

**STOCKAGE MODERNE DES CEREALES ET DES LEGUMI
NEUSES : SITUATION ACTUELLE ET PERSPECTIVES**

Elaboré par MM. : AIT EL GADI A. — EL MIR M. — EL HARTI A.

INTRODUCTION

Le stockage des céréales est l'un des facteurs les plus importants pour assurer la sécurité alimentaire du pays. En effet, compte tenu du décalage entre le rythme de la production et celui de la consommation, toute politique de régulation du marché ne peut être qu'illusoire si elle ne considère pas la fonction stockage.

Au Maroc, malgré l'importance qui semble lui être accordée, ce secteur reste insuffisamment connu et n'a pas fait, ces dernières années, l'objet d'études en proportion du rôle prépondérant qu'il joue dans l'économie céréalière. En effet, la dernière enquête remonte à 1979.

Pour cela, dans le cadre des études sectorielles entreprises par l'Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses, une enquête nationale sur le stockage des céréales et des légumineuses a été entreprise en juin 1990. Cette enquête multiobjective a touché l'ensemble des organismes stockeurs agréés par l'Office.

Les premiers résultats de cette enquête feront l'objet de cette communication.

I— OBJECTIFS :

Les objectifs assignés à l'enquête sont :

— constitution d'une base nationale de données sur le secteur du stockage moderne au Maroc.

— étude de la situation actuelle du secteur afin d'obtenir des résultats pouvant faciliter le débat et éclairer les décideurs pour une politique de stockage au Maroc.

— recueil des avis et suggestions des organismes stockeurs pouvant aider à dégager un plan national de stockage en vue de l'amélioration de l'existant et les perspectives à venir :

**II— FONCTIONNEMENT DU MARCHÉ
NATIONAL DES CEREALES ET DES LEGUMI-
NEUSES**

1— INTERVENTION DE L'ONICL :

Avant d'examiner les résultats de l'enquête, il est utile de rappeler brièvement le fonctionnement du marché national des céréales et des légumineuses.

La réglementation du marché des céréales s'exerce par l'entremise de l'Office National Inter-

professionnel des Céréales et des Légumineuses.

Cet organisme créé depuis 1937, avait pour mission initiale d'organiser le marché du blé tendre. En 1948, son champ d'action avait été étendu à toutes les céréales, puis en 1973 à toutes les légumineuses.

Les interventions de cet organisme sont réglées par le dahir portant la loi n° 1-73-335 du 24 septembre 1973 et les textes pris pour son application.

L'Office est chargé d'étudier toutes les mesures législatives et réglementaires de nature à lui permettre de disposer des informations nécessaires pour assurer en toutes circonstances l'équilibre entre l'offre et la demande et régulariser le marché des céréales et des légumineuses et de leurs dérivés.

Ainsi, parmi ses principales fonctions, l'Office suit le marché des céréales, assure la gestion des stocks tant au niveau régional qu'au niveau national, et réalise le cas échéant les importations des céréales en vue d'assurer l'approvisionnement régulier du marché.

**2— AGENTS OPERATEURS DANS LE
MARCHÉ DES CEREALES ET DES LEGUMI-
NEUSES**

Le commerce des céréales et des légumineuses s'effectue dans deux marchés assez distincts :

— L'un dit marché « libre », fonctionne sur la base de l'offre et de la demande. Les transactions s'effectuent librement entre agriculteurs, collecteurs et détaillants soit au niveau des exploitations, soit au niveau des souks ruraux ou des halles aux grains.

— L'autre marché dit « contrôlé », est le plus encadré par l'ONICL. Dans ce marché, le commerce des céréales et des légumineuses est effectué par les organismes coopératifs, les commerçants céréalistes et les industriels de transformation.

Il importe de souligner que seul ce marché représente une structure permettant d'agir sur l'ensemble du marché national avec une stratégie bien définie.

Parmi ces différents agents économiques, seuls les organismes coopératifs (SCAM et CMA) et les commerçants agréés sont spécialisés dans le

conditionnement et le stockage moderne des céréales pour une longue durée.

Néanmoins, la fonction de stockage continue dans une large mesure à être assurée par les exploitants agricoles eux-mêmes, pas uniquement pour des raisons de commerce, mais dans le but principal de satisfaire leurs besoins familiaux, du cheptel et des semences.

III — METHODOLOGIE :

Pour répondre aux objectifs assignés à cette enquête deux questionnaires multirubriques ont été établis :

a/ Un questionnaire Etablissement : Il porte sur l'organisme stockeur dans sa globalité. Les grands traits de ce questionnaire sont :

- L'identification de l'établissement.
- Les potentialités de stockage de l'organisme, sa structure et les perspectives à venir.
- Les réceptions, les livraisons et les stocks de report par nature de céréales et de légumineuses au cours d'une campagne agricole, ainsi que les types de livreurs et de débouchés.
- L'économie du stockage, avec notamment les charges afférents au personnel, aux traitements, aux investissements, à l'entretien et à la conduite du stockage.

b/ Un questionnaire « Dépôt » : Ce questionnaire, rempli pour chaque dépôt, comprend les parties suivantes :

- L'identification et les zones territoriales du dépôt.
- La description du dépôt, sa structure et sa capacité de stockage.
- Les capacités de réception, de livraison, et de manutention.
- Le niveau des pertes et leurs causes.

Une enquête pilote a permis de redresser et d'affiner ces questionnaires pour qu'ils répondent au mieux aux objectifs assignés à l'enquête.

Les données collectées à l'échelle nationale sont saisies sur microordinateur et ont fait l'objet de traitement au moyen du logiciel SAS.

IV — RESULTATS

Avant de présenter les résultats quantitatifs de l'enquête sur la capacité de stockage et sa répartition, il y a lieu de préciser que la capacité de stockage des organismes stockeurs est répartie en :

- Entrepôts couverts : constitués de silos et de magasins; ces derniers sont pourvus de murs et de toits qui assurent l'isolation de la marchandise stockée de l'environnement extérieur.
- Entrepôts semi couverts : constitués de hangars pourvus de toitures mais absence partielle

ou totale des murs. Dans ces structures les marchandises sont en contact avec l'environnement extérieur.

— Terres-plein : ce sont des aires aménagées afin de recevoir des marchandises en stock sous bâches.

Dans ces structures deux modes de stockage sont pratiqués :

Le stockage en sacs : Les sacs sont empilés à l'intérieur des magasins couverts ou des hangars, ou bien protégés par des bâches sur des terres-plein.

Le stockage en vrac :

On distingue :

— **Le stockage en bardis :** le vrac est entouré de sacs d'appui. Ce mode est pratiqué en magasins.

— **Le stockage en silos :** horizontaux ou verticaux.

1 — EFFECTIF ET TYPE D'ENTREPRISE DE STOCKAGE

Les entreprises en activité dans le secteur du stockage encadré par l'ONICL, sont au nombre de 127 et constituées de :

— 14 coopératives, soit 11 % de l'effectif total.

— 113 commerçants agréés (C.A) dont :

— 64 entreprises individuelles, soit 56,6 % des C.A.

— 47 entreprises type société anonyme (S.A), soit 41,6 % des C.A.

— 2 entreprises type société à responsabilité limitée (SARL), soit 1,6 % des C.A.

Leur répartition en fonction de l'année de création se présente comme suit :

— Avant 1960 : 26

— Entre 1960 et 1970 : 15

— Entre 1970 et 1980 : 33

— Créés entre 1980 et 1990 : 53

On note que 80 % des entreprises ont moins de 30 ans. 42 % ont seulement, moins de 10 ans.

En fait, il s'agit, essentiellement, des entreprises nouvellement créées.

Leur répartition régionale est la suivante :

Sud 1

Tensift 14

Centre 44

Nord Ouest 26

Centre Nord 19

Oriental 6

Centre Sud 17

On note, en particulier, qu'il y a une concentration des entreprises dans les régions économiques du Centre et du Nord Ouest; inversement la

région du Sud n'en possède qu'une seule, il s'agit, en l'occurrence, de la CMA d'Agadir.

La présence en nombre élevé des entreprises dans les régions du Centre et du Nord Ouest s'explique par le fait que ces régions sont les plus productrices en céréales et légumineuses du pays et disposent d'infrastructures de transformation les plus élevées.

De plus, la majorité des entreprises créées après 1980, sont localisées dans les régions du Centre (17 entreprises) et du Centre Nord (16 entreprises).

2— DISPONIBILITES EN INSTALLATIONS DE STOCKAGE

La capacité totale de stockage au niveau des organismes agréés par l'ONICL, telle qu'elle est appréciée par l'enquête, est de 22.068.950 QX; et répartie comme suit (voir figure 1) :

Capacité couverte : 12.998.200 QX soit 58,9 %

Capacité semi couverte : 2.271.000 QX soit 10,3 %

Capacité non couverte : 6.799.750 QX soit 30,8 %

La structure détaillée de cette capacité est consignée dans le tableau 1.

L'infrastructure permanente, composée des entrepôts couverts et de hangars semi couverts, est de 15.269.200 QX. La première constatation qui se dégage, est que cette capacité ne représente que 24 % des besoins globaux en céréales.

A côté de cette capacité permanente, les organismes stockeurs disposent d'une capacité additionnelle en terres-plein de 6.799.750 QX qu'ils utilisent pour le stockage des céréales, en considérant évidemment que ce type de stockage ne peut satisfaire les normes de conservation.

Comparées aux capacités dégagées lors du recensement effectué par le MARA en 1979 soit 14.000.000 QX, on constate un accroissement insignifiant de la capacité permanente soit une moyenne de 1 % par an; alors que les capacités sous bâches ont enregistré une augmentation de 3.299.750 QX, soit une hausse moyenne de 9,4 % par an.

La répartition par type d'organisme et par région économique, fait ressortir les faits suivants :

— Au niveau des organismes stockeurs :

— La capacité permanente par organisme est sujette à une variation très importante; elle est en moyenne de 135.000 QX, mais peut varier de 600 à 1.000.000 QX. La répartition par classe d'entreprises est comme suit :

Classe	Nombre d'agréés
0QX	14
à 50.000 QX	28
50.000 à 100.000 QX	36
100.000 à 300.000 QX	39
300.000 à 500.000 QX	6
500.000 à 1.000.000 QX	4
1.000.000 QX	0

— On note en particulier que 11 % des agréés en possèdent pas de capacité permanente, alors que près de 2/3 des entreprises détiennent une capacité permanente inférieure à 100.000 QX, 92 % disposent d'une capacité inférieure à 300.000 QX et seulement 8 % des organismes possèdent une capacité permanente dépassant les 300.000 QX.

Les coopératives disposent d'une capacité permanente de 1.127.700 QX (dont 216.000 QX en semi couvert) soit 27 % du disponible permanent national. Elles détenaient en 1979, 5.200.000 QX soit une regression de l'ordre de 2 % par an. Ceci trouve son explication, entre autres, dans les faits suivants :

— soit que certains bâtiments ne sont plus utilisables.

— soit que les délais de location d'autres bâtiments n'ont pas été renouvelés.

— ou bien que certains magasins cédés en jouissance ont été récupérés par leurs propriétaires.

Par contre, un courant de dynamisme des commerçants agréés a gagné le terrain. En effet, leur capacité sous abris, qui était de 8.800.000 QX en 1979, est passée actuellement à 11.141.500 QX soit un accroissement moyen de l'ordre de 1,9 % par an répartie de la façon suivante :

	Capacité totale	Capacité permanente	Sous bâches
Sociétés anonymes	8.433.000	6.617.000	1.816.000
Entreprises Indivi.	6.193.750	4.474.500	1.719.250
SARL	50.000	50.000	0
TOTAL	14.676.750	11.141.500	3.535.250

— Les sociétés anonymes détiennent 43.3 % des capacités permanentes: les entreprises individuelles n'en possèdent que 9.3 %.

— 75.9 % des capacités détenues par les commerçants agréés ont couvertes. cette proportion n'est que de 55.8 % pour les coopératives.

— Les entreprises type S.A.R.L ne jouent qu'un rôle secondaire dans le stockage des céréales et des légumineuses.

— Les entreprises créées après 1980. détiennent une capacité couverte de 4.748.500 QX soit 31 % du disponible national. Cela nous permet d'affirmer. que le secteur du stockage est sujet à des effets qui tendent à se compenser : la cessation d'activité de certaines entreprises dans un sens. et la création de nouvelles entités dans l'autre sens.

En effet. si cela n'est pas le cas. notre patrimoine en capacité permanente serait actuellement de l'ordre de 20 millions de QX (capacité recensée en 1979 à laquelle on ajouterait celle nouvellement créée). La regression de la capacité correspond soit à l'arrêt total ou partiel de l'activité de certains entreprises. Ces retraits concernent. en particulier. les lieux où l'activité s'est trouvée réduite par suite soit de l'insuffisance de la récolte soit d'une concurrence très agressive.

— Au niveau régional :

— On constate une répartition inégale des capacités de stockage permanentes. Les grands centres de stockage sont situés dans les régions qui sont à la fois les plus productrices de céréales et de légumineuses et les plus fournies d'industries utilisatrices. Il s'agit des régions économiques du Centre (38.8 %). du Nord-Ouest (17.4 %). du Centre Nord (16.3 %) et du Centre Sud (14.6 %). Les régions à faible production céréalière sont démunies de capacités de stockage. Il s'agit des régions du Sud et de l'Oriental avec respectivement 250.000 QX et 426.500 QX. Ces capacités correspondent pratiquement à celles détenues par les deux coopératives situées dans ces deux régions. Toutefois. ces observations doivent être rapprochées des disponibilités et des besoins de chaque région économique afin de juger de l'importance et de l'adaptation des capacités de stockage de chaque région.

Le phénomène le plus frappant de cette concentration du disponible national en moyens de stockage. est que quatre provinces détiennent à elles seules 69 % de nos disponibilités en capacité permanente. Il s'agit de :

- Casablanca : 3.864.000 QX
- Fès : 2.550.000 QX
- Meknès : 1.948.000 QX

Kénitra : 1.888.000 QX

— Le stockage sous bache prend de plus en plus de l'ampleur. Son importance varie d'une région à l'autre en fonction des considérations économiques et pratiques de chaque organisme stockeur. Les coopératives détiennent à elles seules 48 % des capacités sous bâches.

3— NATURE DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE :

Les organismes stockeurs utilisent de préférence les magasins pour entreposer leurs marchandises. Ainsi. les magasins représentent 88.7 % de la capacité permanente contre seulement 11.39 en silos. Ce choix est dicté par les considérations suivantes :

— Le coût de construction moins élevé des magasins que pour les silos.

— La non spécialisation des magasins. d'autant plus que la plupart des organismes stockeurs pratiquent d'autres activités annexes.

— La facilité de louer ou de vendre les magasins dans le cas de cessation de l'activité.

La capacité moyenne par magasin est de l'ordre de 40.000 QX.

— 61 % des installations sont en location et 39 % en propriété. Ce fait très significatif n'est que la conséquence de l'incertitude et de la prudence des organismes stockeurs qui caractérisent ce secteur.

Ages des installations :

L'âge des installations peut être considéré comme une indication approximative de l'état général des installations. Toutefois. l'entretien des installations est un facteur qui pourrait relativiser la conclusion afférente à cette indication.

La répartition des capacités permanentes en fonction de l'âge de construction des installations est donnée dans le tableau suivant :

Ages des installations	Silos % QX	Magasins % QX	Total QX
30 ans	882.560 5,8	3.704.008 24,3	4.586.568
30 à 30 ans	0 0,0	978.456 6,4	978.456
10 à 20 ans	167.973 1,1	1.765.180 11,6	1.933.153
0 à 10 ans	610.768 4,0	7.162.255 46,9	7.771.023

Ce tableau fait ressortir que la décennie des années 60 est caractérisée par une certaine stagnation de la capacité permanente de stockage, mais notre patrimoine a connu un rajeunissement significatif au cours de la dernière décennie. En effet, environ la moitié des installations existantes ont moins de dix ans. Toutefois, les installations dépassant trente ans sont encore importantes (30 %). En outre, plus que la moitié de la capacité offerte par les silos date de plus de 30 ans.

4— COMMERCIALISATION, TAUX D'UTILISATION DES CAPACITES EXISTANTES

4—1— COMMERCIALISATION :

L'analyse des achats des céréales et des légumineuses, par les organismes stockeurs donne lieu aux observations suivantes (tableau 2) :

Une variabilité régionale importante des proportions commercialisées.

— L'existence d'une corrélation positive entre le volume commercialisé et l'importance des récoltes. Cependant, le caractère fluctuant de la production n'est pas de nature à modifier fondamentalement les proportions relatives commercialisées au niveau de chaque région.

En effet, c'est au niveau des régions économiques du Centre, du Nord Ouest, et du Centre Sud que des quantités importantes sont commercialisées.

— Les achats par les coopératives ne cessent de diminuer (voir figure 2). A titre d'exemple, la coopérative de la Chaouia qui commercialisait 23,49 % des achats de la région du centre en 1986 n'a réalisé que 8 % en 1988 et seulement 1,14 % en 1989.

— Pour les S.A. et les entreprises type individuelles, leurs achats sont en nette progression durant les campagnes considérées. Les entreprises individuelles ont presque triplé leurs achats entre 1985 et 1989, alors que les S.A. monopolisent actuellement presque la moitié des achats totaux (45,55 %).

1— Le rythme de la collecte au cours de l'année :

Le figure 3 montre que le rythme de la collecte durant la campagne 1989/90 diffère selon la nature de la céréale et selon la région économique; elle met en évidence aussi que la plus grande partie de la collecte est faite en juin, juillet et août. Il faut signaler que dans certains centres les offres des céréales aux organismes stockeurs sont faites dans les limites d'une période très courte (dans le Sud par exemple).

Ces offres massives durant les 3 mois, sont dictées par un besoin en trésorerie pour certains producteurs, et par un manque des moyens de stockage adéquats pour d'autres. Cet état semble contribuer largement à la baisse des niveaux des prix, et aux difficultés qu'éprouvent la plupart des centres pour recevoir et entreposer les céréales collectées dans un laps de temps court.

Les éléments statistiques consignés dans le tableau 3 permettent de tirer les constats ci-après :

— Les proportions des céréales réceptionnées à fin août s'établissent comme suit :

82,6 % pour le blé tendre.

36 % pour les autres céréales.

39,7 % pour les légumineuses.

— Les réceptions du blé tendre sont beaucoup plus rapides et concentrées dans le temps que celles des autres céréales. Ceci reflète en fait l'importance relative des exploitations modernes, très dominantes dans le cas du blé tendre qui produisent en vue de la vente et écoulent ainsi leurs récoltes aussitôt après la moisson.

— Les achats ont lieu durant toute l'année, ceci s'explique par le fait qu'en culture traditionnelle (cas du blé dur), les céréales font fonction de trésorerie et sont maintenues en stock au niveau de l'exploitation. Leur écoulement se fait à petites quantités échelonnées sur toute la campagne au fur et à mesure des besoins monétaires du producteur.

2— LES FOURNISSEURS DES CEREALES ET DES LEGUMINEUSES :

Les proportions des céréales et des légumineuses livrées aux organismes stockeurs sont données dans le tableau 4.

L'examen des données de ce tableau fait apparaître les principales constatations suivantes :

— Globalement 48,60 % des livraisons sont faites par les producteurs eux-mêmes et 51,40 % par les intermédiaires. On assiste donc à un partage du marché entre les producteurs et les collecteurs.

— Les acquisitions des coopératives auprès des producteurs sont de 57,10 %. Cette part est importante pour les régions du Centre Nord, du Sud, de l'Oriental et de Tensift, respectivement 75 %, 70 %, 65,04 % et 64,32 %.

Quant aux organismes privés, ils s'approvisionnent pour 42,24 % auprès des producteurs et pour 57,76 % auprès des intermédiaires.

— Les livraisons faites par les producteurs sont caractérisées par des variations interrégio-

nales importantes. En effet, si 75,65 % des livraisons de la région Centre Sud sont le fait des producteurs, 31,9 % seulement le sont dans la région orientale. De même 25 %, uniquement des achats de la coopérative du Centre Nord se font auprès des producteurs, alors que 90 % des achats de la coopérative de la région du Centre Sud proviennent des producteurs.

3— L'ÉCOULEMENT DES STOCKS :

En examinant les proportions écoulées vers chaque branche d'utilisation, qui sont consignées dans le tableau 5 et la figure 5, on relève les éléments suivants :

— Dans l'ensemble, c'est le secteur de la transformation (minoteries industrielles), qui draine l'essentiel des marchandises stockées; avec une moyenne de 83,75 % des ventes totales et des extrêmes de 72,29 % et de 95 % selon les régions. Ceci vient du fait que l'essentiel des achats des organismes stockeurs est constitué de blé tendre pour lequel il y a une garantie de reprise par l'ONICL.

— Les commerçants privés livrent 79,53 % de leurs achats au secteur de la transformation, mais il faut signaler la prédominance affirmée des proportions livrées par les entreprises type individuelles; soit 83,90 %.

— Les coopératives livrent 89,41 % de leurs stocks à la transformation. Toutefois, la coopérative située à l'Oriental livre le 1/3 de ses achats (32,17 %) au circuit libre.

— Les entreprises type SARL, livrent uniquement au marché libre et à l'exportation.

Les quantités destinées à l'exportation ne sont significatives que dans les régions limitrophes du port de Casablanca : Centre (11,5 %) et Nord-Ouest (6,07 %) où sont par ailleurs localisées les sociétés agréés et spécialisées en importation et l'exportation.

Globalement, les exportations représentent 5,28 % des écoulements totaux.

4—2— TAUX D'UTILISATION DES CAPACITÉS EXISTANTES

Le taux d'utilisation constitue un bon critère explicatif du dynamisme d'un organisme et de la variation des frais de stockage.

Ce paramètre exprimé par le rapport des achats totaux à la capacité de stockage permanente, permet de rendre compte de l'utilisation effective de la capacité de stockage.

Afin de dégager des conclusions sur le taux

d'utilisation, celui-ci est calculé sur les cinq dernières campagnes (1985/89).

L'évolution du taux d'utilisation selon les différents organismes est consigné dans le tableau ci-après :

	85/86 86/87 87/88 88/89 89/90
Coopératives	97,8 117,2 74,9 87,1 58,7
Commerçants agréés	39,7 66,0 38,5 81,5 67,7
GLOBAL	58,6 85,7 48,1 83,1 65,3

Il ressort, d'après ces chiffres que :

— La capacité de stockage permanente totale n'est jamais exploitée à 100 %. Le taux d'utilisation moyen global est de 72,8 %. Les taux moyens durant les cinq dernières années sont respectivement pour les coopératives et les commerçants agréés de 87,2 % et de 60 %.

Les 2/5 des organismes enquêtés enregistrent des taux d'utilisation très médiocres (moins de 50 %). La distribution selon l'ensemble des organismes est comme suit :

Classe	Nombre
0 à 50 %	51
50 à 100 %	38
100 à 200 %	28
200 %	10

— 30 % des organismes stockeurs font appel au stockage en terres-plein.

— Les taux élevés enregistrés en 1985 et 1986 au niveau des coopératives sont dus essentiellement à la commercialisation massive des orges par ces organismes.

— Les variations du taux d'utilisation d'une année à l'autre sont, en général, en corrélation positive avec la production.

Analysée en fonction des régions et des types d'organisme, comme l'indiquent le tableau 6 et la figure 6, on note que :

— La capacité de stockage semble être mieux utilisée dans les régions de Tensift et de l'Oriental. Cependant, le taux élevé au niveau de l'Oriental signifie plutôt une insuffisance de la capacité qu'une bonne utilisation.

— Les coopératives utilisent mieux leur capacité de stockage que les privés. Les taux les plus élevés sont enregistrés au niveau des coopératives situées dans les régions du Nord-Ouest (169,4 %), et du Centre Sud (168,9 %).

— Les taux d'utilisation sont en corrélation positive avec les productions régionales.

V— Point de vue des professionnels sur le secteur de stockage :

Les professionnels interrogés sur les problèmes qui se posent en matière de stockage s'inquiètent fortement sur l'avenir du secteur où la plupart des entreprises enregistrent des pertes.

Les bénéficiaires enregistrés par certaines entreprises sont trop souvent dûs à des amortissements non comptabilisés ou au non respect de leurs engagements vis-à-vis de leur personnel (salaires, charges sociales et maintien de l'emploi...).

Il faut attribuer cette faible rentabilité aux frais financiers qui grèvent lourdement les charges d'exploitation. En effet, les 2/3 du financement de la collecte sont réalisés par des crédits bancaires.

Les charges fiscales constituent un autre élément qui entrave le secteur. A cet effet, les organismes privés évoquent les avantages préférentiels accordés aux coopératives.

Cette situation préoccupante, à bien des points de vue, a incité les stockeurs privés à associer au stockage des céréales d'autres activités annexes, ce qui gêne l'intensification de la capacité de stockage spécialisée.

D'une façon générale, les recommandations faites par les professionnels peuvent être résumées dans les points suivants :

— Augmentation impérative et substantielle de la prime de stockage et de la marge de rétrocession. Ces primes suivent imparfaitement l'évolution générale des prix et des charges. Pour se faire, les organismes suggèrent de définir un mode pratique de rémunération variable de l'opération de stockage en indexant éventuellement la prime de stockage au prix du blé qui constitue l'essentiel de leurs achats.

— Instaurer et généraliser une politique de crédit type CNCA.

— Garantir une rentabilité optimale des locaux de stockage par une durée raisonnable de stockage.

— Envisager l'octroi des céréales d'importation en stockage pendant les campagnes à faible production.

— Renforcer les critères de sélection à la délivrance des agréments dans le but d'avoir des entreprises mieux gérées et facilement contrôlables, et exiger des normes techniques devant garantir une bonne conservation des céréales stockées.

VI— Capacités actuelles face aux besoins de stockage :

Dans l'état actuel des choses, il est extrêmement difficile de trouver une ligne générale pour apprécier globalement la capacité de stockage du

pays par rapport à ses besoins. En effet, les organismes stockeurs ont des fonctions différentes et une part importante de leurs capacités n'est utilisée que partiellement pour les céréales.

Aussi, allons-nous dans un premier temps déterminer les besoins actuels en moyens de stockage sur la base de paramètres classiques suivants :

- Les besoins humains
- Les besoins animaux
- Les écrasements de la minoterie industrielle

Les besoins humains en blés sont de 47.500.000 QX (cf. étude ONICL sur le déficit céréalier à l'horizon 2000 et 2010; mars 1990).

La demande en céréales pour la consommation animale est de l'ordre de 13.500.000 QX.

Les écrasements de la minoterie industrielle sont de l'ordre de 26.000.000 QX.

Or, le pays doit disposer de moyens de stockage pouvant abriter :

— Un stock de sécurité équivalent à 4 mois de consommation humaine.

— Un stock servant de volet de roulement, de deux mois d'écrasement.

— Un stock de céréales secondaires équivalent à 4 mois de consommation animale.

Compte tenu de ces données le déficit actuel serait de l'ordre de sept millions de quintaux.

Or, on doit remarquer que pratiquement cette manière simpliste de procéder ne reflète pas la réalité. De plus, l'estimation des termes de base, en vue des projections, ne peut reposer que sur des hypothèses difficilement contrôlables. En effet, le développement du stockage est directement lié à l'importance du ratio commercialisation par rapport à la production. Ce ratio est pour le moment très faible et ne semble pas avoir un effet incitateur sur la fonction stockage. Il serait, en conséquence, anormal de proposer des investissements dont la rentabilité est incertaine. Cette crainte est partagée par l'ensemble des professionnels qui préfèrent ainsi éprouver quelques difficultés temporaires de stockage en années de bonnes récoltes que de disposer d'installations importantes mais sous exploitées.

La proportion importante des locaux en location et la diversification des activités pratiquées par les organismes stockeurs en sont les témoins.

Donc, eu égard au volume des céréales locales transitant actuellement par le circuit contrôlé, il ne semble pas nécessaire de développer dans l'immédiat la capacité globale existante.

En effet, le taux de collecte ne représente en moyenne que 15 % de même la capacité actuelle permet de stocker facilement des quantités de céréales équivalentes au maximum commercialisé

durant la dernière décennie soit environ 16 millions de quintaux en 1986/87.

On peut donc dire qu'en l'état actuel des choses, les organismes stockeurs disposent d'une capacité suffisante leur permettant de faire face aux volumes des céréales et des légumineuses qu'ils achètent.

Cependant, si la capacité globale semble être quantitativement suffisante, sa répartition spatiale n'est pas proportionnelle aux flux régionaux des céréales. En effet, la capacité est très sollicitée dans certaines régions (Oriental par exemple), alors qu'elle est sous utilisée dans d'autres (Centre, Nord-Ouest). Cette situation doit inciter les pouvoirs publics à envisager une réflexion approfondie visant à mettre en place une politique de mesures incitatives afin de réaliser non seulement une répartition spatiale rationnelle des capacités existantes, mais améliorer le taux d'utilisation actuel pour éviter le retrait éventuel de certaines sociétés et même encourager d'autres investissements dans le secteur.

Parmi ces mesures, celle que préconisent la plupart des professionnels; consiste en la mise en stock d'une partie des céréales d'importation. Il faut rappeler en effet, que les importations dont le volume moyen annuel est de 17 millions de QX, sont réalisées en fonction des besoins, lesquels sont étalés sur toute l'année. Par ailleurs, le ravitaillement des industriels et principalement les minoteries à blé est opéré directement à partir des ports. L'octroi d'une partie de ces importations aux organismes stockeurs permettra donc de :

- les faire participer au maintien du stock de sécurité.

- améliorer la rentabilité des capacités existantes par l'augmentation de leur taux d'utilisation et la diminution des charges d'exploitation.

- encourager les investissements dans le secteur.

- procéder à des importations groupées dans le temps pour profiter, d'une part, des cours mondiaux et pouvoir utiliser éventuellement des navires de gros tonnage, d'autre part. On peut objecter que cette proposition induira :

- des mouvements inutiles et générateurs de frais : manutention, transport, stockage,...

- des pertes aussi bien quantitatives que qualitatives suite aux insuffisances technique de certains centres de stockage.

- des craintes de créer des ruptures d'approvisionnement par l'insuffisance des moyens techniques généraux vue les quantités de céréales à recevoir.

Ces deux options donnent matière à la réflexion et une étude de choix de l'une ou l'autre de ces alternatives semble opportune.

Compte tenu du taux d'utilisation actuel, de 72,8 %, la part des importations qui pourrait transiter par les organismes stockeurs est de 4 millions de QX soit l'équivalent de la capacité permanente non utilisée. Cette part représente le quart de nos importations.

VII— Perspectives

En perspectives, le volume des céréales qui sera commercialisé dans le circuit orienté vers l'industrie, jugé actuellement insuffisant, aura tendance à augmenter raison :

- du développement prévu de la production céréalière et plus particulièrement l'intensification du blé tendre.

- de l'augmentation de la démographie, essentiellement urbaine.

- de l'amélioration du niveau de vie qui entraînera une évolution des habitudes alimentaires.

- de l'occupation professionnelle des femmes

- et de la déréglementation du commerce intérieur des céréales.

1— Besoins en capacité de stockage pour 1995 et à l'horizon 2010

Compte tenu du caractère transitoire qui caractérise le marché national des céréales, on peut admettre qu'à court terme le volume des céréales qui transite par le marché contrôlé ne connaîtra pas de changement très significatif.

Par ailleurs, l'enquête a révélé que les organismes stockeurs en activité projettent de réaliser d'ici 1995 une capacité additionnelle de l'ordre de 4 millions de QX (voir tableau 7 pour les détails).

En conséquence si certaines mesures viennent d'être concrétisées, notamment le relèvement de la prime de magasinage et de la marge de rétrocession, et si les capacités prévues par les organismes enquêtés sont réalisées, notre pays ne connaîtra pas de difficultés quantitatives en matière d'installations de stockage au terme de 1995.

A l'horizon 2010, l'étude réalisée en mars 1990 par l'ONICL sur l'évaluation du déficit céréalier a abouti aux résultats ci-après :

Production de blé tendre : 38,1 millions de QX

Production de blé dur : 20,9 millions de QX

Production maïs et triticales : 4,6 millions de QX

Importations blé tendre : 18.0 millions de QX.

En admettant des changements dans les habitudes alimentaires de la population en faveur des farines industrielles et des produits d'origine animale le taux de collecte de chacune des céréales principales sera de :

80 % pour le blé tendre, soit 22,9 millions de QX.

60 % pour le maïs et le teriticale, soit 8,8 millions de QX

10 % pour le blé dur, soit 2,1 millions de QX.

En outre, on estime qu'au moins 30 % des importations seront mises en stock avant utilisation, soit 6 millions de QX.

Alors, la capacité de stockage minimale dont il faudra disposer au niveau des organismes stockeurs à l'horizon 2010, devrait être de l'ordre de 40 millions de QX.

CONCLUSION

Notre patrimoine de stockage moderne se caractérise par sa capacité relativement suffisante du point de vue quantitatif. Le secteur des organismes agréés connaît deux phénomènes contradictoires à savoir le retrait de certaines sociétés, compensé fort heureusement par la création d'autres entreprises.

Ces deux phénomènes ont eu pour résultat une stagnation de notre capacité permanente au cours des dix dernières années. Bien qu'en décroissant, le rôle des coopératives de commercialisation reste essentiel dans ce secteur.

L'activité des commerces agréés, s'affirme d'avantage malgré la prudence dont ils font preuve à cause du caractère incertain du secteur.

Bibliographie

ONICL : Fiche portant sur le problème du stockage des céréales août 1982.

Anonyme Economie céréalière Marocaine 1983.

ONICL le stockage des céréales au Maroc avril 1988.

MARA-DVRA- Restructuration du secteur coopératif de commercialisation des céréales — septembre 1989.

LISTE DES ABREVIATIONS

QX : quintaux : 1 quintal = 1/10 tonne.

ONICL : Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses.

SCAM : Société Coopérative Agricole Marocaine

CMA : Coopérative Marocaine Agricole.

S.A : Société Anonyme.

SARL : Société à Responsabilité Limitée.

CNCA : Caisse Nationale du Crédit Agricole.

SAS : Système d'Analyse Statistiques.

C.A : Commerçants Agréés.

Cette capacité correspond à la réalisation, en moyenne, d'un projet de 1 million de QX an d'ici l'an 2010.

Or, la libéralisation du marché céréalier exclut tout investissement public dans le secteur du stockage. La promotion de ce type d'investissement, pour qu'il soit entrepris par le secteur privé, exige une politique de rigueur et d'incitation pour répondre au souci légitime de rentabilité émis par les commerçants agréés.

La répartition régionale est loin d'être rationnelle. Le Sud et l'Orient sont les plus démunies en moyens de stockage.

Les perspectives à long terme incitent à l'inquiétude. Aussi bien les pouvoirs publics que les professionnels sont appelés à prendre conscience de cette situation et à oeuvrer pour un plan d'action en intégrant la fonction stockage dans le programme céréalier général. Les efforts devront se faire dans le sens d'un soutien du secteur pour le renforcement et l'amélioration des capacités existantes mais aussi pour l'atténuation des disparités régionales. La réalisation d'une capacité additionnelle d'au moins un million de QX par an semble être nécessaire d'ici à l'horizon 2010.

ONICL- rôle et domaine d'intervention — novembre 1989.

ONICL- Evaluation du déficit céréalier : situation actuelle et perspectives aux horizons 2000 et 2010 — mars 1990.

ONICL- Financement de la campagne de commercialisation 1989/90 — mars 1990.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Capacité de stockage disponible au niveau national

Tableau 2 : Evolution des proportions commercialisées

Tableau 3 : Rythme des réceptions au cours de la campagne 1989/1990

Tableau 4 : Proportions des livraisons aux organismes stockeurs

Tableau 5 : Proportions des livraisons aux utilisateurs

Tableau 6 : Taux d'utilisation de la capacité de stockage permanente

Tableau 7 : Capacité de stockage prévue par les organismes stockeurs.

