rajouter à la solution de l'équation de diffusion un terme permettant de rendre compte d'une période de relaxation mais la démonstration et les résultats sont insuffisamment explicités ;

- résolus par la méthode des différences finies (HAGHIGHI et SEGERLIND, 1988b ; PATIL, 1988), ils rendent bien compte des états transitoires mais nécessitent un maillage important et donc un temps de calcul rédhibitoire pour simuler un séchoir entier.

- modèles tirés des théories de la TPI plus ou moins simplifiées. Le grand intérêt de ces méthodes est qu'elles permettent de considérer les relations croisées existant entre les différents flux. Malheureusement la plupart des

applications sont basées sur des matériaux inertes (sable en particulier) à mille lieues du produit qui nous intéresse. Néanmoins, avec force simplifications, parfois pour les ramener à de simples modèles diffusifs/convectifs, on peut trouver des exemples sur le maïs : FORTES et OKOS (1982) ont essayé de simuler la dryeration (repos puis refroidissement lent en cellule) par cette méthode en considérant les flux d'eau liquide, vapeur et de chaleur mais leur modèle présente un grand nombre de constantes dont la détermination ne semble pas simple ; ABID *et al.* (1988), quant à eux, n'ajoutent que la thermodiffusion de l'eau au modèle classique diffusif/convectif pour, finalement, constater qu'elle est négligeable.

- modèles "pseudo-physiques" ou considérés comme tels parce qu'ils utilisent des lois extrapolées à partir des lois physiques connues et reconnues. Il s'agit essentiellement de modèles compartimentaux simples (peu de compartiments) courants en biologie (CHERRUAULT, 1983). Ils présentent l'énorme avantage d'être peu gourmands en temps de calcul tout en simulant les gradients existants dans le grain, de manière simpliste il est vrai. Un exemple particulièrement intéressant est le modèle de TOYODA (1988) qui représente un grain de riz comme 2 compartiments concentriques ou 2 cuves en cascade pour l'humidité (un seul compartiment pour la température) et écrit que le flux d'eau entre 2 cuves est proportionnel à l'écart de teneur en eau entre ces 2 cuves. Ce modèle semble suffisant pour simuler son séchoir à recirculation qui fait alterner périodes de séchage et périodes de relaxation. A l'ENSIA, J.C. LAGUERRE *et al.* (1989) ont appliqué une approche compartimentale similaire pour la modélisation du séchage en couche mince d'autres produits alimentaires.

Aussi, avons nous choisi d'utiliser un modèle à 3 compartiments uniquement pour la teneur en eau (température uniforme). Le compartiment périphérique est le lieu de la vaporisation de l'eau vers l'air de séchage et le gradient de teneur en eau est simulé essentiellement par les deux autres compartiments.

d) Les constantes relatives au maïs

Beaucoup d'auteurs oublient de mentionner tout ou partie des constantes utilisées pour leur modèle. Or il nous semble fondamental de reconnaître l'importance des constantes sur les résultats d'un modèle tout particulièrement quand celles-ci sont des fonctions de plusieurs paramètres.

- Les coefficients de transfert de chaleur α et de matière β_p sont liés par la relation :

$$\frac{\alpha}{\beta_p \cdot L_v} = 64,7 \text{ Pa.K}^{-1}$$

qui est obtenue par l'analogie de COLBURN (LONCIN ET MERSON, 1979).

Il suffit donc de déterminer α . RATTANAPANT (1986) a constaté la grande diversité des résultats obtenues à partir de corrélations empiriques sur les transferts de chaleur, pour finalement préférer un ajustement expérimental. On pourra toutefois noter que BROOKER *et al.* (1974) utilisent une valeur de α comprise entre 28 et 34 W.m⁻².°C⁻¹ pour le maïs.

- la masse volumique réelle à l'état anhydre

KUPPINGER (1980) donne pour du maïs INRA 258 :

$$\rho_g = 1353 - 179,4.X + 78,4.X^2 \text{ avec } 0,05 \leq X \leq 0,85$$

MüHLBAUER (1974) donne, pour du maïs INRA 258 :

$$\rho_g = 1397 - 204.X \text{ avec } 0,0 \leq X \leq 0,6$$

PABIS et HENDERSON (1962) donnent une valeur moyenne de 1280 kg.m^{-3} sans autres précisions. Il semble donc que l'on peut retenir une valeur moyenne de 1350 kg.m^{-3} que l'on considèrera constante au cours du séchage.

- la capacité thermique massique, à pression constante, du maïs anhydre

BROOKER et *al.* (1974) ainsi que KAZARIAN et HALL (1963) donnent $c_{pg} = 1122 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour le maïs "yellow dent corn" sec. On retiendra donc cette valeur.

- l'activité de l'eau dans le maïs

$A_w = \text{fonction}(X, T_g)$ qui dépend de la variété considérée

on pourra prendre la formule de THOMSON et *al.* (1968) :

$$A_w = 1 - \exp[-0,6876.(T_g + 45,5555).X^2]$$

donnée pour du maïs denté (figure 1).

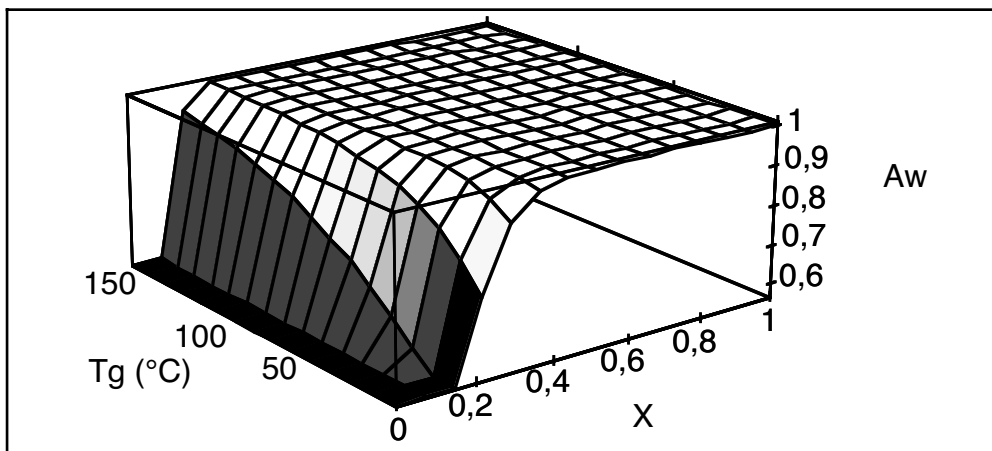


Figure 1 : A_w fonction de X et de T_g

- la porosité (volume d'air dans un 1 m^3 de séchoir rempli de grains)

$\varepsilon = \text{fonction}(X)$ qui dépend très fortement de la variété et de la teneur en eau

KUPPINGER (1980) donne pour du maïs INRA 258 :

$$\varepsilon = 0,513 - 0,11.X + 0,48.X^2 - 0,56.X^3 \text{ avec } 0,05 \leq X \leq 0,85$$

MüHLBAUER (1974) donne, pour du maïs INRA 258 :

$$\varepsilon = 0,390 + 0,095.X \text{ avec } 0,1 \leq X \leq 0,6$$

THOMSON et ISAACS (1968) donnent une valeur moyenne de 0,423 sans autres précisions. En attendant une détermination expérimentale, on prendra 0,45.

- la surface volumique du grain

$a = A_g/V_g = \text{fonction}(X)$ qui dépend probablement aussi de la variété et de la teneur en eau.

BROOKER *et al.* (1974) donnent une valeur de $784,12 \text{ m}^{-1}$ sans autre précisions. On tire de MÜHLBAUER (1974), pour du maïs INRA 258, en assimilant le grain à une sphère :

$a = 0,003597 \cdot \pi \cdot (7,28 + 0,236 \cdot X)^2 \cdot 1350$ avec $0,1 \leq X \leq 0,6$
qui donne 837 m^{-1} pour $X = 0,538$ (35% d'humidité).

On pourra retenir $a = 800 \text{ m}^{-1}$, comme une constante, en attendant une détermination expérimentale par la méthode préconisée par LE MAGUER (1989). A noter que peu d'auteurs précisent la valeur de ce paramètre pourtant fondamental.

2 - Matériels, méthodes

Dans la mesure où nous disposons déjà de cinétiques expérimentales de séchage en couche mince et en conditions constantes (DAUDIN, 1982), nous nous sommes orientés essentiellement vers des expériences en conditions variables. Ainsi nous pouvions ajuster le modèle sur les cinétiques en conditions constantes et le valider en conditions variables.

a) Préparation du maïs

Pour nos expériences de sauts et d'arrêts de séchage, il a été nécessaire de réhumidifier du maïs. Il a été fourni par le laboratoire d'A. LE BRAS à l'ITCF : il s'agit de maïs récolté, sur les mêmes parcelles près d'Etampes, en 1987 et 1988, séché pendant environ 5 mois en crib (en épi, à ciel ouvert) et dont la qualité, à la teneur en eau près, est très proche de celle d'un grain fraîchement récolté.

Deux méthodes de réhumidification ont été employées :

- trempage à température ambiante pendant 24 h puis égouttage à l'air libre pendant 2 à 24 h.

- la méthode de DAUDIN (1982) qui consiste à laisser tremper le maïs dans de l'eau distillée dans des bocaux placés dans une chambre froide pendant 15 jours. Le maïs est ensuite égoutté et stocké sous plastique pendant 24 h dans un réfrigérateur. Une heure avant l'expérience, le produit est étalé à l'air ambiant.

Du maïs frais, de la même provenance, a été utilisé pour les expériences de 1989.

b) Séchoir expérimental

Le séchoir utilisé était celui du laboratoire associé INRA-GIA à l'ENSIA (figure 2). Le dispositif de conditionnement d'air et son instrumentation ont été profondément modifiés depuis 1988 et seul le dispositif de chauffe, commandé manuellement mais régulé automatiquement, a été utilisé. Toute l'acquisition est centralisée sur l'ordinateur relié à la centrale de mesure.

Ce type de séchoir présente trois inconvénients :

- du fait du dispositif de pesée discontinue, le début d'une cinétique est soit mal connu, soit bien connu mais influencé fortement par la mesure,

- il est impossible de retirer du produit au cours d'une expérience sans influencer la cinétique, ce qui empêche de tracer une cinétique de séchage couplée à une cinétique de dégradation de la qualité amidonnaire,

- il est impossible de travailler en-dessous de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ de vitesse d'air en entrée de la couche : ceci empêche d'expérimenter dans le domaine de fonctionnement des séchoirs industriels.

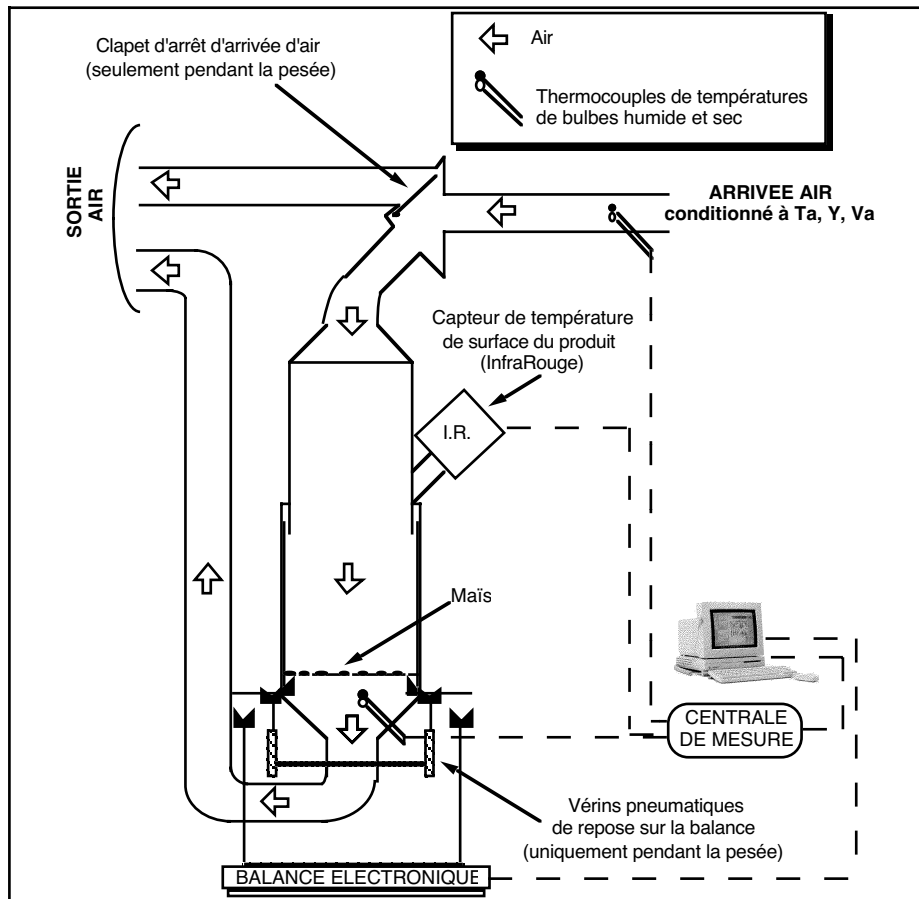


Figure 2 : Séchoir Expérimental INRA-GIA

c) méthode d'EULER

Il s'agit d'une méthode simple d'intégration numérique des systèmes d'équations différentielles (SIBONY et MARDON, 1982). Dans notre cas, avec un système de 5 équations différentielles couplées, à 5 variables indépendantes (X_1, X_2, X_3, T_g, Q), il faut faire l'hypothèse que le pas de temps choisi pour l'intégration sera suffisamment petit pour que les variables soient considérées indépendantes pendant la durée d'une itération. En pratique, nous avons vérifié que les méthodes d'EULER et de RUNGE KUTTA d'ordre 4 donnaient exactement le même résultat, avec une stabilité numérique comparable. Ceci nous a conduit à retenir la méthode d'EULER, la plus simple et, de loin, la plus rapide.

Pour éviter les problèmes de divergences numériques, une méthode à pas variable a été développée : on calcule Δt au début de chaque itération selon

$$\Delta t = \frac{0,05}{\text{Maximum} \left\{ \frac{\partial X_1}{X_1 \cdot \partial t}, \frac{\partial X_2}{X_2 \cdot \partial t}, \frac{\partial X_3}{X_3 \cdot \partial t}, \frac{\partial T_g}{T_g \cdot \partial t} \right\}}$$

Cette méthode limite les variations relatives de chaque variable à 5% maximum au cours d'une itération et permet d'empêcher pratiquement toute divergence numérique. De plus, la simulation est beaucoup plus rapide.

d) Simplex

Il s'agit d'une méthode d'optimisation non linéaire qui permet d'identifier les paramètres d'un modèle en l'ajustant à des expériences. Plusieurs variantes existent, et nous avons utilisé celle d'ALLANEAU (1979) qui permet une adaptation rapide du simplex par changement de conformation spatiale à chaque itération.

Deux critères de minimisation ont été successivement utilisés :

- somme des carrés des écarts de teneur en eau du grain, entre points expérimentaux et simulés rapportés au carré de la valeur expérimentale,
- approximation de la surface entre les courbes expérimentales et simulées, par la méthode des trapèzes.

Le critère couramment utilisé de la somme des carrés des écarts n'a pas été retenu car il favorisait l'ajustement sur le début du séchage où la teneur en eau du grain est plus forte. Le premier critère choisi, plus performant, a cependant le défaut d'être dépendant du nombre de points expérimentaux et n'est valable que si les points expérimentaux sont régulièrement espacés. C'est pourquoi, le deuxième critère a été préféré pour les arrêts et sauts de séchage. Les simulations sur ordinateur étant faits en simple précision, le critère d'arrêt du simplex était un écart-type entre tous ses sommets inférieur à 10^{-6} pour le premier critère et 10^{-6} fois la valeur recherchée du critère dans l'autre cas.

3 - Description du modèle

Le grain est supposé uniforme en température et chaque compartiment en teneur en eau. La compartiment 3 est considéré comme le siège de la vaporisation de l'eau et de son éventuelle condensation (figure 3).

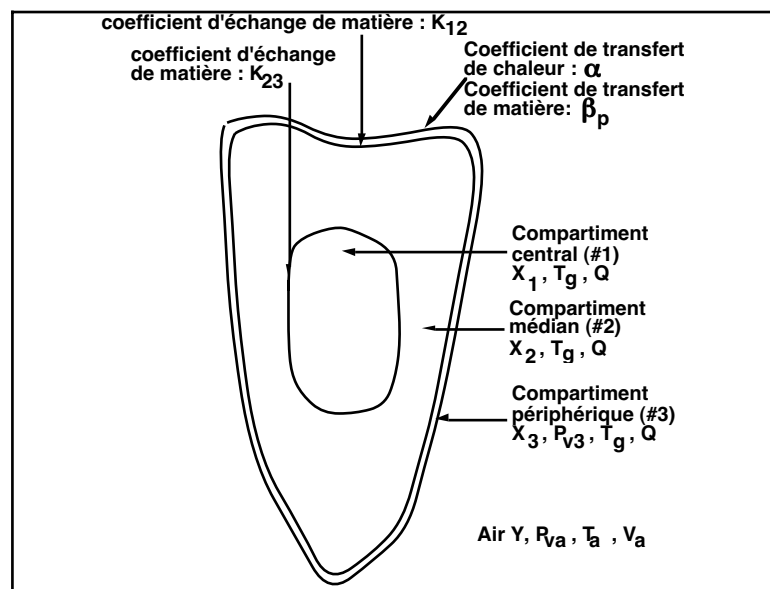


Figure 3 : représentation d'un "grain moyen"

La seule hypothèse de nature géométrique porte sur les proportions de chaque compartiment par rapport à l'ensemble du grain : le compartiment 3 est fixé arbitrairement à 10% du volume total, 45% pour chacun des 2 autres.

Dans le cas d'une couche mince, en considérant les transferts de matière et de chaleur entre un grain et l'air, on a les densités de flux suivantes (LONCIN, 1985 ; BIMBENET, 1984) :

$$\Phi_m = \beta_p \cdot (P_{v3} - P_{va}) \quad \text{avec } P_{v3} = A_w \cdot P_{vsat} \quad [1]$$

$$\Phi_c = \alpha \cdot (T_g - T_a) \quad [2]$$

et, par analogie, on pose, pour les débits d'eau entre les compartiments internes (TOYODA, 1988) :

$$D_{12} = K_{12} \cdot (X_1 - X_2) \quad [3]$$

$$D_{23} = K_{23} \cdot (X_2 - X_3) \quad [4]$$

on peut donc écrire les bilans d'eau dans le grain (on fait l'hypothèse qu'ils sont tous identiques) :

$$\begin{aligned} & \text{variation de la masse d'eau du compartiment } i \\ & = \\ & \text{débit d'eau depuis le compartiment } i-1 \\ & - \\ & \text{débit d'eau vers le compartiment } i+1 \end{aligned}$$

soient, pour les compartiments 1,2 et 3 :

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot V_g \cdot \tau_1 X_1)}{\partial t} = -D_{12} \quad [5]$$

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot V_g \cdot \tau_2 X_2)}{\partial t} = D_{12} - D_{23} \quad [6]$$

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot V_g \cdot \tau_3 X_3)}{\partial t} = D_{23} - A_g \cdot \Phi_m \quad [7]$$

Hypothèse :

- vaporisation de l'eau uniquement dans le compartiment 3 ;

et, pour simplifier le calcul :

- on néglige les termes correspondant aux dérivées partielles de ρ_g , τ_i , V_g (pas de tassement du grain).

ce qui donne, finalement :

$$\frac{\partial X_1}{\partial t} = \frac{-D_{12}}{\rho_g \cdot V_g \cdot \tau_1} = \frac{B_1}{\rho_g \cdot \tau_1} \cdot (X_2 - X_1) \quad [8]$$

$$\text{avec } B_1 = \frac{K_{12}}{V_g} \text{ en } \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial t} = \frac{D_{12} - D_{23}}{\rho_g \cdot V_g \cdot \tau_2} = \frac{B_1}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_1 - X_2) + \frac{B_2}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_3 - X_2) \quad [9]$$

$$\text{avec } B_2 = \frac{K_{23}}{V_g} \text{ en } \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial t} = \frac{D_{23} - A_g \cdot \Phi_m}{\rho_g \cdot V_g \cdot \tau_3} = \frac{B_2}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (X_2 - X_3) + \frac{\beta_p \cdot a}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (P_{va} - P_{v3}) \quad [10]$$

soit en posant $X = \tau_1 \cdot X_1 + \tau_2 \cdot X_2 + \tau_3 \cdot X_3$ qui représente la teneur en eau moyenne du grain.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{-A_g \cdot \Phi_m}{\rho_g \cdot V_g} = \frac{\beta_p \cdot a}{\rho_g} \cdot (P_{va} - P_{v3}) \quad [11]$$

et pour la température, dans le cas d'un Φ_m positif (séchage) :

$$\begin{aligned} & \text{vitesse de variation de la charge volumique d'énergie} \\ & \quad = \\ & \text{vitesse de production volumique d'énergie} \end{aligned}$$

soit :

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot (c_{pg} + X \cdot c_{pw}) \cdot T_g)}{\partial t} = -a \cdot \Phi_c - a \cdot \Phi_m \cdot H_v \quad [12]$$

Hypothèse : on néglige la variation de c_{pw} et de c_{pg} avec T_g .

ce qui donne :

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_g}{\partial t} &= -a \cdot \frac{\Phi_c + \Phi_m \cdot L_v}{\rho_g \cdot (c_{pg} + X \cdot c_{pw})} \\ &= \frac{-\alpha \cdot a \cdot (T_g - T_a) - \beta_p \cdot a \cdot (P_{v3} - P_{va}) \cdot L_v}{\rho_g \cdot (c_{pg} + X \cdot c_{pw})}\end{aligned}\quad [13]$$

et dans le cas d'un Φ_m négatif (condensation) :

$$\begin{aligned}\frac{\partial T_g}{\partial t} &= -a \cdot \frac{\Phi_c + \Phi_m \cdot [T_a \cdot c_{pv} - T_g \cdot c_{pw} + L_v]}{\rho_g \cdot (c_{pg} + X \cdot c_{pw})} \\ &= \frac{-\alpha \cdot a \cdot (T_g - T_a) - \beta_p \cdot a \cdot (P_{v3} - P_{va}) \cdot [T_a \cdot c_{pv} - T_g \cdot c_{pw} + L_v]}{\rho_g \cdot (c_{pg} + X \cdot c_{pw})}\end{aligned}\quad [14]$$

Par ailleurs, on peut ajouter l'équation bilan supplémentaire relative à la dégradation de la qualité amidonnaire du maïs (cf. chapitre 1) :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -K_Q \cdot Q^2 \quad [15]$$

Pour simuler le séchage du maïs en couche mince, il faut donc résoudre le système suivant :

$$\begin{aligned}\frac{\partial X_1}{\partial t} &= \frac{B_1}{\rho_g \cdot \tau_1} \cdot (X_2 - X_1) \\ \frac{\partial X_2}{\partial t} &= \frac{B_1}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_1 - X_2) + \frac{B_2}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_3 - X_2) \\ \frac{\partial X_3}{\partial t} &= \frac{B_2}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (X_2 - X_3) + \frac{\beta_p \cdot a}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (P_{va} - P_{v3}) \\ \frac{\partial Q}{\partial t} &= -K_Q \cdot Q^2 \\ \frac{\partial T_g}{\partial t} &= \frac{-\alpha \cdot a \cdot (T_g - T_a) - \beta_p \cdot a \cdot (P_{v3} - P_{va}) \cdot L_v}{\rho_g \cdot (c_{pg} + X \cdot c_{pw})}\end{aligned}$$

où K_Q a été déterminé dans le chapitre 1, τ_1 , τ_2 et τ_3 ont été fixés arbitrairement, et α , B_1 et B_2 sont ajustés sur les expérimentations de DAUDIN (1982).

4 - Résultats

a) Séchage en conditions constantes

L'étude du modèle en conditions constantes est basée sur les fichiers de cinétiques de DAUDIN (1982) notés MAIS5.CIN à MAIS34.CIN. Ces données ont l'inconvénient de ne pas couvrir le domaine de séchage d'un séchoir industriel pour les vitesses d'air et surtout de ne pas être réparties selon un plan d'expérience. Pour les conditions initiales du grain, dans un but simplificateur, on écrit $X_1=X_2=X_3=X=X_0$ = teneur en eau au temps 0 dans le fichier et, pour la température on prend $T_{g0}=20^{\circ}\text{C}$.

Un premier ajustement sur le fichier expérimental MAIS5.CIN ($T_a=56^{\circ}\text{C}$, $Y=0,011$ et $V_{ahc}=2 \text{ m/s}$) a été nécessaire pour centrer notre étude de sensibilité sur les valeurs de α , B_1 et B_2 . Cette étude a montré que le choix de Δt , pas de temps dans la méthode d'EULER, était limité essentiellement par T_a (60 s à 50°C , 5 s à 100°C) sous peine d'instabilité numérique aboutissant à une divergence.

C'est à la suite de ces observations, qu'une méthode à pas variable a été développée, apportant à la fois stabilité et rapidité.

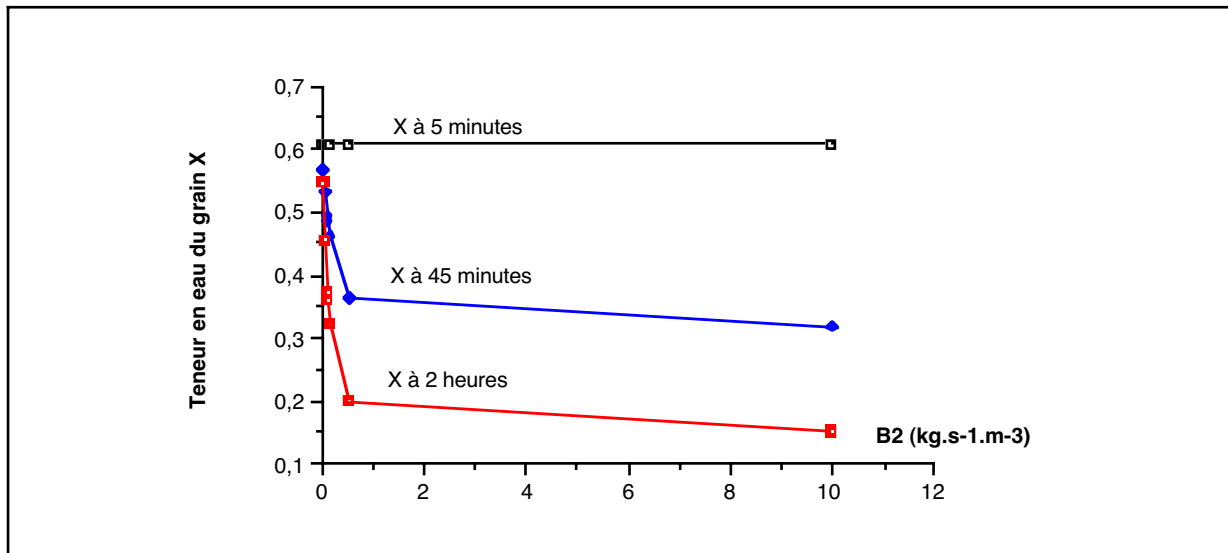


Figure 4 : Influence du coefficient B_2 sur la teneur en eau du grain X dans le cas d'une simulation centrée sur l'expérience MAIS5.CIN ($T_a=56^{\circ}\text{C}$, $Y=0,011$ et $V_{ahc}=2 \text{ m.s}^{-1}$).