Tableau n° 1

CAPACITES DE STOCKAGE DISPONIBLES AU NIVEAU
NATIONAL AU MOIS DE JUIN 1990
par région économique
par type d'organisme

Unité:QL

Région économique	Type d'organisme	COUVERTE		SRMI COUVERTE		SOUS BACHES		TOTAL	
		QX	%	QX	%	QX	%	QX	%
SUD	Coopératives	250.000	2,00	0	0,00	80.000	1,10	330.000	1,50
	Commerçants agréés	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	Total	250.000	2,00	0	0,00	80.000	1,10	330.000	1,50
TENSIFT	Coopératives	410.500	3,30	1.000	0,10	291.000	4,10	702.500	3,20
	Commerçants agréés	886.000	7,20	15.000	0,60	185.050	2,60	1.086.050	4,90
	Total	1.296.500	10,40	16.000	0,70	467.000	6,70	1.779.500	8,10
CENTRE	Coopératives	1.286.500	5,40	0	0,00	1.587.000	22,10	2.873.500	10,80
	Commerçants agréés	4.264.000	31,30	468.000	20,20	1.419.000	19,70	6.151.000	28,00
	Total	5.550.500	36,70	468.000	20,20	3.006.000	41,80	9.024.500	38,80
NORD OUEST	Coopératives	480.700	3,10	65.000	2,70	455.000	6,30	1.000.700	4,10
	Commerçants agréés	1.942.000	15,60	175.000	7,30	836.000	11,70	2.953.000	13,40
	Total	2.422.700	18,70	240.000	10,10	1.291.000	18,00	3.953.900	17,40
CENTRE NORD	Coopératives	785.000	6,30	100.000	4,20	615.000	8,60	1.500.000	6,80
	Commerçants agréés	843.000	6,80	822.000	34,50	414.000	5,80	2.079.000	9,50
	Total	1.628.000	13,10	922.000	30,70	1.029.000	14,40	3.579.000	16,30
ORIENTAL	Coopératives	270.000	3,30	50.000	2,10	138.000	1,90	458.000	2,70
	Commerçants agréés	81.500	0,70	25.000	1,10	5.000	0,10	111.500	0,50
	Total	351.500	3,90	75.000	3,20	143.000	2,00	569.500	3,20
CENTRE SUD	Coopératives	429.000	3,50	0	0,00	471.000	6,60	900.000	4,10
	Commerçants agréés	1.070.000	8,60	550.000	23,10	676.000	9,40	2.296.000	10,50
	Total	1.499.000	12,10	550.000	23,10	1.147.000	16,00	3.196.000	14,60
TOTAL GLOBAL		12.998.200	100	2.271.000	100	6.799.750	100	22.068.950	100

Tableau n° 2

EVOLUTION DES PROPORTIONS COMMERCIALISEES

POUR LA PERIODE 1985/89

- par région économique

- par type d'organisme

(EN %)

Région économique	Type d'organisme	Campagne 185/86	Campagne 186/87	Campagne 187/88	Campagne 188/89	Campagne 189/90	Moyenne Quinquennale
SUD	Coopératives	2,07	2,40	0,14	1,66	1,05	
	Commerçants agréés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Total	2,07	2,40	0,14	1,66	1,05	2,04
TENSIFT	Coopératives	9,04	5,64	1,85	3,20	4,57	
	Commerçants agréés	10,11	4,85	2,65	5,02	8,28	
	Total	19,15	10,49	4,50	8,22	12,85	12,22
CENTRE	Coopératives	23,49	9,47	12,04	8,00	1,14	
	Commerçants agréés	22,10	25,35	29,10	39,24	32,15	
	Total	45,59	34,84	41,14	47,24	33,29	34,66
NORD OUEST	Coopératives	3,96	9,87	10,77	8,17	9,07	
	Commerçants agréés	6,08	5,23	10,60	6,83	8,85	
	Total	10,04	15,10	21,37	15,00	17,92	16,09
CENTRE NORD	Coopératives	7,69	12,47	6,46	2,72	0,01	
	Commerçants agréés	1,84	3,55	4,59	8,11	13,99	
	Total	9,53	16,02	11,05	10,83	14,00	14,48
ORIENTAL	Coopératives	5,80	6,23	3,28	1,11	0,76	
	Commerçants agréés	0,76	0,83	0,94	0,37	0,67	
	Total	6,56	7,06	4,22	1,49	1,44	4,79
CENTRE SUD	Coopératives	4,33	9,31	6,68	6,03	7,71	
	Commerçants agréés	2,72	4,77	10,90	9,53	11,74	
	Total	7,06	14,09	17,58	15,56	19,45	15,72
TOTAL GLOBAL	Coopératives	56,38	55,39	41,22	30,89	24,31	
	Commerçants agréés	43,61	44,58	58,78	69,10	75,68	
	Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

MOIS	BLE TENDRE	AUTRES CEREALES	LEGUMINEUSES	TOTAL
Janvier	136.684	141.836	57.905	336.425
Février	58.022	96.354	66.325	220.701
Mars	56.052	67.694	59.201	182.947
Avril	40.298	46.294	24.920	111.512
Mai	273.290	52.833	390.606	716.729
Juin	3.495.591	109.225	300.882	3.905.698
Juillet	2.572.513	160.231	188.892	2.921.636
Août	1.345.993	422.032	149.201	1.917.226
Septembre	459.842	313.261	886.118	
Octobre	250.885	195.252	108.627	554.764
Novembre	182.976	186.309	65.926	435.211
Décembre	99.085	130.818	85.460	315.363
TOTAL	8.971.231	1.921.893	1.611.206	12.504.330

Région économique	Type d'organisme	Proportions producteurs	livrées par les collecteurs et autres
SUD	Coopératives	30.00	70.00
	Commerçants agréés	0.00	0.00
	Moyenne	39.67	57.37
TENSIFT	Coopératives	81.70	18.30
	Commerçants agréés	26.56	73.44
	Moyenne	36.32	63.68
NORD OUEST	Coopératives	66.33	33.67
	Commerçants agréés	41.22	59.85
	Moyenne	55.36	44.64
CENTRE NORD	Coopératives	75.00	25.00
	Commerçants agréés	77.34	22.34
	Moyenne	50.61	49.39
ORIENTAL	Coopératives	34.96	65.04
	Commerçants agréés	14.66	85.34
	Moyenne	31.89	68.11
CENTRE SUD	Coopératives	90.00	10.00
	Commerçants agréés	54.25	45.75
	Moyenne	75.65	27.35
MOYENNE	Coopératives	57.11	42.89
	Commerçants agréés	42.24	57.88
	Moyenne	48.59	51.48

Ce tableau fait ressortir que la décennie des années 60 est caractérisée par une certaine stagnation de la capacité permanente de stockage, mais notre patrimoine a connu un rajeunissement significatif au cours de la dernière décennie. En effet, environ la moitié des installations existantes ont moins de dix ans. Toutefois, les installations dépassant trente ans sont encore importantes (30 %). En outre, plus que la moitié de la capacité offerte par les silos date de plus de 30 ans.

4— COMMERCIALISATION, TAUX D'UTILISATION DES CAPACITES EXISTANTES

4—1— COMMERCIALISATION :

L'analyse des achats des céréales et des légumineuses, par les organismes stockeurs donne lieu aux observations suivantes (tableau 2) :

Une variabilité régionale importante des proportions commercialisées.

— L'existence d'une corrélation positive entre le volume commercialisé et l'importance des récoltes. Cependant, le caractère fluctuant de la production n'est pas de nature à modifier fondamentalement les proportions relatives commercialisées au niveau de chaque région.

En effet, c'est au niveau des régions économiques du Centre, du Nord Ouest, et du Centre Sud que des quantités importantes sont commercialisées.

— Les achats par les coopératives ne cessent de diminuer (voir figure 2). A titre d'exemple, la coopérative de la Chaouia qui commercialisait 23,49 % des achats de la région du centre en 1986 n'a réalisé que 8 % en 1988 et seulement 1,14 % en 1989.

— Pour les S.A. et les entreprises type individuelles, leurs achats sont en nette progression durant les campagnes considérées. Les entreprises individuelles ont presque triplé leurs achats entre 1985 et 1989, alors que les S.A. monopolisent actuellement presque la moitié des achats totaux (45,55 %).

1— Le rythme de la collecte au cours de l'année :

Le figure 3 montre que le rythme de la collecte durant la campagne 1989/90 diffère selon la nature de la céréale et selon la région économique; elle met en évidence aussi que la plus grande partie de la collecte est faite en juin, juillet et août. Il faut signaler que dans certains centres les offres des céréales aux organismes stockeurs sont faites dans les limites d'une période très courte (dans le Sud par exemple).

Ces offres massives durant les 3 mois, sont dictées par un besoin en trésorerie pour certains producteurs, et par un manque des moyens de stockage adéquats pour d'autres. Cet état semble contribuer largement à la baisse des niveaux des prix, et aux difficultés qu'éprouvent la plupart des centres pour recevoir et entreposer les céréales collectées dans un laps de temps court.

Les éléments statistiques consignés dans le tableau 3 permettent de tirer les constats ci-après :

— Les proportions des céréales réceptionnées à fin août s'établissent comme suit :

82,6 % pour le blé tendre.

36 % pour les autres céréales.

39,7 % pour les légumineuses.

— Les réceptions du blé tendre sont beaucoup plus rapides et concentrées dans le temps que celles des autres céréales. Ceci reflète en fait l'importance relative des exploitations modernes, très dominantes dans le cas du blé tendre qui produisent en vue de la vente et écoulent ainsi leurs récoltes aussitôt après la moisson.

— Les achats ont lieu durant toute l'année, ceci s'explique par le fait qu'en culture traditionnelle (cas du blé dur), les céréales font fonction de trésorerie et sont maintenues en stock au niveau de l'exploitation. Leur écoulement se fait à petites quantités échelonnées sur toute la campagne au fur et à mesure des besoins monétaires du producteur.

2— LES FOURNISSEURS DES CEREALES ET DES LEGUMINEUSES :

Les proportions des céréales et des légumineuses livrées aux organismes stockeurs sont données dans le tableau 4.

L'examen des données de ce tableau fait apparaître les principales constatations suivantes :

— Globalement 48,60 % des livraisons sont faites par les producteurs eux-mêmes et 51,40 % par les intermédiaires. On assiste donc à un partage du marché entre les producteurs et les collecteurs.

— Les acquisitions des coopératives auprès des producteurs sont de 57,10 %. Cette part est importante pour les régions du Centre Nord, du Sud, de l'Oriental et de Tensift, respectivement 75 %, 70 %, 65,04 % et 64,32 %.

Quant aux organismes privés, ils s'approvisionnent pour 42,24 % auprès des producteurs et pour 57,76 % auprès des intermédiaires.

— Les livraisons faites par les producteurs sont caractérisées par des variations interrégio-

nales importantes. En effet, si 75,65 % des livraisons de la région Centre Sud sont le fait des producteurs, 31,9 % seulement le sont dans la région orientale. De même 25 %, uniquement des achats de la coopérative du Centre Nord se font auprès des producteurs, alors que 90 % des achats de la coopérative de la région du Centre Sud proviennent des producteurs.

3— L'ÉCOULEMENT DES STOCKS :

En examinant les proportions écoulées vers chaque branche d'utilisation, qui sont consignées dans le tableau 5 et la figure 5, on relève les éléments suivants :

— Dans l'ensemble, c'est le secteur de la transformation (minoteries industrielles), qui draine l'essentiel des marchandises stockées; avec une moyenne de 83,75 % des ventes totales et des extrêmes de 72,29 % et de 95 % selon les régions. Ceci vient du fait que l'essentiel des achats des organismes stockeurs est constitué de blé tendre pour lequel il y a une garantie de reprise par l'ONICL.

— Les commerçants privés livrent 79,53 % de leurs achats au secteur de la transformation, mais il faut signaler la prédominance affirmée des proportions livrées par les entreprises type individuelles; soit 83,90 %.

— Les coopératives livrent 89,41 % de leurs stocks à la transformation. Toutefois, la coopérative située à l'Oriental livre le 1/3 de ses achats (32,17 %) au circuit libre.

— Les entreprises type SARL, livrent uniquement au marché libre et à l'exportation.

Les quantités destinées à l'exportation ne sont significatives que dans les régions limitrophes du port de Casablanca : Centre (11,5 %) et Nord-Ouest (6,07 %) où sont par ailleurs localisées les sociétés agréées et spécialisées en importation et l'exportation.

Globalement, les exportations représentent 5,28 % des écoulements totaux.

4—2— TAUX D'UTILISATION DES CAPACITÉS EXISTANTES

Le taux d'utilisation constitue un bon critère explicatif du dynamisme d'un organisme et de la variation des frais de stockage.

Ce paramètre exprimé par le rapport des achats totaux à la capacité de stockage permanente, permet de rendre compte de l'utilisation effective de la capacité de stockage.

Afin de dégager des conclusions sur le taux

d'utilisation, celui-ci est calculé sur les cinq dernières campagnes (1985/89).

L'évolution du taux d'utilisation selon les différents organismes est consigné dans le tableau ci-après :

	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90
Coopératives	97,8	117,2	74,9	87,1	58,7
Commerçants agréés	39,7	66,0	38,5	81,5	67,7
GLOBAL	58,6	85,7	48,1	83,1	65,3

Il ressort, d'après ces chiffres que :

— La capacité de stockage permanente totale n'est jamais exploitée à 100 %. Le taux d'utilisation moyen global est de 72,8 %. Les taux moyens durant les cinq dernières années sont respectivement pour les coopératives et les commerçants agréés de 87,2 % et de 60 %.

Les 2/5 des organismes enquêtés enregistrent des taux d'utilisation très médiocres (moins de 50 %). La distribution selon l'ensemble des organismes est comme suit :

Classe	Nombre
0 à 50 %	51
50 à 100 %	38
100 à 200 %	28
200 %	10

— 30 % des organismes stockeurs font appel au stockage en terres-plein.

— Les taux élevés enregistrés en 1985 et 1986 au niveau des coopératives sont dus essentiellement à la commercialisation massive des orges par ces organismes.

— Les variations du taux d'utilisation d'une année à l'autre sont, en général, en corrélation positive avec la production.

Analysée en fonction des régions et des types d'organisme, comme l'indiquent le tableau 6 et la figure 6, on note que :

— La capacité de stockage semble être mieux utilisée dans les régions de Tensift et de l'Oriental. Cependant, le taux élevé au niveau de l'Oriental signifie plutôt une insuffisance de la capacité qu'une bonne utilisation.

— Les coopératives utilisent mieux leur capacité de stockage que les privés. Les taux les plus élevés sont enregistrés au niveau des coopératives situées dans les régions du Nord-Ouest (169,4 %), et du Centre Sud (168,9 %).

— Les taux d'utilisation sont en corrélation positive avec les productions régionales.

V— Point de vue des professionnels sur le secteur de stockage :

Les professionnels interrogés sur les problèmes qui se posent en matière de stockage s'inquiètent fortement sur l'avenir du secteur où la plupart des entreprises enregistrent des pertes.

Les bénéficiaires enregistrés par certaines entreprises sont trop souvent dûs à des amortissements non comptabilisés ou au non respect de leurs engagements vis-à-vis de leur personnel (salaires, charges sociales et maintien de l'emploi...).

Il faut attribuer cette faible rentabilité aux frais financiers qui grèvent lourdement les charges d'exploitation. En effet, les 2/3 du financement de la collecte sont réalisés par des crédits bancaires.

Les charges fiscales constituent un autre élément qui entrave le secteur. A cet effet, les organismes privés évoquent les avantages préférentiels accordés aux coopératives.

Cette situation préoccupante, à bien des points de vue, a incité les stockeurs privés à associer au stockage des céréales d'autres activités annexes, ce qui gêne l'intensification de la capacité de stockage spécialisée.

D'une façon générale, les recommandations faites par les professionnels peuvent être résumées dans les points suivants :

— Augmentation impérative et substantielle de la prime de stockage et de la marge de rétrocession. Ces primes suivent imparfaitement l'évolution générale des prix et des charges. Pour se faire, les organismes suggèrent de définir un mode pratique de rémunération variable de l'opération de stockage en indexant éventuellement la prime de stockage au prix du blé qui constitue l'essentiel de leurs achats.

— Instaurer et généraliser une politique de crédit type CNCA.

— Garantir une rentabilité optimale des locaux de stockage par une durée raisonnable de stockage.

— Envisager l'octroi des céréales d'importation en stockage pendant les campagnes à faible production.

— Renforcer les critères de sélection à la délivrance des agréments dans le but d'avoir des entreprises mieux gérées et facilement contrôlables, et exiger des normes techniques devant garantir une bonne conservation des céréales stockées.

VI— Capacités actuelles face aux besoins de stockage :

Dans l'état actuel des choses, il est extrêmement difficile de trouver une ligne générale pour apprécier globalement la capacité de stockage du

pays par rapport à ses besoins. En effet, les organismes stockeurs ont des fonctions différentes et une part importante de leurs capacités n'est utilisée que partiellement pour les céréales.

Aussi, allons-nous dans un premier temps déterminer les besoins actuels en moyens de stockage sur la base de paramètres classiques suivants :

- Les besoins humains
- Les besoins animaux
- Les écrasements de la minoterie industrielle

Les besoins humains en blés sont de 47.500.000 QX (cf. étude ONICL sur le déficit céréalier à l'horizon 2000 et 2010; mars 1990).

La demande en céréales pour la consommation animale est de l'ordre de 13.500.000 QX.

Les écrasements de la minoterie industrielle sont de l'ordre de 26.000.000 QX.

Or, le pays doit disposer de moyens de stockage pouvant abriter :

— Un stock de sécurité équivalent à 4 mois de consommation humaine.

— Un stock servant de volet de roulement, de deux mois d'écrasement.

— Un stock de céréales secondaires équivalent à 4 mois de consommation animale.

Compte tenu de ces données le déficit actuel serait de l'ordre de sept millions de quintaux.

Or, on doit remarquer que pratiquement cette manière simpliste de procéder ne reflète pas la réalité. De plus, l'estimation des termes de base, en vue des projections, ne peut reposer que sur des hypothèses difficilement contrôlables. En effet, le développement du stockage est directement lié à l'importance du ratio commercialisation par rapport à la production. Ce ratio est pour le moment très faible et ne semble pas avoir un effet incitateur sur la fonction stockage. Il serait, en conséquence, anormal de proposer des investissements dont la rentabilité est incertaine. Cette crainte est partagée par l'ensemble des professionnels qui préfèrent ainsi éprouver quelques difficultés temporaires de stockage en années de bonnes récoltes que de disposer d'installations importantes mais sous exploitées.

La proportion importante des locaux en location et la diversification des activités pratiquées par les organismes stockeurs en sont les témoins.

Donc, eu égard au volume des céréales locales transitant actuellement par le circuit contrôlé, il ne semble pas nécessaire de développer dans l'immédiat la capacité globale existante.

En effet, le taux de collecte ne représente en moyenne que 15 % de même la capacité actuelle permet de stocker facilement des quantités de céréales équivalentes au maximum commercialisé

durant la dernière décennie soit environ 16 millions de quintaux en 1986/87.

On peut donc dire qu'en l'état actuel des choses, les organismes stockeurs disposent d'une capacité suffisante leur permettant de faire face aux volumes des céréales et des légumineuses qu'ils achètent.

Cependant, si la capacité globale semble être quantitativement suffisante, sa répartition spatiale n'est pas proportionnelle aux flux régionaux des céréales. En effet, la capacité est très sollicitée dans certaines régions (Oriental par exemple), alors qu'elle est sous utilisée dans d'autres (Centre, Nord-Ouest). Cette situation doit inciter les pouvoirs publics à envisager une réflexion approfondie visant à mettre en place une politique de mesures incitatives afin de réaliser non seulement une répartition spatiale rationnelle des capacités existantes, mais améliorer le taux d'utilisation actuel pour éviter le retrait éventuel de certaines sociétés et même encourager d'autres investissements dans le secteur.

Parmi ces mesures, celle que préconisent la plupart des professionnels; consiste en la mise en stock d'une partie des céréales d'importation. Il faut rappeler en effet, que les importations dont le volume moyen annuel est de 17 millions de QX, sont réalisées en fonction des besoins, lesquels sont étalés sur toute l'année. Par ailleurs, le ravitaillement des industriels et principalement les minoteries à blé est opéré directement à partir des ports. L'octroi d'une partie de ces importations aux organismes stockeurs permettra donc de :

- les faire participer au maintien du stock de sécurité.

- améliorer la rentabilité des capacités existantes par l'augmentation de leur taux d'utilisation et la diminution des charges d'exploitation.

- encourager les investissements dans le secteur.

- procéder à des importations groupées dans le temps pour profiter, d'une part, des cours mondiaux et pouvoir utiliser éventuellement des navires de gros tonnage, d'autre part. On peut objecter que cette proposition induira :

- des mouvements inutiles et générateurs de frais : manutention, transport, stockage,...

- des pertes aussi bien quantitatives que qualitatives suite aux insuffisances techniques de certains centres de stockage.

- des craintes de créer des ruptures d'approvisionnement par l'insuffisance des moyens techniques généraux vue les quantités de céréales à recevoir.

Ces deux options donnent matière à la réflexion et une étude de choix de l'une ou l'autre de ces alternatives semble opportune.

Compte tenu du taux d'utilisation actuel, de 72,8 %, la part des importations qui pourrait transiter par les organismes stockeurs est de 4 millions de QX soit l'équivalent de la capacité permanente non utilisée. Cette part représente le quart de nos importations.

VII— Perspectives

En perspectives, le volume des céréales qui sera commercialisé dans le circuit orienté vers l'industrie, jugé actuellement insuffisant, aura tendance à augmenter raison :

- du développement prévu de la production céréalière et plus particulièrement l'intensification du blé tendre.

- de l'augmentation de la démographie, essentiellement urbaine.

- de l'amélioration du niveau de vie qui entraînera une évolution des habitudes alimentaires.

- de l'occupation professionnelle des femmes

- et de la déréglementation du commerce intérieur des céréales.

1— Besoins en capacité de stockage pour 1995 et à l'horizon 2010

Compte tenu du caractère transitoire qui caractérise le marché national des céréales, on peut admettre qu'à court terme le volume des céréales qui transite par le marché contrôlé ne connaîtra pas de changement très significatif.

Par ailleurs, l'enquête a révélé que les organismes stockeurs en activité projettent de réaliser d'ici 1995 une capacité additionnelle de l'ordre de 4 millions de QX (voir tableau 7 pour les détails).

En conséquence si certaines mesures viennent d'être concrétisées, notamment le relèvement de la prime de magasinage et de la marge de rétrocession, et si les capacités prévues par les organismes enquêtés sont réalisées, notre pays ne connaîtra pas de difficultés quantitatives en matière d'installations de stockage au terme de 1995.

A l'horizon 2010, l'étude réalisée en mars 1990 par l'ONICL sur l'évaluation du déficit céréalière a abouti aux résultats ci-après :

Production de blé tendre : 38,1 millions de QX

Production de blé dur : 20,9 millions de QX

Production maïs et triticales : 4,6 millions de QX

Importations blé tendre : 18.0 millions de QX.

En admettant des changements dans les habitudes alimentaires de la population en faveur des farines industrielles et des produits d'origine animale le taux de collecte de chacune des céréales principales sera de :

80 % pour le blé tendre, soit 22,9 millions de QX.

60 % pour le maïs et le teriticale, soit 8,8 millions de QX

10 % pour le blé dur, soit 2,1 millions de QX.

En outre, on estime qu'au moins 30 % des importations seront mises en stock avant utilisation, soit 6 millions de QX.

Alors, la capacité de stockage minimale dont il faudra disposer au niveau des organismes stockeurs à l'horizon 2010, devrait être de l'ordre de 40 millions de QX.

CONCLUSION

Notre patrimoine de stockage moderne se caractérise par sa capacité relativement suffisante du point de vue quantitatif. Le secteur des organismes agréés connaît deux phénomènes contradictoires à savoir le retrait de certaines sociétés, compensé fort heureusement par la création d'autres entreprises.

Ces deux phénomènes ont eu pour résultat une stagnation de notre capacité permanente au cours des dix dernières années. Bien qu'en décroissant, le rôle des coopératives de commercialisation reste essentiel dans ce secteur.

L'activité des commerces agréés, s'affirme d'avantage malgré la prudence dont ils font preuve à cause du caractère incertain du secteur.

Bibliographie

ONICL : Fiche portant sur le problème du stockage des céréales août 1982.

Anonyme Economie céréalière Marocaine 1983.

ONICL le stockage des céréales au Maroc avril 1988.

MARA-DVRA- Restructuration du secteur coopératif de commercialisation des céréales — septembre 1989.

Cette capacité correspond à la réalisation, en moyenne, d'un projet de 1 million de QX an d'ici l'an 2010.

Or, la libéralisation du marché céréalier exclut tout investissement public dans le secteur du stockage. La promotion de ce type d'investissement, pour qu'il soit entrepris par le secteur privé, exige une politique de rigueur et d'incitation pour répondre au souci légitime de rentabilité émis par les commerçants agréés.

La répartition régionale est loin d'être rationnelle. Le Sud et l'Oriental sont les plus démunies en moyens de stockage.

Les perspectives à long terme incitent à l'inquiétude. Aussi bien les pouvoirs publics que les professionnels sont appelés à prendre conscience de cette situation et à oeuvrer pour un plan d'action en intégrant la fonction stockage dans le programme céréalier général. Les efforts devront se faire dans le sens d'un soutien du secteur pour le renforcement et l'amélioration des capacités existantes mais aussi pour l'atténuation des disparités régionales. La réalisation d'une capacité additionnelle d'au moins un million de QX par an semble être nécessaire d'ici à l'horizon 2010.

ONICL- rôle et domaine d'intervention — novembre 1989.

ONICL- Evaluation du déficit céréalier : situation actuelle et perspectives aux horizons 2000 et 2010 — mars 1990.

ONICL- Financement de la campagne de commercialisation 1989/90 — mars 1990.

LISTE DES ABREVIATIONS

QX : quintaux : 1 quintal = 1/10 tonne.

ONICL : Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses.

SCAM : Société Coopérative Agricole Marocaine

CMA : Coopérative Marocaine Agricole.

S.A : Société Anonyme.

SARL : Société à Responsabilité Limitée.

CNCA : Caisse Nationale du Crédit Agricole.

SAS : Système d'Analyse Statistiques.

C.A : Commerçants Agréés.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Capacité de stockage disponible au niveau national

Tableau 2 : Evolution des proportions commercialisées

Tableau 3 : Rythme des réceptions au cours de la campagne 1989/1990

Tableau 4 : Proportions des livraisons aux organismes stockeurs

Tableau 5 : Proportions des livraisons aux utilisateurs

Tableau 6 : Taux d'utilisation de la capacité de stockage permanente

Tableau 7 : Capacité de stockage prévue par les organismes stockeurs.

Tableau n° 1

CAPACITES DE STOCKAGE DISPONIBLES AU NIVEAU
NATIONAL AU MOIS DE JUIN 1990
par région économique
par type d'organisme

Unité:QL

Région économique	Type d'organisme	COUVERTE		SEMI COUVERTE		SOUS BACHES		TOTAL	
		QX	%	QX	%	QX	%	QX	%

SUD	Coopératives	250.000	2,00	0	0,00	80.000	1,10	330.000	1,50
	Commerçants agréés	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	Total	250.000	2,00	0	0,00	80.000	1,10	330.000	1,50

TENSIFT	Coopératives	410.500	3,30	1.000	0,10	291.000	4,10	702.500	3,20
	Commerçants agréés	886.000	7,20	15.000	0,60	185.050	2,60	1.086.050	4,90
	Total	1.296.500	10,40	16.000	0,70	467.000	6,70	1.779.500	8,10

CENTRE	Coopératives	1.286.500	5,40	0	0,00	1.587.000	22,10	2.873.500	10,80
	Commerçants agréés	4.264.000	31,30	468.000	20,20	1.419.000	19,70	6.151.000	28,00
	Total	5.550.500	36,70	468.000	20,20	3.006.000	41,80	9.024.500	38,80

NORD OUEST	Coopératives	480.700	3,10	65.000	2,70	455.000	6,30	1.000.700	4,10
	Commerçants agréés	1.942.000	15,60	175.000	7,30	836.000	11,70	2.953.000	13,40
	Total	2.422.700	18,70	240.000	10,10	1.291.000	18,00	3.953.900	17,40

CENTRE NORD	Coopératives	785.000	6,30	100.000	4,20	615.000	8,60	1.500.000	6,80
	Commerçants agréés	843.000	6,80	822.000	34,50	414.000	5,80	2.079.000	9,50
	Total	1.628.000	13,10	922.000	38,70	1.029.000	14,40	3.579.000	16,30

ORIENTAL	Coopératives	270.000	3,30	50.000	2,10	138.000	1,90	458.000	2,70
	Commerçants agréés	81.500	0,70	25.000	1,10	5.000	0,10	111.500	0,50
	Total	351.500	3,90	75.000	3,20	143.000	2,00	569.500	3,20

CENTRE SUD	Coopératives	429.000	3,50	0	0,00	471.000	6,60	900.000	4,10
	Commerçants agréés	1.070.000	8,60	550.000	23,10	676.000	9,40	2.296.000	10,50
	Total	1.499.000	12,10	550.000	23,10	1.147.000	16,00	3.196.000	14,60

TOTAL GLOBAL		12.998.200	100	2.271.000	100	6.799.750	100	22.068.950	100

Tableau n° 2

EVOLUTION DES PROPORTIONS COMMERCIALISEES

POUR LA PERIODE 1985/89

- par région économique

- par type d'organisme

(EN %)

Région économique	Type d'organisme	Campagne 1985/86	Campagne 1986/87	Campagne 1987/88	Campagne 1988/89	Campagne 1989/90	Moyenne Quinquennale
SUD	Coopératives	2,07	2,40	0,14	1,66	1,05	
	Commerçants agréés	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Total	2,07	2,40	0,14	1,66	1,05	2,04
TENSIFT	Coopératives	9,04	5,64	1,85	3,20	4,57	
	Commerçants agréés	10,11	4,85	2,65	5,02	8,28	
	Total	19,15	10,49	4,50	8,22	12,85	12,22
CENTRE	Coopératives	23,49	9,47	12,04	8,00	1,14	
	Commerçants agréés	22,10	25,35	29,10	39,24	32,15	
	Total	45,59	34,84	41,14	47,24	33,29	34,66
NORD OUEST	Coopératives	3,96	9,87	10,77	8,17	9,07	
	Commerçants agréés	6,08	5,23	10,60	6,83	8,85	
	Total	10,04	15,10	21,37	15,00	17,92	16,09
CENTRE NORD	Coopératives	7,69	12,47	6,46	2,72	0,01	
	Commerçants agréés	1,84	3,55	4,59	8,11	13,99	
	Total	9,53	16,02	11,05	10,83	14,00	14,48
ORIENTAL	Coopératives	5,80	6,23	3,28	1,11	0,76	
	Commerçants agréés	0,76	0,83	0,94	0,37	0,67	
	Total	6,56	7,06	4,22	1,49	1,44	4,79
CENTRE SUD	Coopératives	4,33	9,31	6,68	6,03	7,71	
	Commerçants agréés	2,72	4,77	10,90	9,53	11,74	
	Total	7,06	14,09	17,58	15,56	19,45	15,72
TOTAL GLOBAL	Coopératives	56,38	55,39	41,22	30,89	24,31	
	Commerçants agréés	43,61	44,58	58,78	69,10	75,68	
	Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

MOIS	BLE TENDRE	AUTRES CERALES	LEGUMINEUSES	TOTAL
Janvier	136.684	141.836	57.905	336.425
Février	58.022	96.354	66.325	220.701
Mars	56.052	67.694	59.201	182.947
Avril	40.298	46.294	24.920	111.512
Mai	273.290	52.833	390.606	716.729
Juin	3.495.591	109.225	300.882	3.905.698
Juillet	2.572.513	160.231	188.892	2.921.636
Août	1.345.993	422.032	149.201	1.917.226
Septembre	459.842	313.261	886.118	
Octobre	250.885	195.252	108.627	554.764
Novembre	182.976	186.309	65.926	435.211
Décembre	99.085	130.818	85.460	315.363
TOTAL	8.971.231	1.921.893	1.611.206	12.504.330

Région économique	Type d'organisme	Proportions producteurs	livrées par les collecteurs et autres
SUD	Coopératives	30.00	70.00
	Commerçants agréés	0.00	0.00
	Moyenne	39.67	57.37
TENSIFT	Coopératives	81.70	18.30
	Commerçants agréés	26.56	73.44
	Moyenne	36.32	63.68
NORD OUEST	Coopératives	66.33	33.67
	Commerçants agréés	41.22	59.85
	Moyenne	55.36	44.64
CENTRE NORD	Coopératives	75.00	25.00
	Commerçants agréés	77.34	22.34
	Moyenne	50.61	49.39
ORIENTAL	Coopératives	34.96	65.04
	Commerçants agréés	14.66	85.34
	Moyenne	31.89	68.11
CENTRE SUD	Coopératives	90.00	10.00
	Commerçants agréés	54.25	45.75
	Moyenne	75.65	27.35
MOYENNE	Coopératives	57.11	42.89
	Commerçants agréés	42.24	57.88
	Moyenne	48.59	51.48

Tableau n° 5

Proportions des livraisons aux
différents utilisateurs

- par région économique

- par type d'organisme

(EN %)

Région économique	Type d'organisme	Proportions livrées		
		Transformateurs	Intermediaires	Exportation
SUD	Coopératives	95,00	5,00	0,00
	Commerçants	-		
	Moyenne	95,00	5,00	0,00
TENSIFT	Coopératives	90,68	9,32	0,00
	Commerçants	78,26	15,40	4,89
	Moyenne	83,98	12,60	2,64
CENTRE	Coopératives	94,32	5,68	0,00
	Commerçants	72,45	13,58	13,97
	Moyenne	76,32	12,18	11,50
NORD OUEST	Coopératives	95,82	4,18	0,00
	Commerçants	67,15	18,65	14,48
	Moyenne	83,27	10,24	6,07
CENTRE NORD	Coopératives	75,00	25,00	0,00
	Commerçants	98,03	1,97	0,00
	Moyenne	86,27	13,73	0,00
ORIENTAL	Coopératives	67,83	32,17	0,00
	Commerçants	97,48	2,60	0,00
	Moyenne	72,29	27,71	0,00
CENTRE SUD	Coopératives	85,00	15,00	0,00
	Commerçants	99,21	0,79	0,00
	Moyenne	88,62	11,38	0,00
MOYENNE NATIONALE				
	Coopératives	89,41	10,59	0,00
	Commerçants	79,53	11,11	9,22
	MOYENNE	83,75	10,75	5,28

Tableau n°6

TAUX D'UTILISATION DE LA CAPACITE PERMANENTE
DE STOCKAGE DURANT LA PERIODE 1985/89

(EN%)

Région économique	Type d'organisme	Periode 85/89
SUD	Coopératives	71,20
	Commerçants agréés	-
	Global	71,20
TENSIFT	Coopératives	115,50
	Commerçants agréés	77,70
	Global	90,20
CENTRE	Coopératives	51,80
	Commerçants agréés	70,30
	Global	66,50
NORD OUEST	Coopératives	169,40
	Commerçants agréés	36,00
	Global	66,30
CENTRE NORD	Coopératives	74,90
	Commerçants agréés	76,10
	Global	75,40
ORIENTAL	Coopératives	113,80
	Commerçants agréés	78,60
	Global	106,50
CENTRE SUD	Coopératives	168,90
	Commerçants agréés	48,30
	Global	76,40
GLOBAL NATIONAL		72,75

Tableau n° 7

Capacités de stockage prévues par les organismes stockeurs en 1995

Unité:QL

Région économique	Type d'organisme	Capacité actuelle	1 9 9 5		Total disponible en 1995
			Magasins	Silos	
SUD	Coopératives	250.000	50.000	0	300.000
	Commerçants agréés	0	0	0	0
	S/total	250.000	50.000	0	300.000
TENSIFT	Coopératives	411.500	50.000	100.000	561.500
	Commerçants agréés	901.000	63.720	300.000	1.354.720
	S/total	1.312.500	113.720	400.000	1.916.220
CENTRE	Coopératives	1.286.500	0	0	1.286.500
	Commerçants agréés	4.732.000	1.135.000	200.000	6.067.000
	S/total	6.018.500	1.135.000	200.000	7.353.500
NORD OUEST	Coopératives	545.700	40.000	0	585.700
	Commerçants agréés	2.117.000	35.000	30.000	2.182.000
	S/total	2.662.700	75.000	30.000	2.767.700
CENTRE NORD	Coopératives	885.000	0	0	885.000
	Commerçants agréés	1.665.000	1.170.000	0	2.835.000
	S/total	2.550.000	1.170.000	0	3.720.000
ORIENTAL	Coopératives	320.000	0	0	320.000
	Commerçants agréés	106.500	95.000	0	201.500
	S/total	426.500	95.000	0	521.500
CENTRE SUD	Coopératives	429.000	450.000	0	879.000
	Commerçants agréés	1.620.000	350.000	0	1.970.000
	S/total	2.049.000	800.000	0	2.849.000
TOTAL ORGANISMES		15.269.200	3.438.720	720.000	19.427.920
MINOTERIES INDUSTRIELLES		2.800.000			2.800.000
TOTAL NATIONAL		18.069.200			22.227.920

THE STORED GRAIN ECOSYSTEM : A GLOBAL PERSPECTIVE

F.V. Dunkel

Entomology Research Laboratory, Montana State University
Bozeman MT 59717 USA

Ecosystem principles such as biological succession, communities, population dynamics, the concept of the niche, limits to growth and food webs apply to grain storage systems as well as to forests, oceans, lakes, prairies, and agroecosystems. Odum (1989) classified the food-storage system as a human subsidized, solar-powered ecosystem, one of the four main ecosystems of the world. A grain storage ecosystem is a complex system that can be described at several levels. One may consider the storage structure itself an entire system. One may add transportation and describe the system as an archipelago of islands linked by transportation and commerce. Government policies, end-user demands, and the economic environment are part of the system that must be considered in sound management. Understanding sampling techniques, the interrelationship of biological and physical factors, and genetic drift in the system are also essential to making sound decisions about the long term direction of postharvest research. This understanding is also essential to the making of sound decisions in the daily management of stored grain and other food commodities. Proper management of this system is crucial to human survival. This presentation will use ecosystem principals to draw together progress which has been made in understanding the physical elements, defined in part by the structure, the biological elements, including human society, and their interrelationships in storage systems throughout the world. Suggestions for future directions in the ecosystem based research on the postharvest system will be presented.

An **ecosystem** is an arbitrarily defined area where the biotic communities interact with their abiotic environment. Fuelled by solar energy or its transformed equivalent, the elements of the

ecosystem interact along different pathways. An ecosystem can be **autotrophic, heterotrophic**, or both depending on how its component organisms use energy to nourish themselves. In **autotrophic ecosystems**, green plants or algae, the producers, fix the solar energy by photosynthesis and use inorganic chemicals to form complex organic molecules. In **heterotrophic ecosystems**, there are no active producers. Organisms called **consumers** nourish themselves by feeding on dead, live or dormant autotrophs.

Pause to reflect on the diversity of ecosystems on the Earth : the forests, the temperate forests, the tropical, highland rainforests; the prairie; the water ecosystems ponds, lakes, rivers, oceans; the desert; the urban center, suburbia; the agroecosystems stored grain or stored product ecosystem.

Odum (1989) classified all the ecosystems of the Earth into 4 classes based on their source and level of energy use (approximate average, annual energy flows are given in Joules).

- Unsubsidized natural solar-powered (8400 KJ/m²).
- Naturally subsidized solar-powered (84,000 KJ/m²).
- Human-subsidized solar-powered (84,000 KJ/m²).
- Fuel-powered urban-industrial (8,400,000 LK/m²).

Stored grain ecosystems are composed of dormant autotrophs, seeds, which serve both as an energy source and as a habitat for many heterotrophic species of fungi, bacteria, insects and mites. There are many sizes, shapes. Consider the diversity of stored grain, stored product ecosystems :

Grain and beans stored in the home in baskets, boxes and other small containers in Rwanda, and

much of subsaharan Africa, in Poland, in Central and South America.

— bags on pallets under plastic sheeting in China,

— bags on pallets without plastic in India, Subsaharan Africa

— bins, of many kinds, either in the house or outside, either owned by the farmer, a cooperative group of farmers, by the government, or by a grain handling company.

— Underground storage occurs in most countries except Europe and the cultures of European derivation in North America. There are many types of underground food storage such as the North African « matmora », the ancient Chinese national warehouse, the modern Chinese spherical bins, the new plastic underground bins in Brazil, the concrete structures of Argentina, the cavern storage warehouses under Kansas City, Mo., the design for North American farms, and the design successful in wet, termite infested soil in East Africa.

Earth-bermed structures use the earth differently than do the completely underground structures. Earth-bermed structures are those such as the Australian multimillion ton earth bermed structure, the domed structures of Kenya, and the ferrocement siles designed for Africa.

— elevators, country elevators, terminal elevators

— refrigerated storages, those in a residence (refrigerators) and large-scale, commercial units

— controlled atmosphere storage above-ground bags in pallets, silos.

— temporary facilities such as the river barge, the ocean transport liner, the railroad car, and the pile on the ground.

INTERACTION OF THE AGROECOSYSTEM AND THE STORED GRAIN ECOSYSTEM

We humans attack a problem in a system by using the model we have of that system in our minds. If the model in our minds is restricted, or incomplete, the solutions we derive for the problem are so restricted also.

In this part of the presentation, I want to look at the common elements of these diverse stored grain ecosystems we have just described. In particular, I want to focus on important examples of how the agroecosystem and the stored grain, stored product ecosystem interact.

In South China in early March, the rice seedlings approach the time at which they need to be transplanted. Farmers feel an urgency to harvest

the wheat crop, because this wheat crop grows in the same fields which need to be flooded to receive the rice seedlings (Dunkel et al. 1982, 1985). There is the temptation, after the wheat harvest, to omit the resting period of the flooded field (usually one week) to insure that the rice stem borers that may have switched to wheat are killed before the new rice crop is planted. There also is a temptation on the part of the farmer to harvest the wheat before the grain is sufficiently field dried. Events in the agroecosystem may greatly influence loss due to fungal development in the stored grain ecosystem.

In the midwest US (Illinois) and the Southeast (Georgia), **Aspergillus flavus** sometimes becomes a storage problem, causes storage loss, and sometimes, because of mycotoxin (aflatoxin) production, condemnation of an entire harvested corn crop. The inoculation of a new crop occurs in the field. One vector for this transfer is the picnic beetle, a nitidulid.

In Rwanda, and most bean producing areas, bruchids move from their sylvatic reservoir, a prairie or savannah ecosystem to the agroecosystem and then to the stored product system. In the agroecosystem, they lay their eggs on the bean pod and the first instar larva penetrates the pod and bean coat and takes up residence in a bean. In that bean it is transferred to the storage ecosystem where its progeny will infest other beans. A similar story can be told for other insects which are able to survive in the storage ecosystem. In fact, I challenge the audience to suggest a « storage » insect that does not also occur in another ecosystem.

In the US, the natural habitat of the lesser grain borer, **Rhyzopertha dominica** is the forest ecosystem. In the south US, **R. dominica** can be trapped miles from storages. Possibly this bridging two ecosystems also occurs in the northern US, possibly in Canada. Like the opossum, **Didelphis virginiana**, the lesser grain borer has been moving steadily north. Both species were once thought to be confined to warmer areas of North America.

Another coleopteran, the larger black flour beetle, **Cynaues angustus**, has not only just recently (in 1900's) entered the stored grain ecosystem, but it is moving quickly north and east in North America. With a center of origin in the Southwest US, **C. angustus**, was associated primarily with the agave, **Agave pareyi** in desert ecosystems. **Cynaues** is a strong flyer and orients well by olfactory cues to filed storage of residue from the cotton ginning process, to grain bins, or to flour mills. When faced with such stored systems as upholstered furniture in transit, this beetle has also been able to cause significant feeding loss.

ECOLOGICAL SUCCESSION AND DEVELOPMENT OF THE COMMUNITY

Community is an assemblage of populations of several species of living organisms sharing the same living areas or habitat. Krebs (1972) defines a community by five measurable attributes :

1. **species diversity** or what kinds of plants and animals live in the community.

2. **growth form and structure** or the way each species grows and the type of structure each species will have, such as mycelia or broad leaves from a tree.

3. **dominance** or which species exerts the most influence on the others because of its numbers, size, toxin production, or other activities.

4. **relative abundance** or the relative proportion of different kinds in a community.

5. **trophic structure** or what consumes what and how the energy flows.

In the stored grain ecosystem, there are three particularly special communities : the fungal community including those that can compete at atmospheric oxygen tensions and those that can only compete in a reduced oxygen tension atmosphere; the insect community including predators and parasitoids, as well as those insects which actually cause loss; and the mammal community. Relatively few species comprise most mammal communities associated with stored grain or stored product ecosystems. Rodents, both new world and old world mice, and voles can be associated with this system. Squirrels and shrews are other pest species in storage.

Domestic mammals and humans are the usual end users of the system. The needs, preferences of this portion of the mammal community often changes due to the nutritional or sensory requirements of the end product, the fat content of the steak, the flour characteristics needed for a certain pasta, or the taste of beans.

POPULATION ECOLOGY

A population consists of groups of interbreeding or potentially interbreeding individuals of one species living together at one locality.

Historically, we know that the ideal growth of a population can be expressed by a differential equation that describes a sigmoidal or logistic curve (Verhulst 1838). The curve has 4 components, the lag or slow acceleration period, the exponential increase period (= logarithmic phase), the deceleration period, and the stationary (equilibrium with the environment) period. The stationary phase is achieved when the population increases to the **carrying capacity** of the environment and the ecosystem. This carrying capacity may change, in the case of fungi and **Tribolium** adults when toxic substances are produced. The equilibrium period is balanced by rates of natality and mortality.

Many species of fungi and some species of insects, when observed in the natural preharvest, harvest and postharvest storage conditions, yield another type of curve, the J-shaped growth curve. This curve was obtained in Manitoba by Sinha and Wallace (1965) with a population of **Aspergillus flavus** in a damp grain pocket in a 13.6T wheat bulk in Manitoba (Sinha and Wallace 1965) (Figure 5C). The population increased at an accelerating rate. Then, instead of levelling off, the population precipitously decreased its rate of increase to zero. The large population of fungi died because of the fungus-induced temperature of 64 degrees C.

In the studies of Cahagnier and Poisson (1973) in Nantes, France, this J-curve phenomenon was observed in freshly harvested wet corn (figure 5B) with species of field fungi **Cephalosporium**, **Cladosporium**, and **Verticillium** as well as storage fungi in the general **Mucor** and **Penicillium**. Rapid, unrestricted, exponential growth, without a lag period, up to the carrying capacity of the environment were recorded. The experiment was terminated at this point, before any major environmental shift could cause a precipitous fall in the population as above.

NICHE CONCEPT AND INTERACTIONS AT THE SPECIES LEVEL

In 1959, G.E. Hutchinson redefined the niche. It is this definition which has become the most accepted definition to date. Hutchinson described a niche as a habitat supplying the environmental conditions, within the range of the species, that the species needs for living and reproducing. Thus, the niche of a species has a potentially unlimited number of environmental variables. This is the **fundamental niche** of the species. Hutchinson further distinguished between the fundamental and the **realized niche**. The realized niche is the actual, limited spectrum of conditions and resources that allows a species to maintain a viable population despite the presence of competitors and predators. Faced with severe competition, such as that in stored grain fungal communities, the individual species may be completely displaced from several parts of its fundamental niche. The species may live

in only the part of the fundamental niche where its predators cannot thrive. That area is its realized niche.

The niche of fungal species is narrowly defined by : water activity of the substrate (the grain, beans, etc), O₂ tension, and sensitivity to mycotoxin production of other fungal species.

THE CELLULAR LEVEL

To understand the successful adaptations that have been made by insects, mites and fungi in the stored grain ecosystem, the morphological, physiological and biochemical characteristics of insects, mites and fungi must be considered at the cellular level. Many stored grain Coleoptera have a special aggregation of their malpighian tubules attached to their hind gut (Dunkel and Boush 1967). Presumably this is for one last chance at reabsorption of scarce molecules of water in the dry stored product environment. Insects associated with storage also have many interesting cells for reception and production of behavior altering compounds. These are products such as :

— Hydroquinones are produced by adult **Tribolium** and used for internal population management.

— The egg spacing chemicals produced by cells associated with the ovipositor of some bruchid females are also used for internal population management.

— The mandibular glands of Pyralid larvae, particularly the Indian mealmoth, **Plodia interpunctella**, produce an epidictic pheromone which protects the feeding territory of late instar larvae.

— Special cells in the grain beetles, **Cryptolestes** spp. produce an aggregating pheromone which calls in both sexes of the same species.

— Other special cells in female dermestid beetles produce pheromones which activate certain cells in male antennae.

— Semiochemicals are produced by many storage insects and are used for host by braconid parasitoids.

Unlike insects and mites, which are insects with direct functional units, fungi lack comparable discrete units. Clones are a common and important feature of fungal population structure (Sinha 1990). Part of the activity of these cells, if they are from filamentous fungi, contributes to loss of grain components. Part of the activity of fungi causes the production of cellular wastes from primary metabolism and the accumulation of secondary metabolites such as mycotoxins. These cellular products actually turn the dominant plant of the ecosystem into a toxic substance.

The list of toxic metabolites produced by stored grain fungi is expanding. Many scientists are involved in this area of research. When the environmental conditions are right, the following can occur (Sinha 1990) :

— In damp grain, patulin is produced by *Penicillium* spp.

In cob corn, zearalenone and trichothecenes are produced.

In many storage structures, aflatoxins are produced by *A. flavus* and *A. parasiticus*.

— Ochratoxins are produced by other **Aspergillus** species.

— In low temperatures, penicillic acid is produced by **A. ochraceus** and **Penicillium cyclopium**.

THE POLITICAL LEVEL

With the strong effect of humans on this human subsidized ecosystem, many changes are exerted on it at the political level. Government rules such as, price subsidies, federal grain grades and standards, and mycotoxin tolerances, have an impact on how the system is managed. End user requirements, such as pesticide free wheat or barley, have an influence on how the system is managed. The use of penalties and incentives at the first point of sale also has a profound effect on how the system is managed.

OUTLOOK FOR FUTURE RESEARCH

As environmental protection agencies around the world increase the restrictions on pesticides used in many ecosystems, including in stored grain, we will be searching at the cellular level, at the community and population level for new ideas of ways to manage without the usual chemicals.

The increasing proportion of resistant individuals in insect and mite populations will also intensify our search for alternative management methods.

The practice of prophylactic application of the same chemical year after year for stored grain « insurance » will soon disappear.

The future looks bright for entomologists who have been investing their lives in those « alternatives ». Instead of being told at regional, national, and international professional meetings that they should « get practical » with their research, that they should switch to a commonly accepted chemical group to investigate, the same people are being sought out and pressed for answers to the present pesticide crisis.

The « alternatives » may not be sprayable or attack every insect pest species in the system. The decision to use a particular alternative will be based on monitoring information, risk/benefit analysis and a specific « prescription » for the most economically important pest. This « prescription-based » pest management will, is requiring a synthesizer, a computer-based expert system for its use. This type of artificial intelligence will need specific answers from research. Researchers and Extension services will need to cooperate more closely than ever before to make a success of management by expert systems.

HOW MUCH ENERGY IS LOST BY MISMANAGEMENT OF THE STORED GRAIN ECOSYSTEM ?

Solar energy is put into the agroecosystem and then transferred to the stored grain ecosystem. In addition, fossil fuel, and human energy are put into the stored grain ecosystem directly.

Many estimates of actual postharvest losses have been made. Estimates have also been made of storage loss, a subset of postharvest loss. Many times these are quoted to suit the purpose of the government providing the data.

In Morocco, the government's general estimate of annual stored grain (wheat) loss in the country was 25 %. Our subsequent studies in Morocco based on weight loss, fungal and insect damage (Bartali et al. 1990) indicated that this was a sound figure.

Figures for postharvest loss in Rwanda were published by FAO as 25 %. Actual surveys of losses during storage in Rwanda were conducted in 1984-86. This data showed that there was a 1—2 % weight loss at the farm level, 12 % loss due to end-user (the consumer) rejection. Clearly, even comparing the FAO figure with the sum of all postharvest loss, there is a wide discrepancy between the published figure and the actual.

HOW DOES AN ECOSYSTEM APPROACH LEAD TO BETTER MANAGEMENT ? TO MORE SUSTAINABLE APPROACHES ? TO MORE ECONOMICAL TECHNIQUES ?

Automatic solutions we have used in the past may not be the more sustainable approach or, now, the more economical technique. As research, Extension, and academic entomologists, we can internalize the principles I have just described for ecosystem analysis.

— How can monitoring the impact of changes in structures and farmer practices be important in

managing insects, mites and fungi in storage ?

— How can knowing the actual preference of consumers who will use the grain, beans or other product impact on storage management methods.

— How will understanding the special niche requirements of fungi associated with stored products make management of them more efficient ?

— How will actually knowing the level of loss experienced at difference levels in a nation's stored grain system help achieve self-sufficiency ?

— How will understanding the insect and mite community, and the sylvatic reservoirs of each species, help scientists devise non-pesticidal stored grain management schemes ?

HOW CAN THESE ECOSYSTEM PRINCIPLES BE APPLIED ON A GLOBAL SCALE ?

Storage ecosystems are connected by transportation and commerce. Grain and other stored products move around our planet Earth on a global scale. The insects and mites that are pests of these commodities can move at an even faster rate, by simply accompanying traveler on jet airplanes.

In our research, Extension, and academic presentations, we can be sure that we internationalize our efforts. By example, we can encourage our colleagues and students to **think globally, and sustainably, and ask the ecosystem questions.** We can ask :

— What are the components of the system with which we are working and, in a practical sense, how can we solve the postharvest problems of this group ?

— How can the postharvest problems of this group be solved without or at least with a minimum use of pesticides ?

— What is **already available** in local materials and in indigenous practices that can be used to solve the problems within the country ?

I hope that the following five case studies will provide some ideas of how ecosystem principles can be applied on a global scale. Each region has its own combinations of environmental conditions, uniquely evolved farmer practices, economic milieu, governmental regulations, and end-user requirements. In applying ecosystem principles to these regions, the unique aspects of the region also need to be considered. These are some examples of how we can assist other countries **while learning** from them in managing our own stored grain ecosystems.

CASE STUDY : PEOPLES REPUBLIC OF CHINA

During my work in the PRC, I encountered many ideas that were adaptable to other countries, including the US.

— I learned that the most common type of large scale storage of grain was in bags on pallets. The stacks of bags were always covered with locally produced plastic sheeting. Under the plastic, CO₂ was forced in. The CO₂ was produced naturally with a slurry of yeast cultures and rice bran, etc. (Dunkel 1982).

I learned that underground grain storage of rice and millet « saved nations » in Ancient China (e.g. during the Sui and Tang Dynasties). I learned that large scale underground storage of wheat and other commodities was now being practiced efficiently with modern methods of remote temperature monitoring. This underground unit also included a mill to prepare the wheat flour (Sterling et al. 1983).

I learned that the Chinese had successfully implemented over 15 years ago a national monitoring plan for their stored grain. Most grain is held in long term storage (over 3 months) by the government, in local, prefectural, or city warehouses. At each of these storages, there is a monitoring plan which includes remotely sensed temperature, analysis of samples for insects, mites, and fungi, moisture content analysis, and several measures specific to rice. Once or twice a month, depending on the time of year, and previous history of the grain, this data is taken and the report sent to the next higher level of organization. Local reports are sent to the Province. Province reports are sent to the federal level, etc. If there is grain at risk, a team of extension responsibilities is sent from the unit receiving the report to those with the problem. If the reports are consistently good, that is if the grain has the « 4 Nos » (No insects, no high moisture, no rodents or birds, no dangerous residues, then the storage unit receives an award. These « 4 no » awards, were, when I worked there, highly respected (Dunkel 1982).

In South China, however, there were problems at the interface of their agroecosystem and the stored grain system. The problem was the « triple crop squeeze » (Dunkel et al. 1982). In the period immediately after harvest, most of the wheat was lost because it did not have sufficient time in the field to dry, and often there were not enough sunny days for the sun drying to get the grain out of a high risk condition. At this point, the grain was on the farm. It was too early in the storage system for the

fancy monitoring system and the CO₂ supplemented controlled atmosphere storage to be implemented to save the grain.

The solution I posed was to use a locally produced food preservative to stop germination of field and storage fungi. This same compound (2,4 hexadienoic acid, sorbic acid), later in the storage period, we showed, would prevent the F1 generation of the main storage insect problems in South China, *Sitophilus oryzae*, *Rhizopertha dominica*, and *Sitotroga cerealea* (Dunkel et al. 1982).

CASE STUDY : MOROCCO

The stored grain system in Morocco consists of matmora, sela, the local market, transportation of many different types and terminal elevators. The matmora and sela are used on-farm, although large farms may also have larger bins and flat storages. The matmora is a flask-shaped underground bin carved from the earth in areas of Morocco which have a particularly favorable soil type. The sela is an aboveground bin built of local reeds and woven. Transportation consists of grain trucks, wagons, baskets on donkeys, rail cars.

The present problem in the storage ecosystem is as follows : The government of Morocco wants to achieve self-sufficiency in wheat and barley. The percent needed to import each year was roughly equal to the amount estimated lost each year due to conditions in the storage system. The Moroccan government knew that storage conditions had to be improved. They did not want to invest in expensive terminal structures that were often difficult to maintain.

After five years of collaborative research and surveys, the following was accomplished to address the problem described. A new matmora was designed, with a sealed plastic liner. With the liner, fungal population development, particularly *A. flaeus* and *A. parasiticus*, did not increase significantly during storage.

On the other hand, the possibility of resistance to low oxygen atmospheres was detected in areas where underground storage (matmora) had been used for centuries, perhaps millennia.

A sound infrastructure of stored grain scientists spanning 8 disciplines was developed. These professors are now committed to posing and testing hypotheses that will lead to application of ecosystem principles for better management of the postharvest system.

CASE STUDY : RWANDA

In Rwanda, 95 % of the population are subsistence farmers. Mean farm size is one hectare and it is decreasing. The primary commodities stored are dry edible beans, sorghum, fermented cassava. Some peas and dry corn are also stored. Storage structures are located on-farm (primarily in the house), in cooperative silo/hangars, in merchant storages, in large scale government storages in bags on pallets, and in long term strategic storage (similar of the government storages).

The Government of Rwanda would like to improve their techniques of long term strategic storage for Rwanda, development of monitoring, other management techniques and structures. As a result, a long term, multidisciplinary collaborative research and survey system was developed.

Information was obtained on the entire stored grain, stored bean system. The following collaborative research and surveys were completed : survey of local bean varieties (over 300 land races or varieties) which produced the bean catalogue, a storage survey of beans and sorghum, genetic resistance of the bean varieties, effect of storage on bean cookability and consumer sensory preference, development of alternative storage methods, and development of grades and standards. A summary of conclusions and recommendations was prepared for the agricultural marketing board and for the Government of Rwanda. This document then formed the basis of another five year period of implementation of results and further research.

We found that :

— Actual levels of loss were not as high as predicted. (Dunkel et al. 1988).

— Producers had developed over 300 land races (varieties) of dry edible beans, **Phaseolus vulgaris** (Lamb and Hardman 1986). Some of these varieties has genetic resistance as dry beans to the two main insect (bruchid) causes of loss in Rwanda (Lamb and Dunkel 1987).

— Underground, sealed storage could be successfully adapted to wet, termite infested soil in Rwanda (Hanegreefs et al.).

— Resistance was predicted to be developing in older government warehouses (Dunkel et al. 1988). In follow on studies, our research indicated that this was the case (Sriharan et al.).

We learned that Rwandan farmers evolved some practices using on-farm plant materials which reduced postharvest loss due to insects. These practices, in the end, may provide some possibilities for novel insecticides that are effective with postharvest and preharvest insects in other areas

of the world as well as in Rwanda on farms and in long term government storages.

CASE STUDY : MINNESOTA

In Minnesota, grain is primarily stored on the farm. Commodities stored are primarily corn, wheat, and barley. Field drying is used for most wheat, but corn is generally low or high temperature dried after harvest. Aeration is used each fall and spring to decrease temperature gradients in the bins. Farmers generally store multiple years to take advantage of the market fluctuations. There is a low profit margin and this is decreasing due to decreasing government subsidies. There is easy access to terminal elevators (There are more terminal elevators in Minnesota than in any other state in US). Transportation possibilities consist of river barge to New Orleans, rail or truck to Chicago, and ocean liner from Duluth.

The problem with the present storage system in Minnesota is that insect contamination of the grain which Minnesota markets can be a threat to marketing of the grain.

Research results have shown that :

— Insect species thought to be important in storage were not (e.g. **Sitophilus**) and other insects not considered important in Minnesota were important (e.g. **Plodia**, **Ahasverus**, **Typhea**, **Cryptolestes**, **Cybaeus angustus**) (Barak and Harein 1981a). Insects not previously thought important were all associated with high moisture conditions and the fungal community.

— Some resistance to malathion and other insecticides has been detected.

— There is no incentive from elevators for the farmer to decrease insect infestation (Barak and Harein 1981b).

— One of the « new » storage insects such as the larger black flour beetle, **Cybaeus angustus** LeConte had moved within the past 80 years from a desert ecosystem and was now able to thrive in diverse storage ecosystem. This diversity included medium moisture Minnesota corn, as well as residue from the cotton ginning process stored in the field and warehoused, newly manufactured cloth furniture (Dunkel et al. 1982, Barak et al. 1981, Morrison and Dunkel 1983, Kao et al. 1984).

Therefore, the situation in Minnesota is such that alternatives to malathion need to be developed and tested. The « new » storage insects and their niche requirements need to be considered in developing a management plan for the storage ecosystem in Minnesota.

CASE STUDY : MONTANA

In Montana, most grain stored is wheat and barley and it is primarily stored on the farm. Grain is primarily dried in the field, before or after swathing. There are few farms that use either dryers or aeration equipment. Grain is often stored for more than one year. Some producers use malathion or reldan (chlorpyrifos methyl) prophylactically. Monitoring is done visually and without the aid of insect traps or remote temperature systems. Profit margins are low for these crops and they are decreasing. Terminal elevator access is often difficult. The nearest port is Seattle or Portland. Most grain is sold to buyers outside North America, primarily Japan. Some grain is sold to California for feed and some to breweries in Missouri or Colorado. Rail or truck is the transportation route out of the state.

The problems with the present storage ecosystem are that the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* is increasing in frequency and currently used insecticides do not seem to work well in its management. The decreasing of already low profit margins for wheat and barley is another problem in this system.

The solution being investigated to solve these problems posed are the initiation of a statewide grower awareness program on the lesser grain borer and laboratory studies on sustainable alternatives to current insecticides for the insect. A statewide survey of this borer in forest, prairie, agro and storage ecosystems is being planned. Marketing of pesticide free wheat and barley is being investigated and research on underground storage systems is in progress.

HOW DOES ENERGY FROM STORED GRAIN FLOW THROUGHOUT THE WORLD ? IS THE PATH OF ENERGY FLOW ALSO THE PATH OF THE MOVEMENT OF RESISTANCE GENES ? AND INSECTS MINUS THEIR POPULATION REGULATING PARASITES, PARASITIDS, AND PREDATORS ?

Although grain follows the worldwide trade routes, small amounts of grain, dry edible beans, and other products are often carried by travelers when they move from country to country and continent to continent. With this grain in transit, insects move, the genetic material which confers on the individual susceptibility (or resistance) to insecticides moves, fungi move. When the insects which cause severe losses move, they often move without

their population regulating parasites, parasitoids, and predators. As international trade routes increase in diversity and international travel by the ordinary citizen increases, resistance to insecticides will spread more and more rapidly. Insects not normally associated with storage ecosystem may by chance enter the system and will be rapidly transported throughout the storage systems of the world.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

1. The stored grain ecosystem is a set of island systems, connected by the transportation systems and the systems of commerce and international food aid.

2. The concepts of modern ecology have not yet been adequately applied to the management of insects and mites in stored grain ecosystems.

3. In several areas involving fungi in stored grain ecosystems, the physical, chemical and biological limits of these organisms have been determined.

4. Efforts should be undertaken to develop energy budgets of grain bulks infested with fungi and/or arthropods or both.

5. Sensitivity of insects and other pests to pesticides is a natural resource which we are abusing around the world. In Canada, many of the *Tribolium* populations are resistant to malathion. In Rwanda, populations of their main storage insects are showing increased resistance to actellic. Reports of resistance to phostoxin and high CO₂/low oxygen atmospheres are appearing in the literature.

On our planet Earth, there are some ecosystems upon which we depend to support our lives. It is extremely urgent that we, as the Chinese Emperor Wen requested of his agricultural advisors in 163 B.C. « exhaust all our efforts and ponder deeply » how we might manage this storage ecosystem in a sustainable, economical, and safe manner.

Les données de base : évaluation des besoins en capacité de stockage, organisation, paramètres pour caractériser les équipements.

Dr BOISSIERES, chargé de la mission Ingénierie Stockage et Conditionnement à la Direction Générale de l'Alimentation.

I— CONSIDERATIONS GENERALES

La récolte et la collecte de céréales et de graines oléagineuses sont réalisées, sur une période très limitée de l'année.

Par contre, la commercialisation vers les industries d'aval s'étale sur une année ou plus (stock de report de fin de campagne), ce qui rend donc nécessaire la présence d'une infrastructure de stockage afin d'adapter l'activité d'amont (production) à l'activité d'aval (utilisation).

La détermination des besoins en capacité de stockage des grains est complexe en raison de l'intervention d'un grand nombre de paramètres dans la formation des stocks, dont l'évolution est bien souvent indépendante et parfois imprévisible (rythme des apports au silo, rythme des sorties, niveau des récoltes et des collectes, niveau des stocks de reports...).

L'analyse de ces différents paramètres, de leur effet et de leur évolution par comparaison à des campagnes de référence, peut néanmoins nous permettre de cerner les besoins et les grandes caractéristiques des constructions à réaliser.

Elle doit être effectuée avec le plus grand soin, préalablement à toute construction, en vue d'obtenir la meilleure adaptation possible des équipements, de stockage aux besoins, et ainsi, la meilleure rentabilité des installations.

Il faut savoir en effet que :

— La coût des constructions de stockage peut varier du simple au triple et cela pour des niveaux de services comparables.

— Les seules dépenses d'amortissement représentent en France, plus de 65 % des frais d'exploitation directs (hors frais financiers).

— La marge brute de l'activité de stockage est faible, de l'ordre de 15 % du C.A. (en France).

— L'amortissement des installations de stockage est généralement long (10 à 15 ans) ce qui implique de définir des stratégies à long terme.

— Les erreurs d'investissement ne sont pas systématiquement compensées par la progression des productions ou par l'inflation.

Les principaux paramètres à prendre en compte pour définir, les besoins en capacités de stockage et les caractéristiques générales des ins-

tallations à construire en vue de préparer le choix des technologies et des entreprises compétentes, sont présentés ci-après.

II— DETERMINATION DES BESOINS EN CAPACITE DE STOCKAGE DES GRAINS

II.1— COEFFICIENT DE ROTATION ANNUEL DES INSTALLATIONS.

Coefficient de rotation annuel des capacités de stockage = $\frac{\text{production (1)}}{\text{Capacité de stockage disponible (1)}}$

(1) même unité

exprimé en tonnes équivalent blé par exemple.

L'analyse du coefficient de rotation des capacités de stockage et de son évolution en fonction des productions prévisibles est très simple. Son utilisation pour évaluer les besoins en capacité de stockage est très courante.

Toutefois cet indicateur, permet seulement de comparer le niveau d'équipement de stockage par rapport aux autres entreprises de (stockage à la ferme), les conditions de commercialisation et les différents types d'espèces collectées (équilibre céréales à paille / maïs) soient comparables.

En aucun cas il ne permet de déterminer de façon rigoureuse les besoins en capacité de stockage au niveau d'une entreprise.

Par ailleurs, il ne permet pas de dégager les besoins en capacité de stockage sur une aire considérée.

II. 2— COMPARAISON DU STOCK MAXIMUM MENSUEL PREVISIBLE A LA CAPACITE DE STOCKAGE UTILISABLE

La dimension d'un réseau de stockage ou d'un silo est directement fonction :

— du niveau des récoltes et des collectes, de leur rapidité d'exécution, des dates d'entrée en récolte des différentes espèces.

— du rythme de la commercialisation, notamment en début de campagne.

— du niveau du stock de report provenant des campagnes antérieures.

La méthode proposée consiste à déterminer la quantité maximum prévisible de graines à stocker au cours des campagnes futures (en faisant le bilan des entrées /sorties prévisibles).

Compte tenu du grand nombre de paramètres

intervenant dans la quantité maximale à stocker, on se limitera à l'estimation de la quantité maximale mensuelle à stocker et à noter à quel moment de l'année elle se présente.

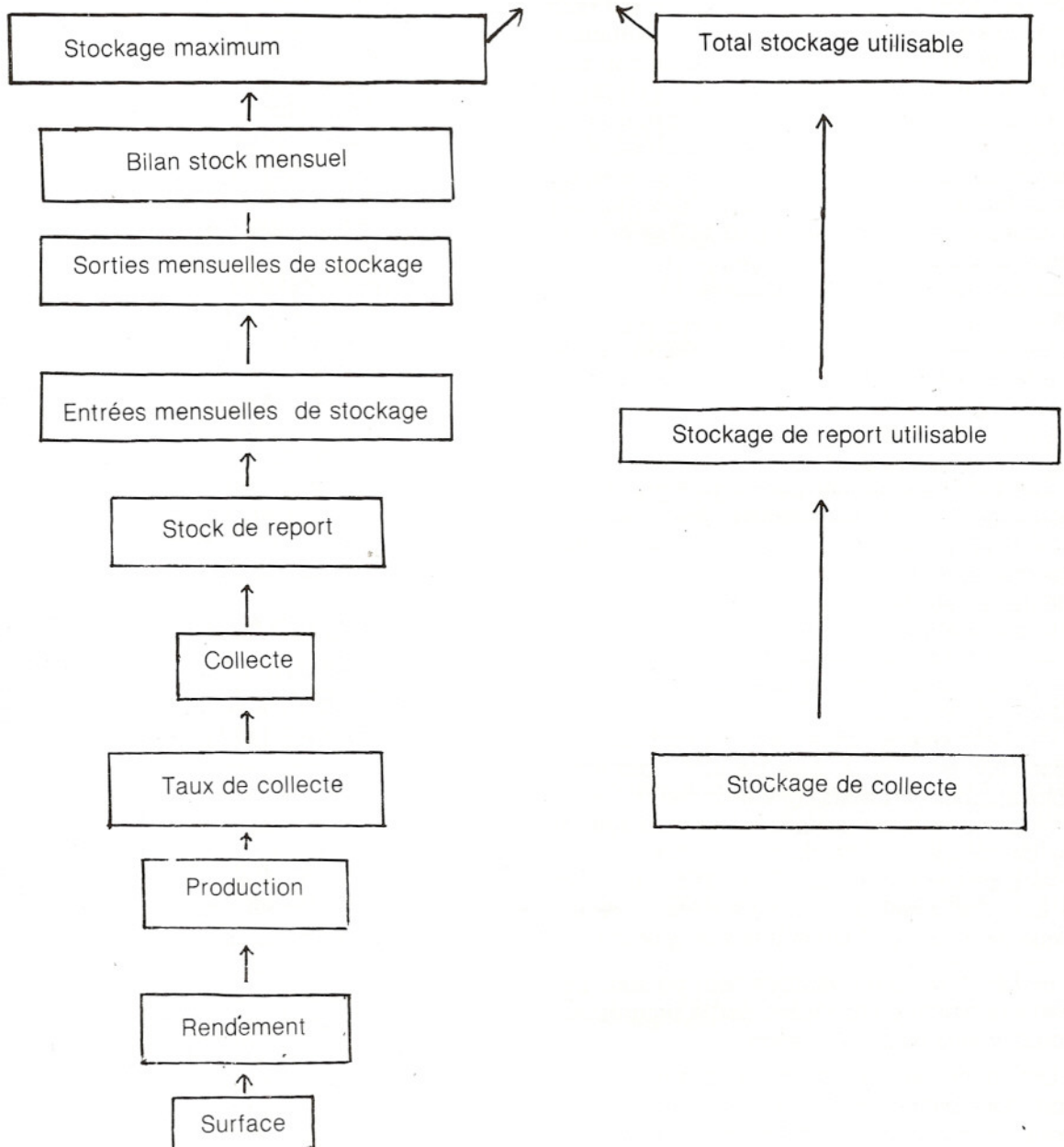
La confrontation du stock maximum mensuel prévisible à la capacité de stockage utilisable, permettra de déterminer le besoin en capacité de stockage à construire sur la zone étudiée.