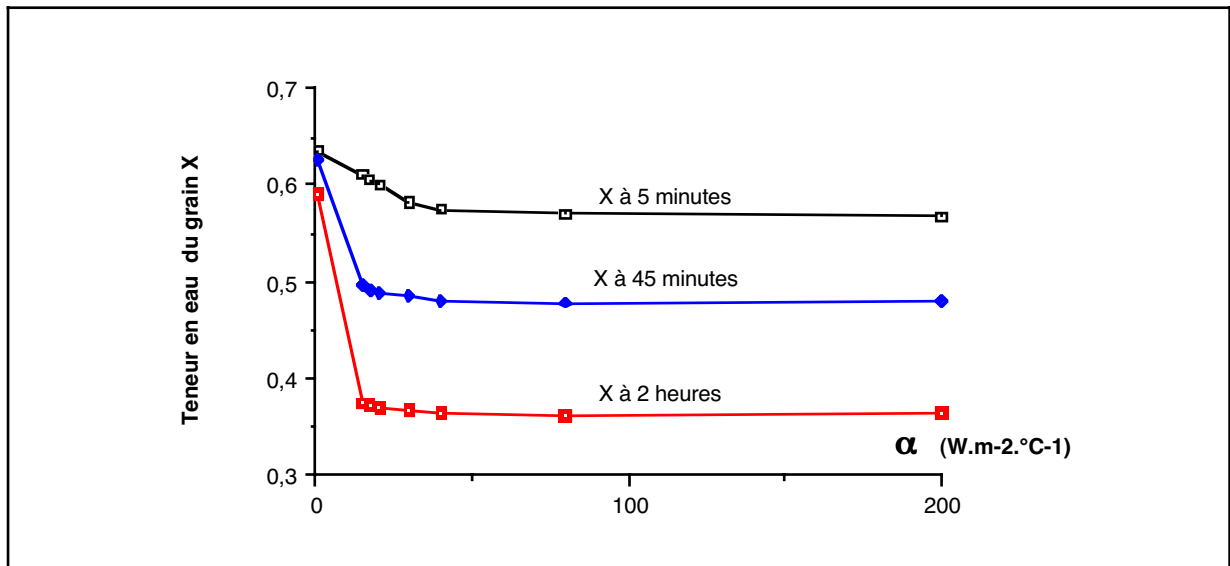


Figure 5 : Influence du coefficient α sur la teneur en eau du grain X dans le cas d'une simulation centrée sur l'expérience MAIS5.CIN ($T_a=56^\circ\text{C}$, $Y=0,011$ et $V_{ahc}=2 \text{ m.s}^{-1}$).

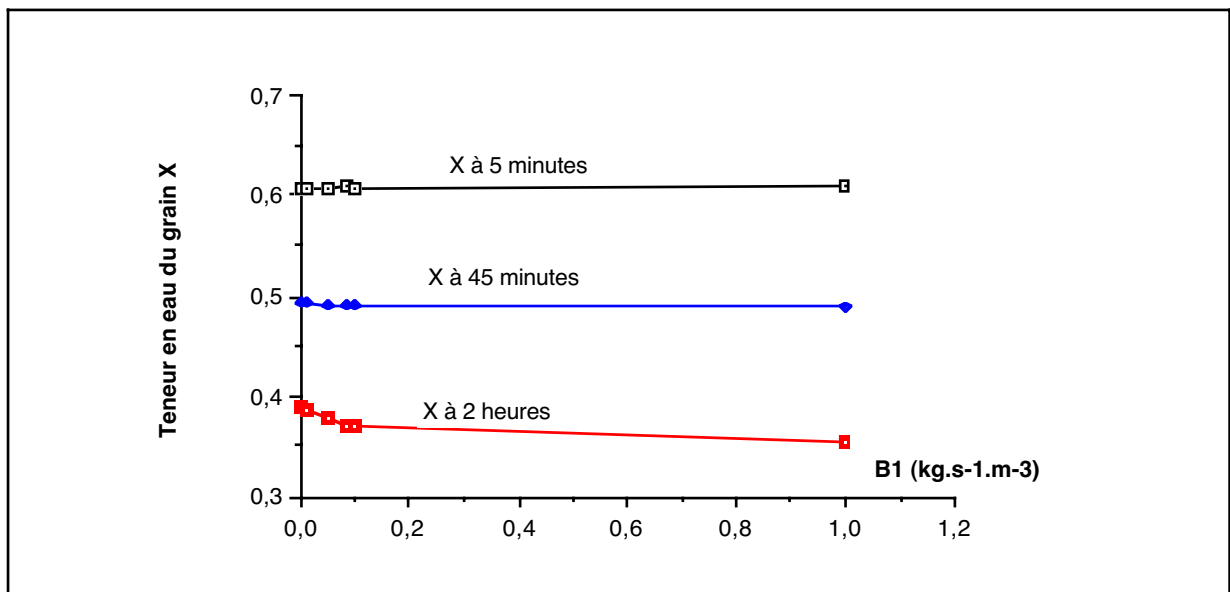


Figure 6 : Influence du coefficient B_1 sur la teneur en eau du grain X dans le cas d'une simulation centrée sur l'expérience MAIS5.CIN ($T_a=56^\circ\text{C}$, $Y=0,011$ et $V_{ahc}=2 \text{ m.s}^{-1}$).

Cette même étude, généralisée à d'autres conditions de séchage, a mis en évidence :

- l'importance majeure du coefficient B_2 sur la simulation (figure 4, B_2 est inférieur à $1 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-3}$),
- qu' α est peu influent, passé 5 minutes, au dessus d'une valeur seuil de 20-30 $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ (figure 5),
- que B_1 est pratiquement sans influence au cours des 2 premières heures (figure 6) car, en dessous de 100°C , le compartiment 1 ne sèche que très lentement (figure 7).

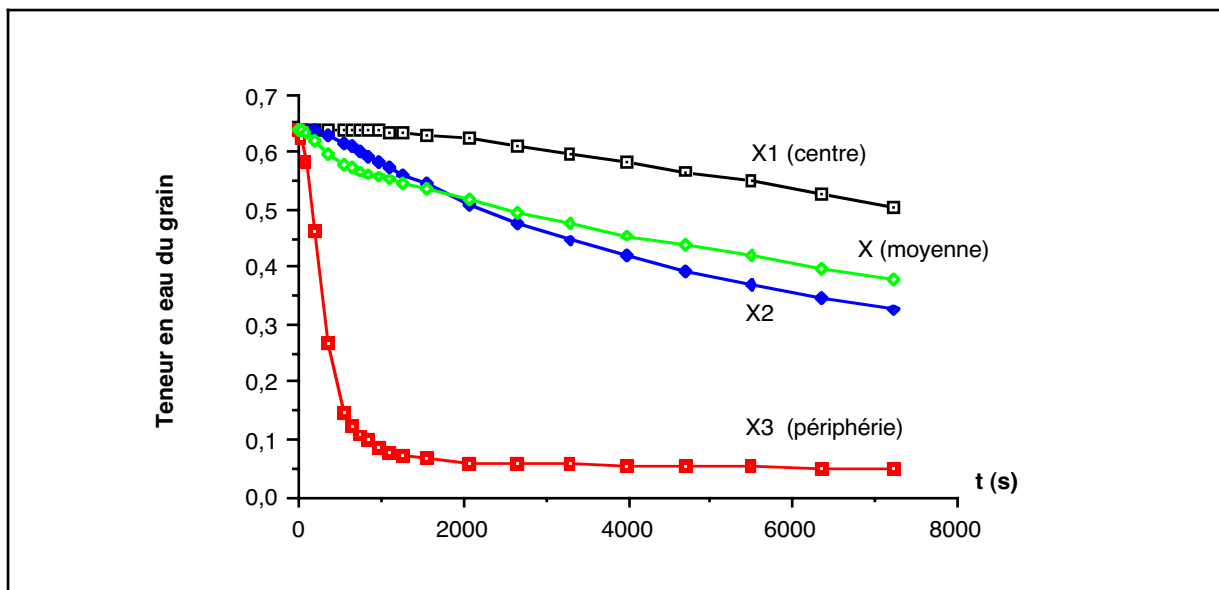


Figure 7 : Profil de teneur en eau du grain dans le cas d'une simulation ajustée sur l'expérience MAIS5.CIN ($T_a=56^\circ\text{C}$, $Y=0,011$ et $V_{ahc}=2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

En fait le modèle est construit de telle façon que le facteur limitant est successivement α (pendant les 5 premières minutes environ), puis B_2 (pendant un temps dépendant très fortement de T_a) et enfin B_1 en fin de séchage.

La méthode du simplex a été utilisée pour ajuster les paramètres α , B_1 et B_2 du modèle à chacune des cinétiques expérimentales de DAUDIN (tableau 1).

Fichier MSDOS	T _a °C	Y	V _{ahc} m/s	B ₁ kg.s ⁻¹ .m ⁻³	B ₂ kg.s ⁻¹ .m ⁻³	α W.m ² .°C ⁻¹
MAIS5.CIN	56	0,011	2	0,086	0,103	17,4
MAIS6.CIN	109	0,011	2	0,135	0,9431	66,26
MAIS7.CIN	56	0,011	0,7	0,112	0,0918	8,4
MAIS8.CIN	59	0,01	2,5	0,149	0,09	13,03
MAIS9.CIN	106	0,012	1,5	0,112	0,868	60,9
MAIS10.CIN	106	0,01	2,5	0,132	0,855	65,02
MAIS11.CIN	106	0,012	0,7	0,105	0,708	40,28
MAIS12.CIN	115	0,016	1,5	0,142	0,892	38,2
MAIS13.CIN	75	0,01	1,5	0,043	0,213	9,1
MAIS14.CIN	91	0,012	1,5	0,058	0,474	26,98
MAIS15.CIN	40	0,01	1,5	0,153	0,029	5,52
MAIS16.CIN	65	0,012	1,5	0,03	0,119	13,68
MAIS17.CIN	125	0,018	1,5	0,145	1,29	28,1
MAIS18.CIN	49	0,007	1,5	0,046	0,0549	7,94
MAIS19.CIN	56	0,011	1,5	0,04	0,0816	10,36
MAIS20.CIN	57	0,055	0,7	0,03	0,0874	17,88
MAIS21.CIN	40	0,03	1,5	0,026	0,0317	25,34
MAIS22.CIN	56	0,023	1,5	0,072	0,0923	18,66
MAIS23.CIN	56	0,045	1,5	0,063	0,116	19,13
MAIS24.CIN	56	0,07	1,5	0,007	0,1369	16,79
MAIS25.CIN	76	0,03	1,5	0,057	0,241	25,22
MAIS26.CIN	76	0,055	1,5	0,144	0,343	43,88
MAIS27.CIN	106	0,028	1,5	0,114	0,6298	53,73
MAIS28.CIN	107	0,092	1,5	0,175	1,03	58,41
MAIS29.CIN	57	0,069	2,5	0,015	0,0987	18,24
MAIS30.CIN	137	0,018	1,5	0,228	1,51	37,52
MAIS31.CIN	150	0,013	1,7	0,662	4,86	45,13
MAIS32.CIN	76	0,097	1,5	0,05	0,189	87,6
MAIS34.CIN	106	0,04	1,5	0,174	1,094	86,98

Tableau 1 : Fichiers expérimentaux de DAUDIN (1982) et résultats d'ajustements.

De cette étude, différentes informations ont été tirées :

- il n'est pas possible de corrélérer simplement α avec les conditions expérimentales, tout particulièrement avec V_{ahc} , mais ceci s'explique à la fois par la conception du séchoir expérimental et par le "plan expérimental" suivi par DAUDIN limitant les vitesses d'air étudiées,
- mis à part les expériences réalisées à haute température (137 et 150°C) ou sur plus de 4 heures, B_1 n'est pas un facteur limitant sur ces cinétiques et reste bien centré autour d'une valeur moyenne de $0,1 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-3}$,
- on peut tracer une exponentielle de régression entre B_2 et T_a avec un coefficient de détermination de l'ordre de 0,96 (figure 8).

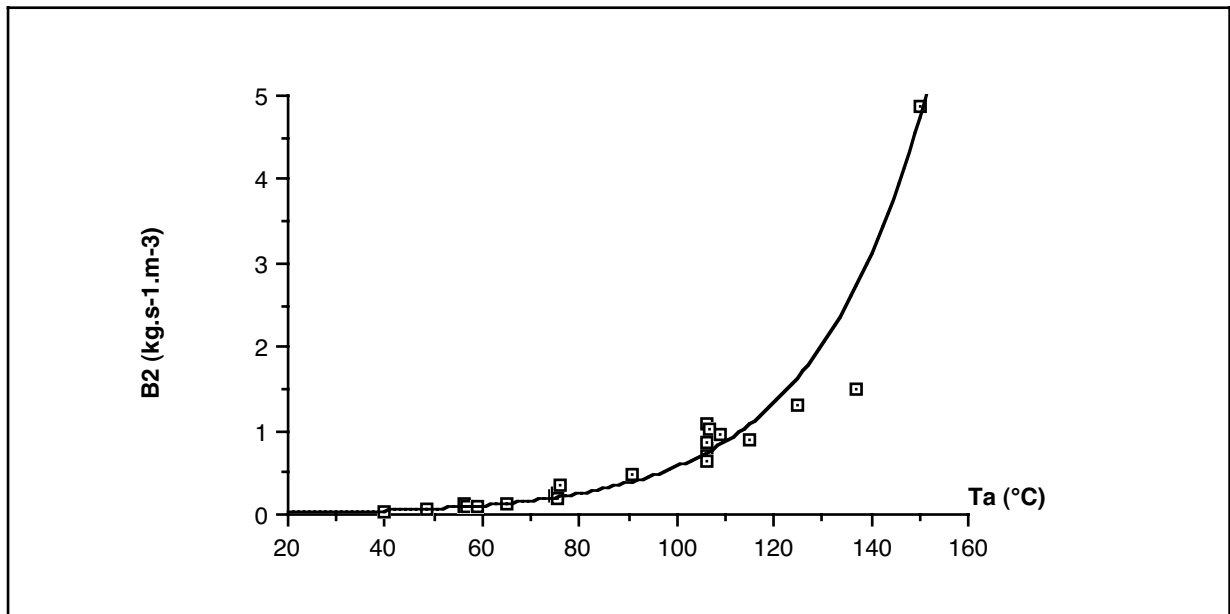


Figure 8 : Exponentielle de régression liant le coefficient B_2 à la température de l'air T_a basée sur les ajustements relatifs aux expériences de DAUDIN (1982).

Pour améliorer la qualité de la simulation, à partir des expériences longues ou à haute température de DAUDIN plus quelques expériences de très longues durées que nous avons réalisées à différentes températures, la méthode du SIMPLEX a permis l'ajustement suivant :

$$B_1 = \exp[-5,521 + 0,0335.T_g]$$

De même, puisqu'il n'a pas été possible d'avoir une bonne corrélation entre α et V_{ahc} , une régression linéaire multiple sur T_a et Y a permis d'expliquer 60% de sa variabilité :

$$\alpha = -19,72 + 0,5152.T_a + 379.Y$$

Finalement avec les 3 ajustements suivants :

$$\begin{aligned} B_1 &= \exp[-5,521 + 0,0335.T_g] \\ B_2 &= \exp[-4,753 + 0,0421.T_a] \\ \alpha &= -19,72 + 0,5152.T_a + 379.Y \end{aligned}$$

nous avons obtenu un modèle capable de simuler toutes les expériences de DAUDIN et toutes nos expériences (figure 9) y compris les condensations rencontrées au début de certaines (figure 10).

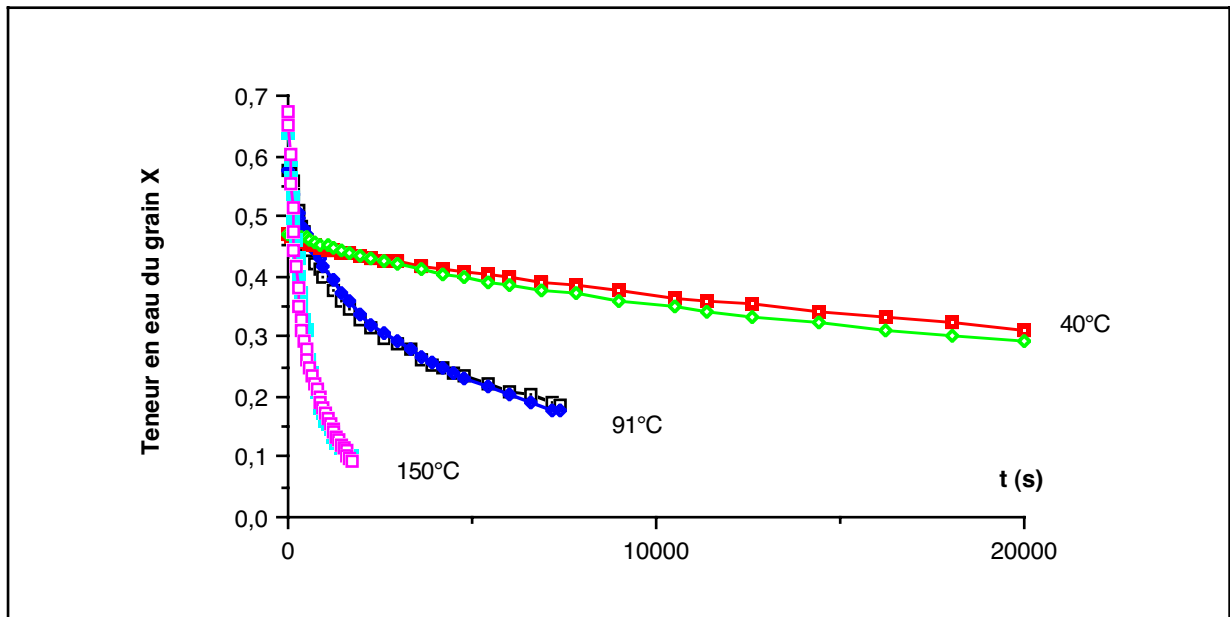


Figure 9 : Comparaison entre 3 courbes expérimentales récentes et les courbes calculées avec le modèle ajusté sur DAUDIN (1982).

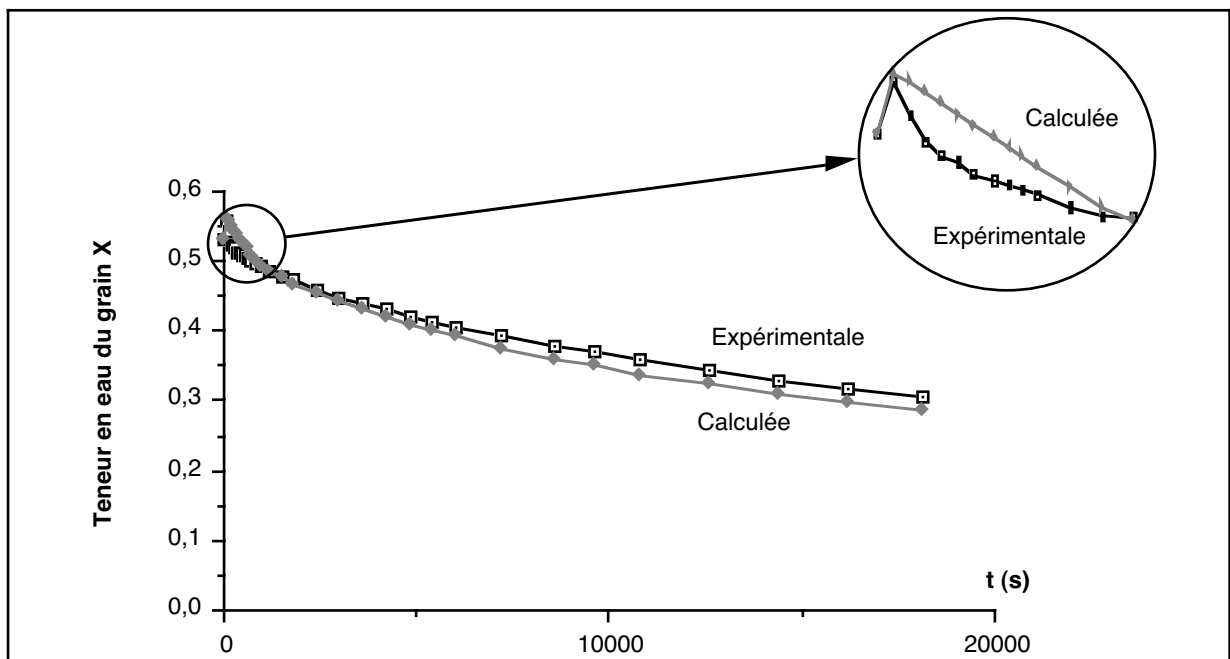


Figure 10 : Comparaison entre une courbe expérimentale avec recondensation et la courbe calculée avec le modèle ($T_a = 56^\circ\text{C}$, $Y = 0,070$ et $V_{ahc} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

b) Séchage en conditions variables

Des expériences de refroidissement ont mis en évidence l'influence des problèmes expérimentaux sur l'interprétation des cinétiques de séchage en conditions variables. Le grain est chauffé, dans un sac hermétique placé en étuve, puis il est introduit dans le séchoir expérimental où circule un air à 30°C .

Mais, il est pratiquement impossible de chauffer préalablement le grain sans le sécher. Ceci combiné au fait que B2 est relié à T_a et non à T_g donne une simulation qui sous-estime un peu le séchage au cours du refroidissement.

De même, l'inertie thermique de l'ensemble du système expérimental (masse métallique importante du séchoir) au cours d'un saut de température d'air rend difficile une interprétation quantitative précise des cinétiques.

Une première série d'expériences d'arrêts de séchage a été réalisée en sortant le panier à température ambiante et en le couvrant avec un plastique. Mais cette première méthode ne permet pas de bien maîtriser le facteur température et on observe toujours un séchage résiduel indésirable pendant l'arrêt. La simulation correspondante est réalisée à partir du modèle ajusté en conditions constantes, en écrivant $\beta_p=0$ et $T_a=20^\circ\text{C}$ au cours de l'arrêt.

Suite à ces essais, il a été nécessaire de revoir le protocole :

- 1 à 4 heures ont semblé nécessaires pour obtenir un rééquilibrage significatif du grain de maïs,
- au cours de l'arrêt, le maïs doit être placé dans un plastique souple, hermétique, sans air, dans une étuve à même température que l'air de séchage : pour le modèle il suffit alors d'écrire $\beta_p = 0$ (et donc $\alpha = 0$).

En fait, ce dernier type d'expérience nous a paru, de loin, le plus fiable et le plus facile à maîtriser.

Sur la figure 11, on peut observer une bonne concordance entre les courbes expérimentale et simulée dans le cas d'un arrêt d'une heure. Il faut, en effet, comparer le faible écart entre les 2 courbes avec les diverses incertitudes expérimentales et avec l'accumulation des erreurs d'arrondi au fil de la simulation. De plus, l'écart ne devient significatif qu'après une durée de séchage de huit heures, très supérieure au temps de séjour moyen dans un séchoir industriel.

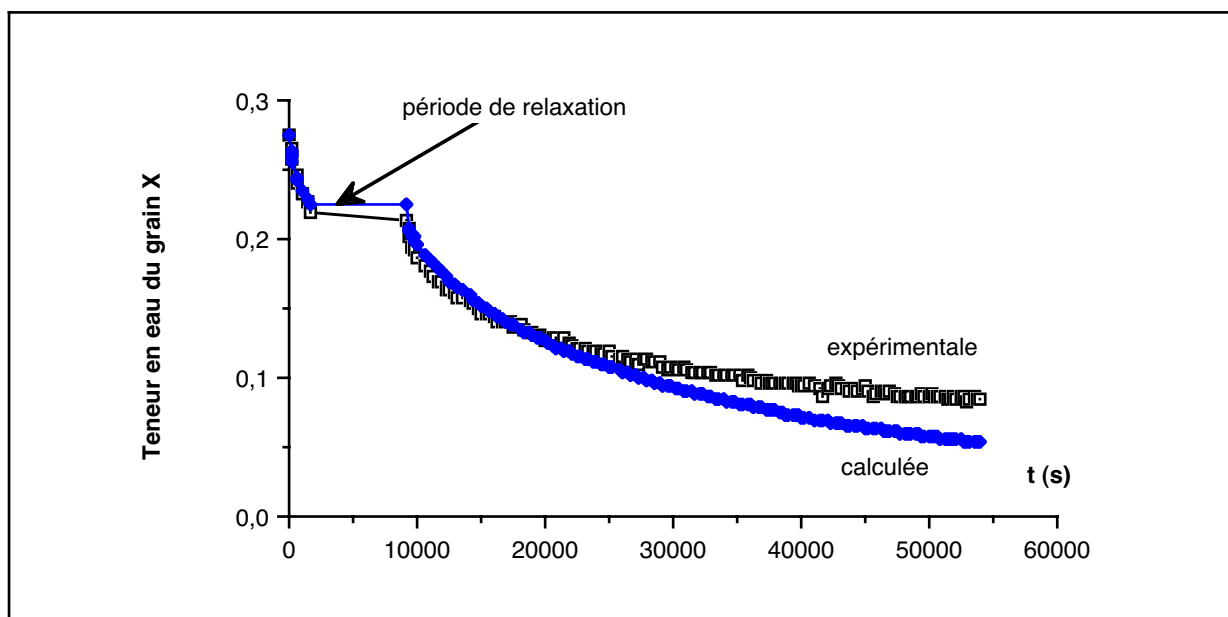


Figure 11 : Comparaison entre une de nos courbes expérimentales ($T_a=60^\circ\text{C}$, $Y=0,005$ et $V_{ahc}=1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) avec arrêt de séchage de 2 heures à

60°C, et la courbe calculée avec le modèle ajusté sur DAUDIN (1982).

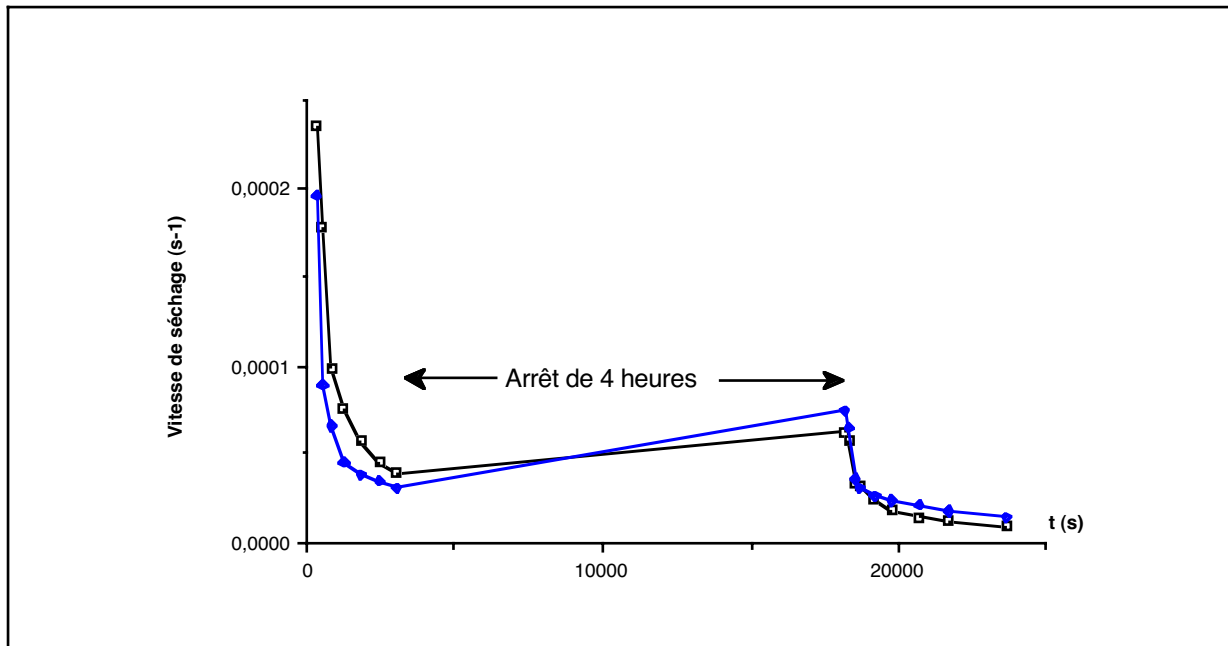


Figure 12 : Comparaison entre une de nos courbes expérimentales ($T_a=61^\circ\text{C}$, $Y=0,010$ et $V_{ahc}=1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) avec arrêt de séchage de 4 heures à 60°C , et la courbe calculée avec le modèle ajusté sur DAUDIN (1982). La vitesse de séchage expérimentale est calculée avec un polynôme glissant d'ordre 2.