Cette approche permet une certaine optimisation de l'estimation des besoins en capacité de

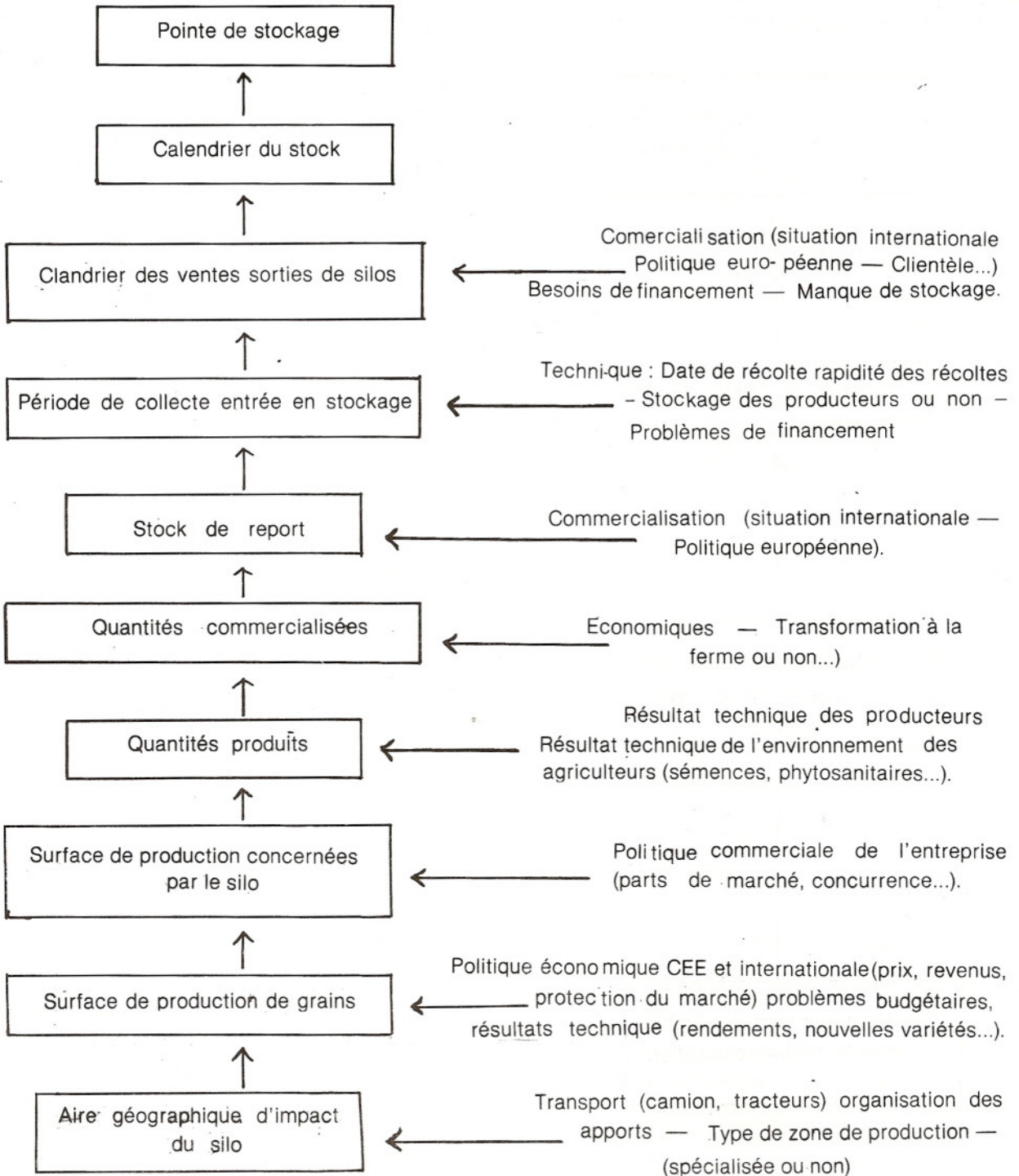
stockage en prenant en compte l'ensemble des paramètres qui interviennent sur le volume du stock (collecte, échelonnement des apports lié au différentes dates de récoltes, rythme de commercialisation).

Elle permet en outre d'intégrer l'effet minorant sur le besoin en capacité de stockage à construire des différentes dates de collecte de certaines espèces (juillet - août : céréales à pailles, septembre : tournesol, novembre : maïs).

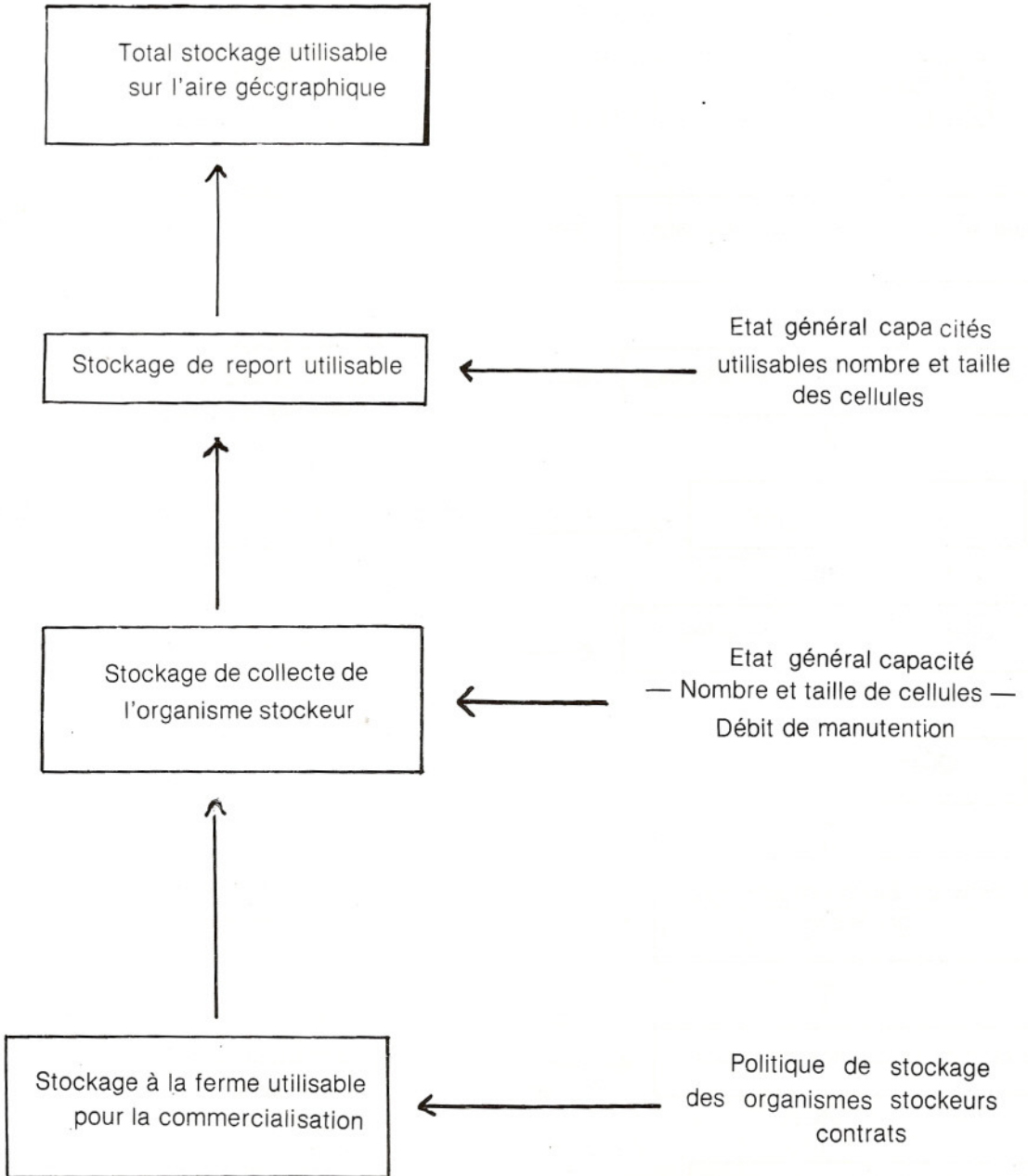
II. 3— ORGANIGRAMME DE LA METHODE COMPARAISON DE LA POINTE DE STOCKAGE MENSUELLE A LA CAPACITE DE STOCKAGE UTILISABLE



QUANTITE A STOCKER ETAPES DE LA PREVISION (PARAMETRES)



CAPACITE DE STOCKAGE



II. 4— PRESENTATION DE LA METHODE : ANALYSE DES PRINCIPAUX PARAMETRES

II. 4.1— DETERMINATION DE L'AIRES GEOGRAPHIQUE D'IMPACT DU SILO

A) Détermination des surfaces consacrées à la production céréalière ou de graines oléoprotéagineuses pouvant être touchées par le silo, dans le cas d'une implantation nouvelle :

Ces surfaces peuvent être appréciées à partir d'un rayon d'action déterminée par la distance maximale économique des transports de grains issus directement de la récolte. Le rayon d'action du silo dépendra donc de l'organisation de ces transports. Par exemple il sera très court (5 — 10 km) si les agriculteurs livrent directement leur récolte par leurs moyens propres (tracteur, remorque). Il sera beaucoup plus important (15 - 20 km) si l'organisme stockeur est pourvu d'un parc de camions bennes pour le transport.

Il dépend aussi de la spécialisation de la zone dans la production de céréales ou de graines oléoprotéagineuses : en secteur de production diffus les distances seront plus longues, tandis qu'en secteur très spécialisé les distances pourront être plus courtes.

Par ailleurs, il faut tenir compte de la concurrence exercée par les autres installations de stockage.

B) Détermination des surfaces consacrées à la production céréalière ou de graines oléoprotéagineuses pouvant être touchées par le silo dans le cas d'une extension d'installation existante :

Il s'agit d'un problème plus facile à résoudre car l'organisme stockeur connaît bien sa zone d'action et ses clients.

Il doit situer son projet dans ses perspectives d'évolution et préciser ses objectifs : par exemple augmentation du rayon d'action du silo du fait de l'organisation des transports par camions bennes qui permettra de drainer des productions provenant de surfaces non encore touchées par le silo existant, augmentation ou diminution de l'aire d'action sous l'effet de la concurrence...

II.4.2— DONNEES CONCERNANT LA PRODUCTION : DETERMINATION DES QUANTITES A STOCKER

A) A partir des surfaces de production céréalières ou d'oléoprotéagineux touchées par l'installation, on devra estimer le potentiel de production et les quantités qu'il est possible de commercialiser par le silo.

Enregistrement des données suivantes pour les différentes productions :

Pour les cinq dernières années : Prévisions Surfaces



B) Quantités à collecter.

Analyse du taux de collecte dans la zone considérée et de son évolution sur les cinq dernières années.

Etablissement du taux de collecte prévisionnel.

C) Quantité de graines pouvant être stockées par l'installation.

Quantités produites prévisionnelles x Taux de collecte prévisionnel

II.4.3— DONNEES CONCERNANT LE DEROULEMENT DE LA COMMERCIALISATION

A) Stock de report de l'année antérieure (inventus)
Analyse de l'évolution sur les cinq dernières campagnes : estimation du stock de report prévisionnel pour chaque espèce.

B) Rythme mensuel des livraisons des différentes productions par les agriculteurs, calendrier mensuel.

L'échelonnement des livraisons au silo dépend de la pratique du stockage à la ferme, de la rapidité des récoltes, des conditions climatiques...

Analyse sur les cinq dernières années et établissement d'un calendrier prévisionnel des apports mensuels en valeur relative.

C) Rythme des ventes

L'échelonnement des ventes dépend des marchés auxquels s'adresse l'installation.

Les ventes à destination du marché intérieur peuvent être régulières et étalées tout au long de la campagne de commercialisation. Toutefois par exemple certaines ventes avoir un caractère exceptionnel et concentrées sur une courte période telles que la vente de céréales à prix réduit à destination de l'alimentation animale.

Les ventes à l'exportation sont par contre beaucoup plus fluctuantes.

Les prévisions de calendrier de commercialisation devront être basées sur une analyse détaillée des campagnes de commercialisation antérieure sur la zone considérée, qui permettront d'établir un rythme mensuel de commercialisation et donc de déstockage.

Un calendrier prévisionnel pourra donc être établi sur ses bases. Il fera apparaître pour chaque graine les % sorties mensuelles. Le produit du % par les quantités collectées prévues permettra d'estimer les quantités mensuelles sorties du stockage.

Le bilan des entrées et sorties prévisionnelles permettra d'établir pour chaque mois le stock mensuel prévisionnel.

II.4.4— DONNEES EQUIPEMENT DE STOCKAGE EXISTANT DANS LA ZONE CONCERNEE

A) Description de l'équipement de stockage de collecte existant dans la zone concernée, exploité par l'organisme stockeur, ainsi que celui des autres organismes stockeurs concurrents.

- capacité de stockage en volume
- nombre et taille des cellules
- débit de manutention
- état général (vétusté...)
- travail en vrac ou en sac.

B) Existe-t-il du stockage à la ferme ?

Comment est-il utilisé ? Y a-t-il une politique d'intégration du stockage à la ferme organisée par l'organisme stockeur sous forme de contrat permettant ainsi de mieux utiliser les capacités de stockage détenues par l'organisme stockeur ?

C) Stockage utilisable sur l'aire géographique déterminée

Il doit être tenu compte de l'état de vétusté des installations, des pertes de capacités de stockage liées aux classements. Un abattement de 20 % des capacités de stockage théorique sera pratiqué.

II.4.5— DETERMINATION DE LA CAPACITE DE STOCKAGE A CONSTRUIRE

Dans un silo de stockage il y a en permanence des entrées et des sorties de graines.

La méthode proposée consiste à établir le calendrier mensuel prévisionnel de stockage.

La confrontation du stock maximum mensuel prévisible à la capacité de stockage existante utilisable permettra de déterminer le besoin en capacité de stockage à construire sur la zone.

Cette méthode permet une certaine optimisation de la prévision des besoins en capacité de stockage en prenant en compte l'ensemble des paramètres qui interviennent sur le volume d'un stock (collecte, échelonnement des apports, commercialisation).

Elle permet de déterminer les besoins en capacité de stockage à tous les niveaux : silo proprement dit, entreprise, région, état.

Par ailleurs l'estimation des flux (entrées / sorties) qui est effectuée permet de caractériser les autres équipements (manutention, débits de réception et d'expédition).

NOTA : En France, les organismes stockeurs sont tenus de déclarer à l'ONIC tous les mois les quantités de céréales détenues.

Des prévisions de stock mensuel peuvent être facilement réalisées à partir de ces données en étudiant la relation stock mensuel /collecte.

DETERMINATION DES AUTRES PARAMETRES PRINCIPAUX CARACTERISENT LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE

En vue d'une bonne adaptation des installations de stockage aux besoins, le maître d'ouvrage doit poursuivre son étude pour définir :

— l'organisation du volume de stockage : taille et nombre des cellules.

— les grandes lignes du diagramme de fonctionnement,

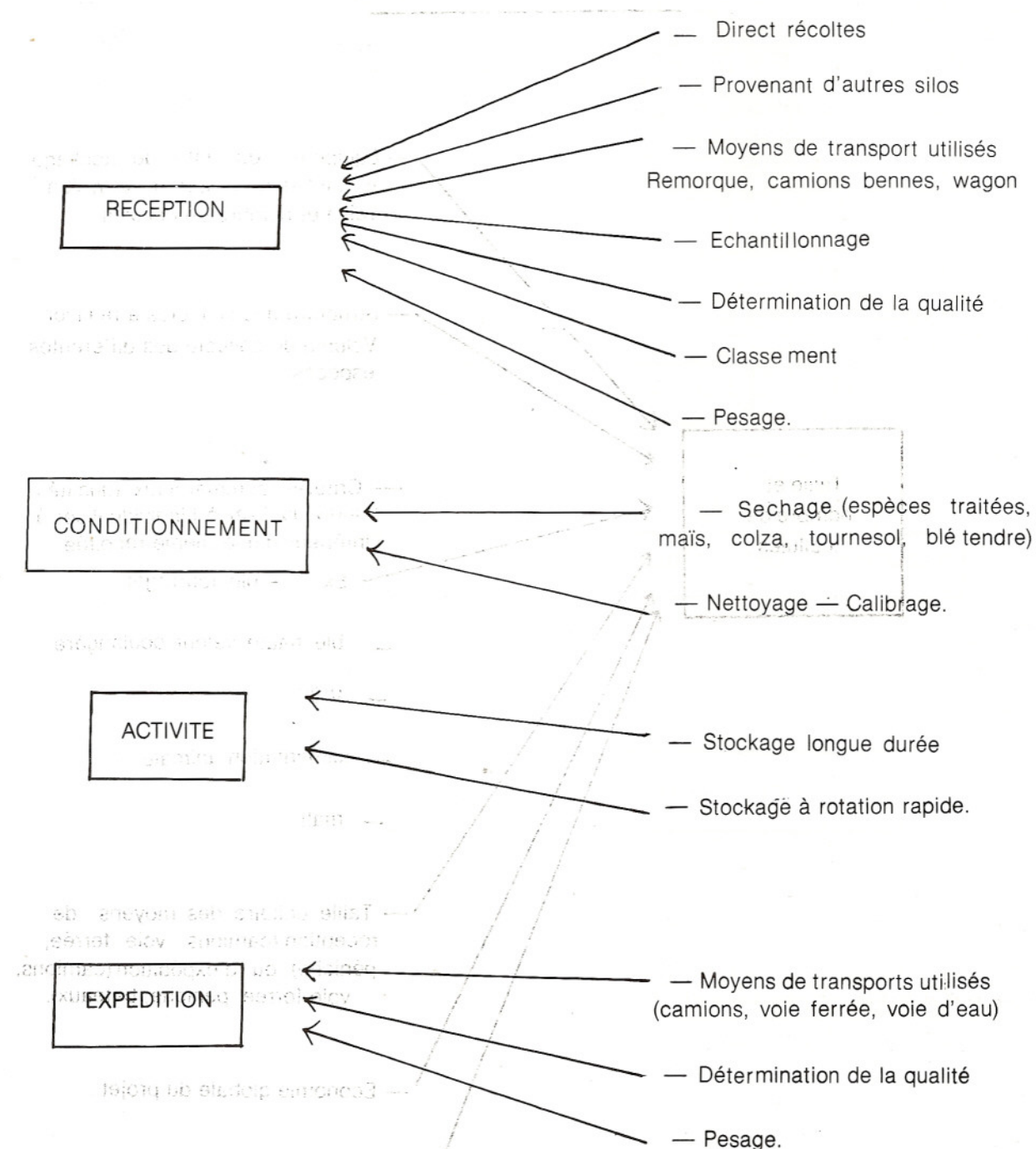
— les performances des appareils souhaitées.

A cet effet il lui appartient de bien analyser le travail qui sera effectué par l'installation.

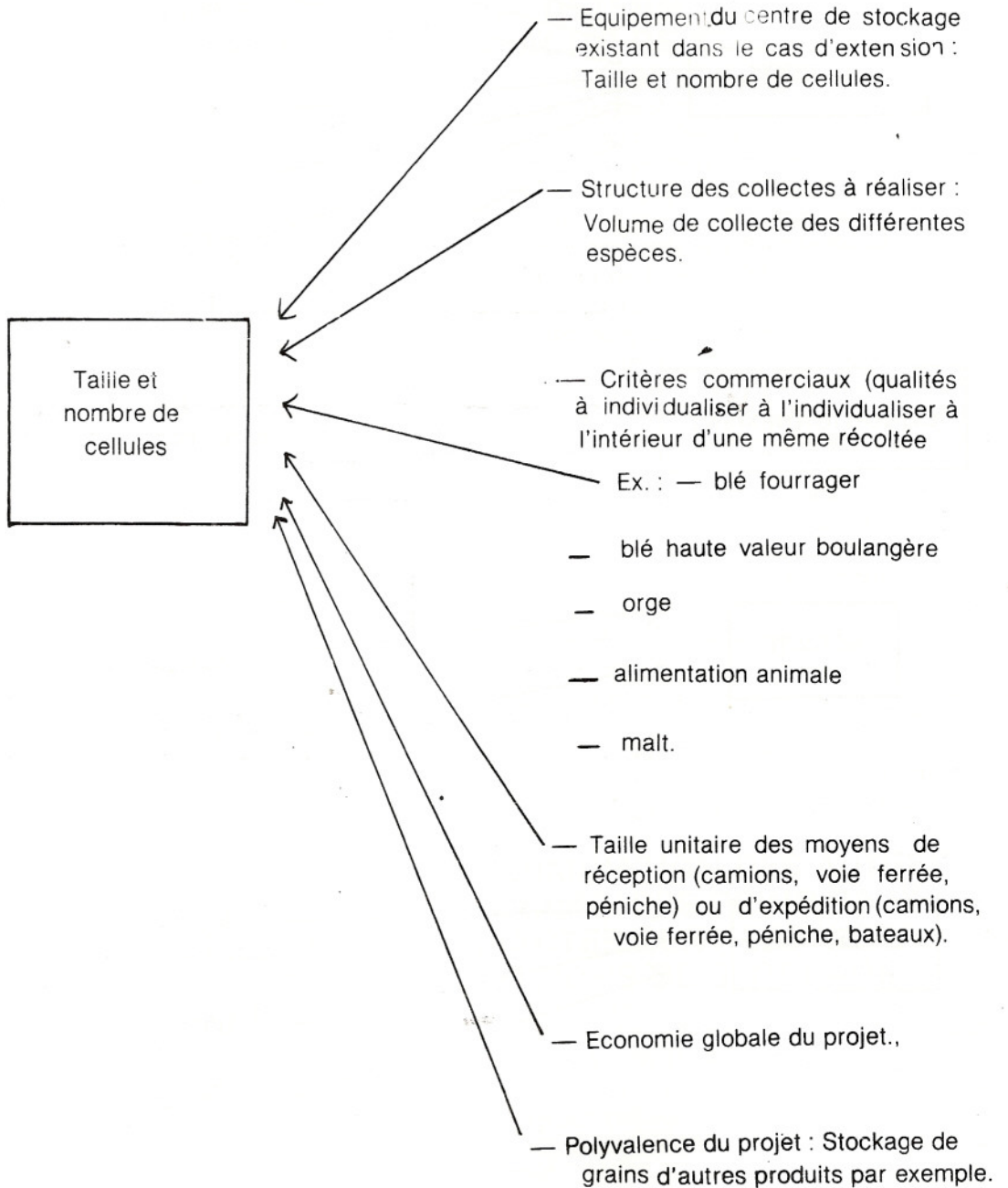
Les principaux critères sont les suivants :

III.1 — ANALYSE DU TRAVAIL

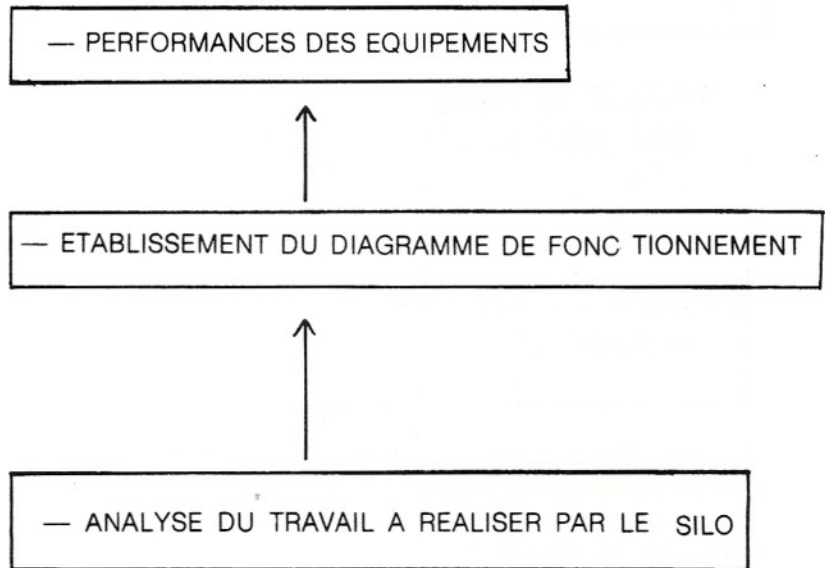
NOMBRE DES CELLULES



III.2 ORGANISATION DU VOLUME DE STOCKAGE : TAILLE ET NOMBRE DES CELLULES



III.3— AUTRES EQUIPEMENTS



PERFORMANCES

DEBIT DE MANUTENTION, RECEPTION, ENSILAGE

. Réception

. Entrées maximales / durée de la collecte possible

DEBIT DE MANUTENTION, NETTOYAGE

Fonction de l'organisation du silo nettoyage immédiat
(Débit adapte au débit de manutention réception)

- Nettoyage diffère
- Le débit peut être inférieur

SECHAGE

Adaptée aux quantités de graines à sécher, le débit de manutention du circuit amont et aval du séchoir doit être adapté aux conditions de fonctionnement du séchoir.

Pour une installation polyvalente prévoir des débits variables.

VENTILATION

10 M3/H/M3 de grains minimum

DEBIT D'EXPEDITION

Sortie maximale prévisible / durée d'expédition possible.

DEPOUSSIERAGE

(Respect des règles d'environnement et sécurité.)

DIAGRAMME DE FONCTIONNEMENT

— Dessin pour chaque fonction des circuits de manutention

. Réception, pesage, échantillonnage, ensilage, stockage.

. NETTOYAGE.

. DESINSECTISATION.

. CONSERVATION (TRANSILAGE, VENTILATION).

. SECHAGE.

. EXPEDITION.

. DEPOUSSIERAGE

— FONCTIONS SIMULTANÉES

— CIRCUITS COMMUNS ET CIRCUITS INDÉPENDANTS

— DEPOUSSIERAGE

— PILOTAGE (AUTOMATE PROGRAMMABLE OU SYNOPTIQUE — CONTACT RELAIS?)

— EXTENSION FUTURE EVENTUELLE

Ces différentes étapes de réflexion doivent permettre au maître d'ouvrage de préciser les éléments essentiels à la définition de son projet : volume de stockage, taille des cellules, différentes fonctions, contrôles, performances des appareils, produits stockés, mode de conservation...

Avant d'engager les discussions avec les spécialistes de la construction de silos (bureau d'ingénierie, entreprises spécialisées...) pour choisir les différentes technologies et parvenir à un projet détaillé, il lui restera encore à noter les contraintes extérieures dont il est nécessaire de tenir compte pour la réalisation du projet :

- contraintes d'ordre climatiques (vents dominants, hygrométrie de l'air, température maxima et minima, neige, pluviométrie..)
- données géologiques : — qualité mécanique des sols,
— hydrologie,
— risque sismique.
- données réglementaires : — réglementation technique sur la construction
- réglementation urbanistique (permis de construire, insertion dans le paysage...)
- réglementation relative à la sécurité (étude de risque, étude d'impact...)
- réglementation relative à l'environnement (émission de poussières, bruit).

DU

SOCEA

SOCIÉTÉ EAU ET ASSAINISSEMENT

B.P. 121

51, avenue Allal- Ben Abdallah

RABAT

**BÉTON CENTRIFUGÉ PRÉCONTRAINTE CONDUITES FONTE
DES FONDERIES PONT - A - MOUSSON ET ACCESSOIRES**

Stock Level Prediction for Grain Storage

M.P. Douglass

Abstract

This paper describes a method for determining the optimum volume for a grain store by means of prediction of stock levels and of crop movements into and out of store. The data required for these predictions is described including historical data such as meteorological data, and predictive data such as expected grain yields, harvest rates and areas. Predictive data also includes demographic data used to estimate volume requirements together with rates of usage and store depletion. The paper describes the use of the data to construct maximum store unit volume requirement charts showing the maximum volume to be stored, total volumes in store at any time during the storage period and the minimum level of stock in store. The paper also points out the need to use predicted changes in moisture content and possible storage losses in order to determine future volumes accurately.

Prediction du volume de stockage céréalier

Cet article décrit une méthode de calcul du volume optimum d'un magasin céréalier par moyen de prédiction des niveaux et des déplacements des stocks. Les données nécessaires a ces prédictions — renseignements météorologiques, rendements céréaliers attendus, vitesse de la récolte, régions exploitées — sont toutes décrites. En plus, il faut tenir compte des données démographiques employées dans l'estimation du volume du magasin ainsi que du taux d'épuisement des stocks. Ensuite, cet article décrit l'élaboration, par moyen de ces données, de graphiques qui indiquent les quantités maximum et minimum de grains à être emmagasinés et le volume total en stockage a n'importe quel moment. Il fait aussi ressortir la nécessité d'utiliser les calculs des variations de teneur en humidité et des pertes en dépôt, dans la plus précise prédiction des volumes futures.

Stock Level Prediction for Grain Storage

M.P. Douglass

Introduction

The ability to predict the level of stocks of grain accurately is a necessary management tool required for the effective operation of any grain store. The reasons for the need for this information fall into two principle categories as follows:

Firstly, in the primary planning of any store, whether it is to be small scale at farm or village level, medium scale, or large scale at merchant, cooperative or parastatal level. A knowledge of the volumes concerned is required to calculate the amount of storage to be provided in any given situation,

Secondly, in the operation of a store it is important to have additional information of in-store crop losses and moisture content changes to be able to give realistic modifiers to convert nominal store stock levels into more accurate values.

This paper examines these two areas, and describes the principle sources and practical application of the accumulated data concerning quantities and volumes of grain.

Store Planning

Firstly then, is the need to determine the likely volume required for the planning of any new store. A further application of the use of this figure will be in any circumstances where an existing store is to be assessed in terms of its ability to meet current and future requirements of capacity.

There are two principle stock level values concerned in this instance in store planning,

(a) the estimated volume of grain which it is anticipated that the store will be required to hold, and

(b) the actual amount that is brought to the store after it is completed.

Whereas the first is a future projection, the second can of course only be determined on a historical basis.

Since the capital cost of a store is a function of its volume, then clearly it is desirable to achieve a designed volume as close as possible to the volume of grain which it will actually store. The greater the difference between these two values, the greater are the cost penalties which will be incurred. If the store is too large and when in use is under utilized, then the cost of storage of the crop that is actually in store will be higher than it would be if the store were full. On the other hand, if the store is not large enough, then there will be potential cost penalties arising from losses from the portion of the crop having to be stored inadequately.

The cost of a store can be expressed either simply in terms of its total cost, or alternatively in terms of the cost per defined unit. The units will usually be either per m³ or per tonne stored although in some cases it may be defined in bags. The use of cost per unit is preferable to using the capital cost since it is easy to compare stores of differing types and volumes on a cost per unit basis.

The data required for the initial planning may depend on the purpose of the store which will be in one or other of two possible categories. This can be either where the store is required to service the output of a known area of crops such as a farm, an agricultural development project or perhaps a local or district store, or alternatively, where the store is required to hold grain brought into an area to serve the needs of a given population. In the first instance the store volume is controlled by the agricultural production factors, whereas in the second instance, the volume is controlled by the population related factors.

$$\text{* Cost per unit} = \frac{\text{capital cost of store}}{\text{designed number of units}} \\ (\text{m}^3, \text{tonnes or bags}).$$

In practice, most stores in developing areas have combinations of both requirements in so far as they will be required to store grain produced locally for local consumption. The difference between local production levels and local consumption requirements will determine whether there is surplus grain to be traded or moved to another area, or whether there will be a deficit requiring extra grain to be moved in from elsewhere. The exceptions to this general point will be either where a store is used solely for commercial purposes, or alternatively where there is no grain production at all, and the store is to be used only as a depot for the supply and distribution of brought in from outside the region.

In some cases, the planning of any grain store will include consideration of the need to dry the crop and the information gathered for planning purposes should reflect that requirement. The data required therefore for a store in the usual situation of needing to accommodate both local production and holding grain for local consumption will be as follows :

a. Meteorological data. In particular relative humidity, temperature and rainfall; normally monthly averages will be available from a meteorological office, but more detailed information can be used if available.

The meteorological data will give an indication of the type of storage that may be possible such as open-air bag stacks. In addition, when combined with other data such as harvest period and typical harvest-time crop moisture contents, will also help to indicate the possible need to dry crops and methods which may be used such as sun drying. Further, it should allow prediction of equilibrium moisture contents.

b. Period of harvest, both the anticipated normal start date and the duration of the harvest. This information is required for any different crops to be stored, as well as for all crops concerned if double cropping is practised.

For each crop, the anticipated volume of harvest divided by the duration of the harvest gives a nominal rate of harvest in terms of tonnes per day. Whereas this figure can be used to help determine store volume as described below, it should not be used as the determining rate in the provision of mechanical handling equipment since that should be designed around expected peak rates of arrival at a store which are likely to be substantially higher than the average nominal rate. Further, it should be pointed out that this average figure will appear to be a fixed rate whereas in practice harvest rates are normally slower at the commencement of harvest, increase towards the middle of the period and then reduce towards the end.

c. Types and varieties of grain to be stored. This can help to determine aspects of the storage to be provided such as the number of cells or individual batches in which the grain is to be stored. Where grain is in bags, then clearly it is possible to create a number of different stacks within a warehouse. On the other hand, where bulk storage is being used, then it will be necessary to provide different cells — bins or silos — for each type of grain, and if required, for different varieties as well.

d. Anticipated yields of crops. Clearly this is related to both the area of crop and to agronomic factors and will be one of the controlling quantities determining the final design volume of the store. Prediction of yields is in the domain of the agronomist or agriculturalist rather than the storage specialist.

e. Anticipated moisture contents of crops at harvest. This factor will only normally be predictable in situations where weather patterns and crop maturity stages are themselves regular and predictable. Moisture content information will help to indicate the need for drying when taken in conjunction with meteorological data.

f. Volume of crop requiring storage. This figure will largely depend on the primary purpose for

which a store is designed. As pointed out earlier, this can range from being for purely commercial purposes to being required for storage of grain for the consumption of a known population with a combination of purposes being common.

Where the crop is for commercial purposes only, the volume requiring storage is relatively easily determined from the yields and areas as pointed out in (c) above.

On the other hand, where population requirements are also to be considered, this figure is not perhaps always quite so easy to determine. It is derived from two main figures :

(i) the population being served by the store. This may range from a constant and settled population in towns, villages and farms, to a floating population, either because it is a migrant population, or because of refugee problems. In the latter case, it may only be possible to estimate the requirements of the store on the basis of a reasoned guess.

(ii) the level of grain to be provided per head of the population. Again this is variable and recommendations depend on factors such as age, employment of adults, stage of lactation of mothers with babies, differences in crop composition etc. (Lathan 1979). An analysis of the population may be time consuming and even then of dubious accuracy and in practice it is sensible to allow an average figure of 400 g of cereals per head per day. (ODNRI 1987). It is therefore possible to calculate the requirements for periods other than a year.

The combination of these figures will therefore give the total crop that will need to be stored over a definable period. As will be seen below, this is not necessarily the amount of grain that will need to be stored at one time.

g. Dispatch period (s) from store. For a commercial store in a totally free market situation, this is likely to be dependant on current market prices, and difficult to predict other than in broad terms. On the other hand, a cooperative or perhaps parastatal store serving a more predictable requirement, will normally have a far more predictable time and time and rate of output. For example, it may be required to release grain on a regular basis for dispatch to a mill and both the volume to be dispatched and the period over which the dispatch will take place can be predicted with a good degree of certainty.

Sources of date

The sources of data concerned with all of these factors described above will come from a number of sources. These may include any or all of the following :

a. Historical records. These will be records of a range of previous events such as factors relating to harvests, for example volumes, timing, rates and moisture contents, as well as factors concerning dispatch from store such as pattern of demand, price patterns etc. Some of this data may be available from official records, but other sources may be needed such as farm records and mill records and sometimes human memory.

b. Accumulated statistics. In particular, meteorological data and population data will need to be derived from this source; this will often be in the form of official records.

c. Forward planning and projections. Inevitably these figures will be derived from a range of different sources, and will reflect differing levels of accuracy. In some cases a projected figure can be closely estimated such as building costs whilst other figures may be a balanced estimate based on experience such as changes in value of a crop over a period in the future. In such a case unexpected events can render the original estimate highly erroneous. Other examples of figures which may need to be estimated may be concerned with items such as dispatch of crop from store to processors, estimates of holding crops for improved market prices and changes in expected yields of crops brought about by improved varieties and agricultural practices.

Data in this category is likely to be derived from consulting with a range of specialists or personnel concerned with particular factors. These will include agronomists or crop specialists, agricultural economists, mill operators and perhaps government or parastatal officers with responsibility for food distribution and supplies.

An example of a chart showing the basic meteorological data for a grain storage project is given in Figure 1. In addition the figure also has the harvest periods of two crops added to it together with the dispatch periods of the crops from store. The data shown is based on a specific agricultural development project, but has been modified for illustrative purposes. A conclusion that can be drawn from this information is that in all probability some form of drying is likely to be required for crop 2, although it is not necessarily required for crop 1. With knowledge of the volumes of the crops concerned, dryer requirements can be calculated.

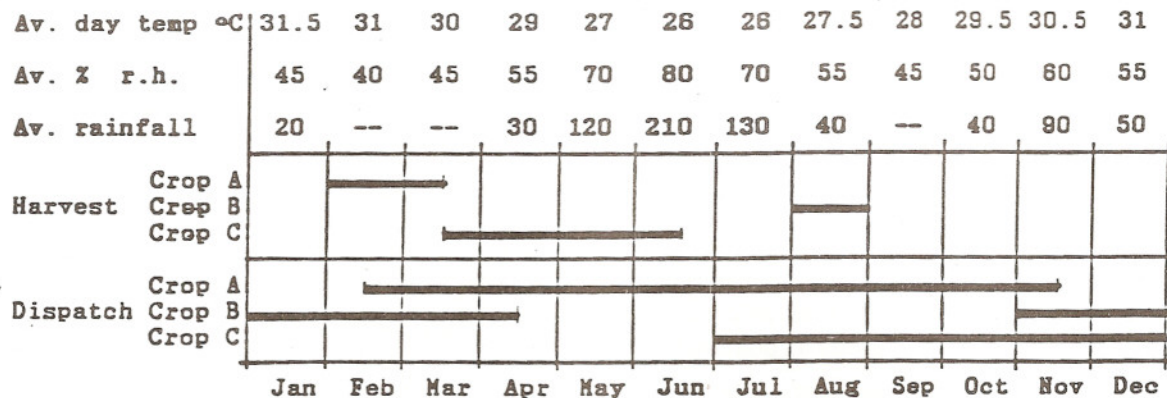


Figure 1. Accumulated Meteorological Data with Harvest and Dispatch Periods

Assuming that a total volume of each crop has been estimated from a range of data such as area of cropping yields, areas of crops, time of harvest and period over which the harvest normally takes place, then a theoretical rate of crop arrival at the store can be calculated, together with the total volume anticipated. Dividing the total crop tonnage by the harvest period will produce a theoretical constant rate of arrival of the crop at the store whereas in practice, harvests will tend to start at a

lower rate as the first of the crop reaches maturity. This rate will then increase to a maximum as the majority of the crop reaches maturity and then decreases again as the last of the crop is harvested. These differing rates are illustrated in principle in Figure 2.

by a given time after the start of harvest, with the total of crop 2 going into store being 2000 tonnes. In practice the data available is likely to be more readily plotted as a series of straight lines than a curve, as shown in Figure 3b. Additional data has been added which can help to determine whether or not drying facilities may be required and if they are, an indication of the volume to be dried and the probable drying rate can also be estimated.

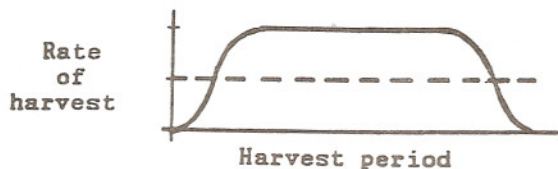


Figure 2. Theoretical and Actual Harvest Rates

Where enough data is available to be able to plot harvesting rates and meteorological data in greater detail, it may be helpful to plot the reception period at a different scale as shown in Figure 3a. Note that the harvest has now been plotted in terms of the volume of the crop which has been harvested

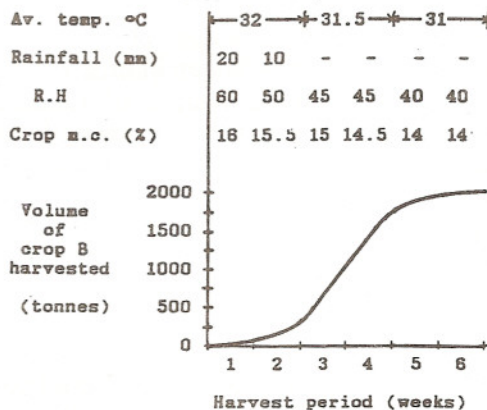


Figure 3a. Accumulated Data over Harvest Period

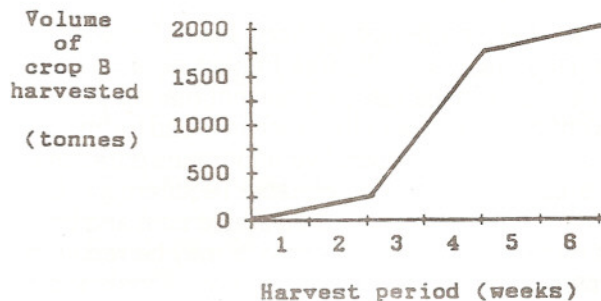


Figure 3b. Straight-line version of Figure 3A

« Problématique du stockage des céréales, légumineuses et tournesol dans la province de Meknès ».

Présenté par : M. Saghir AHMED

Introduction :

La province de Meknès consacre plus de 50 % de sa superficie à la production des céréales, des oléagineux et des légumineuses.

Les rendements moyens en blé tendre sont deux fois supérieurs à la moyenne nationale.

Le rendement en tournesol en est supérieur de moitié.

La province de Meknès est ainsi à l'échelle du Maroc une grande région de production de céréales et tournesol.

I. Productions moyennes :

Spéculations	Superficies Moyennes (Ha)	Productions Moyenne (qx)
Céréales	137.600	2.574.000
Légumineuses	32.500	271.000
Tournesol	35.500	353.000
Total	205.600	3.198.000

(1) Moyenne des 5 dernières campagnes pour céréales et légumineuses et moyenne des 2 dernières campagnes pour tournesol.

Cet effort doit sans doute être accompagné d'une amélioration des structures de stockage et de conditionnement situés en aval, afin de réduire les pertes après récolte, de diminuer le coût du stockage et de la commercialisation et donc de renforcer la compétitivité de ces filières de production.

En effet, bien souvent, la capacité couverte s'avère insuffisante et les organismes stockeurs et particulièrement la SCAM recourent au stockage à l'air libre entraînant un besoin en sacheries, en bâches et en plançons, importantes et coûteuses, occasionnant des pertes très sensibles.

II— Déficit ou besoin en capacité de stockage :

1— Capacité de stockage disponible :

	SCAM (qx)	Agréés /qx)	Total(qx)
Silos	291.000	—	191.000
Magasins	105.000	844.600	249.600
Aires de stockage	381.000	39.200	420.2000
Total	777.000	883.800	1.660.800

2— Capacité de stockage utilisable :

	SCAM (qx)	AGREES (qx)	TOTAL UTILISABLE (qx)
Capacité Totale	Capacité Utilisable Rab. 20 %	Capacité Total	Capacité Utilisable Rab. 35 %
Silos	291.000	232.800	—
Magasins	105.000	84.000	548990
Aires de Stockages	381.000	—	39.2000
Total	777.000	316.800 320.000	48.990 550.000
			867.790 870.000

— Un rabatement de 20 % a été opéré sur la capacité de stockage de la SCAM pour raison de classement des espèces.

— Un rabatement de 35 % a été opéré sur la capacité de stockage des agréés, soit 20 % pour raison de classement des différentes espèces et 15 % en raison des collectes effectuées par ces commerçants dans les autres provinces.

A noter que la province de Meknès compte 12 commerçants agréés et que le stockage effectué par les moulins est momentanément et de ce fait, n'a pu être pris en considération (stockage de type outil : 1 mois d'utilisation).

III. PRODUCTIONS ET QUANTITES COMMERCIALISABLES :

Spéculations	Productions Moy. (qx)	Taux de collecte	Quantités Commercialisables (QX)
— Céréales			
Blé tendre	1.923.000	70 %	1.346.100
Autres Céréales	651.000	10 %	65.100
Total céréales	2.574.000		1.411.200
— Légumineuses	271.000	10 %	27.1000
— Tournesol	353.000	100 %	353.000
TOTAL	3.198.000		1.791.300

Les taux appliqués pour la détermination des quantités commercialisables sont respectivement de 70 % pour le Blé tendre et 10 % pour les autres céréales et les légumineuses, 100 % pour le tournesol.

Les quantités totales commercialisables sur les productions de la province s'élèvent en moyenne à 1.791.300 QX, soit environ 1.791.000 qx.

IV— DETERMINATION DU DEFICIT : (1)

1/ Détermination du déficit global (SCAM + agréés) :

1ère hypothèse :

On considère que :

— Stock de report = 0

— Sorties de report : 0

le déficit global sera :

$$1.791.000 - 870.000 = 921.000 \text{ QX}$$

(1) Pour faciliter un calcul le raisonnement est fait en équivalent blé.

2ème hypothèse :

Dans ce raisonnement, on tient compte aussi bien du stock de report que des entrées et sorties (données mensuelles).

La récolte et la collecte des céréales et des graines oléagineuses sont faites sur une période très limitée de l'année :

Par contre, la commercialisation vers les industries d'aval s'étale sur une année ou plus, ce qui rend donc nécessaire la présence d'une infrastructure de stockage afin d'adapter l'activité d'amont (production) à l'activité d'aval (utilisation).

La méthode proposée consiste à déterminer la quantité maximum prévisible de graines à stocker au cours des campagnes futures en faisant le bilan des entrées et sorties prévisibles et à repérer à quel moment de la campagne elle se produit.

Compte tenu du grand nombre de paramètres intervenant dans la quantité maximale à stocker on se limitera à l'estimation (1) de la quantité maximale mensuelle à stocker et noter à quel moment de l'année, elle se présente.

La confrontation du stock maximum mensuel prévisible à la capacité de stockage utilisable,

permettra de déterminer le besoin en capacité de stockage à prévoir

Ainsi, l'analyse des points de collectes mensuelles prévisibles montre que le stock mensuel le plus élevé est enregistré en août et s'élève à 1.578.000 QX. (2)

Le déficit sera $1.578.000 \text{ QX} - 870.000 \text{ QX} = 708.000 \text{ QX}$.

(1)— Paramètres intervenant sur le volume du stock : collecte échelonnement des apports liés aux différentes dates de récolte, rythme de commercialisation.

(2)— Source

_____ : Etude analyse des besoins en capacité de stockage des graines dans la province de Meknès. Page 42. D. Boissiers et G. Lauraus.
Il a été considéré de même que les agréés n'effectuent pas de stock de report.

— CAS DE LA SCAM DE MEKNES

1) Détermination du besoin en capacité de stockage

au niveau de la SCAM de Meknès :

— Capacité de stockage disponible :

— Calendrier des entrées :

_____ Pour le blé tendre le calendrier prévisionnel des apports a été établi à partir des données moyennes constatées au niveau de la SCAM de Meknès.

Les mêmes valeurs ont été retenues pour le blé dur et l'orge.

La collecte de maïs et des légumineuses : fèves, lentilles et pois-chiche, petits-pois, est encore marginale dans la province de Meknès.

— Calendrier des sorties :

_____ Les produits stockés sont essentiellement commercialisés vers des industries utilisatrices ou la consommation directe.

Capacité de stockage disponible : 320.000 qx.
Stock de report : 125.000 qx

Stock le plus élevé est enregistré en août et s'élève à 710.000 — 320.000 = 390.000 qx

Déficit :

La capacité de stockage à construire est égale à 390.000 qx augmenté de 20 % de cette capacité pour tenir compte des pertes en capacité de stockage pour raison de classement des espèces soit : 78.000,00 qx

La capacité définitive à prévoir sera de :
 $78.000 + 390.000 = 468000,00$ qx

VI. Programme d'équipement :

Pour combler ce déficit, un programme de réhabilitation et d'extension des équipements existants et de construction de nouvelles unités de stockage a été retenu.

Ce programme a pour objectif :

— D'assurer aux installations de la SCAM un bon coefficient d'utilisation (remplissage) en vue d'une meilleure exploitation et tout en tenant compte de la capacité de stockage existante chez les commerçants agréés et les possibilités d'équipement des agriculteurs en moyens de stockage.

— A) LA REHABILITATION DES CENTRES DE STOCKAGE

EXISTANTS

Ces centres comportent déjà un intérêt logistique : équipements valables et emplacements adéquats. Leur adaptation au stockage et à la manipulation en vrac est de nature à permettre leur exploitation rationnelle.

Il s'agit dans cette réhabilitation d'une :

1°/ Remise en état des silos désaffectés du centre de Sidi M'Barek (24.000 qx).

2°/ Installation des sondes thermétriques sur les différents silos (permettant de détecter les élévations de températures dans les cellules, donc de prévoir soit des ventilations, soit des transvasements ou traitements) : programmée 1991.

3°/ Remise en état des circuits de manutention en vue d'améliorer la capacité de réception et de limiter le temps d'attente des SCAM I et SCAM II.

4°/ Installation des nébulisateurs à l'entrée des silos (pour traitement des graines) : programmée en 1991.

—B) AMENAGEMENTS ET EXTENSIONS DES CENTRES

EXISTANTS :

Ces aménagements et ces extensions visent l'augmentation de la capacité de stockage des centres existants pour plus de 200.000 qx. il s'agit de :

— La construction de nouvelles cellules (en extension des anciennes).

— La conversion du stockage en sac. en stockage en vrac des magasins existants après leur consolidation cas de la SCAM I (siège) et SCAM II (ex. Docks-silos) 84.000 qx.

—C) CONSTRUCTION DE NOUVELLES UNITES :

Cette construction est destinée à absorber les 250.000 qx restants par l'implantation de 5 unités viables de 50.000 (qx) chacune au centre des grandes zones de productions de la province.

Les lieux d'implantation en projet sont :

- 1 Unité de 50.000 (qx) à Aïn Jemaâ-Aïn Orma
- 1 " " " à N'Zala de Béni Amar
- 1 " " " à El Hajeb
- 1 " " " à Agouraï
- 1 " " " à Souk Sebt Jahjough.

D— FORMATION DU PERSONNEL DE LA SCAM POUR UNE MEILLEURE EXPLOITATION DES EQUIPEMENTS

E— COUT DU PROJET :

- Aménagement, extension, et réhabilitation : prix de revient d'un quintal stocké : 100 DH/QL (1)
Coût total : $224.000 \times 100 = 22.400.000,00$ dh
- Création de nouvelles unités (magasins) : prix de revient d'un quintal stocké : 200,00 dh (2)

Coût total : 250.000 x 200.00 =
50.000.000.00 DH

Autres équipements et formations :
7.600.000.00 DH

Coût total projet : 80.000.000,00 DH

CONCLUSION :

En guise de conclusion, j'attire votre attention que ce programme important et indispensable, ne peut être réalisé qu'à moyen ou long terme, il est envisagé de lancer dans un premier temps dans le

cadre du Projet Meknès II, les opérations relatives à la réhabilitation et la remise en état des équipements existants et particulièrement la remise en état de la manutention.

(1) et (2) selon estimation faite par D. Boissières.
REHABILITATION 40,3 DH/ql
Unités Niles 107,00 DH/ql

SOCIETE POUR L'EQUIPEMENT HYDRAULIQUE ET INDUSTRIEL



études
fournitures
installation

ROVATTI

- POMPES CENTRIFUGES
A AXE VERTICAL

- POMPES CENTRIFUGES MULTICELLULAIRES

CHARLATTE

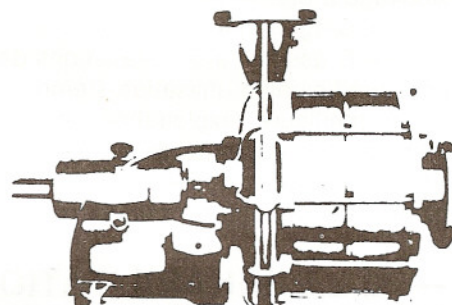
ANTI BELIERS

A.T.M.

- POMPES DOSEUSES
- TRAITEMENT DES EAUX

S.E.H.I

47, rue planquette - casablanca - tél : 24.46.59



 **rovatti**



LE STOCKAGE DES CEREALES A LA FERME

par Messieurs LASSERAN, NIQUET et MONROCQ, Ingénieurs à l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 8, Avenue du Président Wilson — 75116 — PARIS — FRANCE.

Résumé Français

Le stockage des grains à la ferme, s'il ne présente pas toujours un intérêt économique évident pour le producteur de céréales, s'impose souvent à l'agriculteur-éleveur.

Une installation de stockage des grains à la ferme ne se conçoit, d'une façon générale, que pour une durée de stockage assez longue, permettant à l'agriculteur de la rentabiliser.

Elle permet la maîtrise du rythme de récolte. L'agriculteur qui stocke reste maître de sa récolte : il peut bénéficier des avantages accordés par l'organisme stockeur auquel il livre (majorations mensuelles) ou bien vendre lorsque les prix sont les plus intéressants.

L'éleveur qui stocke assure déjà la conservation de sa propre récolte et peut acheter différentes céréales lorsque les prix sont intéressants pour fabriquer ses aliments à moindre coût.

Toutefois, il faut tenir compte dans un calcul de rentabilité de l'immobilisation du capital grain, des charges d'investissement et de fonctionnement de l'installation.

Résumé Anglais : THE STORAGE OF CEREALS ON THE FARM

The storage of grain on the farm, if it doesn't always present an evident economic interest for the cereal producer, is often a necessity for the cattle breeder.

A storage installation for grain at the farm is conceivable in general only for a sufficiently long time, allowing the farmer to profit from his investment.

It allows him to control the rhythm of the harvest. The farmer who stores stays master of his harvest. He's able to benefit from the advantages accorded by the storage firm to which he delivers (monthly increases) or equally well sell when prices are the most attractive.

The breeder who stores has already assured the conservation of his own harvest and is able to

buy different cereals when the prices are attractive to produce his feed at the lowest cost.

However it is necessary to take into account in a calculation of profitability the immobilisation of the grain capital, of the investment charges and the running cost of the installation.

Quelques chiffres en France :

En 1988 avec 18,8 millions de tonnes, le stockage à la ferme représente 38 % de la capacité nationale du stockage.

L'autoconsommation représente, toutes céréales confondues, une quantité moyenne d'environ 10 millions de tonnes par campagne.

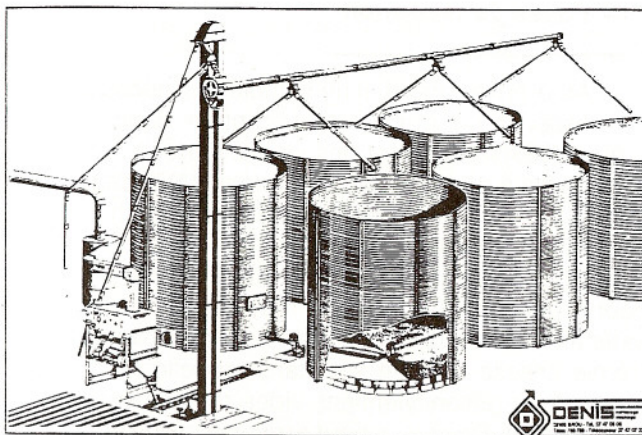
Répartition des modes de stockage :

- « De fortune » (greniers, planchers, dalles bétonnées) : 5,5 millions de tonnes (29 %).
- En cellules : 11,3 millions de tonnes (60 %).
- En cribs pour le maïs : 2,0 millions de tonnes (11 %).

Pourcentage en stockage ventilé :

- 1965 : 17 % du stockage total.
- 1977 : 32 % du stockage total.
- 1989 : 43 % du stockage total.

Description d'une installation de stockage à la ferme



Les différents postes d'une installation de stockage à la ferme sont :

- la réception,
- le pesage,
- le nettoyage,
- la manutention,
- le séchage,
- le stockage,
- la ventilation.

I. RECEPTION

C'est un poste qui est trop souvent négligé lors de la conception d'une installation de stockage fermier, pourtant, il est souvent utile de pouvoir réceptionner rapidement le grain que l'on désire stocker, d'en connaître la masse de façon précise et de pouvoir l'échantillonner facilement pour déterminer les caractéristiques des grains (humidité, température, taux d'impuretés et de brisures, etc...). Un système de pesage s'impose pour connaître avec précision les masses des différents grains afin de gérer ses stocks et faire éventuellement des bilans.

Pour réceptionner rapidement le grain, qu'il soit récolté sur l'exploitation ou acheté à un organisme stockeur, la fosse de réception est indispensable pour s'affranchir du débit du circuit de manutention.

Après un échantillonnage bien représentatif des différents lots, l'indicateur d'humidité est un auxiliaire indispensable pour apprécier l'aptitude au stockage du grain.

— Fosse de réception

Au premier abord, il ne semble pas nécessaire de posséder un moyen de réception rapide des grains. Il existe en effet des vis élévatrices munies d'une trémie de réception. Leur débit est assez lent et il faut tenir compte de l'organisation du chantier de récolte qui ne doit souffrir aucun retard, ou de la durée de livraison par camion qui doit être la plus courte possible. Le meilleur moyen pour arriver à satisfaire ces deux exigences est de disposer d'une trémie creuse dans le sol, dans laquelle les véhicules de livraison viennent vider rapidement leur chargement. De plus, il peut arriver que des pannes dans l'installation arrêtent les moyens de manutention. La capacité de la fosse est alors employée comme tampon pour recevoir du grain pendant un certain temps.

— Accès à la fosse :

La largeur minimale stabilisée de la voirie conduisant à la fosse doit être de 3 mètres (gabarit routier : 2,50 m).

La hauteur minimale de passage nécessaire est de 4 m (attention aux arbres, porche de ferme, lignes électriques et téléphoniques, etc...).

Si la fosse est située sous hangar, la hauteur minimale pour benner sans difficulté est de 8 m pour un semi-remorque.

Prévoir une aire de dégagement suffisante devant la fosse de réception pour que la manoeuvre des véhicules s'effectue dans de bonnes conditions. Lorsque la fosse est extérieure, il est indispensable de prévoir une couverture amovible escamotable par un treuil ou par un système coulisant sur rails.

— Capacité de la trémie :

Il est logique de penser que la capacité de la trémie soit proportionnelle à celle de l'installation de stockage, au débit de récolte de la ou des moissonneuses-batteuses, et à la connaissance des camions livrant les produits. Cependant, il existe un volume minimum au-dessous duquel il ne faut pas descendre qui est de l'ordre de 8 m³ soit 60 quintaux de capacité.

Dans les installations importantes, il existe 2 choix possibles :

- Soit prévoir une trémie dont la capacité correspond à 3 heures de récolte de moissonneuse-batteuse, mais les limites de cette solution sont rapidement atteintes car les dimensions de la trémie nécessaire atteignent des valeurs importantes.

- Soit, et cela est souvent préférable, avoir une trémie ayant un volume égal à celui du véhicule le plus important assurant le transport du grain. Dans ce cas, le système de manutention devra être capable d'assurer un débit horaire au moins égal aux possibilités de récolte de la ou des moissonneuses-batteuses.

— Forme de la trémie :

On a toujours intérêt à enterrer la trémie de sorte que son emplacement ne constitue ni une gêne, ni un obstacle. La forme la mieux adaptée est celle d'une pyramide inverse. Trois solutions sont à envisager en fonction du système de manutention assurant la reprise du grain. Dans le cas de reprise par vis, la pyramide est régulière, c'est-à-dire que

son sommet est placé dans l'axe du centre de la base. Dans le cas de reprise par élévateur à godets, la pyramide est irrégulière, une de ces faces est verticale pour amener le grain au fond d'un puits contenant l'élévateur. Dans le cas de reprise par transporteur à chaîne ou à bande caoutchouc la base est rectangulaire et la trémie en V.

II. PESAGE

S'il n'est pas courant en exploitation céréalière de peser les masses de produit stocké, cela le devient plus dans le cas des céréaliers-éleveurs qui ont à gérer un stock souvent plus disparate en ce qui concerne les types de grains conservés et dont la rotation est plus rapide et continue tout au long de l'année.

Quatre types de matériel peuvent être utilisés pour peser les lots de grains à la ferme, il s'agit du pont-basculé, du pèse-essieu, de la bascule de circuit et de la trémie peseuse.

III. NETTOYAGE

Il est indispensable de bien nettoyer le grain provenant de la moissonneuse-batteuse, que ce soit pour le livrer directement à l'organisme stockeur, pour le sécher et pour le conserver.

Dans le cas de céréales à paille, cette opération a pour but d'enlever les « verdillons » et autres déchets (balles, paille, etc...) qui nuisent à leur bonne conservation, tout en permettant d'obtenir une meilleure présentation et un poids spécifique plus élevé. Pour le maïs et les oléagineux le pré-nettoyage permet d'éliminer toutes les parties humides souvent de grosses dimensions (morceaux de tir, rafles, siliques, etc...) avant le passage au séchoir. On réduit ainsi considérablement les risques de bourrages, donc d'incendies, et dans le même temps on diminue le coût du séchage en retirant les déchets plus humides que le grain.

Pour ces opérations, il existe un certain nombre d'appareils qui vont du simple pré-nettoyeur par ventilation du flux de grain au nettoyeur-séparateur travaillant « façon semences ».

Les équipements actuellement disponibles sont les suivants :

— pré-nettoyeur-épurateur avec ventilation du flux de grain pour un nettoyage sommaire (enlèvement des parties légères).

— épurateur ou émotteur à tambour pour un pré-nettoyage des grains avant séchage éliminant les particules légères et les grosses impuretés humides.

— pré-nettoyeur circulaire ou à turbine, élimi-

nant les particules légères (balles, paille, follicules de maïs) efficace sur grains secs.

— nettoyeur-calibreur à tambour rotatif pour le pré-nettoyage du maïs humide et le nettoyage-calibrage des céréales à paille et des oléagineux.

— nettoyeur-séparateur à grilles inclinées pour un nettoyage assez poussé de tous les grains, ainsi que leur calibrage.

IV. MANUTENTION

Pour la manutention des grains en vrac, il existe plusieurs systèmes dont le choix dépend du plan de transport (vertical, horizontal ou oblique), du débit et de la polyvalence de l'installation. Dans tous les cas, il est important que le système retenu respecte au maximum l'intégrité physique du grain. Pour tous ces équipements, les matériaux utilisés évoluent et de nouveaux apparaissent : aciers peints, aciers dégraissés peints avec passage au four, acier laqué, acier galvanisé, acier zingué, inox et même PVC pour certains éléments. La durée de vie du matériel de manutention dépend des quantités de grain véhiculé, mais aussi de la protection contre la rouille choisie par les fabricants. Dans tous les cas, les traces de rouille doivent être neutralisées rapidement. Pour un bon fonctionnement du chantier de récolte, il faut prévoir un débit de manutention supérieur de 1,5 fois celui de la moissonneuse-batteuse.

1. Gravité

Le grain en masse est un matériau granuleux qui se comporte comme un liquide. Sous l'action de la pesanteur, il chute verticalement s'il n'est pas retenu à la partie basse. Il peut aussi glisser sur des parois obliques si elles ont un angle de 30° par rapport à l'horizontale quand il est sec et de 45° s'il est humide.

Avantages :

C'est le procédé de manutention le plus simple et le plus économique qu'il faut exploiter chaque fois que cela est possible dans un circuit de manutention.

Inconvénients :

Lors du remplissage des cellules le grain subit un choc lors de l'impact sur la paroi verticale ou sur le fond. Si le grain est très sec ou s'il a été mal traité au cours du séchage, le taux de grains cassés augmente avec la formation de « fines » (poussières de farine); ceci est néfaste à une bonne conserva-

tion des grains. De même lors du remplissage d'une cellule lorsque l'arrivée du grain s'effectue toujours à partir du même point, il se produit « un cône de remplissage » : c'est une zone où le grain est plus tassé et plus concentré en brisures que le restant de la cellule, et donc la ventilation sera peu efficace, créant ainsi un lieu à risque d'échauffement du grain. Des systèmes simples permettent de réduire ces inconvénients, il s'agit d'une simple tôle fixe au bout du tube de descente du grain qui éclate le flux grain, ou bien d'un cône pointe en haut placé dans le flot de grain qui éparpille le produit.

2. Vis

Les vis d'Archimède sont des vis de manutention qui utilisent un filet hélicoïdal en rotation sur lui-même. Il en existe plusieurs sortes : vis sous tube, vis en auge (forme U), vis à pas variable (extraction de cellule)...

Vis sous tube : **Avantages :**

La vis sous tube simple est très robuste. Elle peut rendre de multiples services du fait de sa mobilité et de son utilisation sous différents angles. Cet appareil est d'un encombrement réduit, d'un montage facile; son fonctionnement est relativement silencieux lorsqu'il est en charge. C'est un équipement idéal pour les courtes distances, qui s'insère bien dans un circuit déjà existant.

Inconvénients :

Ce matériel travaille assez mal avec du grain humide (écrasement du grain, bourrages). De même, il faut éviter de manutentionner des gros grains comme le maïs, mais plus encore les pois, car la casse peut être importante si ces grains sont très secs. La vidange intégrale est difficile à obtenir donc ce matériel est à proscrire pour la manutention des semences, lorsque l'on a besoin d'isoler parfaitement les lots.

Vis en auge :

Contrairement à la vis sous tube, elle est généralement fixe. A débit identique, elle est d'un encombrement plus important et d'un prix plus élevé que la vis sous tube. Elle en possède sensiblement les mêmes avantages et inconvénients, toutefois elle ne supporte qu'une très faible inclinaison.

Vis par vidange intégrale d'une cellule ronde :

Il existe une vis nue qui se place dans la cellule, en fin de la vidange naturelle du grain, au niveau du boîtier central de reprise. Dès le démarrage, la vis s'enfonce dans le grain en ramenant celui-ci au centre de la cellule. Puis au fur et à mesure de la vidange, la vis progresse tout en déblayant le grain qui s'éboule. Lorsque la vis a effectué un tour complet, la cellule est entièrement vide.

Avantages :

Ce système permet la vidange, intégrale des cellules rondes, seul un dernier coup de balai est nécessaire pour qu'il ne reste plus un grain. Il évite d'avoir à creuser un cône de vidange dans le sol pour y loger le pied d'une vis de reprise.

Inconvénients :

Il est impératif d'équiper les cellules d'un faux-fond perforé pour la ventilation, afin de loger la vis de reprise du grain, cela entraîne une baisse de la capacité des cellules et une augmentation du coût de l'installation.

3. Elévateurs à godets

Principe :

Il est composé d'une courroie de tissu nylon recouverte de caoutchouc, sur laquelle sont fixés des godets, et qui tourne entre deux poulies dans deux conduits métalliques.

Il sert à élever verticalement le grain, il est obligatoirement fixe. L'alimentation de l'appareil peut s'effectuer de 2 façons :

— par la jambe descendante : les godets plongent dans la masse de grain contenu dans le pied de l'élévateur. Ce principe est le plus utilisé, il présente l'avantage de permettre un remplissage complet des godets, mais peut faire augmenter le taux de brisures lorsque l'on manutentionne un produit fragile.

— par la jambe montante : les godets sont chargés lorsqu'ils se présentent devant le gousset d'entrée, mais dans ce cas, ils sont moins bien remplis.

Il existe maintenant des modèles qui peuvent être alimentés indifféremment sur l'une ou l'autre jambe.

C'est un appareil d'un encombrement réduit et d'un montage facile; il est constitué d'éléments démontables et interchangeables, de ce fait, sa longueur peut être facilement modifiée.

Ce matériel spécialisé dans le transport vertical est peu exigeant en énergie, il demande 2 à 2,5 fois moins de puissance qu'une vis élévatrice de débit équivalent.

Il peut transporter le grain à des hauteurs très importantes (plusieurs dizaines de mètres).

Inconvénients :

Pour des produits fragiles, tels que pois ou semences, il faut diminuer les vitesses de rotation des élévateurs pour limiter la casse au maximum.

C'est un matériel assez coûteux dont le prix est encore augmenté lorsqu'il faut prévoir un puits dans le sol pour loger le pied en cas de reprise du grain dans une fosse de réception.

A partir de la même carcasse, il est possible de doubler le débit d'une élévateur en changeant le type ou la disposition des godets et la tête de distribution. Les godets en tôle ou en polyéthylène peuvent alors être un type « sans fond », « doubles » ou « starco »; la tête d'élévateur doit avoir un profil étudié pour permettre l'évacuation d'une quantité de grain plus importante. Attention, lorsque l'on augmente le débit, il faut augmenter la puissance du moteur au moins dans la même proportion.

4. Convoyeurs à bande

Il est aussi appelé transporteur à bande ou bande transporteuse. Ce matériel est composé d'une bande caoutchouc extrêmement résistante, circulant sur des rouleaux positionnés en V et montés sur roulements à billes étanches.

L'alimentation s'effectue par une trémie mobile, centrant le grain sur la bande. Le grain est évacué soit par une sortie en bout, soit par un chariot déverseur mobile. Celui-ci, d'une forme très étudiée, permet de diriger le flot de grain d'un côté ou de l'autre de l'appareil, quel que soit son emplacement sur la bande. Il peut être déplacé électriquement ou à l'aide d'un système de cablerie à partir du sol. La vitesse de la bande est de l'ordre de 1,5 m/s (0,5 m/s minimum à 2,5 m/s maximum).

Avantages :

C'est un appareil très doux, qualité très estimée lorsque les produits à transporter sont fra-

giles (pois, semences). Sa vidange rapide et intégrale est très appréciée par les agriculteurs multiplicateurs de semences.

La puissance nécessaire est faible par rapport au débit et à la longueur (environ 1 ch pour transporter 300 q/h à 20 mètres). Le niveau sonore atteint est très faible lorsque le matériel est en bon état.

Le convoyeur à bande peut facilement fonctionner dans les deux sens lorsqu'il est utilisé en vidange de cellules et que les sorties sont en bout.

Inconvénients :

L'encombrement important du chariot verseur peut rendre ce système de manutention difficile à installer dans certaines charpentes. Cet appareil émet plus de poussières qu'un transporteur à chaîne ou une vis en auge.

5. Transporteur à chaîne

C'est un appareil de manutention par une chaîne sans fin, munie de barrettes transversales, circulant lentement dans un coffre de section rectangulaire et entraînant le grain en masse compacte vers les sorties. Dans le transporteur à chaîne simple auge l'alimentation peut s'effectuer sur le dessus ou latéralement à l'appareil alors que dans celui à double auge elle se fait exclusivement par le dessus.

Avantages :

La faible section est le principal avantage du transporteur à chaîne. A débit égal, il a une section 7 fois moins importante qu'un transporteur à bande et 2 fois moins qu'une vis. Comme la vis, il peut être utilisé en position inclinée grâce à l'utilisation de barrettes adaptées. Il n'émet pas de poussière et ne provoque pas de casse du grain. De par sa conception, sa structure métallique le rend autoporteur. Il reste toujours propre grâce à sa vidange intégrale.

Inconvénients :

La puissance nécessaire pour transporter 300 q/h à 20 mètres est de 2ch; soit le double de celle d'un convoyeur à bande. Ce matériel est assez bruyant surtout lorsqu'il n'est pas alimenté de façon correcte.

6. Transport pneumatique

Dans les cas difficiles, où il n'y a pas d'accès et pas de possibilité d'écoulement gravitaire du

grain, ni de mise en place de moyens de manutention classiques, il reste le recours au matériel pneumatique. Il s'agit d'une soufflerie servant à aspirer le grain et à le refouler par l'intermédiaire de tuyauteries. Le débit d'un appareil pneumatique diminue d'un tiers lorsqu'il fonctionne à 45° par rapport à l'horizontale et de deux tiers lorsqu'il aspire ou refoule à la verticale. Pour un type d'appareil donné, lorsque ce dernier fonctionne à l'horizontale, son débit baisse de 15 % quand on double la longueur du circuit.

Avantages :

Ce matériel est en général déplaçable surtout lorsqu'il est fixé sur l'attelage 3 points d'un tracteur et peut être utilisé en différents endroits d'une installation. Il permet de vider une cellule difficilement accessible par la manutention classique. Il peut être actionné par un moteur électrique ou par la prise de force d'un tracteur. Il peut dans ce dernier cas être utilisé dans des hangars dépourvus d'alimentation électrique de forte puissance.

Inconvénients :

A débit et à longueur identiques, la consommation électrique est beaucoup plus importante que celle d'un système mécanique classique. A l'horizontale et à débit identique, il consomme 4 fois plus qu'une vis sous tube. Ce type de manutention est assez traumatisant pour les grains aussi n'est-il pas recommandé pour les gros grains (maïs, pois, soja, etc...).

V. SECHAGE

Voir communication de M. LASSERAN de l'ITCF.

VI. STOCKAGE

Préalablement à la réalisation d'une installation de stockage, il convient de se poser un certain nombre de questions et d'y apporter une réponse :

— quelle est la quantité totale de céréales à stocker

— quelles sont ces différentes céréales et leurs variétés ?

— quelle est la place disponible pour le stockage ? Y a-t-il déjà un bâtiment existant ?

— quel est le budget disponible ?

— quelle est la nature du sol et du sous-sol ?

C'est uniquement après avoir répondu à ces quelques questions que l'on pourra se décider sur un type et une configuration de stockage bien précis.

La quantité totale à stocker ainsi que les différentes céréales et leurs variétés déterminent le

nombre et la capacité des cellules. La place disponible permet de choisir le type de cellule. La nature du sol et du sous-sol guide le choix du système de vidange et de ventilation (enterrée ou sur le sol). Un des problèmes importants à résoudre avant de choisir le stockage est celui de l'humidité. Il faut éviter les remontées d'eau par le sol, pour assurer une bonne conservation des grains. Il est conseillé d'effectuer un drainage autour du bâtiment et de poser un film plastique avant de couler la dalle.

Pour une capacité de stockage déterminée et une même hauteur, il faut une surface au sol supérieure de 50 % pour des cellules rondes par rapport à celle nécessaire pour des cellules carrées ou rectangulaires. Dans tous les cas, il vaut mieux prévoir plusieurs petites cellules à une seule grande, ceci afin de réaliser un classement par variété.

On peut classer le stockage en deux catégories :

— stockage classique ou cellules

. cellule cylindrique en tôle ondulée,

. cellule polygonale en tôle plissée,

. cellule carrée ou rectangulaire en tôle plissée

ou type pal-planche.

— stockage en case pour aménagement de bâtiments :

. cloisons mobiles en béton ou métalliques en tôle plane,

. cloisons en bois ou en parpaings.

1. Stockage classique en cellules.

Cellule cylindrique ou en tôle ondulée :

C'est le stockage qui est le plus couramment rencontré car il est le moins coûteux. Les tôles ondulées cintrées sont obtenues à partir de panneaux de 1 m de haut sur 2 m de long et d'une épaisseur variant de 12,5/10° de mm pour le bas à 7,5/10° de mm pour le haut. Ces panneaux s'assemblent par boulonnage pour constituer des viroles qui se superposent en hauteur avec joint d'étanchéité. L'ensemble est maintenu par des renforts verticaux boulonnés sur les panneaux et scellés ou fixés dans le sol.