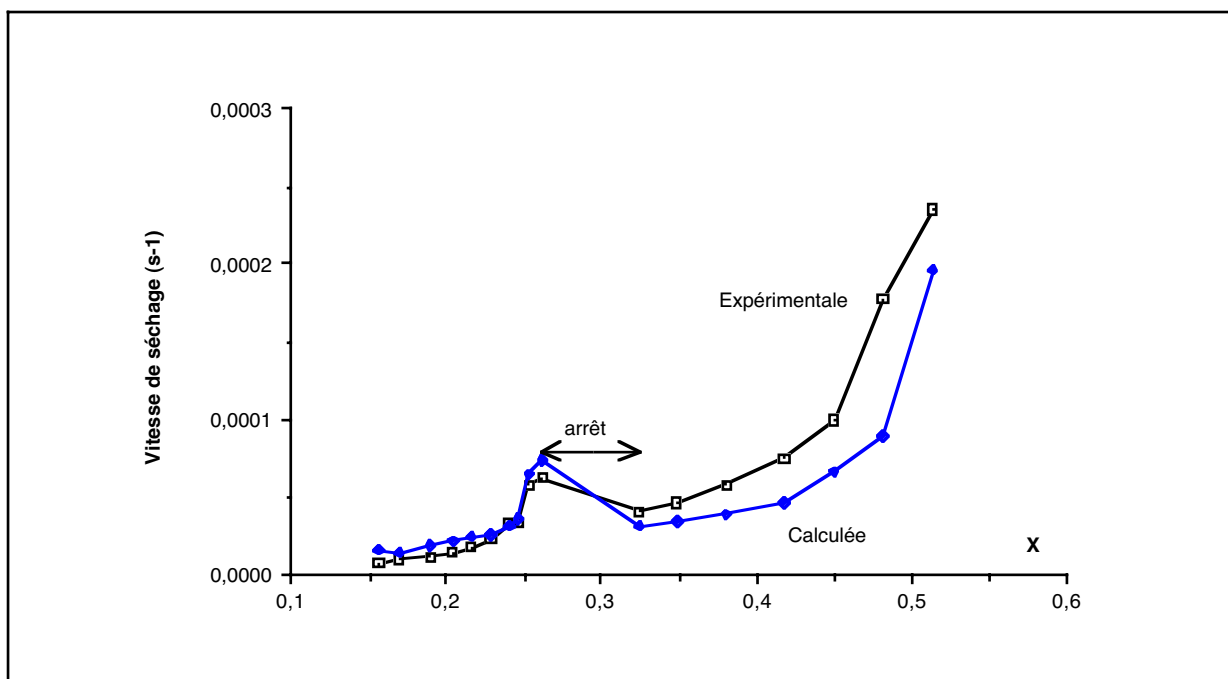


Figure 13 : Comparaison entre une de nos courbes expérimentales ($T_a=61^\circ\text{C}$, $Y=0,010$, $V_{ahc}=1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) avec arrêt de séchage de 4 heures à 60°C , et la courbe calculée avec le modèle ajusté sur DAUDIN (1982).

(1982). La vitesse de séchage expérimentale est calculée avec un polynôme glissant d'ordre 2.

Il faut noter que B_1 joue ici un rôle important puisque c'est lui qui contrôle, avec B_2 , le rééquilibrage de teneur en eau que l'on observe durant les arrêts. Cette diminution du gradient de teneur en eau au sein du grain permet une reprise du séchage à vitesse supérieure (figures 12 et 13).

c) Séchage et dégradation de la qualité

Une série d'expériences de séchage en couche mince a été réalisée avec du maïs frais de l'ITCF sur lequel on a mesuré la qualité amidonnaire avant et après l'expérience grâce au "test de turbidité" exprimé en absorbance.

La figure 14 montre un bon accord entre les qualités mesurées et simulées en regard de l'incertitude sur la mesure. Mais surtout, l'allure générale de la relation $Q_f = \text{fonction}(T_a)$ est identique à celle observée dans le cas d'un choc thermique à teneur en eau constante (cf. chapitre 1).

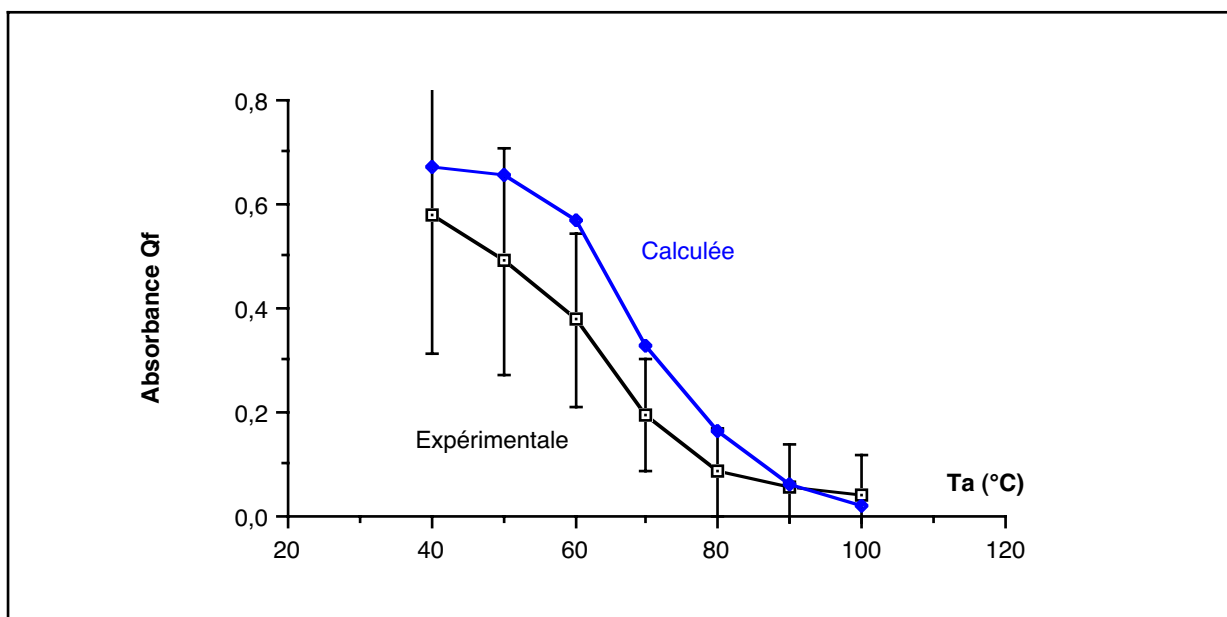


Figure 14 : Comparaison entre qualités mesurées, en fin de quelques-unes de nos expériences de séchage ($t=3600$ s, $Y=0,005$ et $V_{ahc}=1,8$ m.s⁻¹, $Q_0=0,673$) à différentes températures d'air, et qualités prédites par le modèle.

5 - Conclusion

Ce modèle est capable de simuler tous les types de séchage en couche mince du maïs (ou d'autres types de grain) : constant, variable, avec arrêt, avec saut, avec condensation.

La qualité vient s'insérer comme une quantité dont on écrit le bilan instantané, selon la même méthode que pour la chaleur, sur un petit intervalle de temps dt . Les

équations correspondantes ont été déterminées expérimentalement dans le chapitre 1.

Il est ainsi possible de dimensionner les caissons de relaxation des séchoirs industriels, ou les cellules de repos entre 2 séchoirs montés en série, de manière à obtenir le rééquilibrage le plus complet de la teneur en eau du grain en limitant la dégradation de la qualité amidonnaire.

Pour améliorer encore la précision des simulations, plusieurs voies sont intéressantes :

- Un séchoir expérimental en lit fluidisé devrait permettre d'obtenir une corrélation à la fois plus physique et plus fine d' α avec les caractéristiques de l'air de séchage et de K_Q avec T_g et X .

- Un réajustement général, portant sur toutes les cinétiques DAUDIN ainsi que sur nos cinétiques de longues durées, pour identifier simultanément les coefficients τ_i et B_2 , devrait permettre de relier B_2 à T_g au lieu de T_a .

III - MODÉLISATION DU SÉCHAGE EN COUCHE ÉPAISSE

L'étape "couche épaisse" dans la modélisation d'un séchoir présente un triple intérêt :

- valider le modèle "couche mince",
- mettre au point une méthode, adaptée, de résolution numérique du système, dans l'espace-temps,
- étudier l'évolution de l'air au cours du séchage.

Bref, il s'agit de mettre au point la brique de base que l'on combinera pour construire le simulateur de séchoirs industriels.

1 - Bibliographie, équations, hypothèses

La couche épaisse apporte une dimension supplémentaire par rapport à la couche mince : l'espace. En effet, on ne peut plus négliger l'évolution des caractéristiques de l'air au cours de sa traversée dans la couche épaisse de grains. Il s'agit maintenant de rendre compte de ces gradients de teneur en eau et de température de l'air ; et ceci au fil du temps.

On peut considérer que, dans la littérature, deux types de méthodes co-existent :

- La résolution en éléments finis (ARNAUD et FOHR, 1991) présente l'intérêt de pouvoir tenir compte des problèmes d'aérodynamique complexe, de conduction inter-grains, de tassement et même de rétrécissement des grains. En effet, on écrit les équations des transferts pour pratiquement chaque grain de la couche épaisse (selon le maillage et un éventuel plan de symétrie). Ce type de calcul est très long à effectuer sur ordinateur et est donc limité, par ces auteurs, à l'étude et au dimensionnement des canaux ou dièdres d'air des séchoirs. Cependant, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs devrait permettre, dans l'avenir, de généraliser ce type de méthode à un séchoir entier.

- La décomposition formelle de la couche épaisse en une succession de couches minces (figure 1) utilise la symétrie autour de l'axe matérialisé par la trajectoire de l'air. Cette méthode, qui suppose un écoulement piston de l'air, est inadaptée pour étudier l'influence d'une aérodynamique complexe sur le séchage. Par contre, le temps de calcul est beaucoup plus faible et conditionné essentiellement par l'épaisseur de grains traversée. C'est la méthode la plus usitée, tant à l'ENSIA (DAUDIN, 1982 ; TECHASENA RATTANAPANT, 1989), que dans le monde entier (BRUCE, 1983 ; BAKKER ARKEMA et *al.*, 1974).

Cette dernière méthode nous a semblé la plus adaptée à notre but : simuler un séchoir industriel à maïs en régime stabilisé et en régime transitoire.

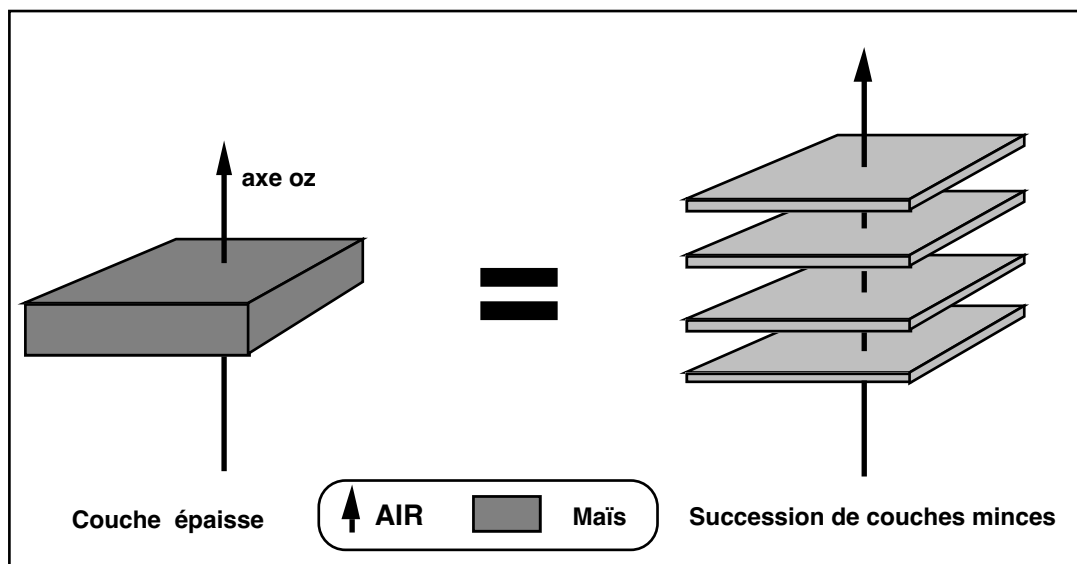


Figure 1 : Décomposition virtuelle d'une couche épaisse en une succession de couches minces.

Les hypothèses supplémentaires nécessaires à la mise en œuvre du modèle "couche mince" du chapitre 2, selon cette méthode, sont :

- écoulement de l'air de type piston sans chemin préférentiel,
- perte de charge négligeable (P constante et uniforme),
- pas d'échanges directs entre grains sur l'axe oz ,
- pas de tassement des grains (ϵ constante et uniforme),
- surface de contact entre grains négligeable (a identique au chapitre 2),

Nous avons donc assimilé la couche épaisse à un empilement de couches minces dont les seuls transferts sont entre air et grains.

Les bilans dans l'air, en considérant le volume de séchoir $S \cdot dz$ et plus particulièrement le volume occupé par l'air $\epsilon \cdot S \cdot dz$ (DAUDIN, 1982), s'écrivent :

$$\begin{aligned} & \text{vitesse de variation de la charge volumique d'énergie} \\ & = \\ & - \text{div}[\text{densité de flux d'énergie}] \\ & + \text{vitesse de production volumique d'énergie} \end{aligned}$$

on peut donc écrire pour le **bilan d'eau dans l'air** :

$$\frac{\partial(\rho_a \cdot Y)}{\partial t} = -\text{div}(V_a \cdot \rho_a \cdot Y) + \Phi_{m.a.} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \quad [1]$$

avec $V_a = \frac{V_{ahc}}{\epsilon}$

hypothèse : on suppose qu'il n'y a pas d'accumulation locale d'air (ρ_a constante).

ce qui donne :

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -V_a \cdot \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\Phi_m \cdot a \cdot (1-\varepsilon)}{\rho_a \cdot \varepsilon} \quad [2]$$

et pour le **bilan de chaleur**, dans le cas d'un Φ_m positif (séchage) :

$$\frac{\partial(\rho_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv}) \cdot T_a)}{\partial t} = -\text{div}[V_a \cdot \rho_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv}) \cdot T_a] + a \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot [\Phi_m \cdot H_v + \Phi_c] \quad [3]$$

hypothèse : on néglige la variation de c_{pv} , c_{pa} avec T_a .

ce qui donne :

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -V_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{a \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\Phi_m \cdot c_{pv} \cdot (T_g - T_a) + \Phi_c}{\rho_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})} \quad [4]$$

dans le cas d'un Φ_m négatif (condensation) :

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -V_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{a \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_c}{\varepsilon \cdot \rho_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})} \quad [5]$$

De Loncin (1985), on tire les constantes relatives aux caractéristiques de l'air et de la vapeur (à $P = 10^5$ Pa et $T_a = 100^\circ\text{C}$):

$$\begin{aligned} \rho_a &= 0,950 \text{ kg.m}^{-3} \\ c_{pa} &= 1012 \text{ J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \\ c_{pw} &= 4210 \text{ J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \\ c_{pv} &= 2030 \text{ J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \\ L_v &= 2,357 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1} \end{aligned}$$

que l'on utilisera réellement comme des constantes (ce qui est justifié par leur faible variation sur l'intervalle considéré).

2 - Résolution numérique

En considérant que la couche épaisse est un empilement de couches minces d'épaisseur Δz (l'axe oz est confondu avec la trajectoire de l'air et de même sens) et que le pas de temps Δt est suffisamment petit pour considérer que les variables sont indépendantes sur cet intervalle, on peut transformer l'équation [2] en :

$$\frac{Y(t+\Delta t, z) - Y(t, z)}{\Delta t} = -V_a \cdot \frac{Y(t+\Delta t, z+\Delta z) - Y(t+\Delta t, z-\Delta z)}{2 \cdot \Delta z} + \frac{a \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_m(t, z)}{\varepsilon \cdot \rho_a} \quad [6]$$

et, de même, l'équation [4] en :

$$\frac{T_a(t+\Delta t, z) - T_a(t, z)}{\Delta t} = -V_a \cdot \frac{T_a(t+\Delta t, z+\Delta z) - T_a(t+\Delta t, z-\Delta z)}{2 \cdot \Delta z} \quad [7]$$

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

Il s'agit donc d'une méthode de différences finies implicite.

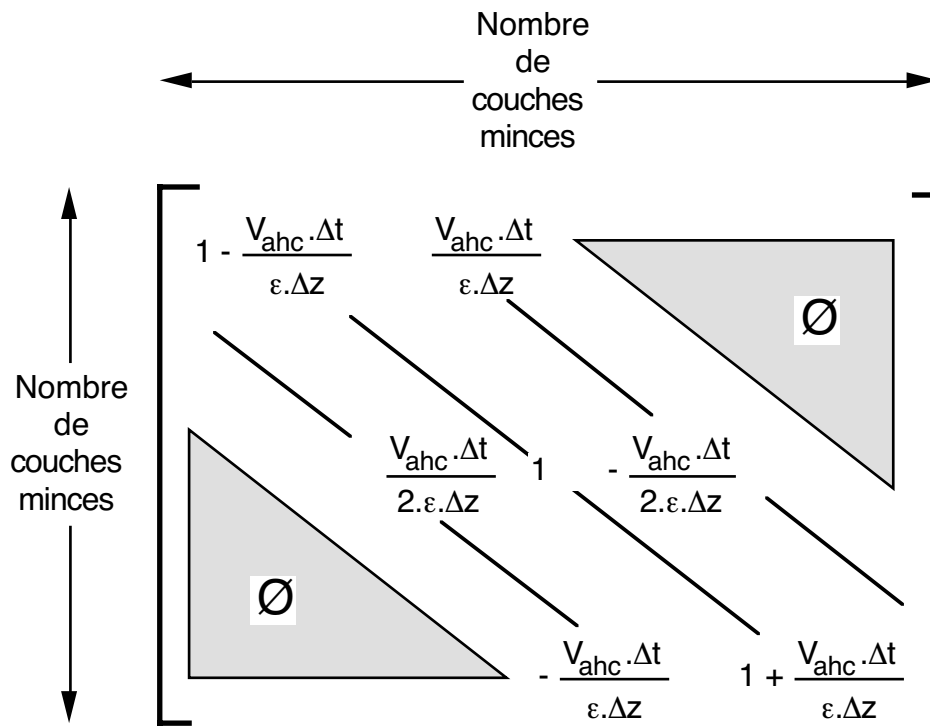
En séparant les termes en t et ceux en t+Δt, on aboutit à l'écriture vectorielle suivante :

$$[Y(t+\Delta t)] = \text{MAT} \cdot \left([Y(t)] + \left[\frac{a.(1-\varepsilon).\Phi_m(t)}{\varepsilon.\rho_a} \right] \right) \quad [8]$$

et

$$[T_a(t+\Delta t)] = \text{MAT} \cdot \left([T_a(t)] + \left[\frac{a.(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{(\Phi_m(t).c_{pv}.T_g(t) - T_a(t)) + \Phi_c(t)}{\rho_a.(c_{pa} + Y(t).c_{pv})} \right] \right) \quad [9]$$

où MAT est l'inverse de la matrice carrée suivante :



Il suffit donc de recalculer, à chaque Δt, les valeurs de X₁, X₂, X₃, X, T_g, Q et le second terme dans la parenthèse des équations [8] et [9] pour chacune des couches minces à l'aide des équations des chapitre 1 et 2, puis Y et T_a à l'aide des équations [8] et [9].

Malheureusement, le pas de temps Δt est limité à 0,01 s maximum sans quoi le calcul diverge très rapidement. Il faut préciser à ce sujet que la méthode explicite associée impose quant à elle un pas de temps maximum de 0,0001 s. Ces valeurs sont inadaptées pour la simulation, sur micro-ordinateur, d'un séchoir entier.

Nous avons donc recherché une méthode de résolution du système en couche épaisse plus rapide.

En reprenant les équations [2] et [4] et en faisant les hypothèses suivantes (DAUDIN, 1982) :

$$\frac{\partial Y}{\partial t} \text{ est négligeable devant } -V_a \cdot \frac{\partial Y}{\partial z} \text{ et } \frac{\Phi_m \cdot a \cdot (1-\varepsilon)}{\rho_a \cdot \varepsilon}$$

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

on obtient alors les équations simplifiées :

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{\Phi_m \cdot a \cdot (1-\varepsilon)}{V_a \cdot \rho_a \cdot \varepsilon} \quad [10]$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\Phi_m \cdot c_{pv} \cdot (T_g - T_a) + \Phi_c}{V_a \cdot \rho_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})} \quad [11]$$

que l'on peut écrire sous forme de différences finies :

$$\frac{Y(t, z + \Delta z) - Y(t, z)}{\Delta z} = \frac{a \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_m(t, z)}{V_a \cdot \varepsilon \cdot \rho_a} \quad [12]$$

$$\frac{T_a(t, z + \Delta z) - T_a(t, z)}{\Delta z} = \frac{a \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\Phi_m(t, z) \cdot c_{pv} \cdot (T_g(t, z) - T_a(t, z)) + \Phi_c(t, z)}{V_a \cdot \rho_a \cdot (c_{pa} + Y(t, z) \cdot c_{pv})} \quad [13]$$

Ayant, par hypothèse, négligé les variations instantanées de Y et de T_a devant leurs variations dans l'espace, on peut supposer que Δt est suffisamment petit pour que Y et T_a soient constantes sur cet intervalle.

Alors on aboutit à une méthode d'intégration des variables dans l'espace-temps simple et robuste. A chaque pas de temps Δt, on recalcule tous les Y(t, z) et T_a(t, z) à l'aide des équations [12] et [13], on écrit Y(t+Δt, z)=Y(t, z) et T_a(t+Δt, z)=T_a(t, z) puis on recalcule X₁, X₂, X₃, X, T_g et Q à l'aide des équations des chapitres 1 et 2.

En fait cela revient à dissocier l'intégration dans l'espace (dz) de celle dans le temps (dt). Un pas de temps Δt de 2 s est alors admissible et la simulation d'un séchoir industriel sur un micro-ordinateur devient possible.

Cette deuxième méthode, beaucoup plus rapide et plus simple de mise en œuvre, **donne exactement les mêmes résultats simulés** que la précédente ce qui confirme la validité de ses hypothèses supplémentaires.

3 - Simulations

Le modèle, ainsi résolu, permet de simuler la cinétique de séchage de toute couche épaisse en considérant la moyenne des teneurs en eau des grains sur l'épaisseur.

Sur les 4 coefficients ajustés K_Q , B_1 , B_2 et α des chapitres précédents, 3 seulement gardent une utilité en couche épaisse. En fait on obtient d'aussi bons résultats avec $\alpha = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$.

Quelques expériences ont été réalisées avec des couches épaisses d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur pour une masse totale de 4 à 5 kg de maïs humide et selon les mêmes méthodes que dans le chapitre 2. On observe une bonne concordance entre les cinétiques expérimentales et calculées (figure 2) compte-tenu de la durée du séchage, des incertitudes expérimentales et des erreurs d'arrondi lors de la simulation.

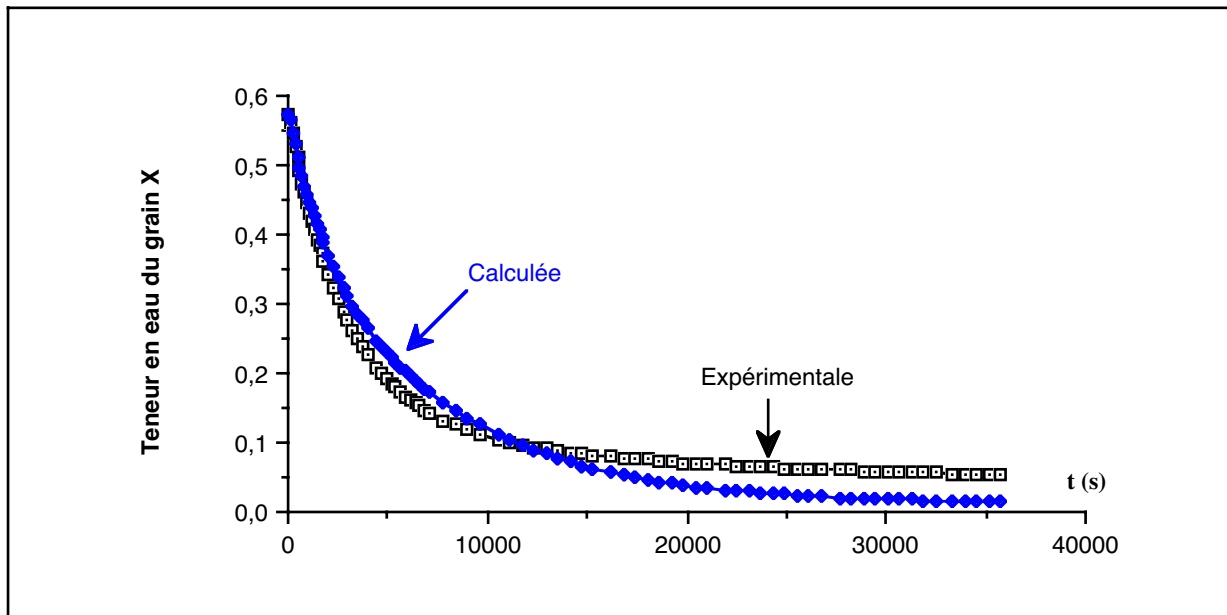


Figure 2 : Comparaison entre cinétiques expérimentales et simulées (couche épaisse de 0,17 m, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,011$ et $V_{ahc}=0,92 \text{ m.s}^{-1}$).

La figure 3 montre que le modèle prédit bien l'inertie observée au début du séchage. Là encore, la simulation colle assez bien à l'expérience réalisée, avec du maïs réhumidifié, en 1990 alors que les coefficients du modèle ont été ajustés sur des expériences "couche mince" de 1980 dans un domaine de vitesse d'air différent (supérieur à $0,7 \text{ m.s}^{-1}$).

Il faut noter que le dispositif de pesée discontinue du séchoir expérimental (cf chapitre 2) provoque un tassement artificiel de la masse de grain, parfois même non-uniforme, lors de la descente du plateau supportant le produit sur la balance.

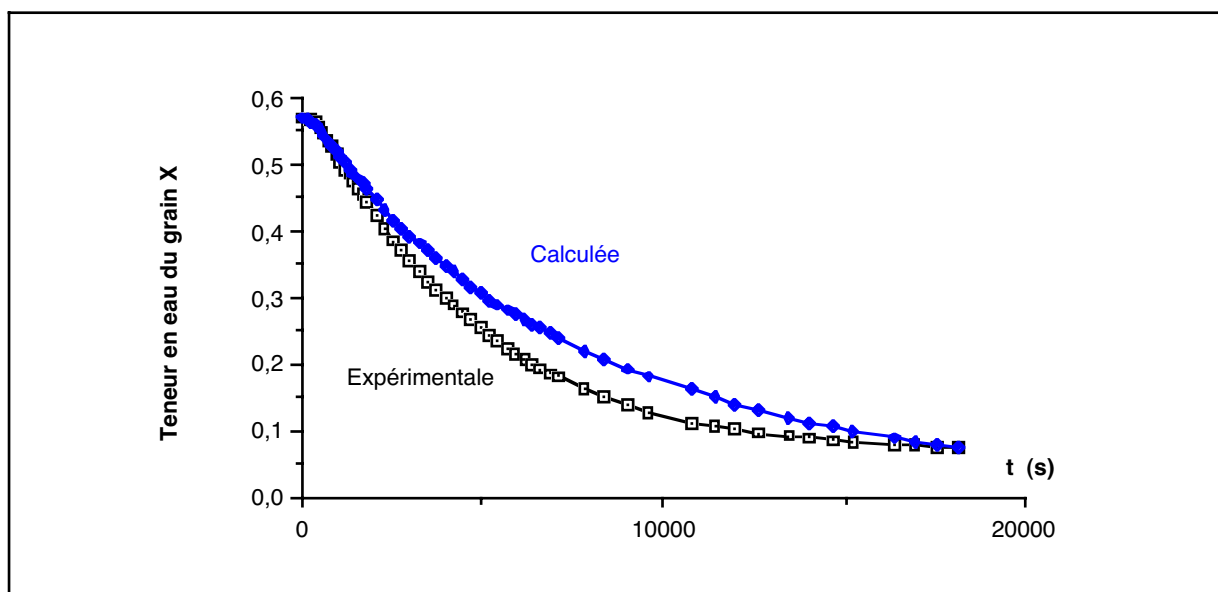


Figure 3 : Comparaison entre cinétiques expérimentales et simulées (couche épaisse de 0,16 m, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

L'expérience associée à la figure 3 (fichiers FCMAIS68.CIN et FCMAIS68.FI) a été utilisée comme une base pour simuler les profils au sein de la couche à un instant donné (6 minutes de séchage).