Ces cellules généralement sans toit peuvent en être équipées moyennant un renforcement et une augmentation du nombre de renforts verticaux pour être implantées à l'extérieur. Dans ce cas apporter une attention toute particulière à la pose des joints d'étanchéification à l'eau; prévoir autour de la cellule une partie cimentée en pente pour éviter la stagnation d'eau de pluie qui risque d'en faire rouiller la base. Pour la ventilation, on peut utiliser le faux-fond perforé qui malheureusement est

cher ou à défaut un réseau de gaines perforées judicieusement réparties qui donne aussi d'excellents résultats. Il existe pour ce type de cellules des accessoires comme : trappe de visite, échelle à crinoline, etc... qui facilitent le travail et assurent la sécurité lors de l'exploitation du matériel.

Pour les cellules équipées d'un faux fond perforé, il existe une vis de reprise amovible qui se fixe au centre du tas lorsque l'écoulement gravitaire du grain ne se réalise plus naturellement. Elle permet la vidange intégrale sans intervention manuelle...

Cellule cylindrique en panneaux de fibres de bois :

Pour des petits stockages et des hauteurs relativement faibles (3 à 4m maximum), l'agriculteur peut préparer et monter lui-même des cellules bon marché en panneaux de fibres de bois de 5 mm d'épaisseur boulonnés entre eux. Au-delà de 250 quintaux un renforcement de la base est nécessaire par feuillards métalliques ou doublage par des panneaux de même épaisseur. Il est indispensable de monter ce type de silo à l'abri de l'humidité sur dalle en béton, de les remplir et de les vider par le centre pour éviter tout risque de basculement.

Cellule polygonale en tôle nervurée ou pliée

La tôle utilisée est soit galvanisée, soit peinte, les panneaux sont pliés sur leur bordure et assemblés par boulonnage extérieur. Les bords nervurés servent de montants verticaux de renforts. Le montage est très facile pour une personne seule, le boulonnage étant entièrement à l'extérieur de la cellule. La ventilation s'effectue à l'aide de gaines perforées. Pour la vidange, il y a obligatoirement une intervention manuelle pour évacuer la totalité du grain...

Cellule carrée ou rectangulaire :

Pour ce genre de cellule, il existe deux formes de panneaux différentes :

— panneaux peints nervurés et soudés sur des cadres rigides profilés. Ils se montent par boulonnage extérieur.

— panneaux peints renforcés par pliage dans le sens horizontal et par soudure sur deux montants verticaux (panneaux type palplanche). Dans les deux cas, des tirants de renforcement sont nécessaires dans les angles. Avec ce type de cellule, il est possible de concevoir des formes de stockage variées par juxtaposition de cellules (cf. schéma ci-contre), permettant ainsi d'utiliser la place disponible au maximum. Bien que plus onéreuses que les cellules cylindriques, elles sont intéressantes dans certains cas où les parois de type palplanche peuvent constituer l'armature d'un bâtiment qu'il

suffit alors de couvrir. Elles permettent alors de réaliser l'économie d'un hangar toujours coûteux.

Pour les 3 types de cellules que nous venons d'évoquer, il existe des versions avec fond conique incorporé. Cela résout le problème de la vidange intégrale, mais pour une hauteur de stockage donnée il y a une perte de volume importante.

2. Stockage en case.

Cloisons mobiles en métal ou en béton

Ces cloisons amovibles permettent de constituer des cases de dimensions variables et modifiables facilement d'une campagne sur l'autre en fonction des besoins. Le chargement et la reprise s'effectuent par vis. La ventilation se pratique à l'aide de gaines perforées posées sur la dalle. A cause de la grande embase des cloisons, le sol doit être parfaitement horizontal pour obtenir des parois bien verticales.

Cloisons en bois ou en parpaings

Ce type de stockage, généralement confectionné par l'agriculteur lui-même, ne peut guère aller au-delà de 3 mètres de hauteur. Pour se prémunir de l'humidité pouvant provenir des murs, il est conseillé de poser un film plastique sur ces derniers.

Si on utilise les murs extérieurs du bâtiment comme parois des cases, il faut s'assurer de leur solidité. Dans le doute prévoir un renforcement de ceux-ci en coulant un béton avec treillis métallique entre la paroi existante et un coffrage rapport en contre-plaqué, de 25 mm d'épaisseur qui sera réutilisé comme cloisons internes. Ces séparations entre cases peuvent être en parpaings de 50 x 20 x 20 cm, en madriers de 80 x 120 mm retenus par 2 fers IPN de 100 mm ou par du contre plaqué fixé sur des poteaux métalliques en IPN de 60 mm ou des poteaux en bois de 80 mm de côté scellés tous le 50 cm.

Boisseau de chargement

Lorsque le stockage est utilisé pour conserver les céréales avant la vente, il faut envisager la mise en place d'un boisseau de chargement camion. Cela permet de ne mobiliser le camion, qui vient chercher le grain d'un minimum de temps. Les durées d'une heure voire plus pour charger un véhicule ne sont plus acceptées par les transporteurs.

On trouve deux types de boisseaux :

— boisseau cylindrique en tôle ondulée,

— boisseau carré ou rectangulaire en tôle plane ou du type palplanche.

Ils permettent le chargement de véhicules routiers, la hauteur sous le point de vidange étant de 4,20 à 4,50 m suivant les fabricants. Ils sont disponibles en version intérieure ou extérieure avec toiture. Les capacités varient de 200 à 500 quintaux.

Les cribs

Le crib est un mode de stockage encore fréquemment utilisé dans certaines régions (Sud-Ouest, Eure-Et-Loir, etc...).

C'est une alternative au séchage artificiel et au stockage classique du maïs.

VII. LA VENTILATION

Au cours du stockage, les grains même s'ils sont aux normes commerciales d'humidité respirant, ils perdent donc du poids et leur qualité peut être altérée. Cela peut se traduire par une diminution de l'aptitude à la panification pour le blé tendre, une baisse du pouvoir germinatif pour les orges de brasserie, une dégradation de la qualité amidonnière pour le maïs, un développement de moisissures ou des pullulations d'insectes. Tout ceci peut être évité en refroidissant le grain, le principal remède contre tous ces dégâts est la ventilation de refroidissement.

1. Ventilation de refroidissement

L'objectif essentiel de la ventilation est le refroidissement du grain et son maintien à une température suffisamment basse pour assurer une bonne conservation, accessoirement, le but recherché peut être un léger séchage. La ventilation d'une masse de grain stocké a deux effets simultanés, mais dont la réalisation complète a des durées très différentes.

Dans un premier temps, relativement court, la ventilation abaisse la température du grain jusqu'à celle de l'air, c'est l'effet de refroidissement. Dans un deuxième temps, si la ventilation se poursuit suffisamment longtemps l'effet obtenu peut être un léger séchage. Dans un cas comme dans l'autre, les phénomènes physiques commandant les échanges de chaleur et d'eau découlent des lois d'équilibre entre l'air et le grain.

Le premier équilibre se produit très rapidement en ventilation : il concerne la température du grain. Avant la ventilation, elle est plus élevée que celle de l'air, après ventilation elle se stabilisera à une valeur légèrement supérieure, égale ou inférieure à la température de cet air de ventilation. Le résultat final dépend de l'humidité relative de l'air :

— Si l'hygrométrie de l'air est supérieure à 75 % on aboutit à un sous-refroidissement.

— Si l'hygrométrie est égale à 75 % le refroidissement est égal à la différence de température entre l'air et le grain au départ.

— Si l'hygrométrie est inférieure à 75 % il y a un sur-refroidissement du grain.

Le diagramme ci-après, établi à partir de tous ces paramètres, précise les conditions dans lesquelles la ventilation est la plus efficace.

Pour la réalisation de cet équilibre de température entre l'air et le grain, les besoins en air sont limités : de 800 à 1500 m³ d'air par mètre cube de grain quelle que soit l'ampleur du refroidissement.

Le deuxième équilibre est celui concernant l'alignement de la teneur en eau du grain sur l'humidité relative de l'air de ventilation. Cette évolution est très lente, pour la réalisation de ce deuxième équilibre, les besoins en air sont beaucoup plus importants, de l'ordre de 50.000 à 80.000 m³ d'air par m³ de grain. Il faudrait donc de 150 à 300 jours de ventilation continue pour sécher le grain de 2 à 3 points.

Lors d'une ventilation, c'est la partie inférieure de la cellule (par où arrive l'air) qui est refroidie la première complètement. Juste au-dessus s'établit une zone de transition, dans laquelle se fait le refroidissement, qui monte très lentement. Le sommet du tas ne commence à refroidir que lorsque la zone de transition l'atteint, il n'est complètement refroidi que lorsque la zone de transition l'a complètement traversé.

On ne doit arrêter définitivement la ventilation que lorsque la température de la couche supérieure du grain devient voisine de la température de l'air (écart inférieur à 2 ou 3° C).

Conduite

Le grain stocké perd du poids parce qu'il respire et cela d'autant plus qu'il est plus chaud. Parallèlement, la chaleur dégagée par la respiration chauffe le grain qui va respirer encore plus, donc s'échauffer encore plus et ainsi de suite (voir chapitre : mécanismes d'altération des grains).

L'expérience montre qu'il faut maintenir le grain en dessous de 12° C pour une bonne conservation. A la moisson, le grain est presque toujours chaud (25 à 35° C suivant les conditions de récolte). Comme il conduit mal la chaleur, un tas de grain ne peut se refroidir tout seul lorsque la température extérieure baisse, donc pour refroidir il faut ventiler.

En cas de stockage de longue durée, au printemps et en été, la température de la masse de grain s'élève lentement. Pour éviter qu'elle dépasse 12° C, le meilleur moyen consiste à abaisser la température du lot de grain pendant l'hiver vers 10° C pour un stockage inférieur à 6 mois et vers 5° C

pour une conservation d'un an. Pour refroidir, il faut faire circuler de l'air plus froid que le grain, dans toute la masse de grain.

On ventilera de préférence la nuit :

- l'air est généralement plus froid que le jour,
- le prix de l'électricité est plus bas (tarif EDF — heures creuses),

Mais il n'est pas possible de ramener en une seule fois du grain de 30 ou 35° C à 10° C car en été la différence de température entre grain et air n'est généralement jamais aussi importante. Il faut donc procéder par étape ou dose de ventilation :

— dès la récolte, une première dose de ventilation abaisse la température du grain autant que le permet la température de l'air (souvent entre 15 et 20° C),

— une deuxième dose de ventilation fin septembre ou début octobre amènera le grain à une température située entre 10 et 15° C puis une autre au début de l'hiver entre 5 et 10° C. Pour un stockage de longue durée, une quatrième dose effectuée par temps de gel permettra de refroidir le grain jusqu'à 0 à 5° C.

Dans la pratique une dose de ventilation ne peut être appliquée qu'en plusieurs nuits. Interrompre la ventilation pendant la journée est sans conséquence nocive, tant que la durée totale d'une dose de ventilation ne dépasse pas la durée pendant laquelle la couche supérieure du grain peut se conserver sans grands dommages : quelques jours pour du grain aux normes de teneur en eau, même si la température est élevée.

ATTENTION : Si la différence de température entre air et grain est trop forte, il se produira des condensations d'eau sur les parois de la cellule, provoquant des zones plus humides et des moisissures. Aussi, il ne faut ventiler en automne et hiver que lorsque l'écart de température entre air et grain se situe entre 5 et 7° C.

Pour décider de l'opportunité d'une dose de ventilation, il faut impérativement surveiller la température. Dès le chargement de la cellule, il est indispensable de surveiller la température de l'air et du grain (à l'aide d'un appareillage thermométrique).

— Pour l'air ambiant, un thermomètre à mercure ou à cadran peut suffire. Il sera placé près de l'ouïe d'aspiration du ventilateur.

— Pour le grain, différentes solutions sont possibles suivant l'importance de l'installation de stockage et le budget consacré à la ventilation.

Autres types de ventilation

La ventilation de maintien continue :

Pour des céréales « humides » au-delà de 17 % de teneur en eau, dans ce cas, la ventilation est surtout utilisée comme moyen de conservation

provisoire sur des grains en attente de passage au séchoir, qu'il s'agisse de céréales humides d'été en provenance des moissonneuses-batteuses, ou du maïs demi-sec ayant déjà subi un préséchage. Le but recherché est le préstockage ou le stockage intermédiaire avant conditionnement définitif.

Attention l'installation de ventilation doit correspondre à un débit spécifique dans le grain de l'ordre de 50 m³ d'air/h par m³ de grain. Ce type de ventilation effectué avec une installation non conçue pour cela est plus néfaste que bénéfique.

La ventilation du maïs appliquée à la technique de « dryeration » :

Ce cas particulier de ventilation a pour but de refroidir le maïs chaud (50 à 60° C) et encore un peu humide sortant du séchoir (18 à 19 %), tout en contribuant à évacuer une certaine quantité d'eau par utilisation de la chaleur accumulée dans le grain.

Le débit spécifique d'air doit aussi dans ce cas être de 50 m³ d'air/h par m³ de grain alors qu'il n'est que de 10 à 20 m³ d'air/h par m³ de grain, pour une ventilation de refroidissement classique.

La ventilation séchante :

Pratiquée sur des petits lots de céréales d'été récoltées humides, ce procédé a pour but de sécher le grain en quelques jours. Le débit d'air doit être encore plus important : 100 à 150 m³ d'air/h par m³ de grain. Un chapitre lui est consacré plus loin.

Ces considérations sur la multiplicité des applications de la ventilation tendent à montrer qu'il est pratiquement impossible de réaliser une installation parfaitement polyvalente. Les extrapolations hasardeuses pouvant conduire à des catastrophes, mieux vaut demander le conseil d'un spécialiste.

LUTTE CONTRE LES RAVAGEURS

Tout grain, lorsqu'il est stocké en masse est susceptible d'être attaqué par divers prédateurs tels les oiseaux, les rongeurs et surtout les insectes. Ceux-ci sont peut-être les plus dangereux car moins visibles mais ils peuvent occasionner des dégâts importants.

Nous venons de voir dans les chapitres précédents les différents moyens (nettoyage, séchage et ventilation) dont disposent les agriculteurs stockant des grains, pour mettre ces derniers dans des conditions de stockage telles que le développement des insectes soit arrêté. Toutefois, il est toujours possible qu'une infestation se développe si certaines précautions complémentaires ne sont pas prises (nettoyage des locaux et du matériel). Dans ce cas, différentes techniques de traitement des grains peuvent être envisagées pour l'utilisation de

produits insecticides qu'il faudra judicieusement choisir.

STOCKAGE DES PRODUITS DERIVES DES CEREALES

L'agriculteur éleveur qui a stocké ses céréales pour fabriquer de l'aliment du bétail est confronté au stockage des produits finis, farines ou granulés.

Les farines très hygroscopiques doivent être utilisées rapidement. Elles sont en général stockées dans des boisseaux en métal ou en plastique montés sur trémies coniques à forte pente pour éviter l'effet de voûte.

Les granulés sont fragiles. Stockés comme les farines, ils doivent être manutentionnés sans violence par des appareils appropriés (vis souples chaînes à palettes, etc...).

Ces produits sont distribués aux animaux directement dans des auges ou des nourrisseurs ou transformés en « soupe » dans des installations spécialisées.

Le texte de cette communication est extrait d'un ouvrage réalisé et publié par l'ITCF sous le

titre : **GUIDE PRATIQUE — STOCKAGE ET CONSERVATION DES GRAINS A LA FERME.**

LES SILOS EN TERRE ARMEE DE PAILLE

CLAY STRAW SILOS

Dr. El Houssine BARTALI (*) et Jamal LAMZOURI (**)

RESUME

Les silos en terre armée de paille constituent une technique de stockage de produits agricoles très avantageuses. La paroi est réalisée en argile et paille hachée auxquelles on incorpore des cordons de paille tressées disposées en cerces pour reprendre les efforts de traction résultant de la poussée du produit pulvérulent emmagasiné.

Les avantages de tels silos résident dans leur coût relativement réduit et dans la bonne isolation thermique offerte par la paroi. Cette isolation crée des conditions de conservation convenables. Ce genre de silos largement utilisés en Chine où ils sont rencontrés avec des diamètres et des hauteurs variables, ont été recommandés par la F.A.O. pour bon nombre de pays en voie de développement.

Au Maroc, une expérience a été démarrée sur l'emploi de ces unités dont deux ont été construites à Rabat et à Meknès et ont fait l'objet d'études qui seront détaillées dans cet article.

ABSTRACT

Clay Straw Silos represent a storage technic for agricultural products with a number of advantages.

The silos wall is made of clay mixed with chopped straw and reinforced with twisted straw bundles used to balance the tensile forces resulting from bulk material action.

Advantages of such structures lay in their relatively low cost and the thermal insulation property of the wall. This agricultural products. This types of silos is largely used in China where the units have varying diameters and heights. F.A.O. has made recommendation for the implementation of these silos in developing countries.

In Morocco, experiments aiming at the promotion of the clay straw silos have been initiated in Rabat and Meknes areas. This paper presents the results of these studies.

I. INTRODUCTION

Les céréales demeurent la toute première ressource alimentaire en général et dans notre pays en particulier. L'importance vitale de cette denrée, justifie la nécessité d'accorder un grand intérêt à sa conservation et son stockage, afin d'en minimiser les pertes.

Le silo d'argile armée de paille, qui s'apparente aux techniques pratiquées dans les anciennes constructions traditionnelles, constitue une contribution à l'amélioration des techniques de stockage. En effet, cette solution peu coûteuse et facilement reproductible vise la mise à profit d'un savoir-faire et le potentiel des matériaux locaux, en vue de répondre à un besoin pressant en agriculture, celui de stockage adéquat des denrées récoltées.

L'emploi de ce genre d'unités fait l'objet d'une large utilisation sur les vastes territoires de la Chine où une capacité de stockage totale dépassant un million de tonnes a été réalisée par ce système. Les dimensions les plus rencontrées pour les unités installées varient de 4 à 8 m pour le diamètre et de 2

à 7 m pour la hauteur. L'extension de ce système de stockage et son adaptation à d'autres pays ont été recommandées par l'Organisation Mondiale pour l'Alimentation, la FAO. Au Maroc, où la construction en terre fait partie des traditions et où les mérites de ce genre de construction notamment en matière d'isolation thermique constituent un atout majeur pour la bonne conservation des produits agricoles, deux expériences ont été menées sur le potentiel du silo d'argile armée de paille. Deux unités de stockage de 15 tonnes chacune ont été réalisées dans deux régions différentes du pays : à

Rabat, sur le Campus de l'IAV Hassan II en 1987, région à climat océanique relativement humide, puis à Meknès, région à climat continental en zone

(*) : Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat.

(**) : Société Nouvelle des Conduites d'Eau, Rabat.

bour favorable, en 1989. Un suivi des performances de ces unités a été réalisé par le Département de l'Équipement et de l'Hydraulique de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II dans le cadre de ses activités de recherche — développement sur le Stockage des céréales au Maroc.

II. CONCEPTION DU SILO EN MATERIAUX LOCAUX

La conception du silo en matériaux locaux se caractérise par les atouts suivants :

- Coût de construction réduit;
- Simple technologie;
- Bonne isolation thermique de la paroi composée d'argile et de paille.

La structure du silo est représentée à la figure 1. L'ouvrage est constitué de trois parties :

- Une trémie conique de vidange composée d'une assise en maçonnerie et recouverte d'une dalle en béton armé. L'assise de maçonnerie est de 2,5 m de hauteur et permet ainsi l'installation d'une porte qui donne accès à l'orifice de vidange gravitaire des grains.

- Un fût en argile armée de paille hachée et en cordons sur une hauteur de 2,85 m. Cette paroi d'une épaisseur de 40 cm offre un obstacle aux transferts de chaleur. Il en résulte une faible variation thermique au sein du grain stocké et par suite des conditions favorables de stockage des céréales.

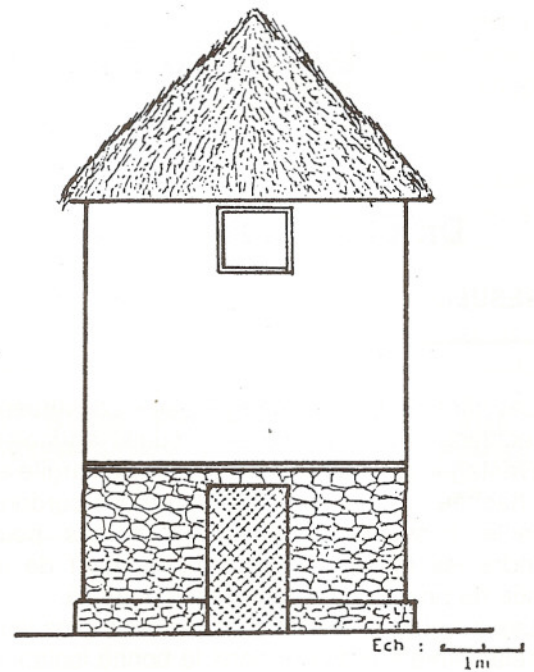
- Une toiture conique en matériaux relativement légers sur une hauteur de 2 m.

Le silo de 15 tonnes de capacité a une forme circulaire avec un diamètre extérieur de 4 m. Il est muni à sa partie supérieure d'ouvertures de façon adéquate pour permettre une bonne ventilation naturelle des denrées stockées. Le remplissage se fait par une fenêtre (0,8x0,9 m²) qui permet aussi l'accès à l'intérieur du silo (figure 2).

III. REALISATION

1. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans l'édification du silo en matériaux locaux sont les suivants : pierres extraites de carrières calcaires, sable, ciment, argile, paille, roseaux, bambous, feuilles de palmier dattier, tapis de jonc et quelques barres d'acier pour la dalle du local de vidange. Le choix de ces matériaux est basé sur des considérations économiques (faible coût, emploi de main d'oeuvre locale et technologie simple) et techniques (faible conductivité thermique, assez bonne résistance, faible perméabilité à l'eau).



Vue en élévation

Fig.1 : Silo en matériaux locaux.

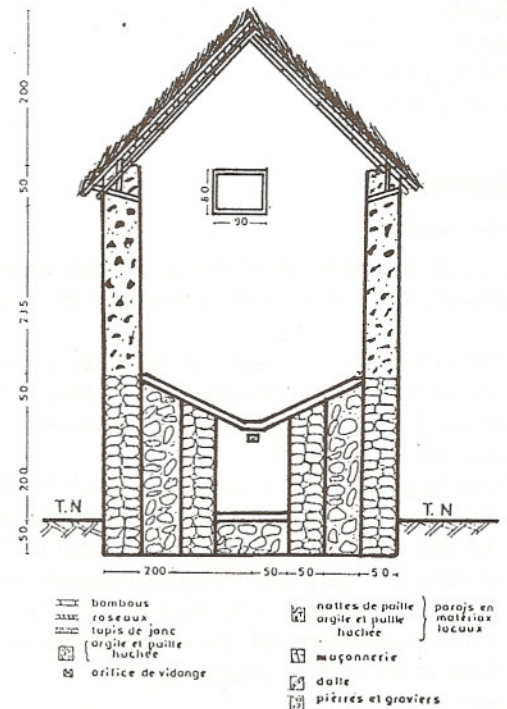


Fig2 : Silo en matériaux locaux
coupe longitudinal (≈ 15 t)

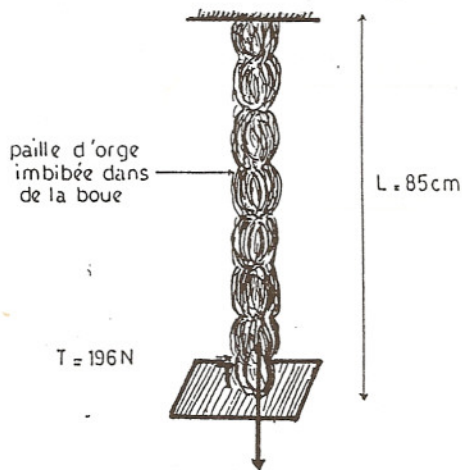


Fig.3 : Caractéristique de la corde

1.1. Argile

a— Cas de l'unité du site expérimental de Dkhissa

L'argile a été prélevée dans une des carrières d'une cimenterie voisine CADEM, située à une dizaine de kilomètres du site expérimental. Trois échantillons ont été prélevés de trois sites différents.

Après analyses granulométriques et essais de détermination des limites d'Atterberg sur des échantillons de ces argiles on a retenu celui qui a le plus grand indice de plasticité, un pourcentage faible en sable et un taux élevé d'argiles et de limons (F.A.O, 1982).

b. Cas de l'unité de Rabat

L'argile utilisée a été prélevée de la carrière de l'Oulja (Salé). L'analyse granulométrique d'un échantillon de ces argiles a montré que ces dernières contiennent plus de 2/3 de limons.

1.2. La paille

La paille est utilisée sous deux formes :

La paille hachée qui réduit les fissurations de l'argile dues à une éventuelle dessiccation, elle contribue aussi à la réduction de la conductivité thermique de la paroi.

— La paroi sous forme de tiges longues qui sont tressées en cordons. Ces dernières sont disposées en cerces pour reprendre les efforts de traction résultant de la poussée du produit pulvérisé stocké.

Les cordons de paille tressés ont une longueur moyenne de 85 cm, une section moyenne de 8×4

cm^3 et une résistance moyenne à la rupture par tension de 20 daN (figure 3).

Les pailles utilisées pour l'unité de l'IAV Hassan II et du site expérimental de Dkhissa sont respectivement celles de l'orge et de blé dur.

1.3. Provenance et qualité des autres matériaux

— Sable : on a utilisé le sable de mer, pour l'unité de l'IAV, et de carrière pour celui de Dkhissa.

— Maçonnerie : des blocs de calcaire taillés ont été utilisés pour l'édification des fondations des deux unités. Leur dimension est variable.

— Bambous : ce sont des éléments qui ont été prélevés des jardins de l'IAV Hassan II. Ces éléments creux ont un diamètre moyen de 6 cm et une longueur variable.

— Roseaux : Les éléments utilisés ont été achetés de la région de Meknès ou de celle de Rabat.

— Tapis de jonc : ce sont des tapis de forme rectangulaire de dimensions $1 \times 2 \text{ m}^2$ en moyenne. Ces éléments sont de fabrication locale.

2. Mode de construction

2.1. Caractéristiques et mode de construction des fondations.

Le sol de fondation étant relativement rocheux et résistant, la fondation adoptée est de type superficielle. Elle est sous forme de radier en maçonnerie avec une profondeur de 50 cm et un diamètre de 4 m (figure 4, coupe E-E).

Au-dessus de cette assise, on a construit un fût constitué de pierres taillées (figure 2). Dans l'exécution de cette élévation, on a eu recours à un tout venant pour remplir les poches de l'assise (figure 4, coupe D-D). La hauteur de cette élévation est de l'ordre de 2,50 mètres, toutefois, il faut signaler que cette hauteur n'est que de 2,00 mètres au niveau de l'orifice de vidange (figure 2), et ceci à cause de la forme conique de la trémie de fond du silo.

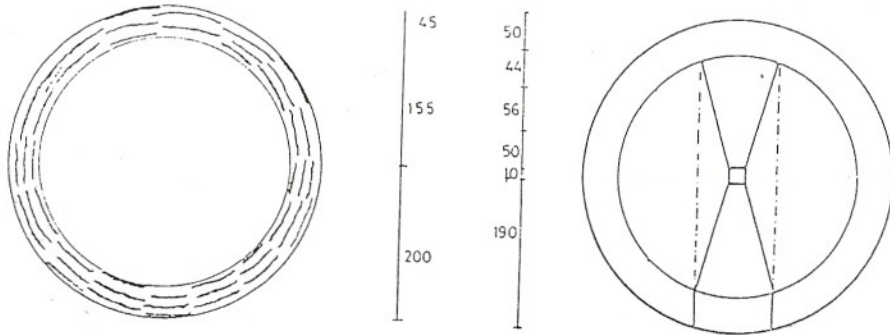
Celle-ci est équipée d'un orifice au milieu pour faciliter la vidange gravitaire des grains (figure 4, coupe C-C). Les matériaux utilisés pour la trémie sont le ciment, le sable, le gravier et l'acier au niveau de la dalle de toiture du local du vidange.

C'est en fait le seul endroit où on a utilisé des armatures, pour reprendre les efforts appliqués par le poids de grains. Les armatures utilisées sont des ronds lisses 10 et 8. Le béton utilisé est dosé à 350 kg/m^3 de ciment CPA 325.

Fig.4 : LES COUPES TRANSVERSALES

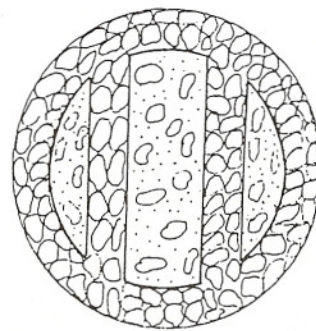
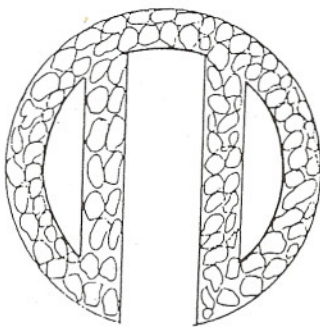
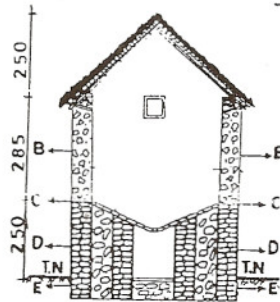
NB : Les mesures sont en cm.

Ech : 0 1m



Coupe BB : Disposition des nattes

Coupe CC : Le plan d'inclinaison de la dalle (Tremie)



50 100

150 100 50

Coupe DD : La maçonnerie

Coupe EE : La fondation

2.2. Fût en argile plus paille

La paroi est un élément essentiel dans une structure de stockage. En plus de sa résistance aux différentes sollicitations dues aux poussées du grain, une paroi doit former une voile étanche à l'eau et aux différents déprédateurs.

La technique de construction pratiquée s'apparente aux techniques pratiquées dans les anciennes constructions traditionnelles en adobe. La procédure utilisée consiste à tresser des tiges de paille mouillées (pour augmenter leur flexibilité). Ensuite on chevauche les tresses de paille ainsi fabriquées. Les deux parties racinaires se trouvent dans des directions opposées l'une par rapport à l'autre. La procédure est répétée plusieurs fois et on finit par avoir des cordons de longueur variable.

Chaque cordon est trempé dans la boue d'argile jusqu'à ce que toutes les tiges soient couvertes. Cette opération est extrêmement importante et doit être faite avec le plus grand soin, parce que plus elle est réussie, plus l'étanchéité et la résistance du mur seront bonnes.

La pose de ces cordons d'argiles et de paille se fait selon trois lignes espacées de 4 à 5 centimètres, agencées par un mélange d'argile et de paille hachée (figure 4, coupe B-B).

Le mur est construit en couches successives, de 20 cm de hauteur chacune. Une couche ne peut être posée que lorsque celle qui la précède a séché à 50 %, pour éviter toute déformation du mur. Un délai de 24 heures est recommandé pour qu'une couche de 20 cm puisse sécher. La verticalité du mur ainsi que le diamètre du silo doivent être vérifiés au fur et à mesure de l'avancement de la construction. Ce test est réalisé moyennant un niveau d'eau. La vérification du rayon au cours de la construction est faite en fixant une planche verticalement au centre du silo et en mesurant chaque fois qu'il est nécessaire le diamètre intérieur et extérieur avec le plus grand soin. Ce test permet aussi de maintenir une épaisseur constante du mur tout au long de la construction. Ces tests sont accompagnés d'un compactage manuel du mur. C'est de cette opération que va dépendre la durabilité des murs du silo.

Le mur ainsi construit à une hauteur de 3 mètres. Avant d'achever cette hauteur, une fenêtre est aménagée. Sa section est de 80 x 90 cm² (figure 2). Cette dernière va servir aussi bien pour le remplissage du silo (moyennant une vis), que pour l'aération et l'accès à l'intérieur du silo. En plus de cette fenêtre des orifices circulaires grillagés sont installés en partie haute du silo. Leur disposition est faite de façon adéquate en les répartissant sur le

pourtour du silo pour permettre une bonne ventilation des denrées stockées, et par la suite assurer des conditions optimales de température et d'humidité pour le stockage des grains.

Afin de faciliter le prélèvement des échantillons de grains stockés, pour suivre de près leur évolution des orifices de 5 cm de diamètre, en 4 points du silo ont été installés.

3— Toiture du silo en matériaux locaux

Les matériaux utilisés lors de l'édification du toit du silo en question, sont respectivement les bambous, les roseaux, des tapis de jonc et l'argile plus la paille hachée. Le choix de ces matériaux est lié à leur disponibilité, leur faible coût et enfin à leur faible poids. La hauteur recommandée pour la toiture est d'environ 50 % du diamètre (F.A.O, 1982).

Le toit est constitué d'une charpente en bambous attachés entre eux par des ficelles en plastique. Chaque élément de cette structure est fixé au niveau du mur à un piquet en bambou, de 30 à 40 cm, enfoncé dans le mur au 2/3 de sa longueur. Le piquet et l'élément porteur du toit sont attachés par une ficelle en plastique. Les éléments de bambous ont été couverts par des roseaux auxquels ils sont reliés par des ficelles.

Cette structure porteuse est recouverte par des tapis de jonc, la liaison entre les deux éléments est réalisée moyennant des ficelles en plastique, le tout est enrobé par de l'argile armée de paille hachée. On a laissé le tout sécher, ensuite on l'a recouvert par des feuilles de palmier dattier. Le toit ainsi construit à une hauteur de 2,00 m et une forme plus au moins semi-circulaire.

4. Revêtement externe du silo

Le revêtement du silo assurer la protection de la paroi contre l'érosion pluviale et réduire les gains de chaleur par rayonnement solaire. La protection contre la pluie peut être obtenue avec l'emploi d'un treillis de tiges de roseaux enroulé et fixé sur le pourtour du silo puis recouvert d'un enduit à base d'argile et de chaux. La chaux ayant pour objectif de contribuer à la stabilisation de l'argile et réfléchir le rayonnement solaire. Une autre technique de protection contre la pluie réside dans l'emploi d'un manteau de plastic autour de la paroi.

IV. CALCUL DU PRIX DE REVIENT

Le prix de revient du silo en argile plus paille s'élève à environ 17.450 dh (ou 2100 US dollars suivant les cours). Il se ventile comme suit :

21 % : Matériaux de construction (Pierres, béton et acier);

22 % : Matériaux locaux;

38 % : Main d'oeuvre;

12 % : Transport;

07 % : Ménuisier plus travaux de finition.

L'utilisation de matériaux locaux provenant de l'exploitation ainsi que l'emploi de la main d'oeuvre familiale peuvent diminuer d'avantage le coût de cette unité.

V. SUIVI DES PERFORMANCES DES UNITES REALISEES AU MAROC

Deux unités de stockage ont été réalisées au Maroc avec la technique de l'argile armée de paille. La capacité de chacune d'elles est de 15 tonnes environ. Elles sont munies d'un orifice de vidange gravitaire pouvant assurer un débit de 6 tonnes par heure.

Une vérification des efforts maximaux sur la paroi du silo, engendrés par la matière ensilée, a été faite moyennant les formules de Reimbert M.A. (1982).

1. Expérience de Rabat

Cette unité a été utilisée pour le stockage de l'orge. Un suivi des déformations des parois a été effectué. Les résultats obtenus montrent que la paroi en argile plus paille ne présente pas de déformation ni de fissurations significatives au cours du temps.

2. Expérience de Dkhissa

Le suivi de cette unité a consisté à analyser les performances du silo en matériaux locaux, par l'évaluation de l'influence des paramètres physiques sur le stock en étudiant :

— L'évolution de la température de la denrée stockée à différents points de la masse de grains;

— La variation de l'humidité relative au centre de la masse de grains;

— L'évolution de la concentration de l'oxygène et du gaz carbonique dans la masse de grains.

Une centrale de mesure a été installée pour la collecte et le stockage des données. Cette centrale est composée :

D'un réseau de capteurs de température et d'humidité relative, reliés à une unité dotée de mémoire et gérée par ordinateur. Les capteurs relèvent la température et l'humidité relative de l'air interstitiel du grain, de l'air et des parois du silo (figure 5);

— D'un ensemble de tuyaux pour l'extraction de l'oxygène et de gaz carbonique de l'air interstitiel du grain stocké;

— D'un système de pièges pour insectes.

Les résultats obtenus après six mois de stockage sont représentés sur les figures 6, 7, 8, 9, 10 et 11 (Alami et Bachraoui, 1990).

2.1 Evolution de la température

Durant toute la période de stockage, la température de l'air ambiant a connu des fluctuations importantes dues au caractère du climat. L'amplitude thermique est beaucoup plus réduite à l'intérieur du silo; 6°C contre 16°C sur la paroi extérieure; (Figure 6).

a— Gradient thermique horizontal

Le gradient de température demeure réduit à l'intérieur de la masse de grains stockée dans le silo (amplitude thermique maximum de 5°C). Les écarts de température au niveau des parois de silo sont sensiblement élevés. La température du grain reste inférieure à celle de l'air ambiant. Lorsque cette dernière chute, la masse de grains se maintient à une température plus élevée. Ceci traduit l'effet isolant de la paroi en argile armée de paille. La température au niveau du centre de la masse de grains a chuté pendant la première période du stockage, puis elle a enregistré au niveau des parois (Figure 7 et 8).

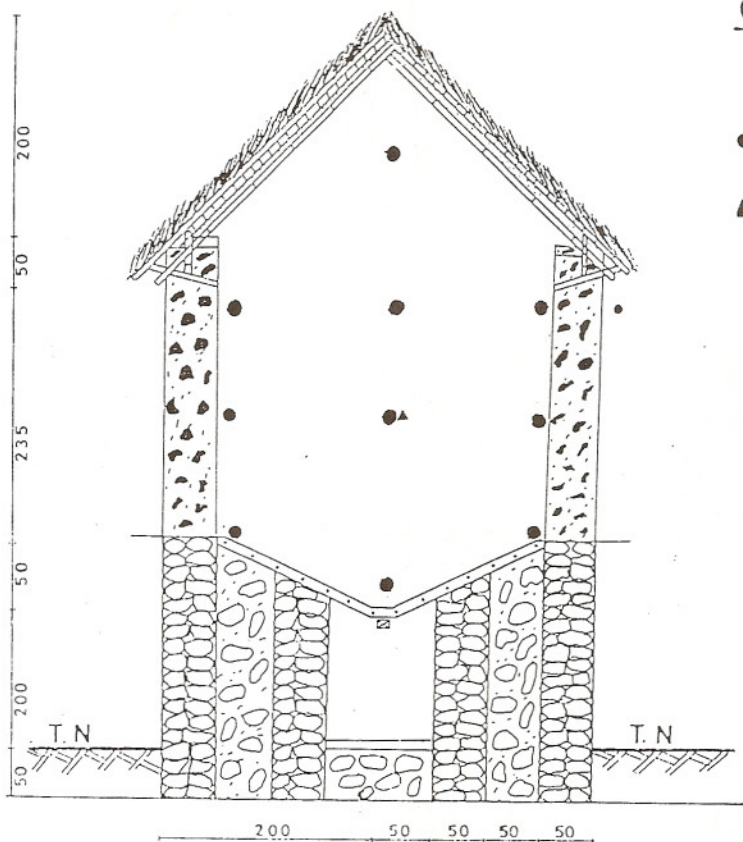
b— Gradient thermique vertical

Le gradient thermique vertical est plus réduit dans la masse de grains — 3 au maximum — (Figure 9). L'allure de l'évolution de la température des points situés près de la paroi est presque identique durant toute la période de stockage (Figure 10). On a donc un faible gradient de température au

Fig.5 : Silo en matériaux locaux .

Répartition des points de contrôle
et d'échantillonnage .

Capacité : 15,8t

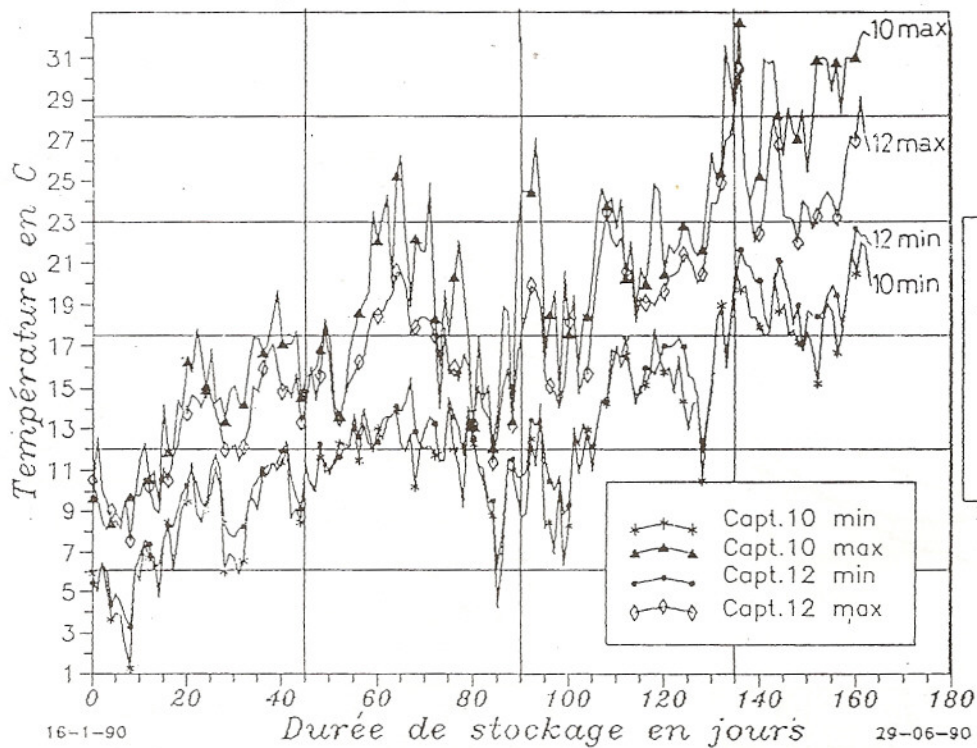


● Capteurs de températures .

▲ : d'humidité relative .

Fig. 6 : SILO EN MATERIAUX LOCAUX

Température min et max de l'air ambiant



16-1-90

Durée de stockage en jours

29-06-90

Fig. 7 : SILO EN MATERIAUX LOCAUX
Gradient horizontal de température

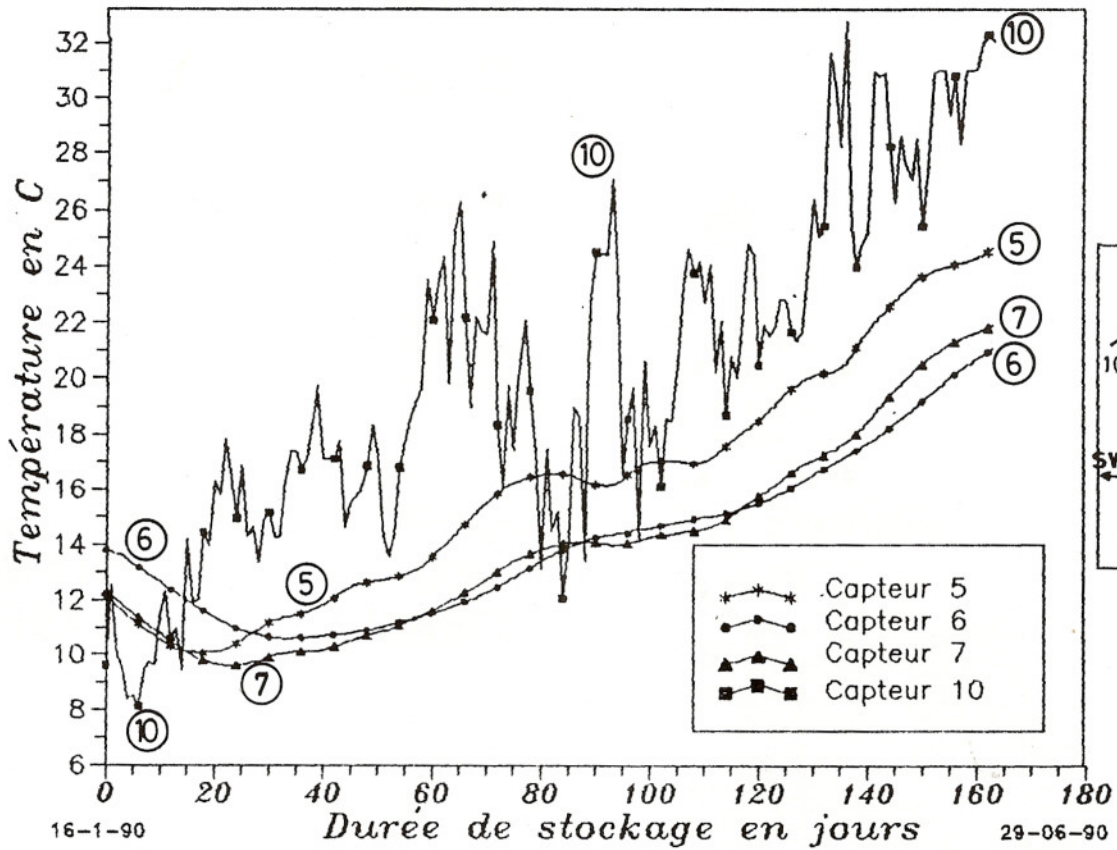


Fig. 8 : SILO EN MATERIAUX LOCAUX
Gradient horizontal de température

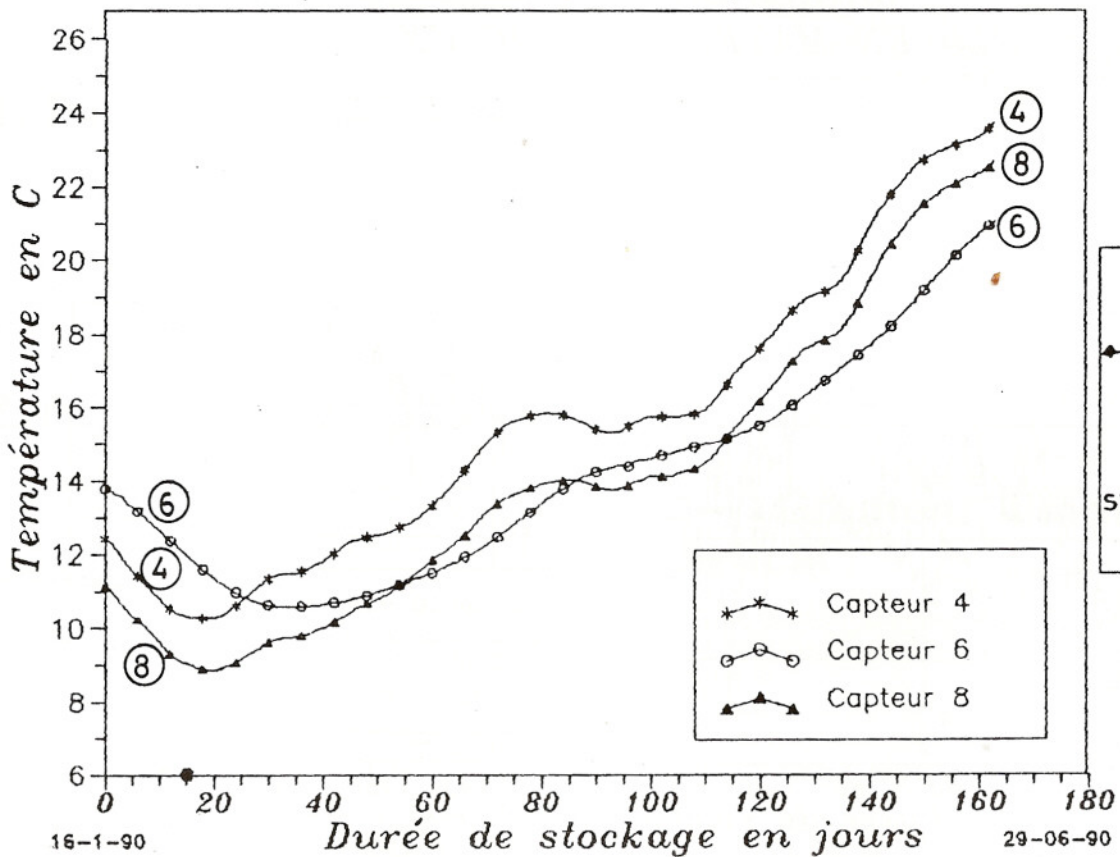


Fig. 9 :SILO EN MATERIAUX LOCAUX
Gradient vertical de température

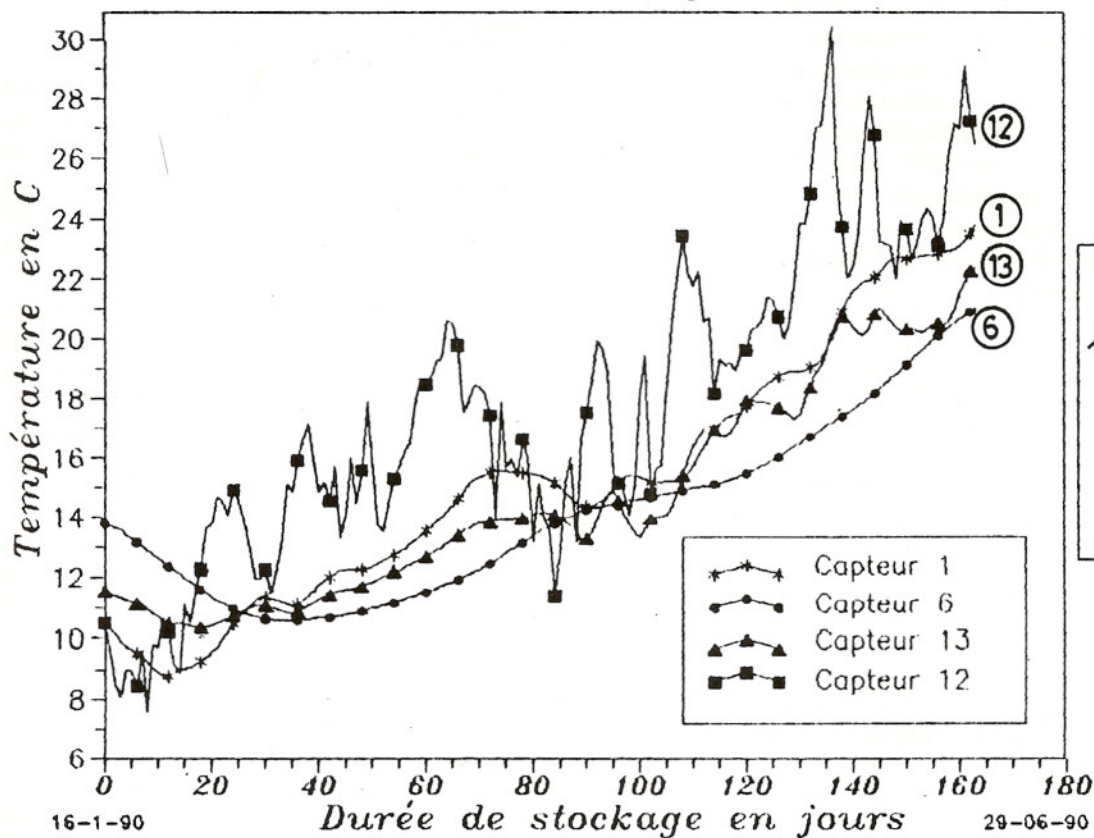
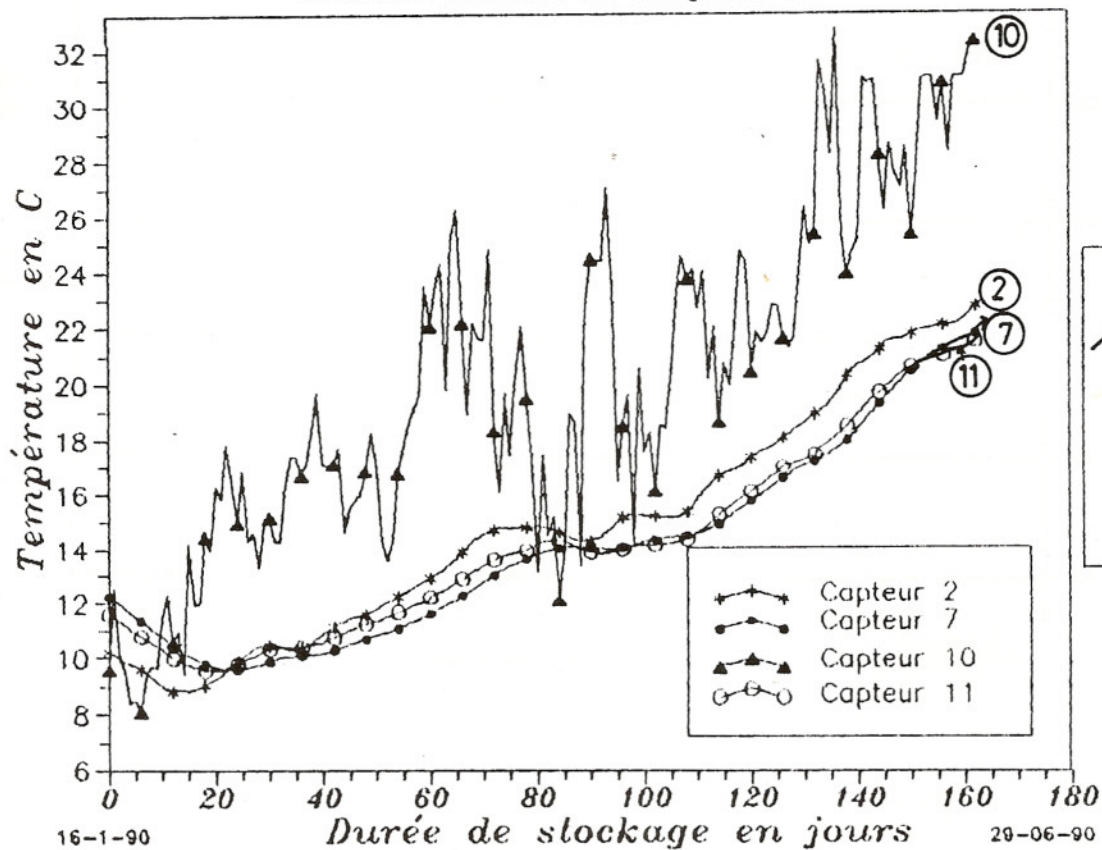


Fig. 10 :SILO EN MATERIAUX LOCAUX
Gradient vertical de température

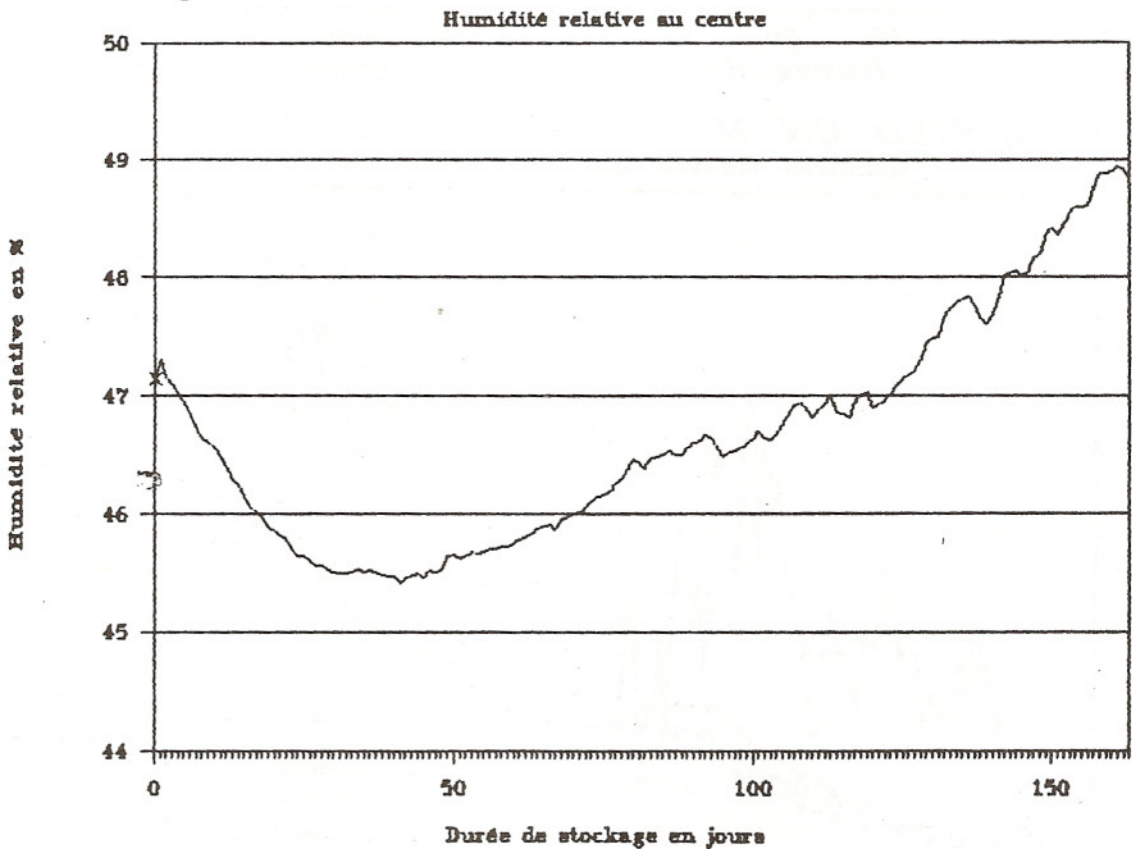


niveau de la paroi. La partie centrale est sujette à de très faibles variations thermiques par rapport aux parties supérieure et inférieure. La première étant soumise à l'effet de la ventilation naturelle et par conséquent à une variation de température influencée par l'air ambiant, alors que la partie inférieure est en contact avec une dalle en béton armée directement influencée par toute variation extérieure de température.

2.2 Variation du taux de l'humidité relative

Durant toute la période de stockage, l'humidité relative s'est stabilisée dans un intervalle de 45 %. Au cours des deux premiers mois elle a chuté de presque 2 % puis elle a augmenté au cours du temps (avec une fluctuation très réduite) pour atteindre 49 % vers la fin du 6ème mois de stockage.

Fig.11 : *SILLO EN MATERIAUX LOCAUX*



VI— Conclusion

Le silo en argile armée de paille peut constituer une solution judicieuse au stockage des denrées récoltes. En effet, cette unité présente plusieurs avantages : coût réduit, excellente isolation thermique et technologie simple. La ventilation naturelle est mise à contribution et l'opération de remplissage naturelle est mise à contribution et l'opération de remplissage est mécanisable. Elle offre également des facilités dans la vidange. Ces considérations constituent des atouts pour la dissémination de cette technique à travers le pays, en

particulier au niveau des exploitants et des coopératives d'agriculteurs.

Le renforcement de la paroi d'argile par les cordons tressés de paille confère au silo une résistance suffisante pour supporter les pressions du grain. La hauteur du silo peut être réduite et le diamètre élargi pour minimiser ces pressions et abaisser le niveau de la fenêtre de remplissage. L'emploi d'un revêtement en plastique pour le toit et de chaux pour stabiliser l'argile peuvent diminuer l'effet de ce risque. Enfin il faut veiller à ce que la paroi du silo ait le temps suffisant de sécher avant l'introduction du grain dans le silo. Ceci réduit les risques d'humidification du grain auprès de la paroi.

VII. Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre des projets de recherche sur le stockage entrepris par l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II

grâce aux supports financiers de l'Agence Internationale pour le Développement (AID), la Direction de la Production Végétale (MARA) et la Coopération Universitaire Belge. Les auteurs leur expriment ici leur reconnaissance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alami, N. et Bachraoui, Z. (1990) Suivi et évaluation des performances des systèmes de stockage des Céréales dans la zone de Saiss. Mémoire de troisième cycle, IAV Hassan II, Option Génie Rural.

constructions en terre, 30-31 mai et 1er juin 1990, Marrakech — Maroc.

F.A.O 1982. China : grain storage structures. Rapport on a FAO/UNDP workshop study tour in the People's Republic of China : 18 october to 16 november 1979, N° 49.

Bartali, H. et Lamzouri, J. (1990) Silo en argile armée de paille. Communication présentée lors du premier Séminaire International sur l'Ingénierie des

REIMBERT, M.A. (1982) Silos théorie et pratique : Calcul, fonctionnement et réalisation. Editions Eyrolles.

Evolution des méthodes d'analyses et de calcul des efforts engendrés par les matériaux granulaires ensiles

**Par J.C. ROTH, Directeur de Recherches, à partir des travaux et publications de
A. KHELIL, D. WEISSE et J.C. ROTH et de l'ensemble des références du G.R.R.S.
Groupe de Recherche Rheologie et Structure affilié au L.E.M.T.A. UA CNRS 875
Département Génie Civil IUT Le Montet F-54600 VILLERS LES NANCY**

RESUME

Après un bref rappel des activités du groupe de normalisation FIP/ISO (WORKING GROUP « silo design » ISO/TC 98/SC3/WG5 « Loads due to Bulk Material ») nous présentons les différentes méthodes analytiques de calcul des pressions statiques, des pressions totales et de quelques méthodes numériques exploitant les lois de comportement élastoplastiques, hypoélastiques et incrémentales de calcul des efforts engendrés par les milieux granulaires en phase d'ensilage.

L'analyse critique des résultats des différentes méthodes de calcul de pression permettent de mettre en évidence le rôle des hypothèses et des caractéristiques mécaniques et physiques concernant les matériaux granulaires étudiés.

Les limites d'exploitation actuelles de ces techniques de calcul sont mises en évidence à travers une large comparaison entre les recommandations des normes, les résultats théoriques et les résultats expérimentaux obtenus sur site réel en France et dans le reste du Monde.

AVANT PROPOS

Les activités de recherches de notre groupe G.R.R.S. (Groupe de Recherche Rhéologie et Structure affilié au LEMTA UA CNRS 875) dans le domaine du stockage des matériaux en vrac au cours de ces dernières années, nous ont amené à faire le point sur l'essentiel des productions scientifiques et techniques à travers le monde dans le domaine du stockage des matériaux granulaires et pluvérulents. Notre participation aux travaux de la « Mission silo » du Ministère de la Recherche et de la Technologie nécessitait une étude comparative objective avec l'ensemble des travaux publiés et une interprétation des résultats originaux à partir des mesures expérimentales sur silos réels obtenues à la base de Chartres dans le cas du stockage du blé.

Nos travaux bibliographiques ont mis en évidence une évolution des thèmes de recherches sous l'influence de courants d'idées et d'écoles de pensées souvent guidés par des besoins industriels immédiats, spécifiques et nationaux, limitant de ce fait les publications et la diffusion des résultats acquis.

Nous constatons cependant, aujourd'hui, un regain d'activités et de productions scientifiques à travers le monde non seulement en France (*) mais également en République Fédérale d'Allemagne, dans les Pays Nordiques ainsi que dans les Pays de l'Est avec une volonté réelle de collaborer, volonté traduite d'ailleurs dans l'augmentation des activités du groupe international de normalisation ISO « Loads due to bulk materials » dirigée par le professeur J. EIBL (Karlsruhe. R.F.A.).

Les travaux en cours dans le groupe international ISO composé d'universitaires et d'ingénieurs expérimentés (voir liste en annexe 1) portent essentiellement sur la détermination :

— des modes d'écoulement spécifiques liés à la géométrie des installations de stockage (définitions adoptées en annexe 2).

— des paramètres caractéristiques des matériaux en vrac et leur méthode de détermination en liaison avec les mesures effectuées en laboratoire (publications en cours par le groupe ISO).

— d'une formulation des calculs de pression capable de satisfaire les besoins des concepteurs (travaux en cours).

L'objectif actuel de tous les chercheurs est de définir un modèle de calcul fiable pour rédiger les règles de calcul des silos en général.

Notre synthèse ou essai de synthèse bibliographique a également mis en lumière l'existence de grandes difficultés.

Au départ, il y a les problèmes de vocabulaire, de définition des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux en vrac considérés soit comme des milieux granulaires, soit comme des milieux pulvérulents. Ensuite, l'ensemble des articles scientifiques et techniques se classent en deux grandes catégories de travaux, une première s'intéressant uniquement à des aspects fondamentaux et une seconde essayant d'élaborer des théories scientifiques et techniques utilisables directement dans la pratique.

L'ensemble des publications, aussi bien fondamentales qu'appliquées, se situent dans des domaines très variés :

1) Dans le domaine théorique il s'agit de :

— mécanique des milieux granulaires pour caractériser le comportement global de ces milieux à partir de leur structure et des phénomènes

physiques qui régissent leur comportement au niveau des grains.

— mécanique des milieux continus, opérant à partir d'un milieu continu équivalent pour exploiter des lois de comportement appropriées.

— mécanique des milieux aléatoires mettant en oeuvre des modèles stochastiques et processus de diffusion.

— caractériser les propriétés mécaniques des grains, des liaisons entre grains, etc...

— cinématique des écoulements, modélisation, etc...

2) Dans le domaine appliqué les études traitent :

— du stockage des poudres et des grains : effet de poussée, voutage, ségrégation, etc...

— du transport : lits fluidisés, écoulement, cinématique des écoulements,...

— du dimensionnement des cellules de stockage,

— des études expérimentales des efforts et des profils de vitesses sur modèles réduits ou réels de silos et de réservoirs,

— de stabilité des constructions : comportement des silos et réservoirs en béton, en métal, en matière plastique stratifiée ou autres.

Malgré de nombreux travaux expérimentaux et d'excellents résultats scientifiques et techniques accumulés au cours des ans, à ce jour, il n'a pas été possible d'établir la vraie nature du comportement des matériaux ensilés ni de leurs actions et interactions avec les structures de stockage en cours de remplissage et de vidange.

En effet, la plupart des études expérimentales sur silos réels, sont très coûteuses, très longues et très délicates vu la complexité des phénomènes intervenants. La complexité des phénomènes est liée à la diversité des matériaux étudiés à l'évolution des paramètres caractéristiques de ces matériaux en fonction des conditions d'écoulement et à l'influence très grande des techniques de conception des capteurs et des géométries des silos. En conséquence, les résultats obtenus pour un nombre limité de milieux granulaires dans une structure donnée, amènent le chercheur à proposer des extrapolations pour l'ensemble des matériaux en vrac, qui restent donc soumis à des interrogations.

Par ailleurs, de nombreux incidents constatés quotidiennement lors du remplissage et de la vidange simultanée ou encore l'apparition de fissures tout comme la rupture de structure aux liaisons entre corps de silos et trémies sont souvent attribués à des effets de surpression appelés « switch stresses ». Ces surpressions pour certains auteurs sont localisées de façon précise ou au contraire pour d'autres chercheurs elles peuvent apparaître dans la totalité de la structure.

(*) Il s'est créé en France en 1989 une association : A.E.M.G. Association pour l'Etude de la Micromécanique des Milieux Granulaires. Adresse : Université Blaise Pascal Clermont Ferrand II BP. 206 — F.63174 AUBIERE CEDEX

En conclusion de l'approche bibliographique l'ensemble des documents étudiés fait apparaître à la lumière de notre propre expérience :

— que de nombreux travaux tant expérimentaux que théoriques restent à effectuer (pour caler les modèles),

— que l'efficacité de la recherche passe par une plus grande concertation entre théoriciens, expérimentateurs et utilisateurs.

— que l'analyse du mode de remplissage et du mode d'écoulement des matériaux granulaires ou pulvérulents ensilés conditionne le fonctionnement du silo tant en statique qu'en dynamique et doit être associée à la mesure expérimentale des pressions (cette situation se retrouve dans l'étude des lois de comportement développées actuellement par plusieurs équipes plus particulièrement en R.F.A. en Suède et en France tout comme dans le reste du monde).

— que la Base Expérimentale de Chartres représente un outil exceptionnel mis à la disposition des chercheurs français pour permettre et favoriser les travaux et les rencontres.

INTRODUCTION

Nous nous proposons de présenter l'évolution des méthodes de calcul de pressions engendrées par les matériaux ensilés. Nous nous intéressons dans un premier temps aux modèles analytiques de calcul des pressions statiques et aux méthodes de calcul des pressions totales.

Après une étude comparative des différentes méthodes de calcul des pressions assimilant toutes le comportement des matériaux ensilés à un sol répondant au critère de l'état d'équilibre limite de MOHR—COULOMB nous établissons les limites d'exploitation de ces modèles.

Si ces modèles traduisent correctement à l'aide de quelques hypothèses le comportement des matériaux pendant le remplissage et au cours du stockage il n'en est pas de même pour la vidange. En cours de vidange, il est indispensable de prendre en compte non seulement les effets du mode d'écoulement, de la cinématique et de la dynamique de l'écoulement mais encore de la variation des paramètres caractéristiques de la matière.

Cette situation spécifique au cours de la vidange impose une approche plus réaliste du comportement de ces matériaux qui passe par l'utilisation de lois de comportement telles que les lois de BOYCE, de LADE et de KOLYMBAS dont l'exploitation à l'aide des techniques de calculs par éléments finis est décrite par la suite.

La multiplicité des méthodes de calcul des pressions engendrées par les nombreux matériaux

très différents stockés en silos ou en réservoirs, les approches très variées de paramètres de ces

matériaux entraînent une nécessité absolue : avoir recours à des mesures sur sites réels.

Nous essayons malgré un nombre important de travaux difficiles à comparer, par manque de références communes, de mettre en évidence les acquis actuels et la nécessité absolue de poursuivre l'étude du comportement des matériaux en vrac ensilés sur site réels seul moyen permettant à tous, chercheurs et utilisateurs, de se mettre d'accord sur des résultats fiables et exploitables.

I. EVOLUTION DES METHODES ANALYTIQUES DE CALCUL DES PRESSIONS DANS LES SILOS.

Nous avons pu relever dans la littérature depuis les premiers travaux de ROBERT en 1982 une évolution des techniques analytiques de calcul des pressions vers les techniques numériques faisant apparaître 3 étapes principales :

— d'abord, les méthodes de calcul des pressions totales : CAQUOT (1956), PIEPER et WENZEL (1962), GENIEV (1958), PLATANOV et KOVTUN (1959), THEIMER (1957), WALKER (1966), SAFARIAN (1969), WALTERS (1973), JENIKE (1968), ENSTADT (1975) et SOKOL (1984).

— et enfin, les méthodes de calcul par éléments finis à partir des lois de comportement adaptés aux matériaux granulaires : loi de LADE, loi de KOLYMBAS, loi de BOYCE depuis 1984.

I.—1 Méthodes de calcul de pressions statiques

Les études de la poussée dans les silos remplis de matériaux pulvérulents datent des expériences de ROBERT (1982). Ces études ont montré que la poussée totale sur le fond du silo était très inférieure au poids du contenu des silos et qu'à une certaine profondeur de la matière, on n'observait plus d'augmentation de la pression verticale sur le fond. Le frottement le long de la surface latérale du silo engendré par la poussée horizontale transfère, en partie, le poids du matériau de remplissage sur les parois du silo.

Cette action de reprise des efforts en parois est appelée « mobilisation du frottement » en paroi, dans les ouvrages spécialisés.

JANSSEN en 1895 (1) fut le premier à obtenir une solution pour calculer les pressions sur les parois verticales d'un silo en tenant compte du frottement de la matière sur les parois. La solution

analytique de JANSSEN est basée sur l'hypothèse de constance du rapport de la pression horizontale sur la pression verticale au sein de la matière ensilée.

Nous allons développer la théorie de JANSSEN qui fait encore référence aujourd'hui alors que les autres méthodes seront présentées succinctement.

Dans ses travaux, JANSSEN prend en compte les hypothèses suivantes pour caractériser la matière ensilée :

1) — La matière ensilée est considérée sans cohésion, homogène, isotrope, avec des caractéristiques mécaniques constantes, notamment, l'angle de frottement interne et l'angle de frottement en paroi.

2) — La matière est dans un état de rupture décrit par le critère d'état limite de Mohr—Coulomb.

3) — Le domaine de rupture est complètement spécifié dans un plan sur lequel les analyses sont restreintes au problème de déformation plane. Les directions principales majeures et mineures sont dans un plan vertical perpendiculaire aux deux parois du silo sur lesquelles les contraintes sont à déterminer.

4) — La matière est supposée en grande déformation pour atteindre l'état critique (indice de vide critique) dans lequel la rupture apparaît à volume constant et à contrainte limite constante.

5) — Les vitesses et les accélérations acquises par la matière ensilée pendant le remplissage et la vidange sont suffisamment petites pour que l'on puisse négliger les forces d'inertie dans les équations d'équilibre de la matière.

REMARQUE IMPORTANTE :

Les méthodes de calcul basées sur l'équilibre d'une couche horizontale de matière ensilée supposent que la matière glisse globalement comme une masse solide sur la paroi durant la vidange. Ceci correspond à la vidange en masse.

a) THEORIE DE JANSSEN.

Parmi les nombreuses études menées, celle de JANSSEN [1] tient une place privilégiée dans la mesure où elle a contribué au développement du calcul des contraintes horizontales et verticales utilisables dans la mise en oeuvre des normes de construction de silos. Cette méthode constitue toujours la base des calculs des efforts exploités dans les normes pour caractériser les effets de la matière ensilée en cours de remplissage.

Le principe du calcul des pressions consiste à découper le massif en tranches infinitésimales horizontales et à étudier l'équilibre d'une couche sous l'effet des charges qui s'y exercent.