Sur la figure 4, au bout de 6 minutes de séchage, seul le compartiment 3 (périphérique) a vraiment séché. Par ailleurs, on observe que le front de séchage a progressé jusqu'à environ 8 centimètres dans l'épaisseur ; et que l'eau évaporée des premières couches va condenser en partie sur les dernières couches.

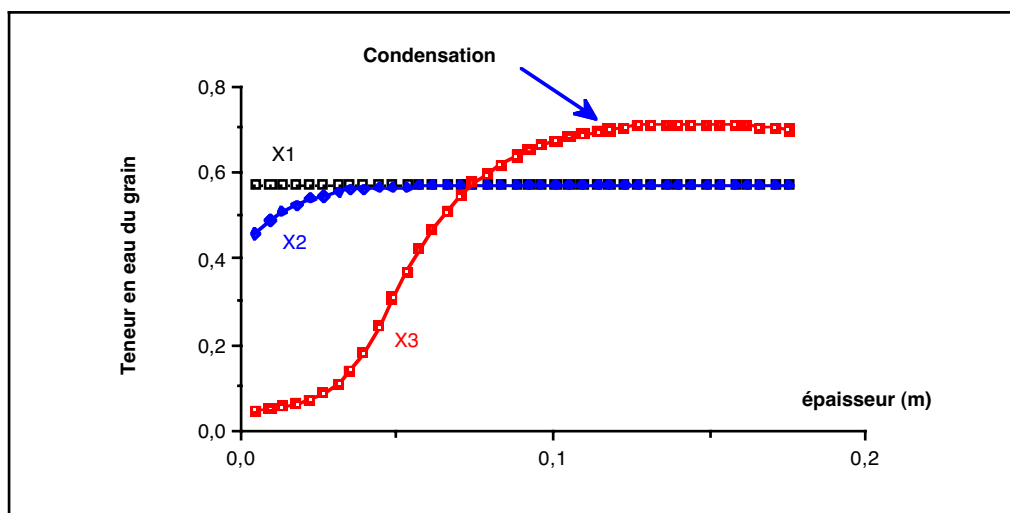


Figure 4 : Profils simulés des teneurs en eau des 3 compartiments au sein de la couche épaisse (épaisseur de 0,16 m, $t=360 \text{ s}$, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

En fait la condensation est d'abord une inversion du sens de l'échange de matière : la pression partielle de vapeur d'eau P_{va} dans l'air devient supérieure à celle

du grain P_{v3} . Mais l'air arrive quand même à la saturation du fait de la chaleur cédée au grain. La simulation prédit donc la formation de gouttelettes à la surface des grains des 3 - 4 derniers centimètres traversés (figure 5 : l'humidité relative de l'air atteint 100%).

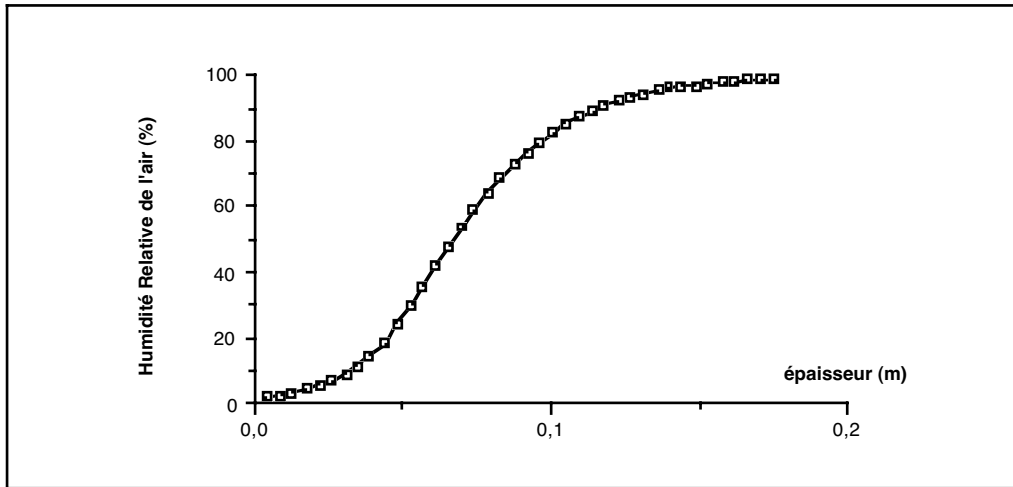


Figure 5 : Profil simulé d'humidité relative de l'air au sein de la couche épaisse (épaisseur de 0,16 m, $t=360$ s, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42$ m.s⁻¹).

Sur la figure 6, on peut observer l'écart entre les températures des grains T_g et de l'air T_a (plus le temps passe plus il est petit) qui diminue progressivement au sein de la couche pour les voir, toutes deux, converger vers la température de bulbe humide à la saturation de l'air.

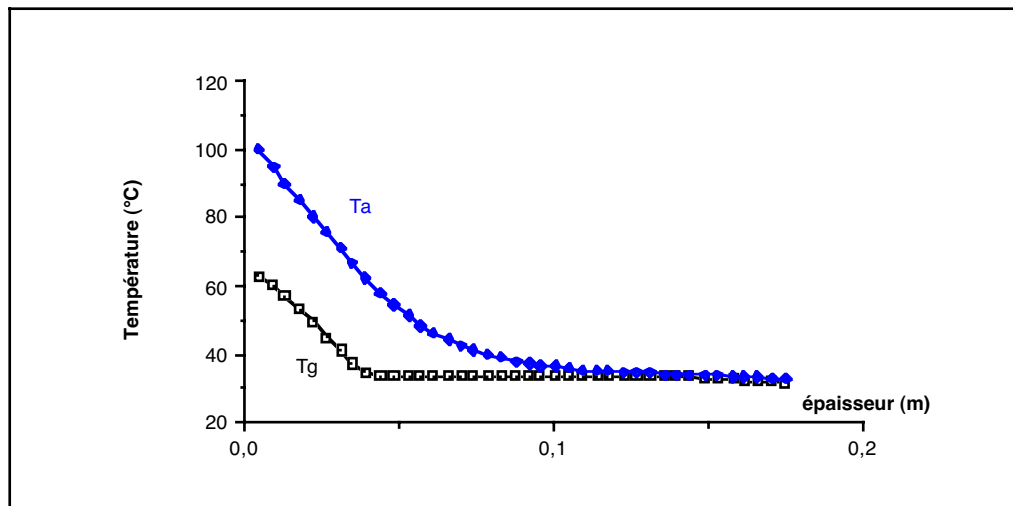


Figure 6 : Profils simulés des températures de grain T_g et d'air T_a au sein de la couche épaisse (épaisseur de 0,16 m, $t=360$ s, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42$ m.s⁻¹).

Toujours en simulant la même expérience, mais en étudiant cette fois l'axe du temps, la figure 7 montre le retard entre la montée en température de la couche

épaisse et la dégradation de la qualité : celle-ci ne commence à se dégrader qu'à partir de 50°C. Or les grains sont initialement à moins de 20°C.

Toutes ces courbes issues d'une même simulations sont difficilement vérifiables expérimentalement tant il est impossible d'instrumenter dans la masse de grain sans modifier l'aéraulique, la thermique... du système. En particulier il est pratiquement impossible de mesurer précisément la qualité amidonnière moyenne de la couche épaisse et plus encore les valeurs locales.

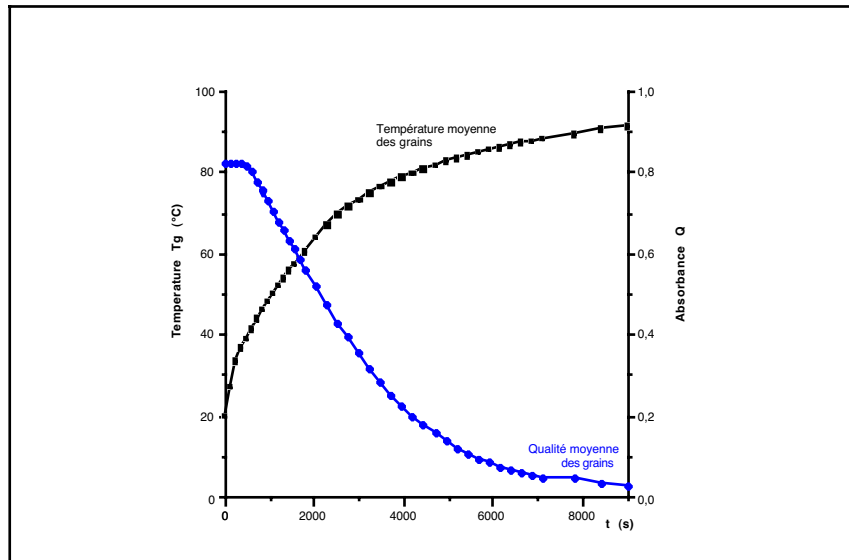


Figure 7 : Evolutions simulées des température et qualité moyennes des grains de la couche épaisse (épaisseur de 0,16 m, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Par contre il est possible de comparer les températures et teneurs en eau instantanées de l'air en sortie de la couche épaisse à tout instant.

En particulier sur les figures 8 et 9, le modèle prédit bien le palier correspondant à la traversée du front de saturation dans la couche épaisse, même si les valeurs absolues sont décalées.

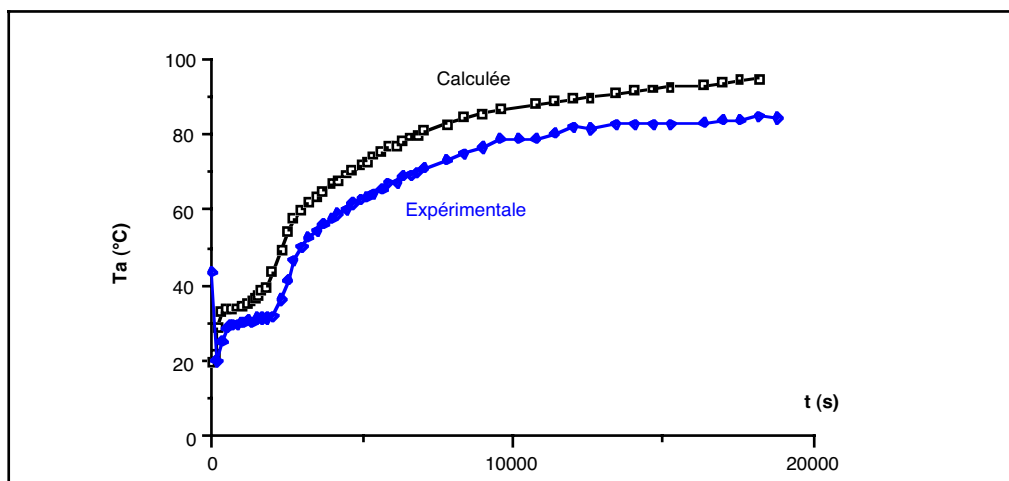


Figure 8 : Comparaison des courbes expérimentale et simulée d'évolution de la température d'air en sortie de la couche épaisse (épaisseur de 0,16 m, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Et même plus généralement, le modèle, sur les courbes des figures 8 et 9, décompose bien les 3 étapes successives du séchage de la couche épaisse :

- échauffement initial, saturation progressive de l'air,
- migration du front de séchage / saturation,
- échauffement final et assèchement de l'air.

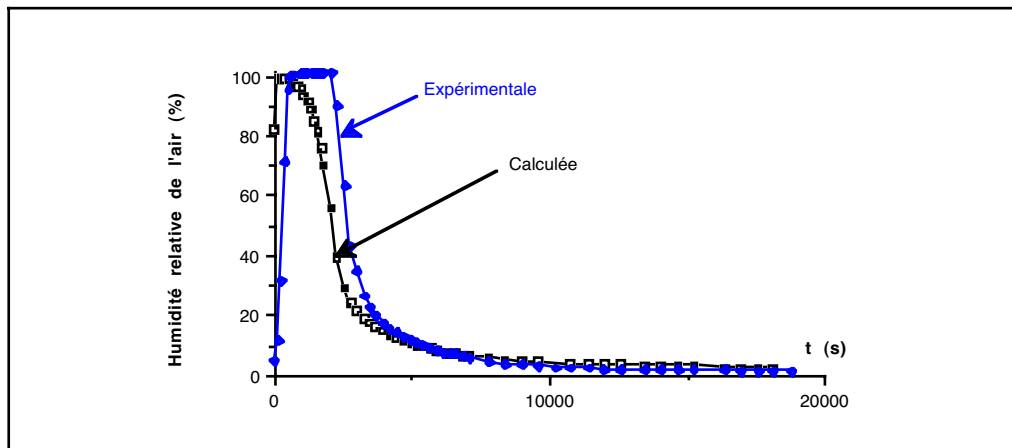


Figure 9 : Comparaison des courbes expérimentale et simulée d'évolution de l'humidité relative de l'air en sortie de la couche épaisse (épaisseur de 0,16 m, $T_a=100^\circ\text{C}$, $Y=0,012$ et $V_{ahc}=0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Dans la mesure où la vitesse d'air est très faible et où l'on atteint la saturation, la dynamique du capteur d'humidité relative de l'air doit être prise en compte pour expliquer, en partie, les différences entre expérience et simulation (figure 9).

4 - Conclusion

Une méthode de résolution des équations dans l'espace-temps a été validée par comparaison avec 2 méthodes plus complexes (implicite et explicite) mais qui nécessitent moins d'hypothèses. Elle présente le double intérêt d'être simple et rapide.

Si l'on tient compte des incertitudes expérimentales et des approximations numériques, les simulations concordent bien avec les résultats expérimentaux sans coefficient d'ajustement supplémentaire (et même un ajustement en moins). En particulier, le modèle prédit assez bien les caractéristiques de l'air au cours de sa traversée de la couche épaisse et cela à tout instant.

La prédiction de la qualité n'a pu être vérifiée expérimentalement mais il faut s'attendre à une perte de précision du fait de la forte dépendance du coefficient de dégradation de la qualité \bar{K}_Q à l'acuité de la prédiction de la température de l'air. Or cette dernière, de par la méthode employée pour la résolution, cumule les erreurs de calcul sur les autres variables.

Pour améliorer la précision, il serait intéressant d'envisager de refaire les ajustement des coefficients B_1 , B_2 et α de manière à intégrer les phénomènes non pris en compte tels la diminution de la surface de contact ou le tassement.

IV - SIMULATIONS D'UN SÉCHOIR INDUSTRIEL

A - EN RÉGIME STATIONNAIRE

1 - Etude bibliographique

Pourquoi simuler le régime stationnaire de séchoirs industriels ? L'intérêt est de prédire, dans un temps très court et pour un coût minime, les performances en matière de qualité amidonnière, teneur en eau, débit évaporatoire et rendement énergétique d'un séchoir existant ou encore à l'état d'idée. En effet, dans ce but, seul le régime stabilisé importe.

Une simulation seule permet de régler un séchoir existant en fonction des caractéristiques du maïs humide en entrée et des objectifs de teneur en eau et de qualité pour le maïs séché.

La multiplication des simulations permet la mise au point, rapide et économique, d'un nouveau séchoir plus performant. Elle permet aussi de classer entre elles les différentes conceptions de séchoirs existantes sur le marché.

L'avantage de notre modèle, à ce sujet, est important puisque, même si le séchoir est globalement en régime stabilisé, localement il est en régime transitoire que seul un modèle dynamique peut simuler.

Nous nous sommes intéressé, dans ce but, aux séchoirs à flux mixtes, catégorie la plus répandue chez les industriels français du séchage du maïs. Classiquement ceux-ci se composent (LASSERAN, 1977) :

- d'un ou plusieurs compartiments ou étages se caractérisant par une température, une teneur en eau et une vitesse de l'air,
- d'un ou plusieurs ventilateurs avec filtres à air,
- d'un dispositif de chauffage de l'air souvent par contact direct avec les flammes des brûleurs,
- d'un dispositif d'évacuation des buées,
- d'un dispositif d'alimentation en grain humide avec sondes de niveaux,
- d'un dispositif d'extraction du grain sec dont la périodicité de fonctionnement est assurée par une minuterie réglable manuellement,

Chaque étage a une fonction précise : préchauffage, séchage, relaxation, refroidissement (BRUCE, 1983).

L'air chauffé provient soit de l'ambiance soit du recyclage des étages inférieurs (air peu saturé).

Le séchoir industriel actuel fait généralement une vingtaine de mètres de haut pour plusieurs mètres carrés de section. Il résulte d'un assemblage vertical de caissons généralement tous identiques, au moins au sein d'un étage. Le grain y circule par gravité du haut vers le bas où il est extrait de manière discontinue afin d'éviter la formation de bouchons et donc d'incendies.

Dans chaque caisson, on trouve des rangées de canaux ou dièdres d'alimentation en air chaud et d'évacuation d'air usé disposés en quinconce. L'air doit donc traverser, verticalement, d'une rangée de canaux d'air chaud vers une rangée de canaux d'air usé, un lit (ou couche épaisse) de grains (figures 1 et 2).

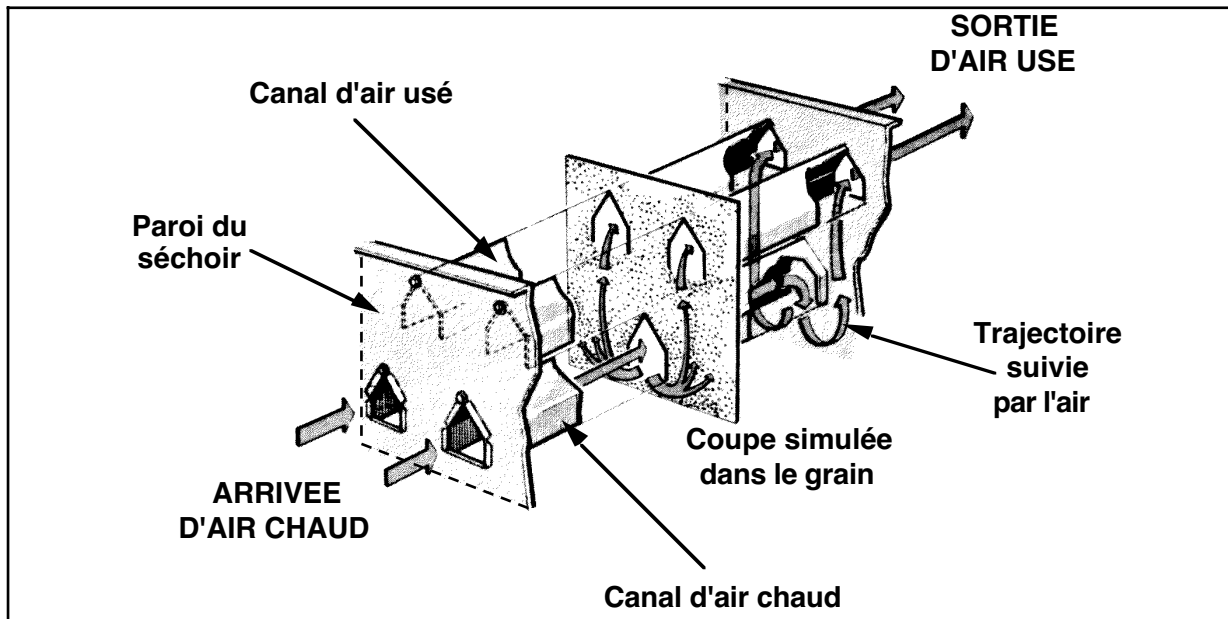


Figure 1 : Vue, dans l'espace, d'une portion d'un caisson de séchage.

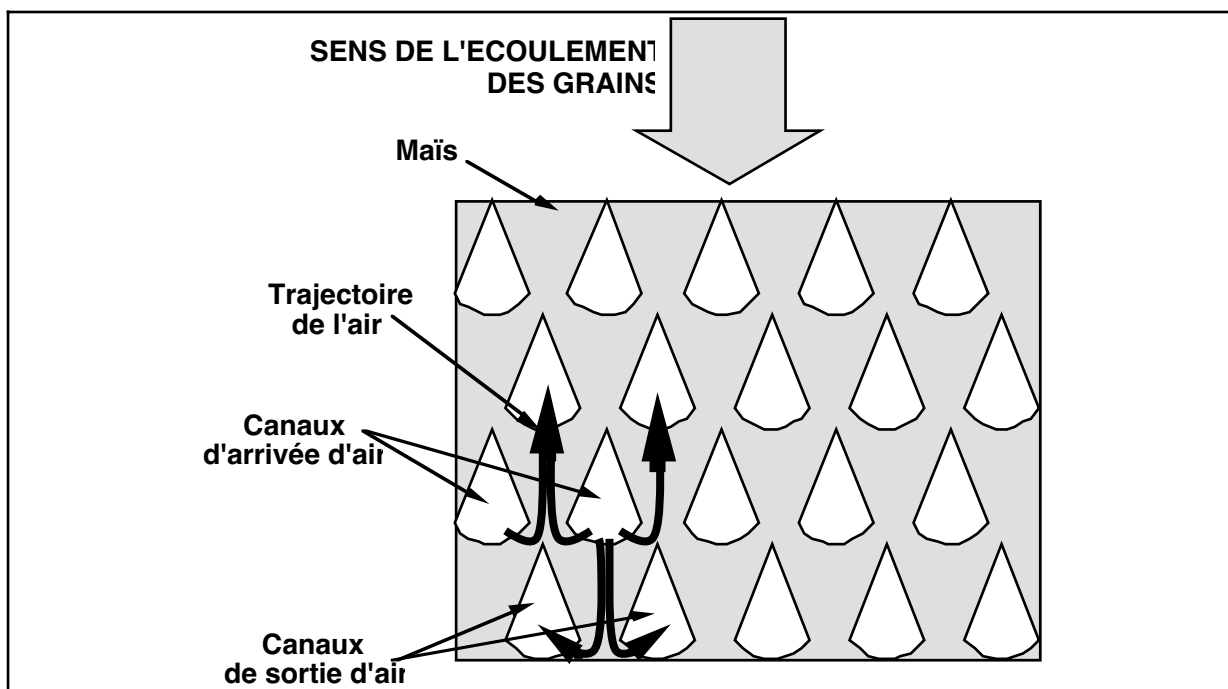


Figure 2 : Vue, de profil, d'un caisson de séchage et répartition des flux d'air chaud.

Le plus souvent, chaque caisson d'un étage de séchage, comprend 4 rangées de canaux (2 d'air chaud, 2 d'air usé). Et, le grain, lors de sa descente dans le séchoir,

rencontre, dans la majorité des cas, alternativement ces 2 types de rangées de canaux.

Il faut noter qu'une minorité de séchoirs américains fonctionne sur ce principe : le plus souvent, les parois latérales du séchoir sont grillagées et l'ensemble du séchoir fonctionne en courants croisés (BAKKER ARKEMA et *al.*, 1974).

TOFTDAHL OLESEN (1987) a étudié l'écoulement de l'air entre les dièdres et évalue les échanges air / grains à :

- co-courants : 32%,
- contre-courants : 32%,
- courants croisés : 36%,

en volumes de grains. Mais ces proportions varient certainement en fonction de la géométrie de ces dièdres et de leur répartition dans l'espace.

Mais la plupart des auteurs (BRUCE, 1983 ; DAUDIN, 1982) considèrent qu'à un lit correspond un type d'échange. Ce qui revient à décomposer le séchoir en un empilement simple de couches épaisses dont les échanges air / grains se font à co ou à contre-courants, alternativement selon l'axe vertical.

BRUCE (1989) considère que la décomposition du séchoir en couches épaisses dont les échanges air / grains se font en courants croisés, donne une meilleure prédiction de la température du grain. Or il est clair que la précision de la prédiction de la qualité du produit séché est directement dépendante de celle de la prédiction de la température du grain.

Néanmoins, nous avons retenu la décomposition du séchoir en couches épaisses alternativement co et contre-courants qui est bien plus rapide à simuler et adaptée à la simulation du fonctionnement dynamique. Celle-ci se traduit, pour le modèle, par l'hypothèse suivante : air et grain suivent des trajectoires verticales de même sens ou de sens opposés dont les caractéristiques sont uniformes sur une section horizontale. Ceci implique que le volume des canaux d'air n'ait pas de "matérialité" (figure 3).

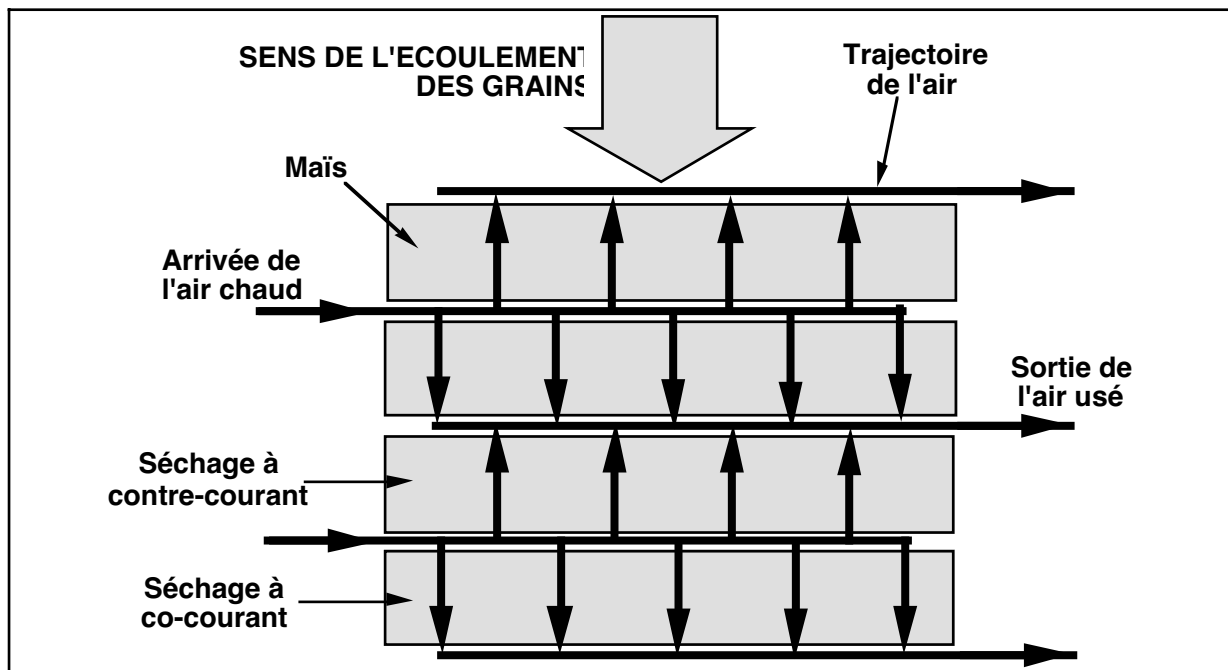


Figure 3 : Représentation par le modèle d'un caisson de séchage vu de profil.

Pour pouvoir utiliser notre modèle "couche épaisse" du chapitre 3, quelques hypothèses supplémentaires sont donc nécessaires :

- canaux d'air immatériels : on travaille sur un volume de séchoir équivalent dont le volume des dièdres est soustrait,
- écoulement piston de l'air sur un axe vertical,
- immobilité des lits de grains entre 2 extractions, écoulement piston au cours de l'extraction,
- durée d'extraction négligeable (inférieure à 1% du temps total),
- uniformité des caractéristiques de l'air et des grains sur une section horizontale,
- transferts air/grains négligeables dans les zones de relaxation,
- pertes calorifiques par les parois négligeables (isolation thermique),

et, d'une manière générale, les hypothèses posées pour la modélisation de la couche épaisse sont élargies à l'ensemble du séchoir.

LASSERAN (1989 b) a montré que l'hypothèse d'un écoulement piston était plus ou moins vérifiée selon les séchoirs et était liée à la géométrie et à l'agencement des canaux d'air. Les résultats de l'étude de LENOIR sur cet écoulement, quand ils seront disponibles, devraient permettre de savoir dans quels cas l'hypothèse est valide.

Les travaux récents de SUN (1991) nous donnent, maintenant, la possibilité d'avoir un regard critique sur les hypothèses relatives à l'aérodynamique.

Il faut insister sur le fait que notre modèle, par construction, ne peut rendre compte de la spécificité de la géométrie des dièdres ni même de leur agencement au sein d'une rangée.

2 - Matériels, méthodes

a) Séchoir pilote

C'est le séchoir pilote de l'ITCF à Boigneville (91) qui a servi pour les expérimentations.

Sur une hauteur d'environ 5 mètres, il est composé de caissons de dimensions 0,5 m x 0,5 m x 0,55 m dont 13,5% du volume est occupé par les 2 rangées de canaux d'air (figure 4). Modulable, il est généralement configuré en 2 étages de séchage, 2 étages de relaxation et 1 étage de refroidissement. On peut l'assimiler à un séchoir industriel à l'échelle 1/4.

Il présente les avantages suivants, par rapport à un séchoir industriel :

- La température et le débit de l'air sont connus et maîtrisés pour chaque caisson ce qui n'est que rarement le cas pour les séchoirs industriels où l'on ne connaît pas exactement la répartition des flux d'air entre les divers caissons d'un même étage.

- Il est possible de fonctionner avec ou sans recyclage d'air. Il est aussi possible de choisir les caissons recyclés.

- L'instrumentation en capteurs est importante, en particulier température et humidité relative de l'air en entrée et en sortie de chaque caisson, débit d'air en entrée de chaque caisson.

- L'extracteur à vis permet de maîtriser précisément le volume de grain extrait.

Il présente aussi quelques inconvénients :

- La géométrie des dièdres et leur agencement sont fixes.

- L'extraction n'est pas instantanée : on modifie le débit du grain en changeant la durée de l'extraction sur un cycle d'une minute.

- La plage de débits de grain balayée par la minuterie de l'extracteur est limitée : ceci implique, dans certains cas, une action manuelle (sur la courroie de démultiplication) gênante pour les expériences de pilotage automatique.

Les expériences de séchage sur ce matériel ont été réalisées par l'équipe du Service "Qualité et Débouchés Agro-Alimentaires" de l'ITCF sous la direction de M. LASSERAN.

Il faut noter qu'il est difficile de maintenir, sur une longue période, les caractéristiques du produit en entrée parfaitement constantes (teneur en eau X et qualité amidonnaire Q) ainsi que, dans une moindre mesure, les réglages du séchoir (température T_a et vitesse V_{ahc} de l'air).

L'absence de fiches (ou fichiers) synthétiques résumant les caractéristiques des essais (parfois anciens) en vue des simulations sur l'ordinateur et la nécessité d'opérer des moyennes sur la plupart des variables (teneur en eau du grain en entrée, température de l'air de séchage...) augmentent l'incertitude sur ces valeurs.

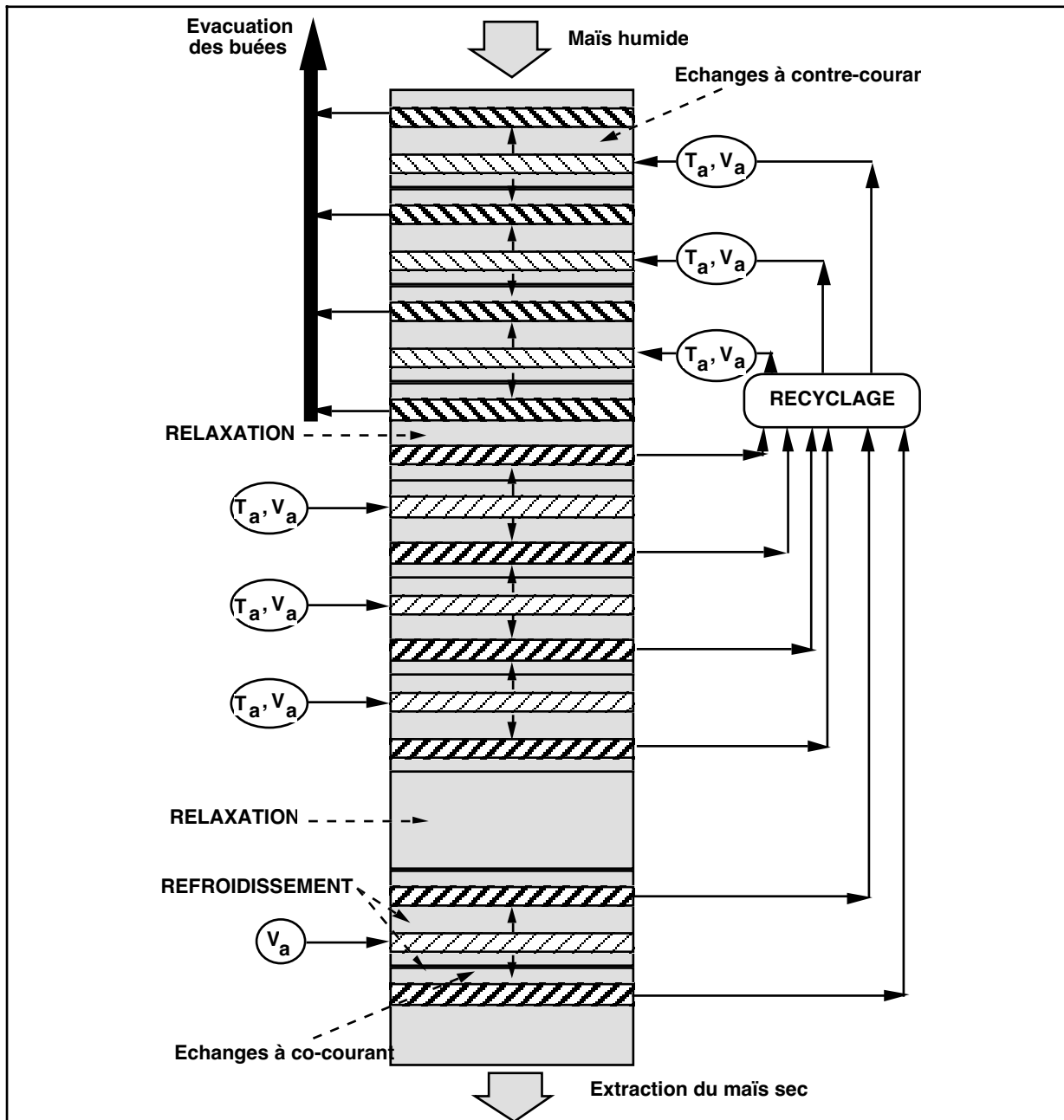


Figure 4 : Représentation schématique du séchoir pilote de l'ITCF dans le cas d'une configuration avec recyclage d'air et refroidissement en partie basse.

b) Résolution numérique

La hauteur de chaque couche épaisse est fixée par :

$$\text{Hauteur couche épaisse} = \text{Hauteur caisson} / \text{Nombre de rangées de canaux}$$

On travaille sur un volume équivalent en déduisant le volume des dièdres au niveau de la hauteur :

$$\text{Hauteur équivalente} = \text{Hauteur réelle} \times \text{Coefficient de remplissage}$$

On calcule la hauteur d'extraction correspondant à la masse de grain soutirée à chaque extraction :

$$\text{Masse soutirée} = \text{Débit grain (kg/s)} \times \text{durée d'un cycle d'extraction}$$

où le débit grain considéré est global et inclut autant les périodes d'extraction que les périodes de séchage. Par ailleurs, un cycle comprend une phase d'extraction suivie d'une phase de séchage où le grain est immobile.

$$\text{Hauteur extraction} = \frac{\text{Masse soutirée}}{\text{Masse volumique apparente} \times \text{Section équivalente}}$$

Dans la mesure où la hauteur d'extraction est rarement un multiple de la hauteur d'une couche mince, cette valeur est arrondie et la durée du cycle d'extraction est modifiée en conséquence : le débit grain reste donc identique.

La masse volumique apparente du maïs est donnée par MUHLBAUER (1974) pour la variété INRA 258 :

$$\text{Masse volumique apparente} = 853 - 252 \cdot X \quad \text{avec } 0,1 \leq X \leq 0,6$$

C'est la masse volumique apparente du grain séché qui est considérée dans tout le séchoir : par commodité, on considère que la variation de ce paramètre sur l'axe vertical influence peu le résultat de la simulation. En fait, il n'existe pas, ou peu, de données sur l'évolution du "compactage" du maïs dans le séchoir (la perte d'eau seule a une faible influence sur la masse volumique apparente).

On recherche le régime stationnaire de chaque couche épaisse, l'une après l'autre, du haut vers le bas. Le cycle de calcul pour chaque couche épaisse comprend 2 phases : séchage pendant l'intervalle entre 2 extractions (60 s pour le séchoir ITCF) puis décalage correspondant à la hauteur d'extraction.

Au départ du calcul, la couche épaisse est initialisée avec les résultats du calcul de la couche épaisse supérieure.

Dans le cas des échanges à co-courant ou des zones de relaxation le calcul de l'état d'une couche mince, à un instant donné, ne dépend que de l'état des couches mince supérieures. La stationnarité est donc atteinte au bout d'un seul renouvellement de la couche épaisse.

Dans le cas des couches épaisses dont les échanges air/grains sont à contre-courant, il faut plus d'un renouvellement complet pour observer la stabilité des teneurs en eau du grain au sein de la couche.

Dans le cas du recyclage d'air, on répète la simulation complète du séchoir en intégrant les teneurs en eau des airs usés calculées précédemment, jusqu'à stabilité de ces mêmes teneurs en eau.

Les simulations sont réalisées de manière à obtenir l'humidité voulue pour le grain en sortie de séchoir : la durée du cycle d'extraction (et donc le débit de grain) est optimisée en conséquence (recherche itérative).

Tous les calculs ont été réalisés sur un APPLE MACINTOSH II SI équipé d'un microprocesseur 68030 cadencé à 20 MHz et d'un coprocesseur arithmétique 68882, le tout apportant une puissance d'environ 1 Mips (million d'instruction par seconde). Le programme a été réalisé en THINK PASCAL version 4.0.

La simulation complète du séchoir pilote de l'ITCF nécessite 2 à 15 minutes de calcul (jusqu'à une heure dans le cas du recyclage d'air) selon le débit de grain et la température de l'air considérés. Cette durée s'allonge avec le recyclage d'air et la hauteur du séchoir. Les pas de temps et d'espace utilisés sont respectivement 1 s et 0,005 m généralement. Le résultat d'une simulation est représenté par un tableau contenant plus de 7000 variables relatives au grain et à l'air.

3 - Résultats

Du fait du temps de calcul important et des nombreuses données à dépouiller, notre étude s'est concentrée sur 2 expériences réalisées à l'ITCF en 1987 et en 1988 avec des configurations et réglages du séchoir très différents.

La figure 5 représente schématiquement la configuration physique du séchoir, ses réglages et le résultat de l'essai N°1 / 1988. La qualité amidonnaire est ici exprimée en pourcentage de la lumière transmise (%T) puisque c'est l'unité couramment utilisée dans la filière maïs pour exprimer le résultat du test de turbidité (cf chapitre 1).

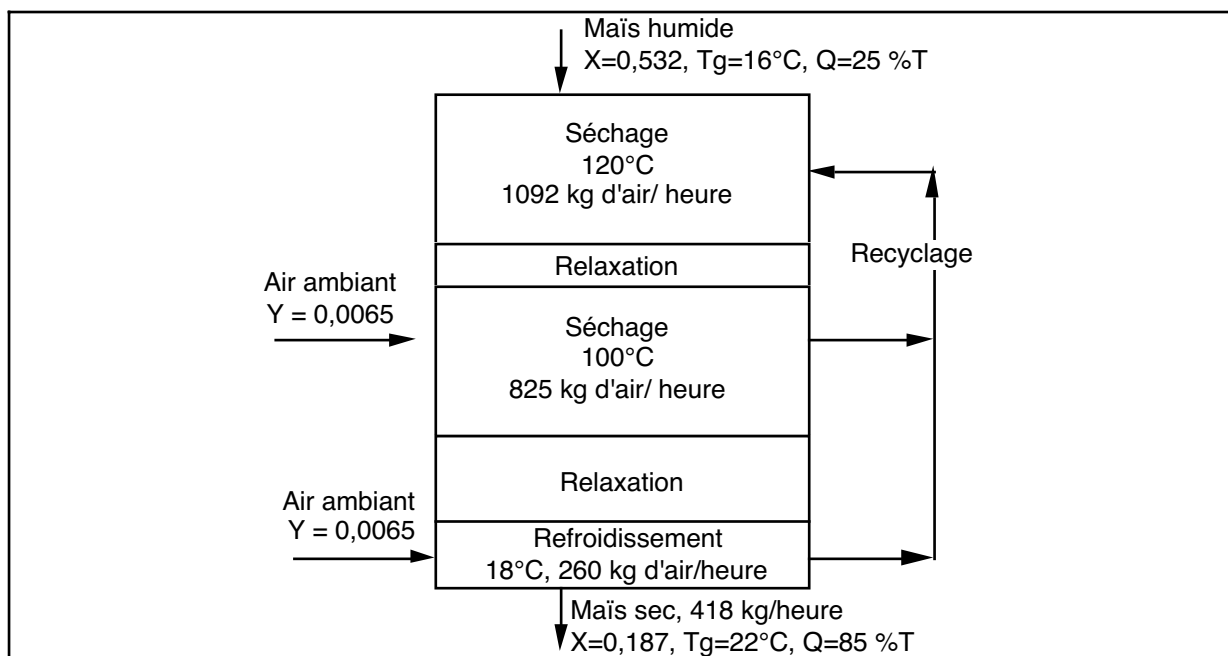


Figure 5 : Essai N°1 / 1988 : configuration et réglages du séchoir pilote de l'ITCF (qualité amidonnaire exprimée en % de transmission).

La simulation de cet essai nécessite en fait plusieurs simulations répétées jusqu'à la stabilisation de la teneur en eau de l'air recyclé et l'obtention de la teneur en eau du grain observée expérimentalement. Il est d'ailleurs important de noter que, sur cet essai, le recyclage d'air influence très peu les caractéristiques du grain séché. Ceci confirme l'intérêt économique du recyclage.

En comparant la simulation aux résultats expérimentaux (tableau 1), on observe :

- les teneurs en eau X du produit séché expérimentale et simulée sont, par construction, identiques,

- la température mesurée T_g du produit séché est prédite avec une erreur inférieure à 1°C ,

- la qualité amidonnaire Q expérimentale du produit séché est prédite avec une erreur proche de $1\%T$,

- l'essentiel de l'écart entre simulation et réalité est "concentré" sur le débit de grain sec (12% d'écart).

ESSAI N°1	1988	Expérience	Simulation
Débit de grain sec		$145 \pm ? \text{ kg/h}$	127 kg/h
	Teneur en eau X	$0,532 \pm ?$	0,422
Entrée	Température T_g	$16^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$	30
	Qualité Q	$25 \%T \pm ? \%T$	15 %T
	Teneur en eau X	$0,187 \pm ?$	0,187
Sortie	Température T_g	$22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$	$21,6^\circ\text{C}$
	Qualité Q	$85 \%T \pm ? \%T$	83,8%T

Tableau 1 : Essai N°1 / 1988 : comparaison entre expérience et simulation (qualité amidonnaire exprimée en % de transmission). Les résultats sont en gras.

L'essai N°2 / 1987 est très différent du précédent (figure 6) : température de séchage plus basse et pas de recyclage d'air.

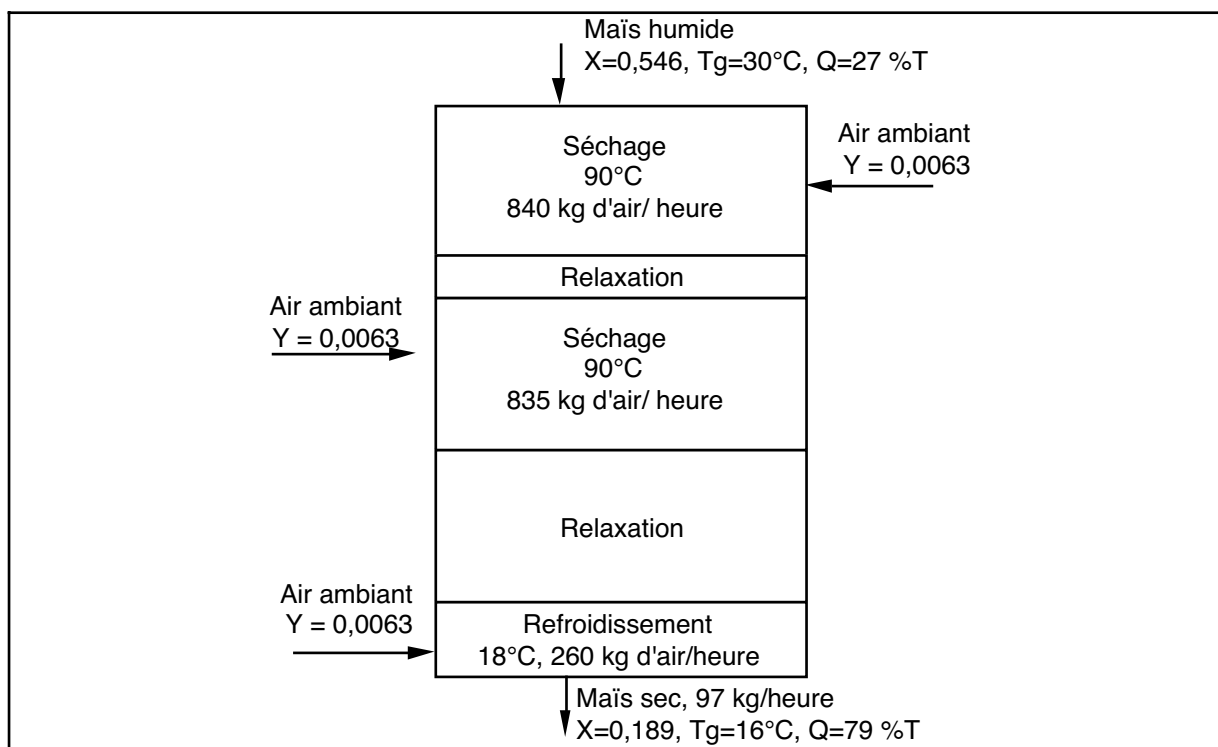


Figure 6 : Essai N°2 / 1987 : configuration et réglages du séchoir pilote de l'ITCF (qualité amidonnaire exprimée en % de transmission).

Là encore, le modèle prédit les teneur en eau X , température T_g et qualité amidonnaire Q du maïs séché avec une très bonne précision (tableau 2). L'écart entre les débits de grain sec réel et simulé est de l'ordre de 10%.

ESSAI N°2	1987	Expérience	Simulation
Débit de grain sec		97 kg/h ± ? kg/h	87 kg/h
Entrée	Teneur en eau X	0,546 ± ?	0,546
	Température Tg	30°C ± 4°C	30°C
	Qualité Q	27 %T ± ? %T	27 %T
Sortie	Teneur en eau X	0,189	0,189
	Température Tg	16°C ± 2°C	19,8°C
	Qualité Q	79 %T ± ? %T	78,1%T

Tableau 2 : Essai N°2 / 1987 : comparaison entre expérience et simulation (qualité amidonnaire exprimée en % de transmission). Les résultats sont en gras.

Ce sont les résultats de la simulation de cet essai que nous allons analyser de manière plus détaillée maintenant. L'axe des abscisses des courbes suivantes représente la distance parcourue par le grain depuis le haut du séchoir : à un facteur multiplicatif près il représente aussi l'axe des temps. Les traits verticaux en gris indiquent les abscisses des dièdres d'arrivée et de sortie d'air.

L'étude de l'évolution de l'humidité relative de l'air usé le long de la progression du grain (figure 7) amène plusieurs réflexions :

- L'humidité relative de l'air usé atteint 100% en haut du séchoir ce que confirme l'expérience.

- L'humidité relative de l'air usé remonte après la première zone de relaxation : ceci confirme un meilleur séchage à la reprise.

- L'humidité relative de l'air usé décroît après la deuxième zone de relaxation : son rôle est donc plutôt négatif puisqu'elle n'améliore pas le séchage à la reprise alors que le grain se dégrade quand même sous l'effet de sa propre température.

- L'humidité relative de l'air usé dans 60% du séchoir est inférieure à 30% : il vaudrait mieux diminuer le débit d'air dans ces caissons ou le recycler vers les caissons supérieurs pour augmenter le rendement énergétique.

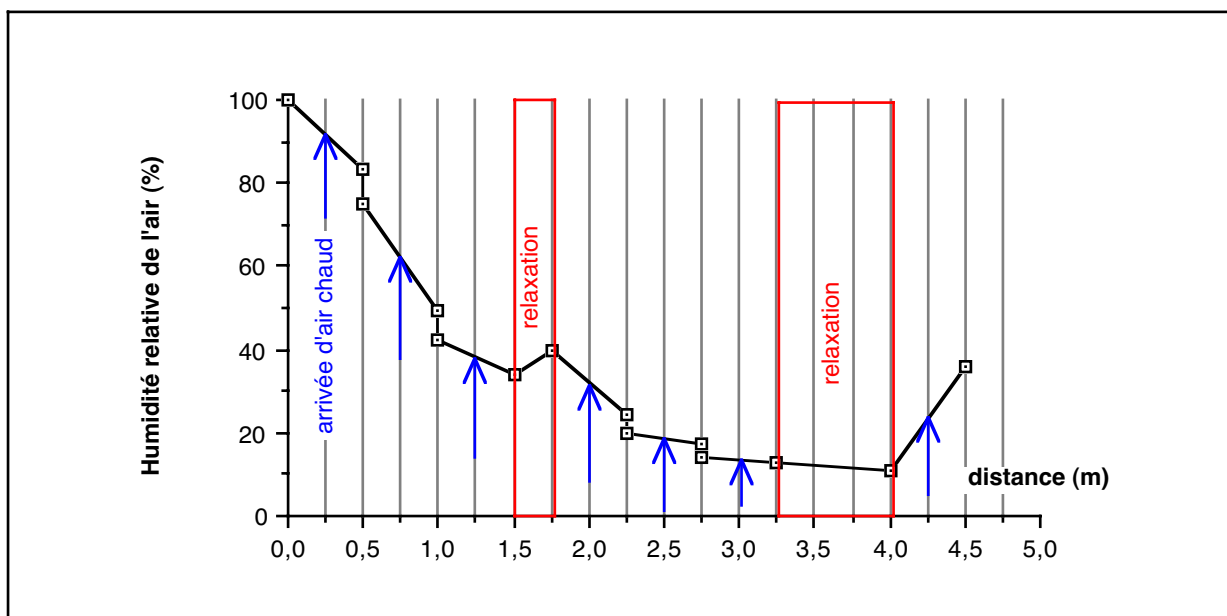


Figure 7 : Essai N°2 / 1987 : évolution simulée de l'humidité relative de l'air usé dans les canaux de sortie (abscisse orientée du haut vers le bas du séchoir).

La figure 8 confirme l'intérêt économique d'un recyclage de l'air usé de la partie basse du séchoir : la température dépasse 50°C sur cette zone (refroidissement non compris).

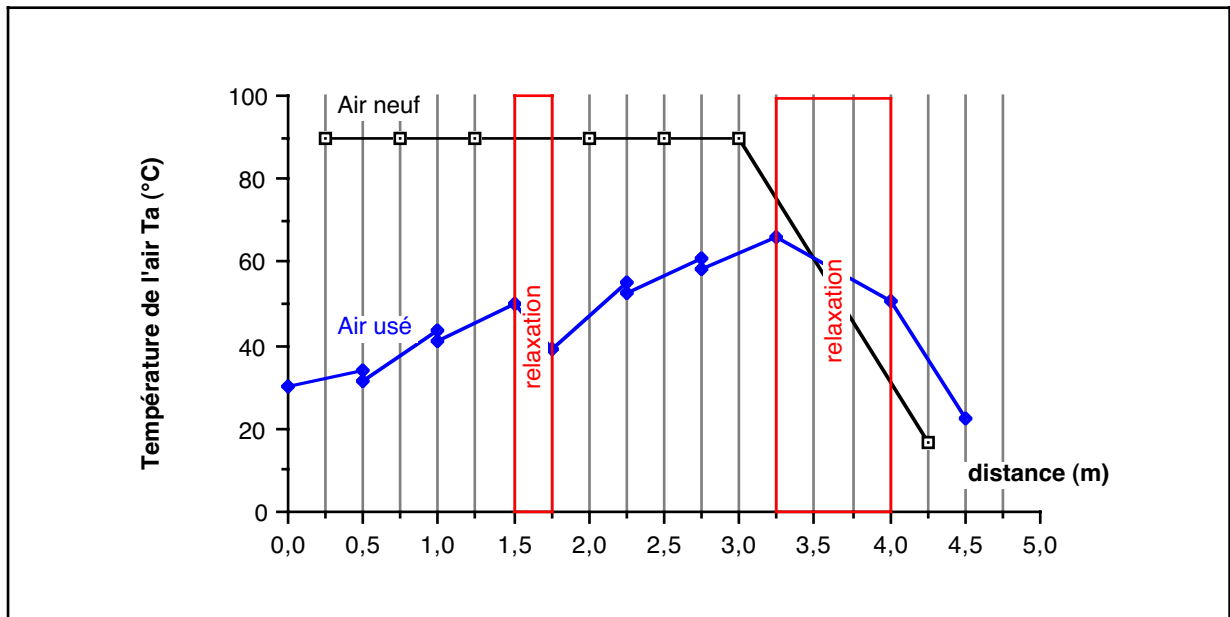


Figure 8 : Essai N°2 / 1987 : évolution simulée des températures de l'air neuf et usé dans les canaux d'entrée et de sortie (abscisse orientée du haut vers le bas du séchoir).

L'étude de la courbe de la figure 9 indique que, sur environ 1 m de hauteur en début de séchage, la teneur en eau du grain ne décroît vraiment qu'à proximité immédiate des canaux d'air chaud. Un débit d'air supérieur éviterait ces zones mortes au sein des premières couches épaisses.

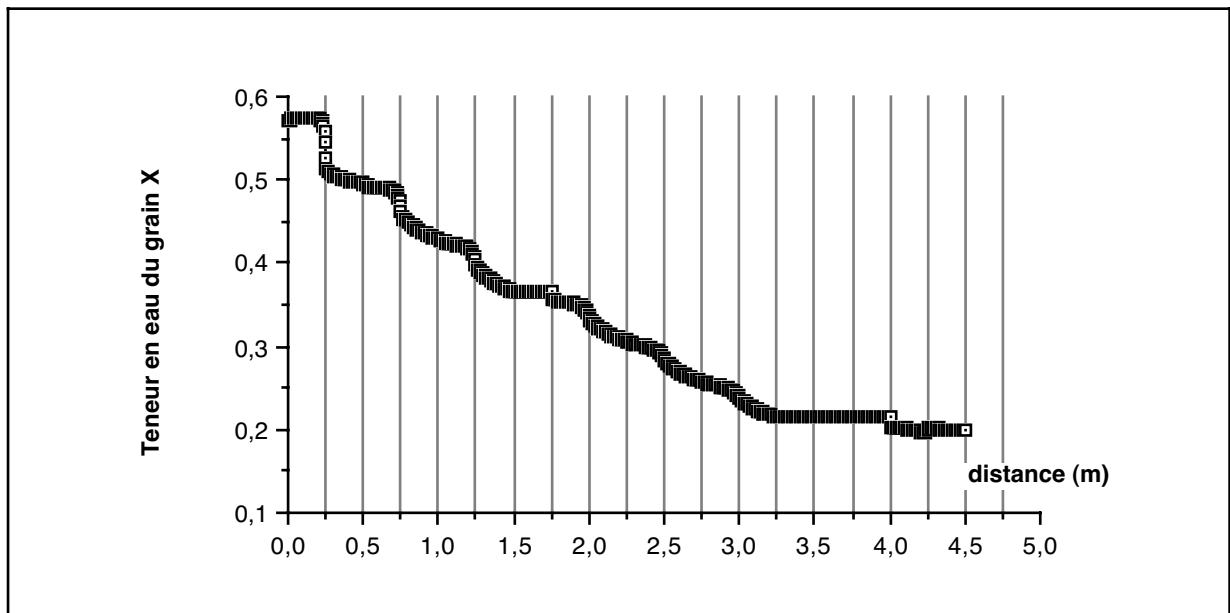


Figure 9 : Essai N°2 / 1987 : évolution simulée de la teneur en eau du grain X au cours de sa descente (abscisse orientée du haut vers le bas du séchoir).

La courbe de la figure 10 est d'une interprétation beaucoup plus complexe :

- Le température du grain varie sans cesse au cours de sa progression, de manière assez brusque à proximité des canaux d'arrivée d'air chaud.

- Seule la première couche épaisse présente un séchage isenthalpe : l'énergie apportée par l'air sert entièrement à vaporiser l'eau (air usé à 100% d'humidité relative sur la figure 7).

- Pour toutes les autres couches épaisses, la température du grain présente un extremum proche de l'arrivée de l'air chaud.

- On note la présence de 2 points singuliers (à 1,75 m et 4 m) correspondant à une discontinuité numérique entre le bas d'une zone de relaxation et le haut de la couche épaisse suivante (contre-courant).

Cette discontinuité est liée à la méthode employée- dématérialisation des dièdres en particulier, et est à rapprocher des problèmes rencontrés par SUN (1991) et ARNAUD et FOHR (1991) lors du calcul de la vitesse maximale atteinte par l'air entre 2 dièdres.

Son influence sur les résultats est très faible car localisée sur quelques centimètres d'épaisseur de grain. La méthode dynamique employée dans le point B de ce chapitre permet d'éviter ce léger écart.

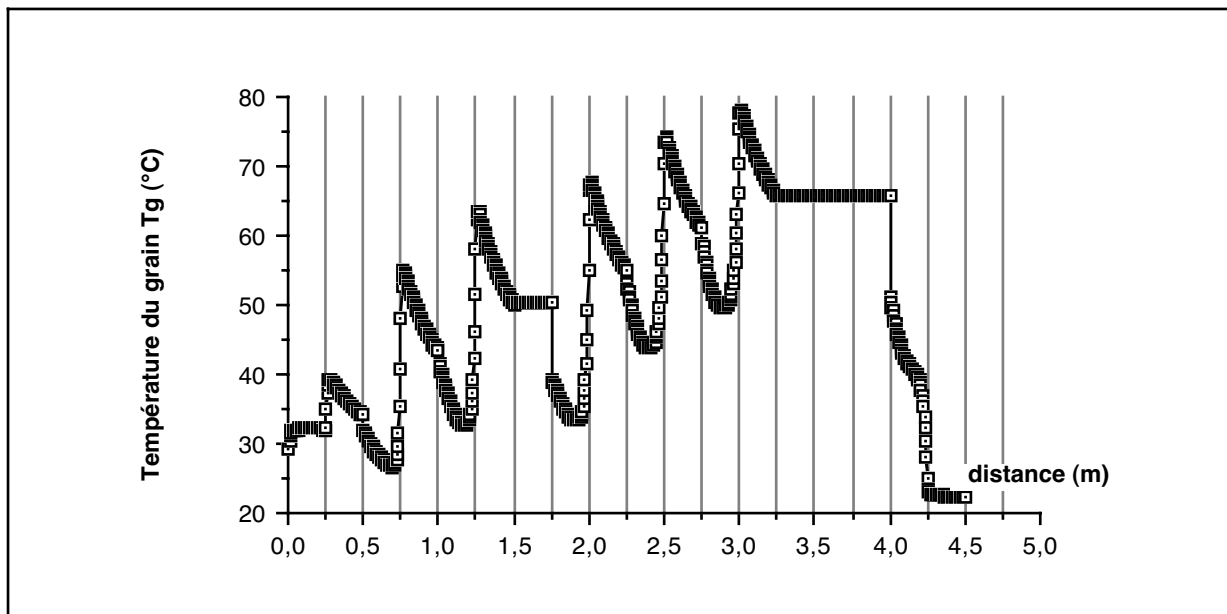


Figure 10 : Essai N°2 / 1987 : évolution simulée de la température du grain T_g au cours de sa descente (abscisse orientée du haut vers le bas du séchoir).

La figure 11 confirme le sous-séchage observé jusqu'à 1 m environ puisque que la qualité amidonnaire n'est que légèrement dégradée.

De plus, à partir d'une distance d'1,25 m, il est clair que les couches "co-courant" sont le siège d'une dégradation accélérée de la qualité amidonnaire.

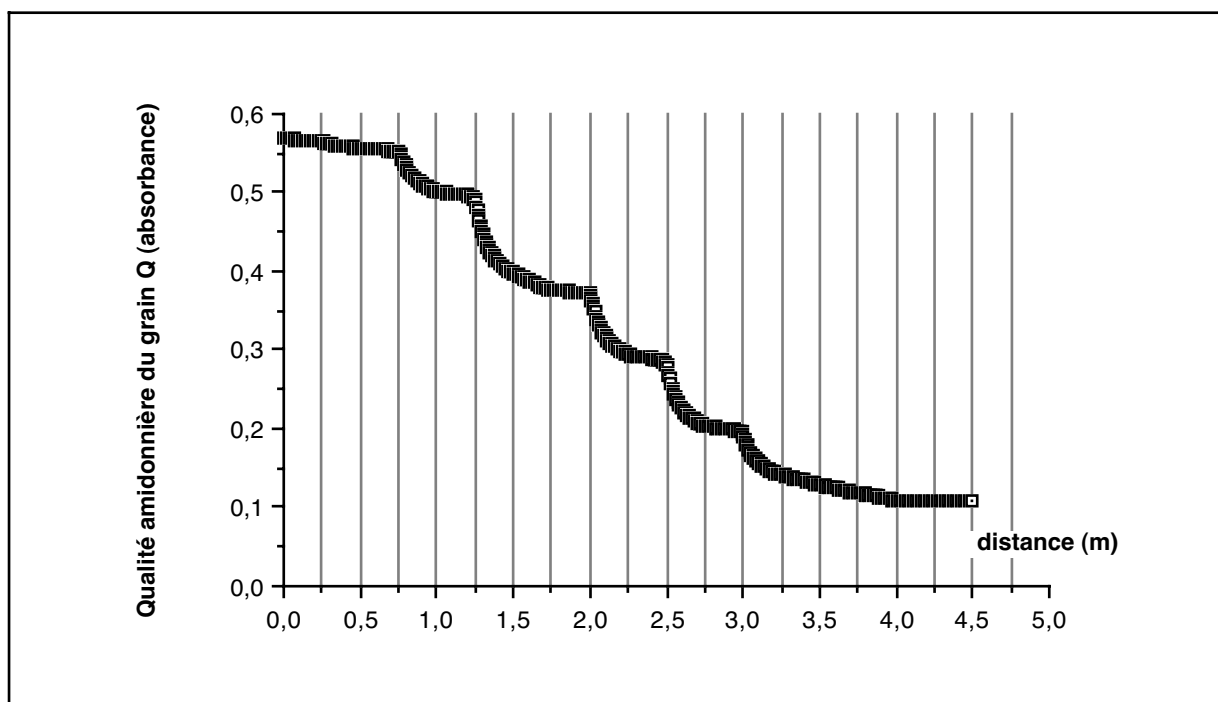


Figure 11 : Essai N°2 / 1987 : évolution simulée de la qualité amidonnière du grain Q au cours de sa descente (abscisse orientée du haut vers le bas du séchoir).

On le voit, l'analyse des résultats d'une simulation est particulièrement complexe tant les interactions entre les diverses variables sont nombreuses.

Ceci, cumulé aux temps de calcul assez longs, a limité le nombre d'expériences testées par le modèle.

4 - Conclusion

Le modèle dynamique développé dans les chapitres précédents, ajusté sur des expériences couches minces en conditions constantes datant de 1980, permet, en 1991, de simuler complètement le régime stationnaire d'un séchoir pilote de 5 m de haut. A l'échelle locale, les nombreux phénomènes transitoires rencontrés par le grain justifient pleinement l'emploi d'un modèle dynamique.

Le programme permet de prédire, en moins d'une heure sur un micro-ordinateur, le régime stationnaire de n'importe quel séchoir à maïs à flux mixtes qu'il existe ou non. L'erreur de prédiction sur la qualité amidonnière est très faible. L'écart entre les débits de grain sec expérimentaux et simulés varie, quant à lui, entre 2% et 15%.

L'adaptation de ce programme sur une station de travail 20 fois plus rapide devrait permettre de tester le modèle sur de plus nombreux cas de séchoirs et de réglages.

Il devrait être ainsi possible de dégager un paramètre ajustable permettant de rendre compte de l'influence des géométrie et configurations des dièdres.

A ce titre, il y a une complémentarité certaine entre nos travaux et ceux des équipes d'ARNAUD et FOHR à Poitiers et de FLICK et CHAABOUNI à Antony.

B - EN RÉGIME TRANSITOIRE

1 - Etude bibliographique

Pourquoi simuler le fonctionnement d'un séchoir industriel en régime transitoire ?

Après s'être intéressé à l'optimisation de la conception et du réglage des séchoirs, il était nécessaire d'étudier l'optimisation de leur conduite (COURTOIS , 1990).

Notre modèle dynamique, construit pour rendre compte du comportement dynamique d'un séchoir, est apparu comme un outil privilégié de mise au point d'un algorithme de conduite automatique.

Une démarche purement expérimentale est, à plusieurs titres, très coûteuse :

- Elle ne peut se faire que pendant 4 à 6 semaines dans l'année car, hors campagne, il n'est pas possible de réhumidifier suffisamment de maïs.

- Elle demande un volume de grain considérable, dont le coût n'est pas négligeable.

- Elle nécessite la présence d'au moins 2 personnes 24 h/ 24 pendant plusieurs jours d'affilé.

- La consommation énergétique est très coûteuse.

- Elle nécessite l'immobilisation du séchoir industriel pendant une partie de la campagne de récolte du maïs à cette seule fin.

- Les expériences sont limitées par les caractéristiques du maïs récolté.

- L'essai de plusieurs structures de schéma de contrôle est pratiquement impossible.

Notre démarche a donc visé à mettre au point un outil informatique permettant de réduire la phase expérimentale pratiquement à la seule validation de l'algorithme de conduite automatique.

Pour réaliser le programme de simulation, les mêmes hypothèses que pour la prédiction du régime stationnaire ont été utilisées, à une exception : pas d'hypothèse de stationnarité.

Avant d'étudier le comportement dynamique du séchoir, il faut délimiter les frontières du système (figure 12) :

- Le système "séchoir à maïs" est délimité physiquement par les parois du séchoir.

- Le système se décompose en séchoir, maïs contenu et air contenu.

- Toutes les variables relatives au maïs et à l'air entrants ou sortants du séchoir sont externes au système.

Le modèle dynamique décrit les relations dynamiques qui existent entre variables internes et externes.

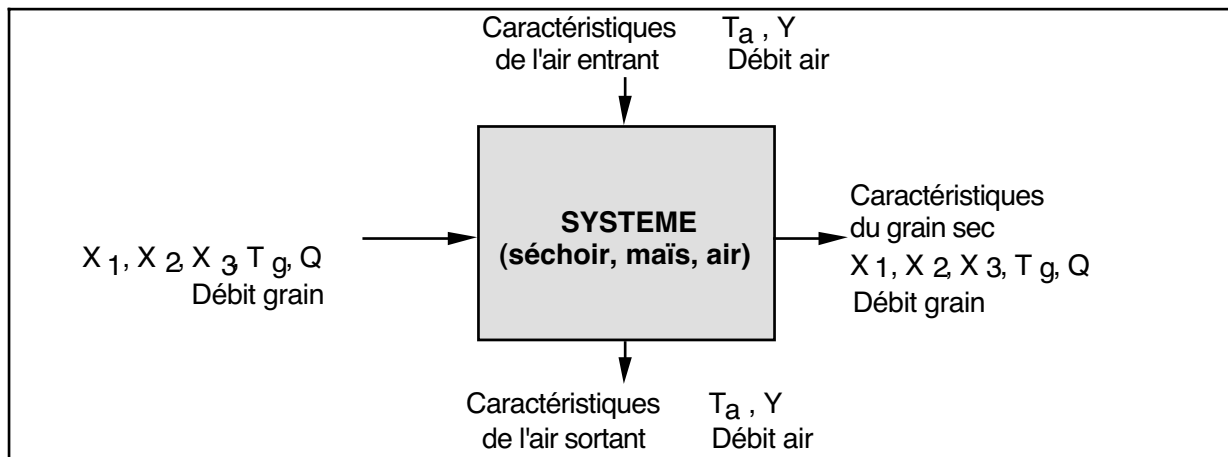


Figure 12 : Représentation fonctionnelle du système dynamique étudié.

Dans un deuxième temps, nous avons simplifié l'étude de ce système multivariables en considérant (figure 13) que la variable contrôlée est la teneur en eau du grain en sortie de séchoir et la variable de commande est le débit de grain.

C'est le cas général pour les séchoirs industriels à maïs, où l'on module manuellement le débit du grain pour stabiliser la teneur en eau du grain séché à la valeur de consigne (commande en boucle ouverte).

L'influence de toute autre variable est considérée comme une perturbation.

En fait, nous avons étendu le système en lui adjoignant son régulateur. Notre modèle est tout à fait capable de simuler le fonctionnement du système séchoir, maïs, air et régulateur (commande en boucle fermée).

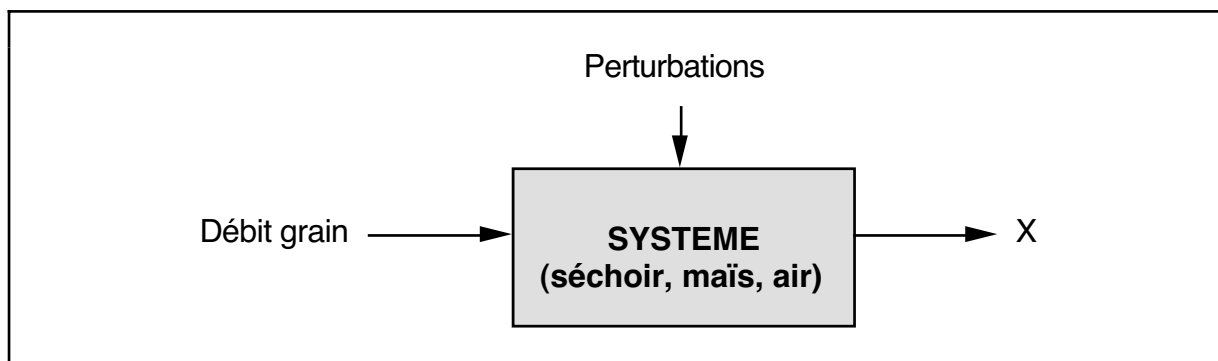


Figure 13 : Représentation simplifiée du système dynamique étudié.

En pratique, à l'heure actuelle, un opérateur "pilote" son séchoir à 3 niveaux :

- il règle la consigne de température pour l'air de séchage en fonction du compromis désiré entre qualité amidonnaire et débit de grain sec souhaités,
- il modifie la fréquence d'extraction (et donc le débit de grain) pour obtenir la teneur en eau désirée en sortie,
- il infléchit sa stratégie précédente pour éviter les phases de sur-séchage dégradant considérablement la qualité amidonnaire, ou même la qualité commerciale (présence de grains brunis).

Il est évident que cette méthode manuelle demande une grande expérience et une attention soutenue 24 h/ 24.

MARCHANT (1985) a résumé les critères que doit vérifier tout système de pilotage, automatique ou non :

- Précision : la valeur moyenne de la teneur en eau du grain séché doit être proche de l'objectif fixé par l'opérateur.
- Rapidité : toute perturbation et en particulier tout changement de teneur en eau du grain en entrée doit être compensée rapidement en sortie.
- Stabilité : le système ne doit pas présenter de trop grandes oscillations (il ne doit pas diverger).
- Robustesse : le système doit rester performant sur un large domaine de fonctionnement du séchoir.

Auxquels il faut rajouter :

- Fidélité : la dispersion de la teneur en eau du grain séché doit être faible.
- Préservation de la qualité : le système doit éviter les phases de sur-séchage qui dégradent la qualité amidonnaire du maïs.

Classiquement, on peut utiliser un régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé) pour stabiliser l'humidité du produit en sortie directement ou indirectement

par la température de l'air usé qui lui est bien corrélée en certains endroits (bas du séchoir).

Il s'agit d'une solution simple et peu coûteuse, bien connue, mais qui ne satisfait qu'aux 2 premières conditions. Expérimentée à l'ITCF il y a une quinzaine d'années, elle est généralement utilisée pour réguler, autour d'un point de fonctionnement stabilisé, la température d'air usé en bas de séchoir, en commandant la fréquence d'extraction.

Mais il est plus intéressant d'utiliser la connaissance disponible sur le procédé (le modèle) pour l'automatiser. C'est pourquoi nous avons suivi cette démarche.

Parmi les nombreux modèles de séchage, la plupart font l'hypothèse de stationnarité. En fait, ils ne sont pas adaptés pour décrire le régime transitoire observé sur un séchoir lors d'une perturbation par exemple. Ils ne peuvent normalement prédire que le nouveau régime stationnaire qui apparaît à la fin de cette transition.

Même les modèles dynamiques de PLATT et *al.* (1991) ou de MOREIRA et BAKKER ARKEMA (1990) font, indirectement, cette hypothèse puisqu'ils utilisent une équation empirique de séchage ajustée sur des cinétiques en couche mince en conditions constantes.

Mais, il faut remarquer que les séchoirs américains sont de conceptions plus simples (pas de canaux d'air noyés dans la masse de grains) et le maïs américain, plus sec, nécessite une amplitude de séchage beaucoup plus limitée qu'en France, tout au moins dans la moitié nord du pays. Dans ces conditions, il est compréhensible que leurs modèles rendent compte du comportement dynamique du séchoir.

A notre connaissance, dans le domaine du séchage des céréales, seul notre modèle est véritablement dynamique : de la couche mince jusqu'au séchoir industriel.

Généralement le modèle est linéarisé autour d'un point de fonctionnement et, par une technique de placement de pôle, un régulateur linéaire est défini.

Ainsi, ELTIGANI et BAKKER ARKEMA (1987) étudient un régulateur linéaire fonctionnant en feedforward (anticipation par la teneur en eau du grain en entrée) et en feedback (correction par la teneur en eau du grain en sortie) pour stabiliser la teneur en eau du grain en sortie d'un séchoir.

NYBRANT (1988) apporte une meilleure robustesse au système : son régulateur est auto-adaptatif et recalcule ses paramètres en permanence. Mais il régule la température de l'air usé et non la teneur en eau du grain séché.

MOREIRA et BAKKER ARKEMA (1989) utilisent un régulateur auto-adaptatif fonctionnant en feedforward et en feedback sur la teneur en eau du grain. Leurs résultats, sur un séchoir américain à courants croisés, semblent intéressants mais difficilement transposables sur les séchoirs à flux mixtes.

Mais, à tous ces travaux, on peut opposer les points suivants :

- Ils sont conçus pour des séchoirs de technologie assez différente, plus simple.

- Ils sont testés généralement sur des pilotes de tailles très limitées, avec des amplitudes de séchage très inférieures à celles rencontrées en France.

- Les auteurs ne donnent généralement que les grandes lignes de leurs travaux et restent imprécis sur le chapitre "matériels et méthodes".

L'institut AFRC (Silsoe, Angleterre) a assez bien décrit sa démarche dans de nombreux rapports (WHITFIELD, 1987a et b). Et, bien qu'il ait travaillé sur du blé et pour des amplitudes de séchage très limitées, la méthode employée, simple et astucieuse, nous a semblé intéressante à adapter à nos séchoirs à maïs.

Le régulateur AFRC est de type PI (proportionnel, Intégral). Mais à partir des connaissances théoriques sur le séchage, la robustesse est accrue par une pseudo-linéarisation du système.

Le constat de départ est que le système en boucle ouverte est non linéaire et donc qu'un régulateur classique ne suffit pas. Pour le linéariser, on part de l'idée que toute cinétique de séchage peut être approximée par une exponentielle. Ce que l'on peut traduire par :

$$X = k_1 \cdot e^{k_2 \cdot t} \quad [1]$$

où X est la teneur en eau du grain en sortie de séchoir,
 t est le temps de séjour du grain dans le séchoir et
 k_1, k_2 sont 2 paramètres à optimiser.

ou bien encore

$$X = k_1 \cdot e^{k_2' / \text{débit grain}} \quad [2]$$

que l'on peut linéariser en :

$$\text{Log}(X) = k_1' + k_2' / \text{débit grain} \quad [3]$$

Finalement, avec une technique de placement de pôles, le régulateur s'écrit,

$$(\text{densité de flux de grain})^{-1} = K_R \cdot \frac{z - a_R}{z - 1} \cdot [\text{Log}(X_t) - \text{Log}(X_{\text{consigne}})] \quad [4]$$

où K_R paramètre le proportionnel,
 a_R paramètre l'intégrale et
 z est la variable de la transformée en Z .

L'utilisation de la densité de flux à la place du débit de grain permet de s'affranchir, au moins en partie, des caractéristiques du séchoir étudié.

Utiliser notre modèle dynamique pour contrôler en temps réel le séchoir demande des moyens de calcul trop coûteux. C'est pourquoi nous avons retenu cet algorithme initialement conçu pour des séchoirs à blé à flux mixtes.

Le modèle dynamique ne sert plus à piloter directement le séchoir mais à concevoir et tester le meilleur algorithme de régulation.

Dans notre étude, l'objectif pour la mise au point du régulateur a été la recherche d'un amortissement critique (sans sur-séchage) en moins de deux temps de séjour de grain, avec une humidité (base humide) du maïs en sortie régulée à moins de 0,5 point.

2 - Matériels et méthodes

a) Instrumentation du séchoir ITCF

Le circuit de manutention du séchoir pilote de l'ITCF à Boigneville a été modifié pour permettre l'installation de deux humidimètres à grain en ligne.

Ces appareils, de marque SERDIA, fonctionnent sur le principe de mesure de la constante diélectrique de l'ensemble grain+air situé entre 2 demi-cylindres d'axes verticaux. Ce paramètre, pour de nombreux produits, est bien corrélé avec leur teneur en eau.

Leur taille, nécessitant une dizaine de kilogrammes de maïs pour donner une mesure, n'est pas bien adaptée au séchoir pilote : il faut plusieurs extraction pour remplir le capteur en sortie de séchoir.

Ce problème a été en partie réglé par un petit automatisme électrique controlant, en permanence, le remplissage et la vidange du capteur en sortie de séchoir.

La figure 14 montre la circulation de l'information. La mesure indirecte effectuée sur les capteurs est transmise vers l'armoire informatique SERDIA où elle est convertie, selon la courbe d'étalonnage en humidité (% base humide). Cette valeur est transmise à l'ordinateur, pilote du séchoir, qui en déduit une commande de débit grain se traduisant par une commande de l'extracteur, via une centrale d'entrées-sorties (HP).

Il faut préciser que ces capteurs sont les seuls sur le marché, au moins à un prix abordable et que le constructeur a adapté le logiciel de l'armoire de traitement pour nos besoins.

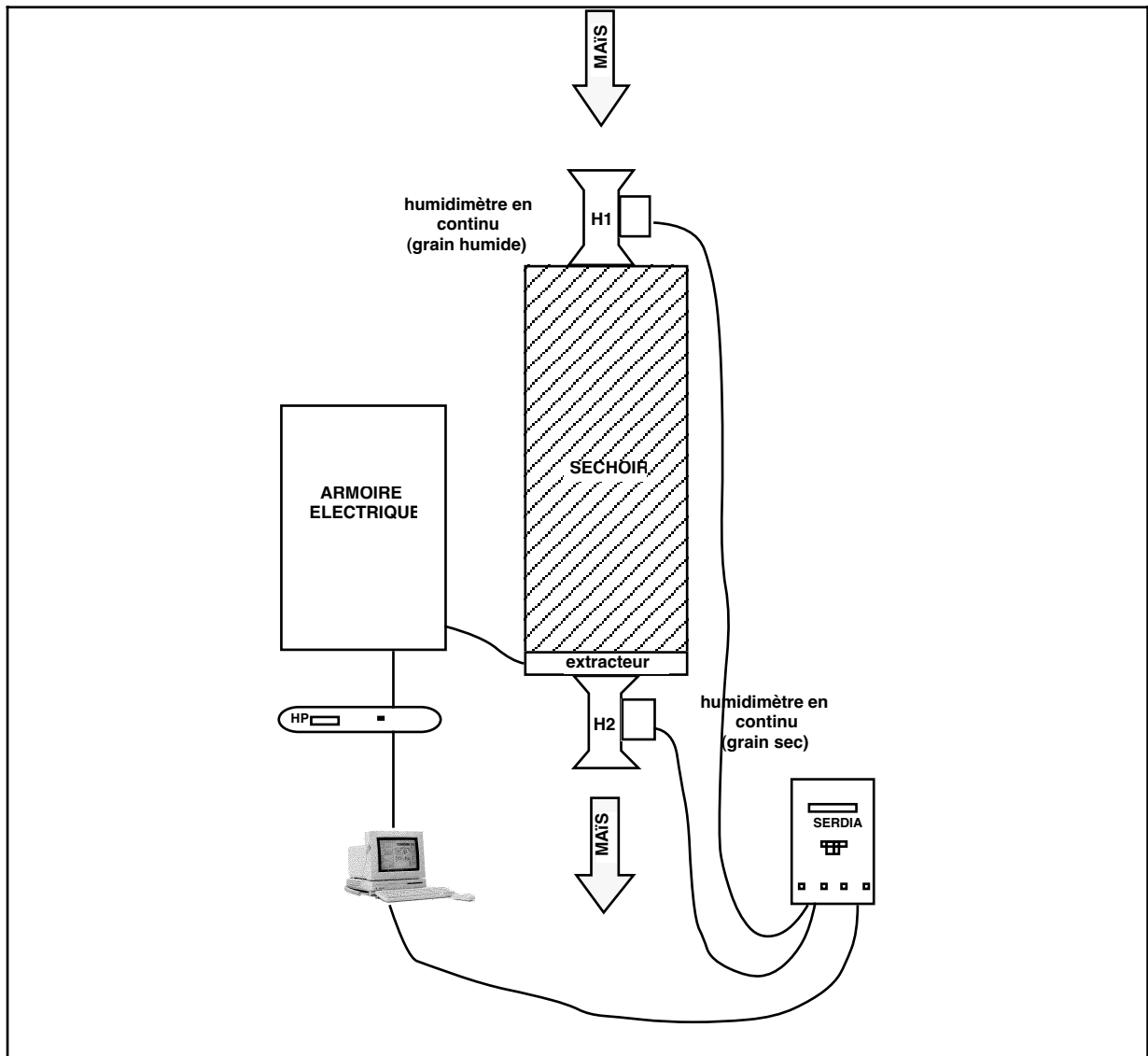


Figure 14 : Boucle de commande du séchoir pilote de l'ITCF.

b) Méthode numérique

La seule différence, par rapport à la méthode utilisée pour décrire le régime stationnaire, réside dans le fait qu'il est ici nécessaire de recalculer l'ensemble du séchoir à chaque pas de temps.

Ceci se traduit par des temps de calcul considérables : jusqu'à 1 s de calcul pour simuler 1 s de fonctionnement du séchoir.

L'équation [4] se traduit numériquement par la relation :

$$\frac{\text{Section du séchoir}}{\text{Débit grain } (t+\Delta t)} = K_R \cdot [\text{Log}(X_{t+\Delta t} / X_{\text{consigne}}) - a_R \cdot \text{Log}(X_t / X_{\text{consigne}})] + \frac{\text{Section du séchoir}}{\text{Débit grain } (t)} \quad [5]$$

où, ici, Δt représente le pas d'échantillonnage (différent du pas de calcul de la simulation).

3 - Résultats

a) Etude du système en boucle ouverte

Simuler le comportement du séchoir, non régulé (système en boucle ouverte : figure 15) et en régime transitoire, permet de le caractériser. C'est une première étape nécessaire avant toute recherche d'algorithme de régulation.

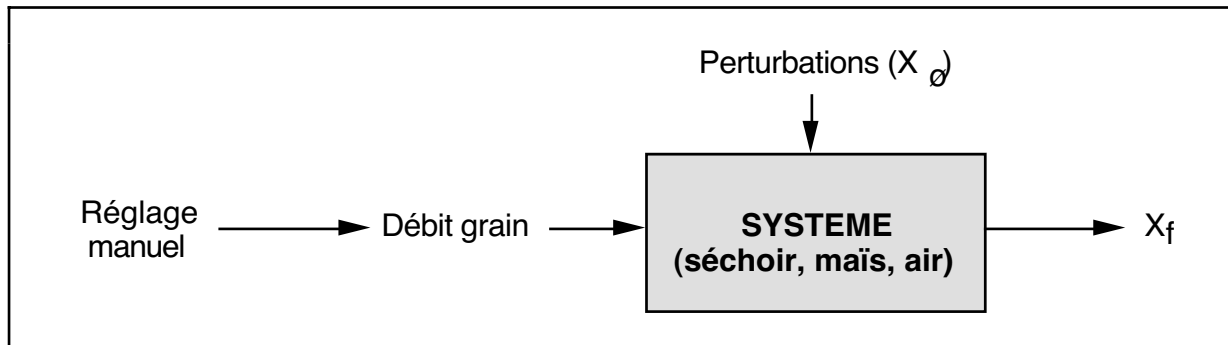


Figure 15 : Fonctionnement du système en boucle ouverte.

Un premier essai consiste à prédire l'évolution de la teneur en eau du maïs séché lors d'un échelon de débit de grain (augmentation brutale de 15%).

La courbe de réponse obtenue (figure 16) est de type chaotique. Ceci vient du mode d'extraction retenu sur le séchoir pilote : toute variation du débit de grain se traduit par une modification de la hauteur de grain extraite avec une fréquence fixe. Dans la mesure où les rangées de canaux d'air sont régulièrement espacées, quand le séchoir atteint son régime stabilisé le grain est en phase avec les rangées de canaux. Le changement de hauteur d'extraction provoque alors un décalage de phase responsable de cette courbe chaotique.

Les discontinuités observées sur la courbe de réponse (figure 16) justifient l'emploi d'un régulateur non linéaire.

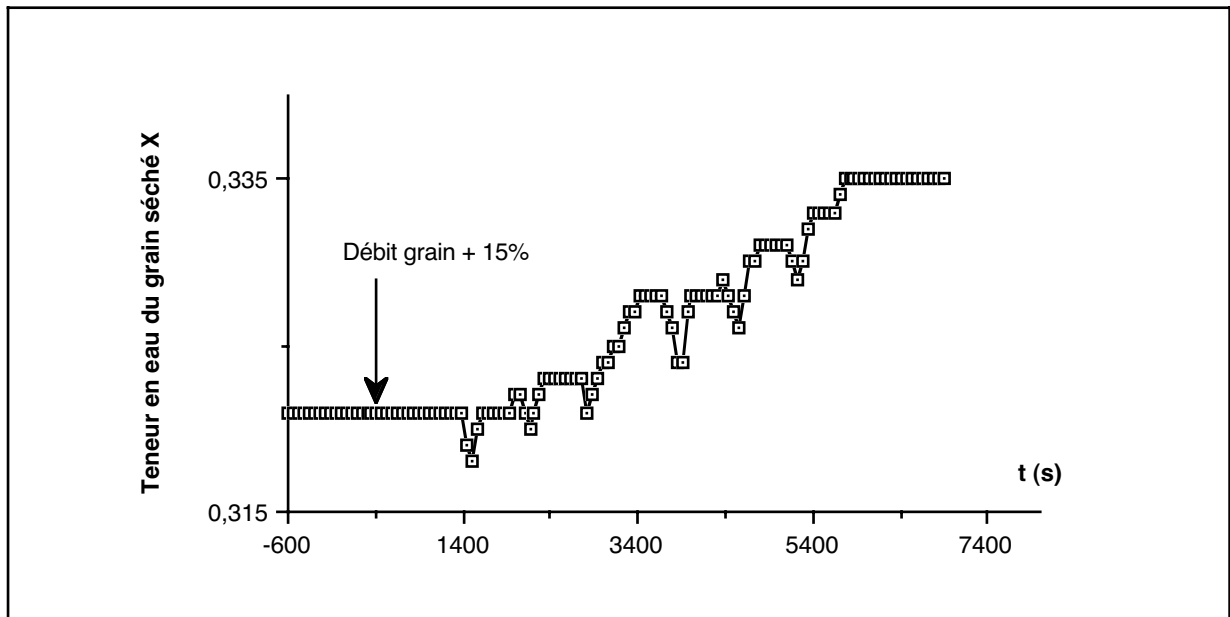


Figure 16 : Courbe de réponse simulée dans le cas d'un échelon de débit de grain (simulation basée sur l'essai N°7 / 1988).

L'étude de la courbe de réponse expérimentale du séchoir dans le cas d'un échelon de débit de grain de 16% (dans des conditions différentes de la simulation précédente) présente, elle aussi, une allure chaotique (figure 17).

Néanmoins, il est difficile de conclure à l'équivalence des 2 courbes puisque, dans le cas de la courbe expérimentale, de nombreux phénomènes parasites influencent la mesure finale (variation des caractéristiques du maïs en entrée, dispersion des temps de séjour...).

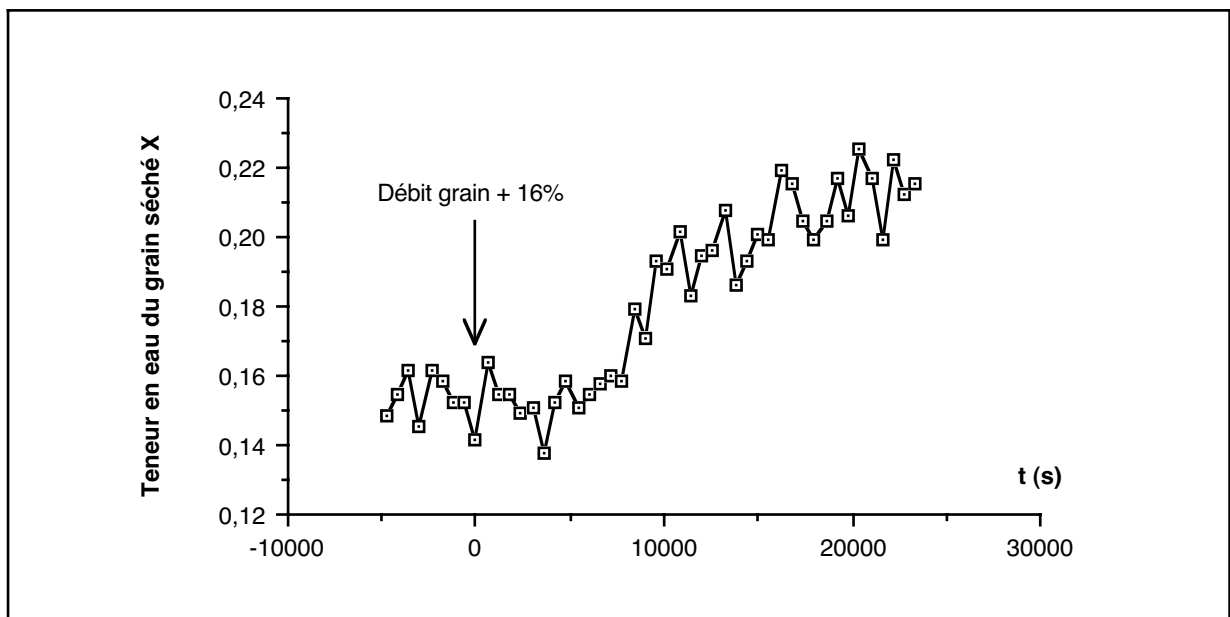


Figure 17 : Courbe de réponse expérimentale dans le cas d'un échelon de débit de grain (Essai N°3 / 1986).

L'étude des courbes de réponse simulées résultant de différents échelons de débit de grain (figure 18), a permis de caractériser le système :

- non-linéaire : à la fois sur le gain statique et par la présence d'un phénomène d'hystérésis entre les échelons positifs et négatifs,
- retard pur élevé (plusieurs heures),
- ordre supérieur à 2.

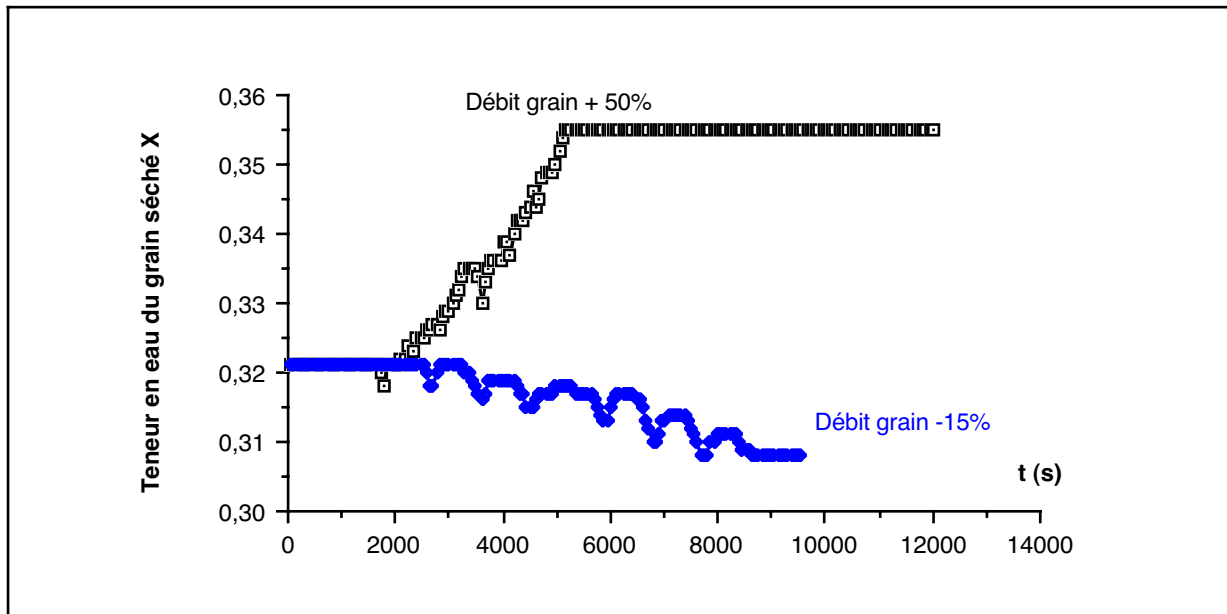


Figure 18 : Courbes de réponse simulées dans le cas d'échelons (à $t=600$ s) de débit de grain (simulations basées sur l'essai N°7 / 1988).

Le modèle dynamique permet, en outre, de tester la sensibilité du séchoir aux diverses perturbations à commencer par les variations de la teneur en eau du maïs en entrée (figure 19). Ainsi, la courbe correspondant à l'échelon $X_{0}+50\%$ présente une montée brusque justifiant encore l'emploi d'un régulateur non-linéaire.

Il faut noter que les courbes obtenues reflètent bien l'hypothèse utilisée pour les simuler : le grain descend selon un écoulement piston. Dans la réalité, en plus d'être bruitées, les courbes seraient plus étalées sur l'axe des temps.

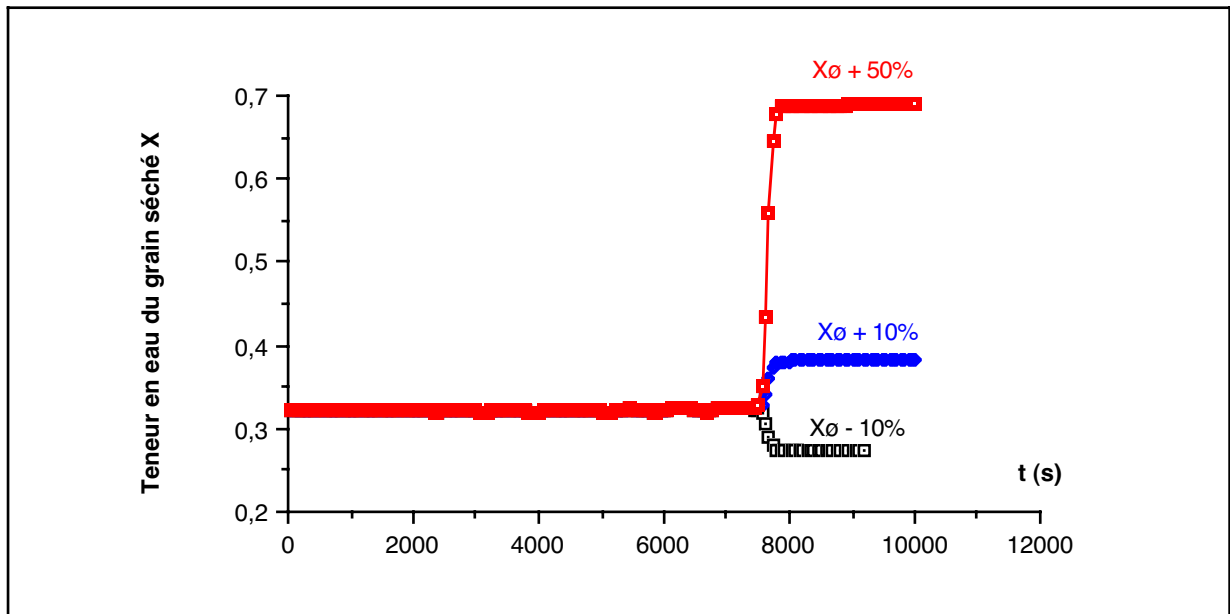


Figure 19 : Courbes de réponse simulées dans le cas d'échelons (à $t=600$ s) de teneur en eau du grain, en entrée de séchoir (simulations basées sur l'essai N°7 / 1988).

En fait, le programme permet de simuler la réponse du séchoir à toute perturbation. L'évolution de chaque variable est calculée et peut être étudiée.

b) Etude du système en boucle fermée

Le modèle peut aussi être utilisé pour étudier le système régulé (en boucle fermée).

La figure 20 schématise le fonctionnement du système régulé par l'algorithme AFRC.

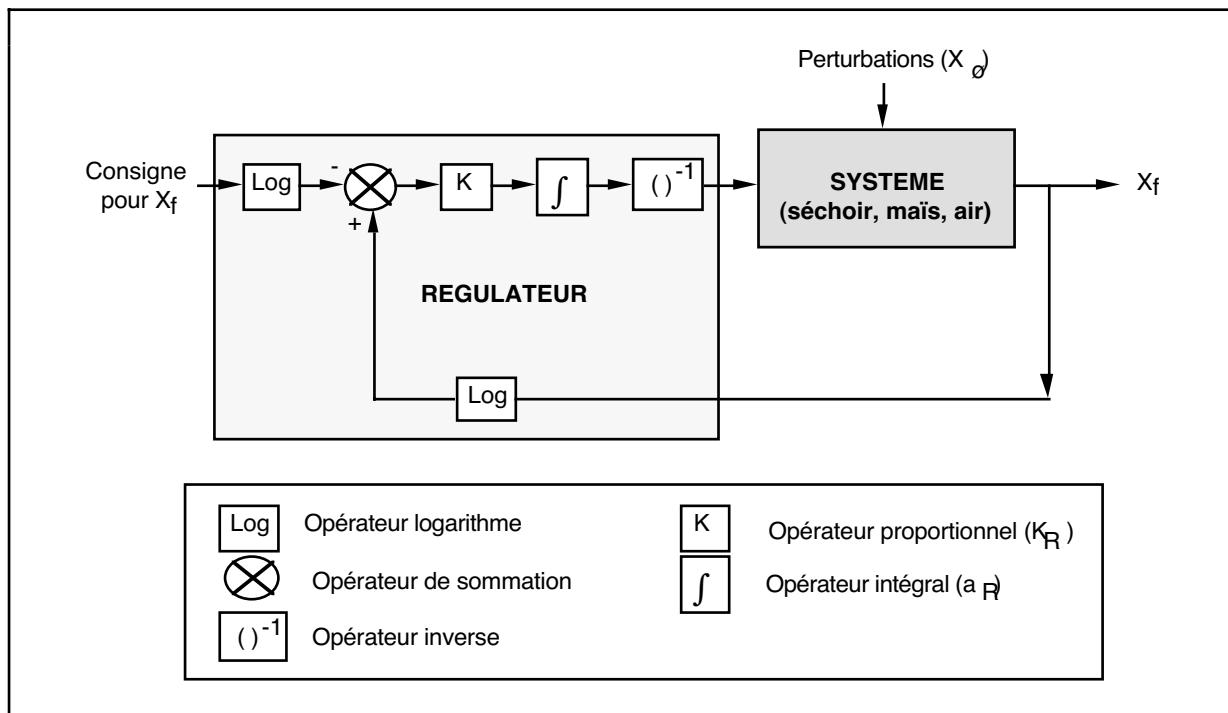


Figure 20 : Fonctionnement du système en boucle fermée.

S'il n'est pas aberrant de conserver la même période d'échantillonnage (300 s), avant d'expérimenter le régulateur sur le pilote, il a fallu, conjointement, tester l'algorithme et identifier les paramètres K_R et a_R .

Les simulations de la figure 21 sont obtenues en imposant un changement de consigne de teneur en eau finale du grain pour le régulateur au temps $t=600$ s. Le séchoir est préalablement stabilisé sur des données de l'essai N°7 / 1988.

L'influence du paramétrage du régulateur apparaît nettement sur cette figure où l'on observe un meilleur amortissement pour le couple ($K_R=0,01$, $a_R=0,7$).

Devant la lenteur des simulations, la recherche du paramétrage optimal s'est faite par essais successifs.

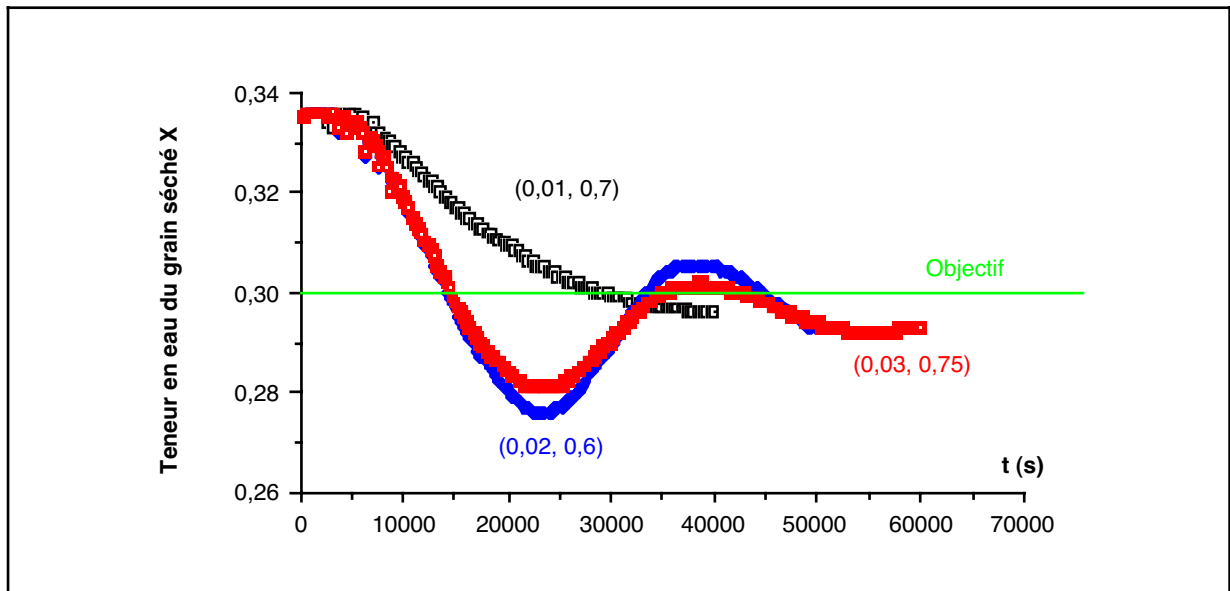


Figure 21 : Influence du couple de paramètres (K_R, a_R) du régulateur sur ses performances (simulations basées sur l'essai N°7 / 1988).

En reprenant ce paramétrage, a priori adéquat, le régulateur a été testé en vraie grandeur, sur le séchoir pilote.

La courbe expérimentale d'évolution de la teneur en eau du grain séché sur la figure 22 indique que le régulateur exécute correctement le changement de consigne en un temps convenable (le temps de séjour du grain passe d'environ 15 000 s à environ 50 000 s).

La courbe expérimentale d'évolution du débit du grain séché sur la figure 22 illustre la commande issue du régulateur pour faire glisser le séchoir d'un régime stationnaire vers un autre.

Les simulations sont apparues conformes, qualitativement, aux résultats expérimentaux. Mais une puissance de calcul supérieure aurait permis de comparer précisément chaque expérience avec sa simulation associée.

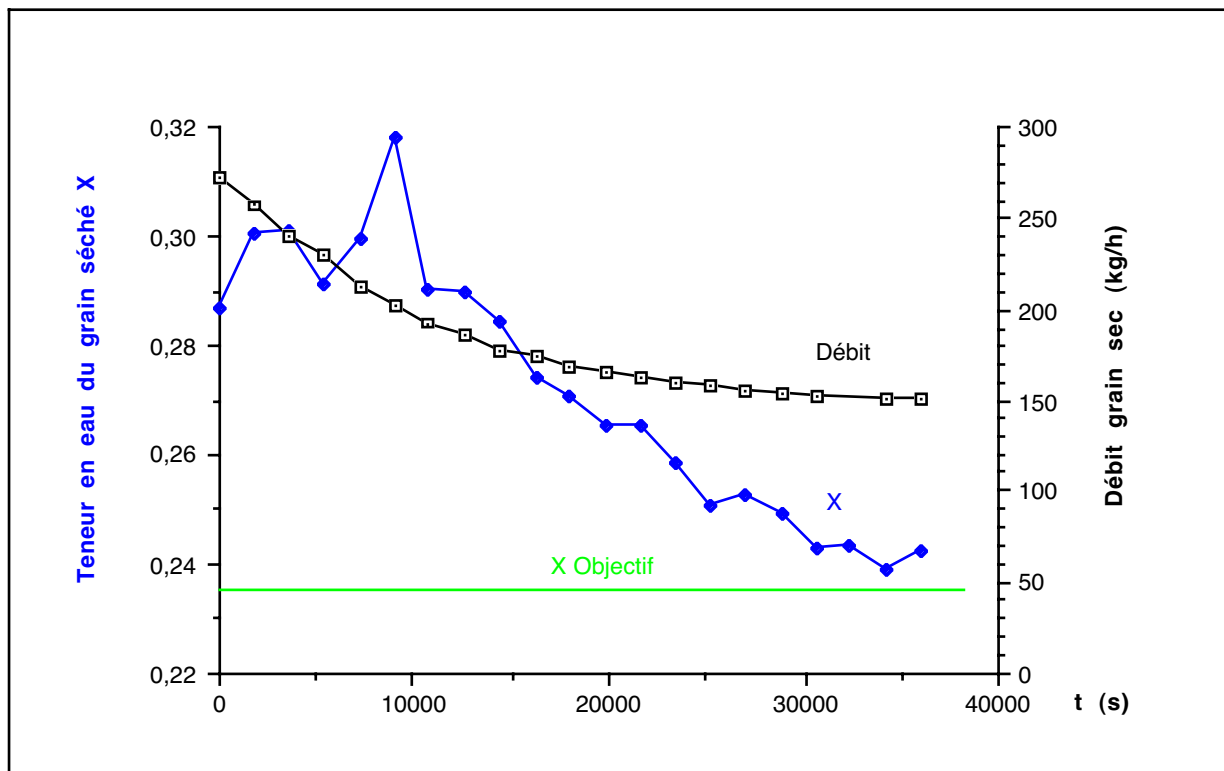


Figure 22 : Evolution du débit et de la teneur en eau du grain séché au cours d'une expérimentation (essai N°5 / 1990).

A la suite d'une série d'expériences courtes sur le pilote, le paramétrage a été légèrement modifié : le couple de valeurs (0,01, 0,7) a été remplacé par (0,012, 0,75) sensiblement plus adapté au domaine étudié de teneur en eau du grain.

Une expérience de 5 jours a ensuite été réalisée avec la participation de tout le Service "Qualité et Débouchés Agro-Alimentaires" de l'ITCF. En fonction des caractéristiques du maïs disponible, un "plan d'expérience" sommaire a été mis au point, puis modifié durant l'expérience en fonction des nombreuses contraintes pratiques.

L'essai N°7 / 1990 (figure 23) comprend plusieurs phases :

- recherche d'un régime stationnaire en mode manuel, production d'un maïs demi-sec,
- début de la régulation avec pour objectif : faire évoluer la teneur en eau du grain en sortie de séchoir de $X_f=0,300$ à $0,282$, ce qui a été parfaitement réalisé,
- nouvel objectif radicalement différent pour le régulateur : $X_f=0,176$ ce qui provoque des oscillations amorties assez rapidement,
- échelon de teneur en eau du grain en entrée de séchoir qui passe de $X_0=0,450$ à $0,280$ (recyclage du grain demi-sec) : le régulateur amortit bien la perturbation.

Un phénomène très important est apparu lors de cet essai : le capteur d'humidité du grain en sortie de séchoir doit être ré-étalonné très souvent sous peine de dérive. Mais chaque ré-étalonnage provoque une perturbation du régulateur

(exemple sur la figure 23 : entre 150 000 et 175 000 s) retardant systématiquement la stabilisation du séchoir.

Ce problème est en grande partie responsable du temps de réaction non optimal du régulateur et il conviendrait d'améliorer les capteurs pour faciliter son travail. Il serait utile, aussi, de combiner les mesures instantanées de teneur en eau du grain avec des mesures de substitution (températures d'air usé...) pour renforcer l'information utilisée par le régulateur.

La rapidité du régulateur est moyenne (de 1 à 3 temps de séjour du grain) et s'explique essentiellement par l'absence d'anticipation (le capteur d'humidité du grain en entrée n'est pas utilisé pour le contrôle).

Le régulateur semble d'une robustesse insuffisante puisqu'il a provoqué des oscillations lors du deuxième changement de consigne. Mais il faut préciser que le fonctionnement normal d'un séchoir industriel à maïs ne présente pas de telles variations d'objectif et que ce régulateur, dans ces conditions, semble tout à fait adapté.

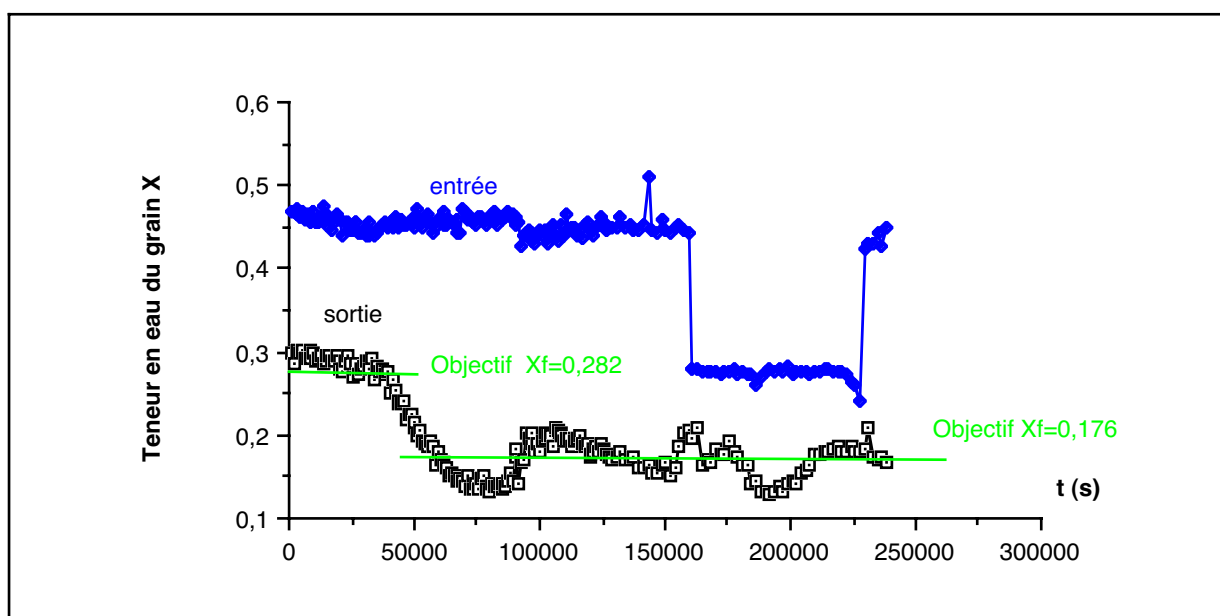


Figure 23 : Test du régulateur par expérimentation : changement de consigne puis échelon de teneur en eau du grain en entrée de séchoir (essai N°7 / 1990).

Un point très important devrait apparaître dans le régulateur : la qualité amidonnaire du maïs séché doit être prise en compte comme une contrainte supplémentaire ou même comme un objectif en soi.

Et l'on peut penser, à ce sujet, que le régulateur devrait minimiser les phases de sur-séchage traumatisantes pour le grain. Le modèle permet la mise au point et le test de ce type d'amélioration.

L'expérience montre (figure 24) qu'il existe une très bonne corrélation entre qualité amidonnaire et teneur en eau du grain en sortie de séchoir. Ceci permet

d'envisager, pour un surcoût nul, une estimation en "temps réel" de la qualité amidonnière du maïs séché, par l'ordinateur.

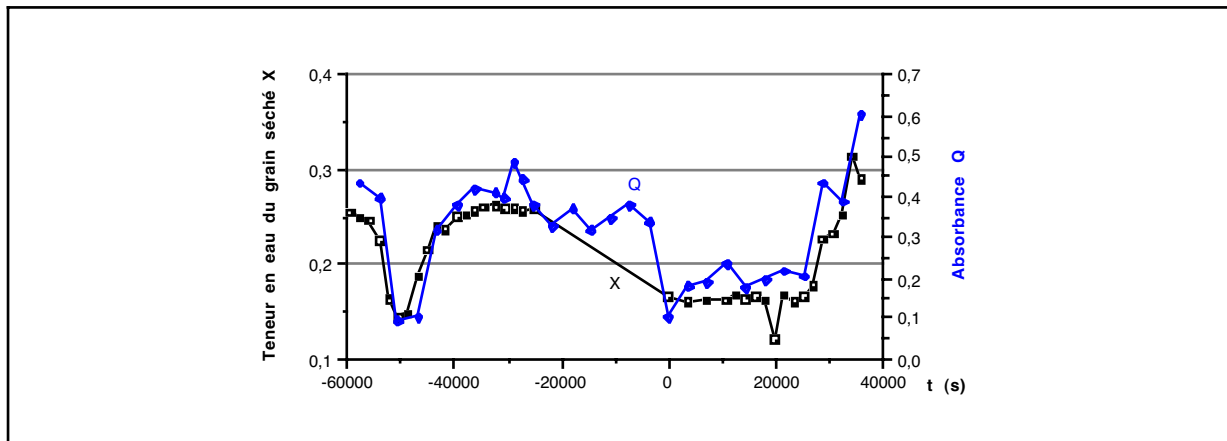


Figure 24 : Corrélation expérimentale entre teneur en eau X et qualité amidonnière Q du grain en sortie de séchoir (essai N°8 / 1990).

En pratique, de nombreuses autres fonctionnalités peuvent être ajoutées à la régulation (COURTOIS, 1990) :

- détection de pannes,
- alarmes incendies, procédure de sécurité,
- bilan énergétiques en "temps réel",
- télégestion...

4 - Conclusion

Au travers de l'étude de l'algorithme de l'AFRC, les potentialités du modèle dynamique, utilisé pour simuler le comportement du séchoir en régime transitoire, sont apparues nombreuses.

Les simulations concordent bien, au moins qualitativement, avec les expérimentations. Ils conviendrait cependant d'utiliser une station de travail plus puissante de manière à vérifier précisément cette concordance.

Les problèmes technologiques liés au choix des capteurs influencent beaucoup les performances du régulateur et méritent une attention soutenue.

Par ailleurs, il conviendra, à l'avenir, de tenir compte systématiquement du problème de la qualité lors de la conception d'un nouvel algorithme.

Malgré son manque de robustesse et d'anticipation, le régulateur testé a semblé suffisamment performant pour une utilisation classique.

L'avenir appartient probablement aux régulateurs auto-adaptatifs tenant compte de l'humidité du grain en entrée.

CONCLUSION

Notre but était de concevoir, tester et valider un modèle dynamique du séchage du maïs adapté aux séchoirs à flux mixtes, majoritaires en France, et qui soit :

- utilisable sur un micro-ordinateur,
- capable de simuler le séchage des grains en toutes conditions transitoires : saut de températures d'air, arrêt de séchage ou relaxation, refroidissement,
- capable de simuler, en plus, la dégradation de la qualité amidonnaire,
- capable de simuler les séchoirs avec recyclage(s) d'air,
- capable de prédire le régime stationnaire d'un séchoir en quelques minutes, avec une bonne précision,
- capable de simuler le comportement dynamique du séchoir soumis à des perturbations, qu'il soit régulé ou non.

Bref, il s'agissait pour nous de mettre au point un outil d'optimisation, statique ou dynamique, de conception, de réglage et de conduite des séchoirs. Le modèle devait permettre, en plus des critères classiques de débit évaporatoire, de consommation énergétique et d'humidité du produit, de tenir compte du facteur qualité.

Les problèmes d'aéraulique et d'écoulement de grains n'interviennent, dans le modèle, qu'au niveau des hypothèses simplificatrices et des données nécessaires aux simulations. Le modèle ne permet donc pas de distinguer l'influence de la géométrie des canaux et de leur agencement. C'est le seul moyen pour simplifier le modèle suffisamment pour le faire fonctionner sur un micro-ordinateur.

Le choix d'un modèle dynamique s'est trouvé justifié à plusieurs niveaux :

- un modèle classique ne peut rendre compte de l'accélération du séchage en fin de relaxation par exemple,
- au niveau du séchoir industriel, le maïs voit les caractéristiques de son air de séchage changer à chaque extraction : c'est pourquoi, au niveau du grain, le régime du séchage peut être qualifié de transitoire,
- pour ces deux raisons, seul un modèle dynamique peut donner une prédiction valable de la qualité amidonnaire du maïs séché,
- seul un modèle dynamique permet d'étudier le comportement dynamique du séchoir (pour mettre au point une régulation).

La démarche structurée, du grain de maïs soumis à un choc thermique au séchoir régulé, a permis de valider, à chaque étape, le modèle.

Une équation qualité a été définie au chapitre 1. Elle présente une précision moyenne pour l'utilisateur, due, pour partie, au "test de turbidité" lui-même ainsi qu'aux deux campagnes atypiques que nous avons subies.

Un modèle dynamique du séchage du maïs en couche mince a été mis au point (chapitre 2). Avec un ajustement limité à deux coefficients d'échanges et un coefficient de transfert, sur des cinétiques en conditions constantes datant de 1980, le modèle est apparu capable de simuler des cinétiques en conditions variables et de prédire la qualité amidonnaire du maïs séché à l'aide de l'équation définie dans le chapitre 1.

Une méthode numérique rapide (chapitre 3) permet de simuler le séchage du maïs en couche épaisse. Les résultats simulés et expérimentaux concordent sans ajustements supplémentaires.

Une extension de cette méthode a été mise au point (chapitre 4) pour simuler le régime stationnaire d'un séchoir industriel. Malgré toutes les hypothèses simplificatrices, les résultats simulés et expérimentaux concordent, là encore, et sans ajustements supplémentaires. La précision obtenue sur la teneur en eau du grain ne peut être améliorée qu'en réajustant certains paramètres du modèle de manière à intégrer l'influence des caractéristiques des dièdres, et des variations de la porosité (liées au séchage, aux extractions...).

Enfin, ce modèle (chapitre 4) a été utilisé pour étudier le comportement dynamique du séchoir pilote de l'ITCF et élaborer un algorithme de régulation. Malgré le nombre limité de simulations réalisées, on observe une bonne concordance entre simulation et expérience.

Les retombées possibles de nos travaux sont les suivantes :

- Utiliser la connaissance tirée des expériences de qualité du chapitre 1 pour réfléchir à de nouvelles conceptions et réglages de séchoir.
- Déterminer localisations et tailles optimales des zones de relaxation dans un séchoir. Evaluer leur incidence sur la qualité amidonnaire et sur le gain de vitesse de séchage à la reprise.
- Déterminer hauteur, débit d'air, température d'air optimaux pour chaque couche épaisse d'un séchoir.
- D'une manière générale, étudier et optimiser tout paramètre de construction d'un séchoir.
- D'une manière générale, étudier et optimiser tout paramètre de fonctionnement d'un séchoir.
- Tester et mettre au point de nouvelles conceptions de séchoirs.
- Mettre au point et tester des algorithmes de contrôle avancés.
- Prédire, en temps réel, la qualité amidonnaire du maïs en sortie de séchoir.

D'ores et déjà, le modèle a été utilisé pour tester une nouvelle conception de séchoir visant une meilleure qualité produite.

Certains points de nos travaux gagneraient à être approfondis :

- Un plan d'expérience limité, basé sur des expériences de séchage en lit fluidisé couplées au PROMATEST, permettrait un réajustement du coefficient qualité K_Q pour une meilleure précision. Ces travaux pourraient se faire en coopération avec l'équipe de STEINMETZ à l'ENSIGC de Toulouse.

- Une étude plus poussée du modèle couche mince devrait permettre d'optimiser les rapports volumiques entre les 3 compartiments d'un grain et aboutir à remplacer T_a par T_g dans la relation exponentielle entre B_2 et T_a . Ceci devrait assurer une meilleure précision dans le cas du refroidissement.

- Des expériences en couche épaisse devraient permettre de réajuster les coefficients B_1 et B_2 de manière à intégrer les transferts non pris en compte (conduction...).

- Une étude plus poussée des simulations de divers séchoirs industriels devrait permettre de trouver des paramètres (ou degrés de liberté) pour intégrer les caractéristiques des dièdres. Ceci permettrait de faire la jonction entre nos travaux et ceux d'ARNAUD et FOHR au LET de Poitiers, et ceux de FLICK et CHAABOUNI au CEMAGREF à Antony.

- Reprogrammer le modèle dynamique sur une station de travail pour pouvoir mettre au point un algorithme de régulation auto-adaptatif avec effet anticipatif sur l'humidité du grain en entrée.

Ce dernier point fait l'objet d'une coopération entre l'ENSIA et l'ITCF allant au delà de la thèse. J'assure personnellement la continuité des travaux sur ce chapitre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arnaud G. et Fohr J.P., 1991, communication personnelle, LET, Poitiers, France.

Abid M., Gibert H., Laguerie C., 1988, Analyse expérimentale et théorique des mécanismes de transferts de matière et de chaleur au cours du séchage d'un grain de maïs dans un lit fluidisé, *Entropie* N°139, 3-12.

AGPM, 1989, Brochures diverses, Boigneville, France.

Allaneau B., 1979, Influence des lipides sur la rétention des constituants volatils, aspects thermodynamiques, thèse de docteur-ingénieur ENSIA Massy, France.

Bakker-Arkema F.W., Lerew L.E., DeBoer S.F., Roth M.G., 1974, Grain drying simulation, research report 214 , Michigan State University, Agricultural Experiment Station, East Lansing, MI, U.S.A..

Bimbenet J.J., 1984, Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires, *Cahiers du GIA, SEPAIC*, Paris, France, 31.

Bimbenet J.J., Brusset H., Loncin M., 1970, Effets de la présence de corps solubles sur la deshydratation des produits biologiques, *Indust. Alim. Agric.* N°4, Paris, France, 385-391.

Bimbenet J.J., Daudin J.D., Wolff E., 1984, Air drying kinetics of biological particles, fourth International Drying Symposium, Kyoto, Japan, 1, 249-256.

Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W., 1974, Drying cereal grains, AVI Publishing Company, inc, Westport, Connecticut, U.S.A., 265.

Bruce D.M., 1983, A simulation of multi-bed, concurrent-flow and counter-flow grain driers. Part 1 The model, DN. 1171, Natl. Inst. Agric. Engng, Silsoe, UK.

Bruce D.M., 1989, communication personnelle, AFRC, Silsoe, UK.

Chen C.S., 1973, Simultaneous heat and mass transfer in convective drying of biological materials, *Ann. Technol. Agric.*, 22(3), 305-312.

Cherruault Y., 1983, *Biomathématiques*, PUF, Paris, France, 127.

Cherruault Y., 1986, *Mathematical modelling in biomedecine, Optimal control of biomedical systems*, D. Reidel Publishing company, 258.

Courtois F., 1990, *Améliorer la conduite des séchoirs : Télégestion et Pilotage Automatique*, Journée technique du GLCG, Automatisation des structures de stockage des grains, Paris, France.

Crank J., 1967, *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press, Oxford, UK, 347.

Daudin J.D., 1982, *Modélisation d'un séchoir à partir des cinétiques expérimentales de séchage*, thèse de docteur-ingénieur, ENSIA, Massy France.

Eltigani A.Y. et Bakker Arkema F.W., 1987, *Automatic control of commercial crossflow grain dryers*, *Drying Technology*, 5(4), 561-575.

Farber B., 1976, *Contribution à l'étude des caractéristiques microscopiques de divers génotypes de maïs. Effets de traitements hydrothermiques sur l'albumen de maïs*, Thèse de doctorat 3ème cycle de l'université Paris VI, France.

Fohr J.P., Arnaud G., Ali Mohamed A., Ben Moussa H., 1988, *Validity of drying kinetics*, Sixth International Drying Symposium, Versailles, France, 151-157.

Fortes M., Okos M.R., 1982, *Modeling of dryeration processes*, third International Drying Symposium, Birmingham, Angleterre, 12-18.

Freeman J.E., 1973, *Quality factors affecting value of corn for wet-milling*, ASAE paper No 71-825.

Gunasekaran S. et Paulsen M.R., 1985, *Breakage resistance of corn as a function of drying rates*, *Transactions of the ASAE*, 28(6), 2071-2076.

Gustafson R.J. et Morey R.V., 1979, *Study of factors affecting quality changes during high-temperature drying*, ASAE paper No 78-3010.

Gustafson R.J., Thompson D.R., Sokhansanj S., 1979, Temperature and stress analysis of corn kernel - Finite element analysis, Transactions of the ASAE, 10, 955-960.

Haghighi K., Segerlind L.J., 1988a, Failure of biomaterials subjected to temperature and moisture gradients using finite element method : II - Stress analysis of an isotropic sphere during drying, Transactions of the ASAE, 11, 938-946.

Haghighi K., Segerlind L.J., 1988b, Modeling simultaneous heat and mass transfer in an isotropicsphere-a finite element approach, Transactions of the ASAE, 31(2), 629-637.

Ingram G.W., 1976, Deep bed drier simulation with intra-particle moisture diffusion, J. Agric. Engng Res., 21, 263-272.

Ituen E.U.U., Mittal J.P. et Adeoti J.S., 1986, Water absorption in cereal grains and its effect on their rupture stress, J. Food Process Engng, 8, 147-158.

Karel M., Saguy I. et Mishkin M.A., 1987, Advances in optimisation of food dehydration with respect to quality retention, fourth International Drying Symposium, Kyoto, Japon, 295-298.

Kazarian E.A., Hall C.W., 1963, Thermal properties of grain, Transactions of the ASAE, 8(1), 65. Cités par Bakker-Arkema F.W., Lerew L.E., DeBoer S.F., Roth M.G., 1974, Grain drying simulation, research report 214, Michigan State University, Agricultural Experiment Station, East Lansing, MI, U.S.A..

Kuppinger H., 1980, Untersuchung und verbesserung der querstromtrocknung von getreide, thèse de docteur-ingénieur, Université d'Hohenheim, R.F.A.

Laguerre J.C., Lebert A., Trystram G. et Bimbenet J.J., 1989, Dynamique du séchage, modélisation du comportement de produits agroalimentaires, 4ème colloque université industrie CEE CFE, Marseille, France.

Landry J., 1979, Etude de la zéïne, groupe des protéines de réserve du grain de maïs : caractérisation et accumulation, Thèse de doctorat d'état de l'Université Paris VI, France.

Lasseran J.C., 1977, Spécial séchage du grain, Perspectives Agricoles N°6, Paris, France.

Lasseran J.C., 1989 a, Evolution de la température au centre d'un grain pendant son séchage, compte-rendu technique, action ACTA-MRT (séchage du maïs), ITCF, Boigneville, France.

Lasseran J.C., 1989 b, Innovations technologiques marquantes - Répercussions sur les coûts d'investissements et de fonctionnement, Journées séchage, recueil des communications, Perspectives Agricoles, Hors Série Juillet-Août, ITCF, Paris, France, 14-27.

Lasseran J.C., 1991, Chemical and physical changes in maize components affecting quality for wet-milling industry, "Uniformity by 2000, International Workshop on Maize and Soybean Quality", Ed. L.D. Hill, University of Illinois, URBANA, 61801, U.S.A..

Lebert A., 1991, Optimisation non-linéaire : principaux algorithmes, Cours de troisième année, ENSIA, Massy, France.

Le Bras A., 1982, Répétabilité et reproductibilité du test de turbidité, étude non-publiée, ITCF, Boigneville, France.

Le Bras A., 1989, Influence des conditions de séchage sur la qualité amidonnière du maïs, Spécial séchage du grain, Perspectives Agricoles Hors Série Séchage, Paris, France, 42-55.

Le Bras A. et Beaux Y., 1984, Appréciation de la Valeur d'Utilisation du Maïs en Amidonnerie, in Godon B. et Loisel W. (ed), Guide Pratique d'Analyse dans les Industries des Céréales, Lavoisier, Paris, France, 597-600.

Le Bras A. et Charenton E., 1989, Contribution à la mise au point d'un mode opératoire définitif du test de turbidité, étude non-publiée, ITCF, Boigneville, France.

Le Maguer M., 1989, Communication personnelle, ENSIA, Massy, France.

Lenoir P. et Alain D., 1988, Le brunissement du maïs au cours du séchage, Informations techniques du CEMAGREF, Antony, France, 1-8.

Lenoir P. et Chaabouni M., 1991, Séchoirs à maïs, état de l'art et importance de l'écoulement des grains, Journée d'étude du 16 janvier sur "Milieux poreux et séchage" de la Société Française des Thermiciens, Paris, France.

Lescano C.L. et Tyrrell D.E., 1987, Change in viability of maize during high temperature drying, *Drying Technology*, 5(4), 497-510.

Levesque M.P., Otten L., Timbers G.E., 1986, Effects of kernel properties on thin-layer drying of shelled corn, fifth International Drying Symposium, Cambridge, U.S.A., 559-566.

Litchfield J.C., Okos M.R., 1988, Prediction of corn kernel stress and breakage induced by drying, tempering and cooling, *Transaction of the ASAE*, 31(2), 585-594.

Loncin M., 1985, Génie industriel alimentaire : aspects fondamentaux, Masson S.A., Paris, France.

Loncin M. et Merson R.L., 1979, Food engineering : principles and selected applications, Academic Press, New York, U.S.A..

Lupano C.E. et Anon M.C., 1987, Denaturation of wheat endosperme proteins during drying, *Cereal Chem.*, 64(6), 437-442.

Marchant J.A., 1985, Control of high temperature continuous flow grain driers, *Agricultural Engineer*, Winter, 145-149.

Moreira R.G. et Bakker Arkema F.W., 1989, Digital control of crossflow grain dryers, ASAE paper No 89-6535.

Moreira R.G. et Bakker Arkema F.W., 1990, Unsteady-state simulation of a multi-stage concurrent-flow maize dryer, *Drying Technology*, 8(1), 61-75.

Mühlbauer W., 1974, Recherches sur le séchage du maïs-grain et étude d'un dispositif de séchage à co-courants, traduction d'une thèse de docteur-ingénieur traduite par le C.N.E.E.M.A., mai 1976, étude No 415, Antony, France.

Nellist M.E. et Bruce D.M., 1987, Drying and cereal quality, *Aspects of Applied Biology*, Cereal Quality, 15, 439-455.

Nellist M.E., 1981, Predicting the viability of seeds dried with heated air, *Seed Sci. & Technol.*, 9, 439-455.

Nishiyama Y., 1987, Sphere drying model for dryer design, ASAE paper No 87-6039.

Nybrant T.G., 1988, Modelling and adaptative control of continuous grain driers, *J. Agric. Engng Res.*, 40, 165-173.

Pabis S., Henderson S.M., 1962, Grain drying theory, *J. Agric. Engng Res.*, 7(1), 21-26.

Patil N.D., 1988, Evaluation of diffusion equation for simulating moisture movement within an individual grain kernel, *Drying Technology*, 6(1), 21-42.

Platt D., Rumsey T.R. et Palazoglu A., 1991, Dynamics and control of cross-flow grain dryers - I. Model development and testing, *Drying Technology*, 9(1), 27-60.

Puiggali J.R., Quintard M., Whitaker S., 1988, Drying granular porous media : gravitationnal effects in the isenthalpic regime and the role of diffusion models, *Drying Technology*, 6(4), 601-629.

Rattanapant O., 1986, Etude du séchage de produits biologiques granuleux traversés par un air chaud, DEA ENSIA, Massy, France.

Sibony M., Mardon J.C., 1982, Analyse numérique II : approximations et équations différentielles, Hermann, Paris, France.

Silva M.A., Nebra S.A., 1988, The calculation of moisture distribution in a drying process, Sixth International Drying Symposium, Versailles, France, 145-150.

Sokhansanj S., 1987, Improved heat and mass transfer models to predict grain quality, *Drying Technology* 5 (4), 511-525.

Sokhansanj S., Cenkowski S., 1988, Equipment and methods of thin-layer drying, a review, sixth International Drying Symposium, Versailles, 159-170.

Sokhansanj S., Kameoka T., Singh D., 1985, Quality assessment in grain drying simulation - A stochastic approach, in *Physical properties of agricultural materials and their influence on design and performance of agricultural machines and technologies*, Faculté de Sbornik, Prague, Tchécoslovaquie.

Steinmetz D., 1990, Communication personnelle, ENSIGC, Toulouse, France.

Stroshine R., Martins J., 1986, Varietal difference in high temperature drying of maize in the midwestern united states, fifth International Drying Symposium, 470-478.

Sun L., 1991, Ecoulement d'air et transferts dans les séchoirs à grain à dièdres, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France.

Techasena Rattanapant O., 1989, Modélisation du séchage à l'air chaud de produits alimentaires granuleux, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France.

Thomson R.A., Isaacs G.W., 1968, Porosity determination of grains and seeds with an air comparison pycnometer, Transaction of the ASAE, 10, 693-696. Cités par Watson S.A., 1987, Corn : chemistry and technology, chapter 3, American Association of Cereal Chemists Inc. Pub., Saint Paul, Minnesota, U.S.A, 605.

Thomson T.L., Peart R.M., Foster G.H., 1968, Mathematical simulation of corn drying - a new model, ASAE paper No 67-313.

Toftdahl Olesen H., 1987, Grain drying, Innovation Development Engineering ApS, Thisted, Denmark.

Toyoda K., 1988, Study on intermittent drying of rough rice in a recirculation dryer, sixth International Drying Symposium, Versailles, France, 171-178.

Wall J.S., James C. et Donaldson G.L, 1975, Corn proteins : chemical and physical changes during drying of grain, Cereal Chemistry, 52(6),779-789.

Watson S.A., 1987, Corn : chemistry and technology, chapter 3, American Association of Cereal Chemists Inc. Pub., Saint Paul, Minnesota, U.S.A, 605.

Whitaker S., 1988, The role of irreversible thermodynamics and the Onsager relations in the analysis of drying phenomena, sixth International Drying U.S.A., Versailles, France, 25-38.

Whitfield R.D., 1987 a, Control of a mixed-flow drier : part 1 - Design of the control algorithm, DN 1393, AFRC, Silsoe, UK.

Whitfield R.D., 1987 b, Control of a mixed-flow drier : part 2 - Testing the control algorithm, DN 1394, AFRC, Silsoe, UK.

Wilson S.G., Nguyen T.V., 1988, Wet problem regions remaining after in bin drying : a two-dimensional model showing the formation of cool wet wall-regions during in-

bin drying of wheat, sixth International Drying Symposium, Versailles, France, 553-564.

RÉSUMÉ

Le maïs est la deuxième production végétale française derrière le blé. Pour être valorisé dans les industries agro-alimentaires, il doit conserver au mieux ses qualités au cours du séchage qui intervient après la récolte. Cette opération, nécessaire à sa stabilisation biochimique et biologique, peut entraîner la dégradation de sa qualité amidonnaire, critère désormais largement répandu dans la filière maïs.

Il est devenu important, maintenant, d'optimiser la conception des séchoirs en considérant, en plus de critères de rendement énergétique et de débit évaporatoire, la production d'un maïs de qualité amidonnaire.

La conduite automatique est un moyen complémentaire d'optimiser la gestion "temps réel" des séchoirs.

Notre travail a consisté en la réalisation d'un outil d'aide à la conception de séchoirs et d'algorithmes de régulation optimisés en termes d'énergie, de débit et de qualité.

L'influence d'un choc thermique sur la qualité amidonnaire du maïs est modélisée. L'équation qualité ainsi définie est reprise dans un modèle dynamique de séchage développé avec une méthode compartimentale, depuis la couche mince jusqu'au séchoir industriel.

Le modèle, ajusté sur des cinétiques de séchage en conditions constantes, est utilisé pour prédire le régime stationnaire de tout séchoir, existant ou non. Il permet de rendre compte de tous les phénomènes transitoires présents dans un séchoir industriel : sauts de température d'air, arrêts de séchage, refroidissement, recondensation, recyclage d'air...

Le modèle est aussi utilisé pour prédire le comportement dynamique de séchoirs soumis à des perturbations et tester ainsi les performances d'un algorithme de régulation.

De la couche mince au séchoir industriel, les simulations sont comparées aux expérimentations, en fonction des données expérimentales disponibles. Une erreur moyenne de 5% sur la prédiction est constatée pour la teneur en eau du maïs sec. L'erreur de prédiction sur la qualité est du même ordre que l'incertitude expérimentale due au test utilisé.

MOTS-CLÉS

séchage, grain, maïs, modèle, compartimental, dynamique, qualité amidonnaire, simulation, régulation.

SUMMARY

Maize is, in France, the second agricultural produce after wheat. To be acceptable for the industry, it has to preserve all its qualities during the drying period following harvesting. Required to reach the biochemical and biological stability of the product, the drying operation can involve a loss in wet-milling quality which is a criterion largely considered in the maize industry nowadays.

Thus it became important to consider, in addition to energetic yield and evaporation rate criteria, the wet-milling quality of the maize in order to optimize dryers design.

Automatic control is a modern way to optimize the dryers "real-time" management.

The objective of this work is to build up a simulation tool helpful for the design of dryers and control algorithms optimized with regards to energy, grain flow and quality.

The influence of a thermal shock on wet-milling quality is modelled. The quality equation thus defined is used in a drying dynamic model based on a compartmental method and developed from the thin layer to the industrial dryer.

The model, adjusted on drying kinetics under constant conditions, is used to predict the steady state of any dryer. It allows the modelling of any transient phenomena happening in industrial dryers : jumps of air temperature, drying breakdowns, cooling, condensation, air recycling...

This model is also used to predict the dynamic behaviour of dryers when a disturbance is applied and thus to test the applicability of control algorithms.

From the thin layer to the industrial dryer, simulations are compared to experimental results. A 5% mean error on the predicted moisture content of dried corn is obtained. The error on the wet-milling quality prediction is of the same order than the error due to the experimental procedure followed.

KEY WORDS

drying, grain, maize, compartmental model, dynamic, wet-milling quality, simulation, regulation.