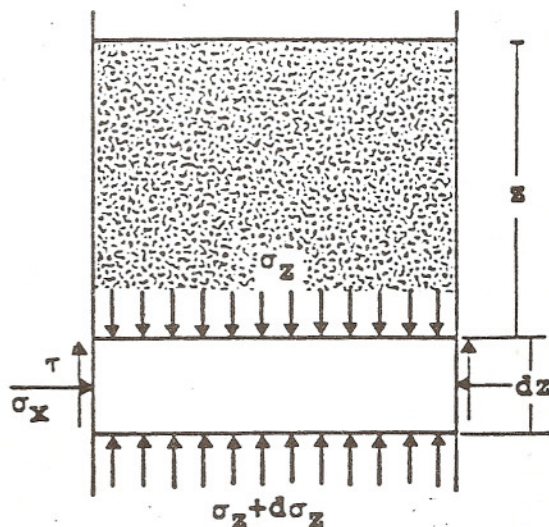


fig. 1 : Equilibre d'une couche de matière ensilée.

Le bilan des contraintes dans la direction z donnée :

- A : aire de la section transversale du silo
- γ : poids volumique de la matière ensilée
- C : périmètre du silo
- σ_x : contrainte horizontale
- σ_z : contrainte verticale
- τ : contrainte de cisaillement

Selon JANSSEN le rapport λ de la contrainte horizontale à la contrainte verticale est constant.

$$\lambda = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} \quad (2)$$

et suppose que σ_x et σ_z ne dépendent que de z et sont des contraintes principales. A l'aide du cercle de MOHR de contraintes, on détermine :

$$\lambda = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (3)$$

ϕ : Angle de frottement interne de la matière.

Le coefficient λ a été introduit par KOENEN pour améliorer la méthode de JANSSEN.

Encore écrit sous la forme $\lambda = \text{tg}^2 (M/4 - d/2)$ représente le coefficient de RANKINE traduisant la pression active d'un sol, c'est-à-dire le rapport de la pression horizontale sur la pression verticale du sol dans l'état d'équilibre limite uniquement sous l'action de son propre poids.

La contrainte de cisaillement à la paroi est liée à la contrainte horizontale σ_x par :

$\tau = \sigma_x \cdot \text{tg} \phi$

ϕ : est l'angle de frottement en paroi, posons $\mu = \tan \phi$

$$\tau = \sigma_x \cdot \mu \quad (4)$$

à l'aide de (2), et (3), l'équation (1) peut s'écrire :

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{\mu \cdot \lambda}{Rh} \cdot \sigma_z = \gamma \quad (5)$$

avec Rh : rayon hydraulique = A/C

La résolution de l'équation différentielle (5)

donne

$$\sigma_z = \frac{\delta \cdot Rh}{\mu \cdot \lambda} \cdot (1 - \exp - \mu \cdot \lambda \cdot z / Rh) \quad (6)$$

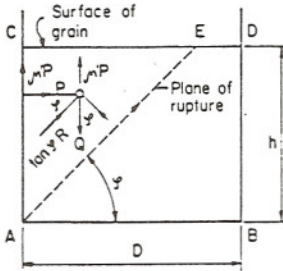
$$\sigma_x = \lambda \cdot \sigma_z \quad (7)$$

$$\tau = \lambda \cdot \mu \cdot \sigma_z \quad (8)$$

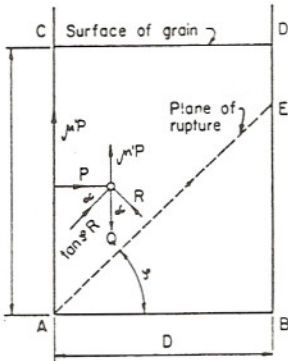
b) METHODE D'AIRY

Développée en 1897, la méthode de Wilfred AIRY [2] présenté des solutions différentes pour les silos et les réservoirs.

La solution proposées par AIRY pour calculer les pressions statiques découle de l'équilibre statique d'un élément de matériau en forme de coin, situé au-dessus du plan de rupture traduisant l'équilibre limite plastique.



(a) réservoirs



(b) silos

Figure 2 : Méthode d'Airy. Equilibre d'un élément de matière.

Les expressions des pressions pour des silos et réservoirs sont :

* pour les silos :

$$p = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot Y^2 \left[\frac{1}{\mu(\mu + \mu') + \sqrt{1 + \mu}} \right]^2 \quad (9)$$

avec $\mu = \tan(\phi)$
et $q = p/k = p/\lambda$ $\lambda = k$

* pour les réservoirs :

$$p = \frac{\delta \cdot D}{\mu + \mu'} \left[1 - \frac{1 + \mu^2}{(2 \cdot Y/D) \cdot (\mu + \mu') + 1 - \mu \mu'} \right] \quad (10)$$

et $q = p/k = p/\lambda$

c) METHODE DE REIMBERT

En 1953 et 1954, Marcel et André Reimbert (3) ont présenté leur méthode de calcul des pressions statiques après avoir effectué de nombreux travaux expérimentaux sur modèles réduits et en vrai grandeurs.

Dans leurs travaux la courbe expérimentale des pressions latérales devient, à grande profondeur, pour la matière ensilée asymptotique à l'axe vertical de la paroi. Cette situation est vérifiée par l'équation de JANSSEN pour les grandes valeurs de z : profondeur du silo.

A partir de cette considération M. et A. REIMBERT ont établi qu'à grande profondeur la pression latérale atteint un maximum et dans ce cas le poids d'une couche horizontale de matière ensilée est entièrement équilibrée par le frottement en paroi puisqu'il y a égalité des pressions au dessus et en dessous de la couche horizontale, elles tendent, en effet, vers la même limite asymptotique.

Les expressions d'après M. et A. REIMBERT des pressions verticales P et horizontales q pour un silo de section circulaire sont :

$$q = \frac{\delta \cdot Y}{4 \cdot \mu \cdot k} (Y/C + 1) - 1 + h/3 \quad \text{©}$$

$$p = p_{\max} (1 - (Y/C + 1) - 2) \quad \text{©}$$

$$p_{\max} = \frac{\delta \cdot D}{4 \cdot \mu \cdot k} \quad C = \frac{D}{4 \cdot \mu \cdot k} - h/3 \quad \text{©11}$$

p' = frottement en paroi

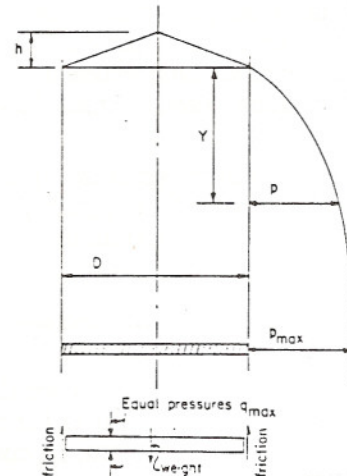


Figure 3 : Méthode de REIMBERT

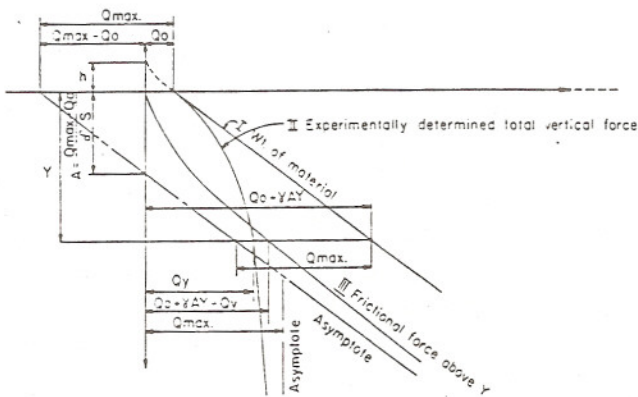


Figure 3 : Méthode de REIMBERT

1.2 Méthode de calcul des pressions totales

Les pressions totales, pressions latérales et verticales prennent en compte les pressions statiques de même nature que les pressions statiques étudiées précédemment auxquelles on a ajouté les surpressions en cours de vidange dues à des causes aussi variées que : les modifications brutales du mode d'écoulement, de la vitesse d'écoulement, les chocs dus aux ruptures de voutes, etc.

Parmi les nombreuses méthodes telles que celles de CAQUOT et KERISEL (1956), PIEPER et WENZEL (1962), GENIEV (1958), PLATANOV et KOVTUN (1959), THEIMER (1970), WALKER (1966), WALTERS (1973), JENIKE et JOHANSON (1968), ENSTAD (1975), FREESE (1980), SOKOL (1984), nous nous attacherons à en exploiter deux seulement (Walters, Sokol), celles qui à notre avis rendent le mieux compte des processus de remplissage et de vidange et sont les plus utilisées aujourd'hui dans les comparaisons avec les normes et mesures expérimentales dans le cas de silos métalliques. (Voir l'étude comparative du chapitre suivant).

Les modifications apportées par Walker, Walters, Jenike, Freese, et Sokol à l'analyse de Janssen concernent la distribution de la contrainte verticale sur une couche donnée de matière ensilée, ainsi que son évolution en fonction de la hauteur de la matière ensilée.

a) — WALKER [4], suppose que C_z est fonction de X (X : axe horizontal du silo) et par conséquent le coefficient n n'est pas constant. La contrainte verticale moyenne sur une couche horizontale de matière ensilée est liée à la contrainte verticale à la paroi par la relation suivante :

Contrainte verticale au niveau de la paroi.
 Contrainte verticale moyenne sur la couche
 D : Facteur de distribution de contrainte

Le facteur D est calculé par WALKER pour des sections circulaires avec l'hypothèse de mobilisation de frottement sur la paroi, c'est-à-dire que les poids de l'élément considéré équilibrent la force de frottement qui s'exerce sur la surface latérale.

La contrainte de cisaillement T est liée à la contrainte verticale au niveau de la paroi C_z (W) par :

$$T = B \cdot O_z(W) \quad (12 \text{ bis})$$

B : est déduit du cercle de Mohr de contrainte considéré par Walters.

On remarque que la seule différence avec les formules de JANSSEN est le remplacement du facteur par $B \cdot D$.

b) WALTERS (5) et (6) utilise la théorie de WALKER en différenciant l'état de contraintes au remplissage et à la vidange. Pour Walters, la juxtaposition de l'état statique (de remplissage) à l'état dynamique (de vidange) à un certain niveau du silo permet de mettre en évidence une surpression appelée pic de contraintes ou « switch stresses ».

c) JENIKE (7) considère qu'en remplissage les équations de JANSSEN donnent de bons résultats avec le coefficient $n = 0.4$. Par contre à la vidange JENIKE — JOHANSON (8) développent une théorie reposant sur des observations expérimentales de l'écoulement à travers une paroi vitrée d'un silo modèle.

La forme et la rugosité des parois sont des paramètres essentiels dans l'apparition de minces couches limites près des parois au cours de l'écoulement. Ces couches limites sont instables et de faible durée. La formation de ces couches limites provoque une transition du champ de contraintes statique de JANSSEN vers un champ de faible énergie de déformation élastique. Par la minimisation de cette énergie durant l'écoulement, JENIKE établit les équations de contraintes horizontale et verticale à la vidange. Le pic de contraintes « switch » n'est autre pour JENIKE que la juxtaposition de l'état statique de JANSSEN et de l'effet dynamique de l'état d'écoulement à un niveau donné h du silo.

d) L'approche proposée par FREESE (10) est basée sur la variabilité de n sur la profondeur. La matière ensilée se trouve durant la vidange dans un état variable oscillant entre un premier état d'équilibre caractéristique du remplissage et un deuxième état d'équilibre lié à la vidange.

Il faut également signaler que CAQUOT-

KERISEL (9) ont déterminé des coefficients en remplissage et en vidange en considérant l'équilibre d'une voute.

e) SOKOL (11) poursuit les travaux de FREESE en calculant au remplissage le rapport à l'état 1 (état d'équilibre au remplissage) comme un rapport moyen sur une surface qui correspond aux directions des contraintes principales. Le calcul de est fait en deux étapes :

— calcul du rapport moyen sur une surface qui correspond aux directions principales à l'état d'équilibre 2 (vidange)

— calcul de la valeur équivalente de relative à la fonction sinusoidale la plus proche de la réalité.

Si du point de vue comportement réel de la matière ensilée cette méthode nous paraît la mieux adaptée son application par contre nécessite au préalable la connaissance avec précision de l'angle de frottement interne ainsi que du coefficient de frottement en paroi à l'état d'équilibre 1 (remplissage) et à l'état d'équilibre 2 (vidange).

Les problèmes actuels rencontrés dans la conception des réservoirs de stockage de grandes dimensions et de silos en général proviennent non seulement de la méconnaissance du comportement des matériaux stockés et ensilés mais encore de la relation fondamentale qui existe entre la détermination des efforts dans le cas statique, ou la détermination des efforts globaux dans les silos et surtout de l'existence de relations fondamentales liant les écoulements et les pressions durant la vidange.

II. ANALYSE CRITIQUE DES METHODES ANALYTIQUES DE CALCUL DES PRESSIONS

II. 1. Aspect théorique

L'ensemble des théories et méthodes de calcul utilisant la notion de mobilisation des efforts de frottement en paroi à partir des travaux de JANSSEN reposent sur le principe de l'état limite d'équilibre plastique décrit par la critère de MOHR-COULOMB.

L'hypothèse introduite par JANSSEN considérant l'équilibre d'une tranche horizontale de matière ensilée à l'équilibre sous l'effet de son propre poids suppose que la répartition des contraintes (des pressions) verticales est uniforme.

La théorie de RANKINE, étudiant l'équilibre plastique d'un sol semi-infini sous l'effet de son poids, appliquée aux silos, permet d'envisager deux

états d'équilibre plastique, un état d'équilibre dit actif lorsque la contrainte verticale est une contrainte principale maximale et un état d'équilibre dit passif lorsque la contrainte verticale est une contrainte principale minimale.

Ces deux états d'équilibre imposent que la cisaillement dans la couche horizontale croisse linéairement de la valeur zéro sur l'axe de symétrie du silo jusqu'à une valeur limite caractéristique du frottement en paroi.

Cette approche a amené de nombreux auteurs déjà cités à faire évoluer les travaux de JANSSEN en considérant des répartitions de contraintes verticales et horizontales correspondant à un état d'équilibre limite non plus dans un élément horizontal mais pour une voute, géométrie bien connue dans les phénomènes de blocage des écoulements donc plus proche d'une distribution réelle.

Du point de vue mathématiques il peut y avoir un grand nombre de courbes représentatives de l'état d'équilibre satisfaisant les conditions de contraintes aux limites au centre et à la paroi du silo, ceci explique la multiplicité des travaux existants. L'avenir de ces méthodes est aujourd'hui limité avec le développement de l'étude des matières granulaires avec les techniques de calculs par éléments finis au service de lois de comportement capable de rendre compte simultanément des phénomènes statiques et dynamiques.

A titre indicatif afin de se faire une idée de la variété des approches du comportement des matériaux par le biais des méthodes analytiques le tableau (1) donne quelques paramètres significatifs pour différentes méthodes de calcul des pressions statiques ainsi que les expressions utilisées dans les normes DIN dont l'évolution significative démontre l'incertitude existant toujours actuellement puisque sa forme est toujours provisoire et en cours de révision.

a) COMPARAISON DES RESULTATS de calcul des pressions à l'aide des méthodes de REIMBERT, JANSSEN et AIRY.

Une étude dans le cas du blé, du charbon et du ciment effectuée par S. SAFARIAN et E. HARRIS fait apparaître pour le calcul des pressions verticales et horizontales des écarts très importants variant entre 20 et 50 % selon la nature du matériau pour ces trois méthodes.

A titre d'exemple les figures (4), (5), (6), (7) représentent les pressions latérales et verticales pour deux silos cylindriques respectivement de 6.1 m et 12.2 m de diamètre et de 24.4 m et 48.8 m de haut avec du blé et du charbon.

Cette étude établit également l'importance du rôle du coefficient de frottement au frottement en paroi faisant évoluer les résultats de la méthode de JANSSEN inférieurs à ceux obtenus par AIRY et

REIMBERT pour $u' = 0.35$ vers des valeurs supérieures aux deux autres méthodes lorsque u' prend la valeur 0.45 dans le cas du blé : voir figures (4) et (5).

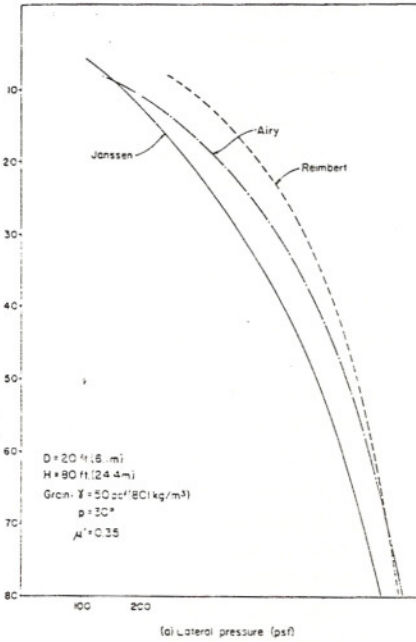


Figure (4)

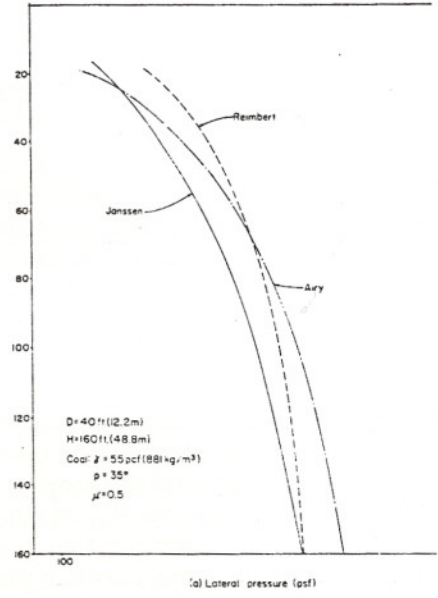


Figure (5)

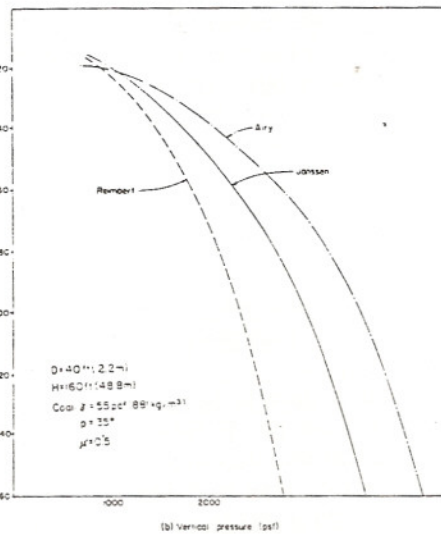


Figure (6)

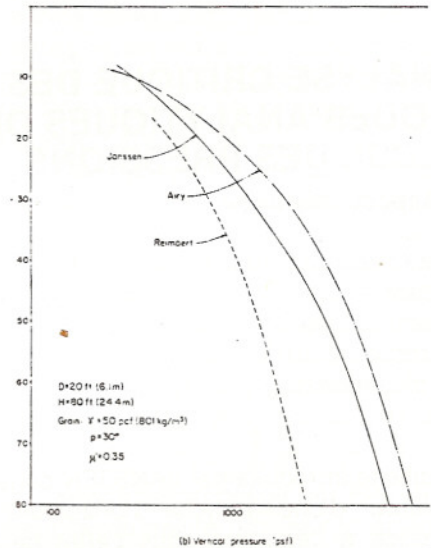


Figure (7)

METHODES	PRESSION VERTICALE	PRESSION HORIZONTALE	COEFFICIENT DE PRESSION		angle de frottement interne δ	angle de frottement en paroi ϕ	REMARQUE
			REMPLISSAGE	VIDANGE			
JANSSEN 1896	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$	$\lambda = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$	$\lambda = \frac{1 - \sin \delta}{1 - \sin \delta}$	Constant	constant	$\phi(\delta) = 1 - \exp\left(-\frac{\mu \cdot \lambda \cdot \gamma}{R_c}\right)$ R_c : rayon hydrostatique
VALLEE 1966	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$	$\lambda = \frac{BD}{\mu}$		.	.	$B = \frac{\sin \delta \cdot \sin \delta}{1 - \cos 2 \delta}$
WALTERS 1972	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$	$\lambda = \frac{(BD)_0}{\mu}$	$\lambda = \frac{(BD)_0}{\mu}$	.	.	$BD = \frac{\mu \cdot \phi \cdot \cos^2 \delta}{(1 + \sin^2 \delta) \cdot \tan \delta \cdot \sin \delta}$ Indice 0 = Statique (-) 0 = Dynamique (-)
JENIKE 1972	$\frac{\gamma}{\beta} \cdot f(\delta)$	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu} \cdot f(\delta)$	$\lambda = 0,4$	$\lambda = \max\left(0,4; \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}\right)$	.	.	Les formules établies sont valables uniquement en régime de remplissage. JENIKE utilise JANSSEN.
ERSTAD 1975	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$	$\lambda = \frac{1 - \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}{1 + \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}$ $\beta = \frac{\pi}{2} (v = \phi)$ $\frac{\pi}{2} \leq v \leq \pi$	$\lambda = \frac{1 - \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}{1 - \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}$ $\beta = \frac{\pi}{2} (v = \phi)$ $0,5 \leq v \leq \frac{\pi}{2}$	.	.	$\sin \mu = \frac{\sin \phi}{\sin \delta}$
SOKOL 1984	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$	$\lambda = \frac{1 - \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}{1 + \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}$ $\beta = \frac{\pi}{2} (v = \phi)$ $0,5 \leq v \leq \frac{\pi}{2}$	$\lambda = \frac{1 - \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}{1 - \sin \delta \cdot \cos 2 \beta}$ $\beta = \frac{\pi}{2} (v = \phi)$ $0,5 \leq v \leq \frac{\pi}{2}$ $\lambda = \sqrt{\lambda_1 \cdot \lambda_2}$	.	.	β : angle entre le vecteur contraintes principales et l'axe vertical z ou l'axe de la paroi Indice 1 pour le remplissage 2 pour la vidange
DIN 1964 1055 - 6	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1$	.	.	DIN 54 utilise les Equations de JANSSEN
DIN 1985/87 1055 - 5	$\frac{\gamma \cdot R_c}{\mu \cdot \lambda} \cdot \phi(\delta)$	$\lambda \cdot \sigma_3$ en remplissage $\lambda \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_3$ en vidange	$\lambda = 0,5 (1 - \sin \delta)$	$\lambda = 0,5 (1 + \sin \delta)$	.	.	σ_3 : défini pour chaque matière ensilée.

Tableau (1)

b) COMPARAISON DES METHODES de calculs de JANSSEN, WALTERS SOKOL (CTICM) avec les résultats des normes DIN 64 (16) et 87 (17) et avec les mesures obtenues à CHARTRES (France).

L'analyse des résultats des mesures obtenues sur le site de Chartres dans le cas du remplissage

du silo « D » (diamètre 6 m et hauteur 8 m) avec du blé permettent d'établir que :

* dans le cas de la pression (contrainte) horizontale figures : (8 a) et (8 b), les résultats expérimentaux sont recouverts par les valeurs théoriques de WALTERS et SOKOL (CTICM).

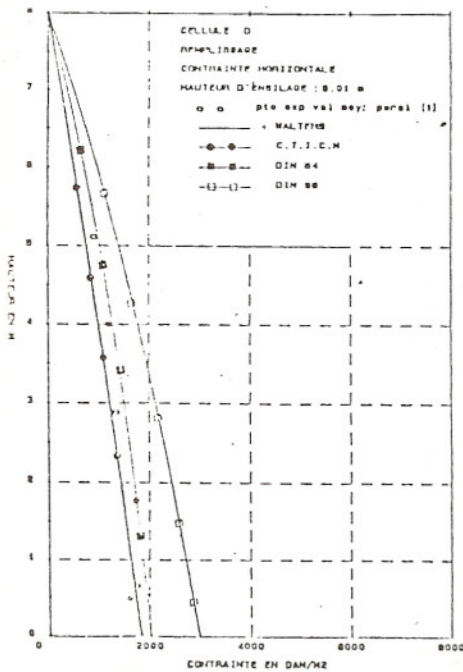


Figure (8 a)

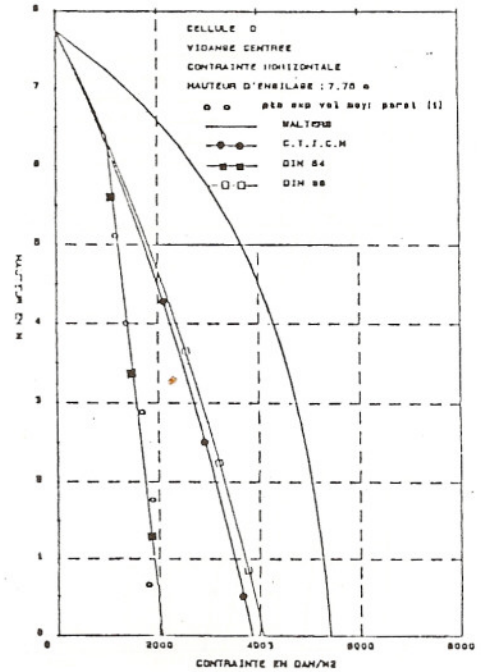


Figure (8 b)

* dans le cas de la contrainte verticale figures : (9 a) et (9 b) les valeurs calculées se répartissent de part et d'autre des mesures.

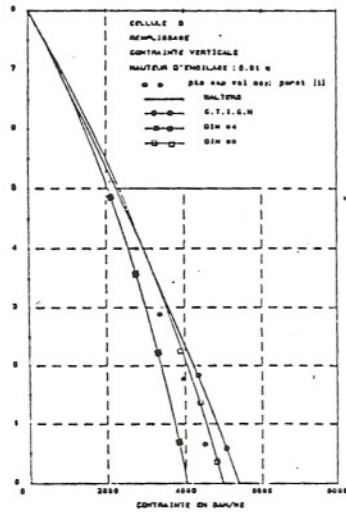


Figure (9a)

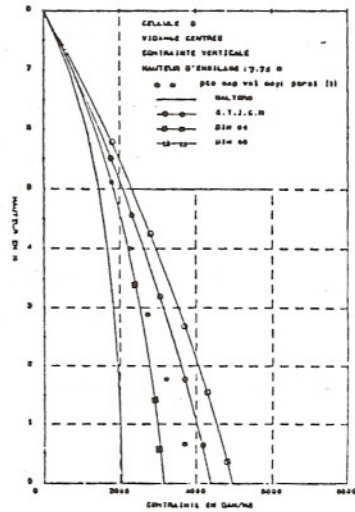


Figure (9b)

* dans le cas du frottement dans les figures (10 a) et (10 b) seuls les résultats de la méthode SOKOL (CTICM) sont nettement inférieurs donc ne conviennent pas.

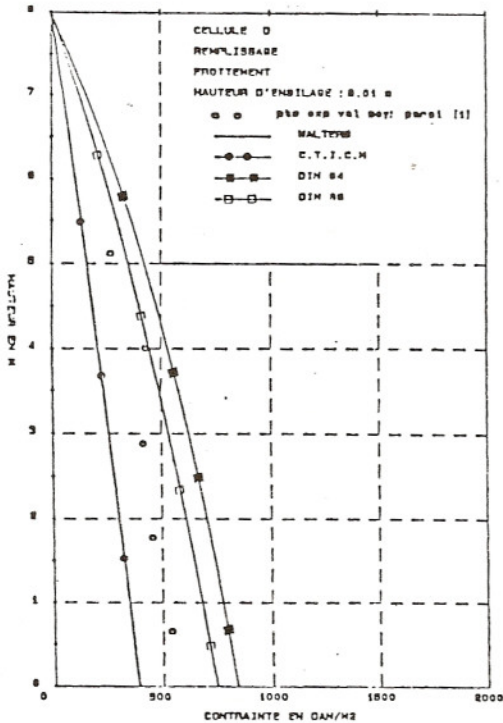


Figure (10a)

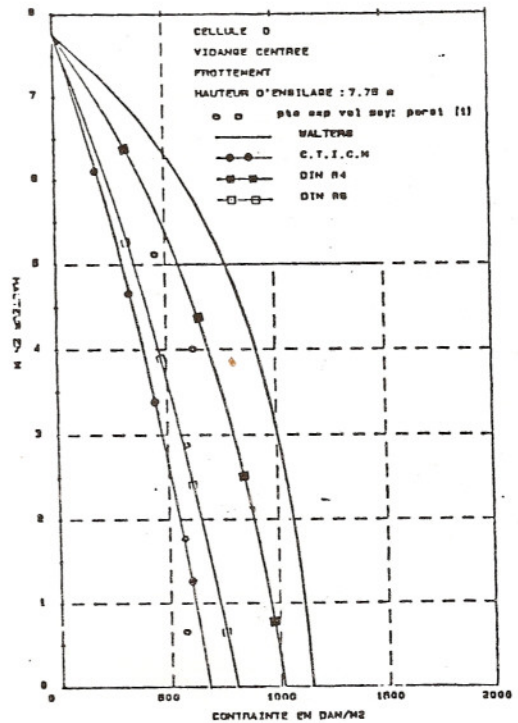


Figure (10b)

II. 2. Influence des paramètres caractéristiques de la matière ensilée.

II. 2. a — Influence du frottement

Nous avons vu dans le paragraphe précédent comment le frottement intervenait dans l'expression de la pression latérale (contrainte) pour du grain.

De façon plus nette encore il est possible de voir l'importance du rôle du frottement à partir de la seule formule de JANSSEN en faisant simplement varier l'angle de frottement en paroi encours de remplissage de 15' à 25' (fig. 11 et 12).

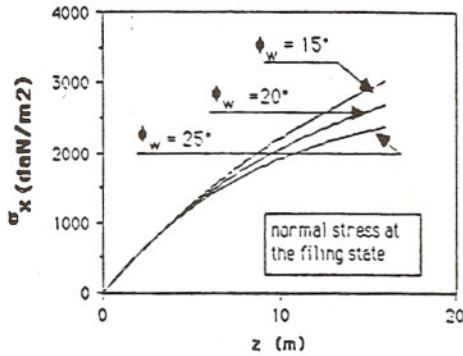


Figure (11)

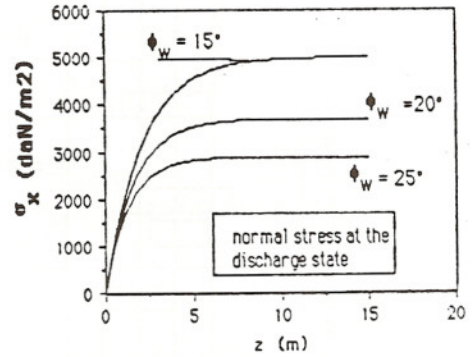
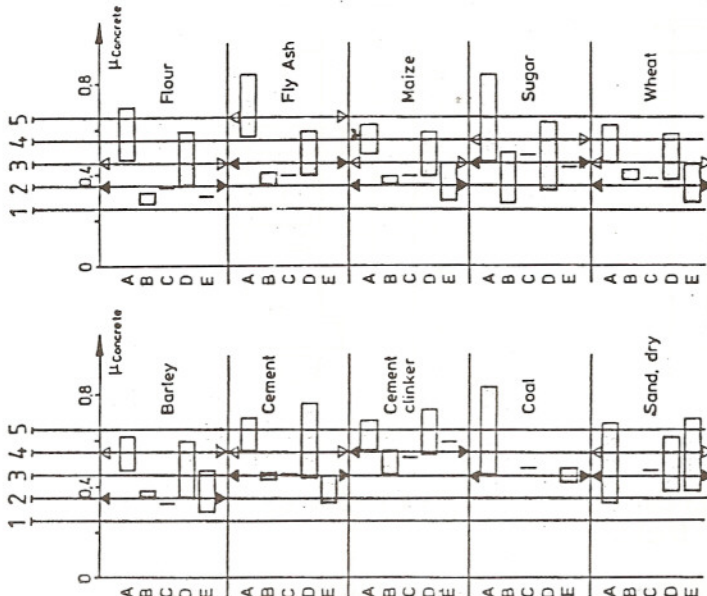


Figure (12)

Les trois tableaux suivants extraits des comptes rendus de la commission FIP/ISO font apparaître l'éventail des valeurs utilisées dans un grand nombre de codes.

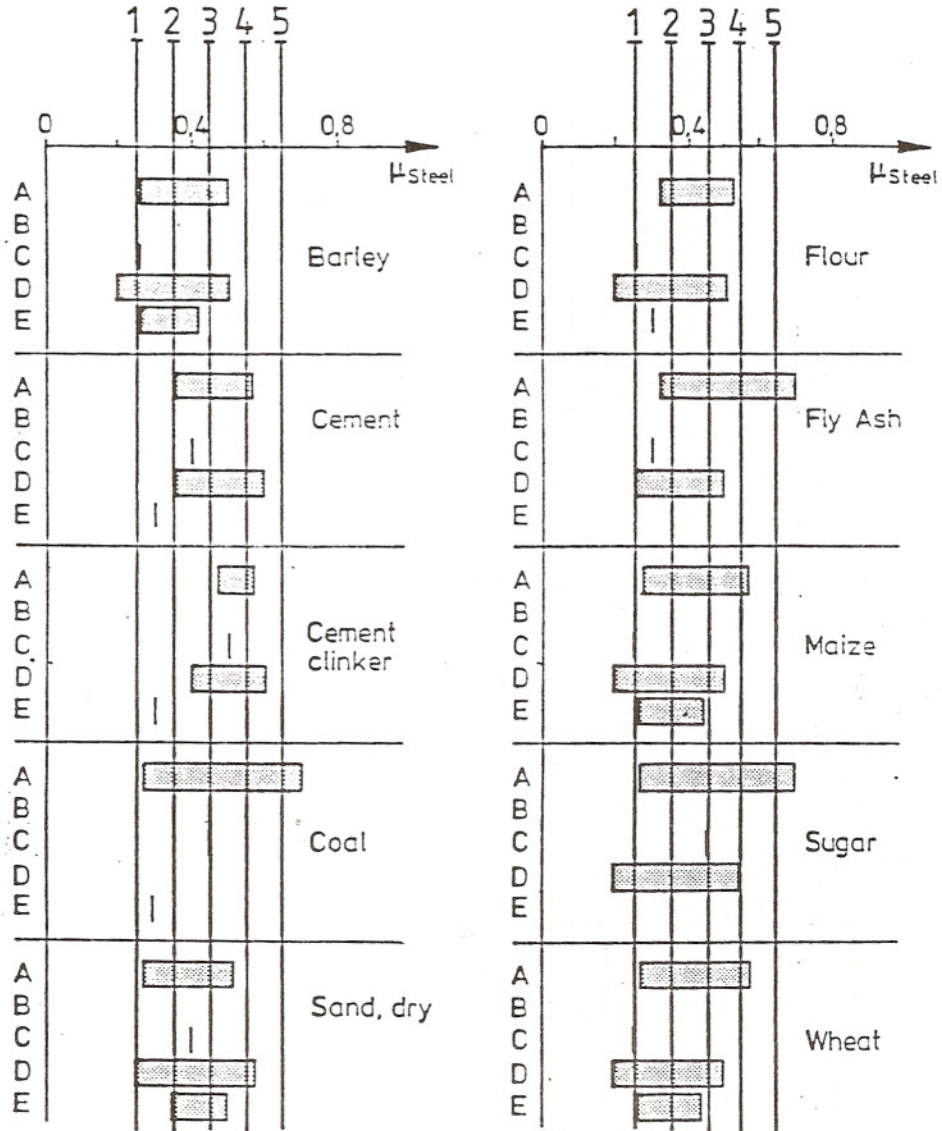


Legende
A = Austr., B = France, C = W.-Ger., D = UK, E = USA
coefficient of wall friction = μ_{Concrete}

TABLEAU [2] des coefficients de frottement en paroi (μ béton)

Ces valeurs exploitées dans les codes pour des structures à parois en béton sont nettement différentes de celles qui sont utilisées dans le cas de parois en acier voir tableau suivant.

Ces différences ont beaucoup contribué à la mise en oeuvre de techniques particulières pour déterminer les silos en béton.



Legende

A = Austr., B = France, C = W.-Ger., D = UK, E = USA
 coefficient of wall friction = μ_{Steel}

Tableau [3] des coefficients de frottement en paroi (μ acier)

II. 2. b— Influence de la densité

Tout comme le coefficient de frottement en paroi la densité des matériaux prise en compte dans les différents codes évolue dans des marges encore plus importantes, d'ailleurs, le terme densité est incorrect au point de scientifique. En effet, tout matériau pulvérulent ou granulaire présente une densité, plus précisément un poids spécifique lié à son état de compressibilité. (état lâche ou plus

ou moins compacté, état sec ou plus ou moins humide, etc.).

La courbe de la figure (13) représente les variations de pressions latérales dans le cas d'un silo en fonction de la variation du poids spécifique, traduite par un coefficient de compressibilité K, alors que le tableau (4) donne des valeurs de densité définies dans certains codes.

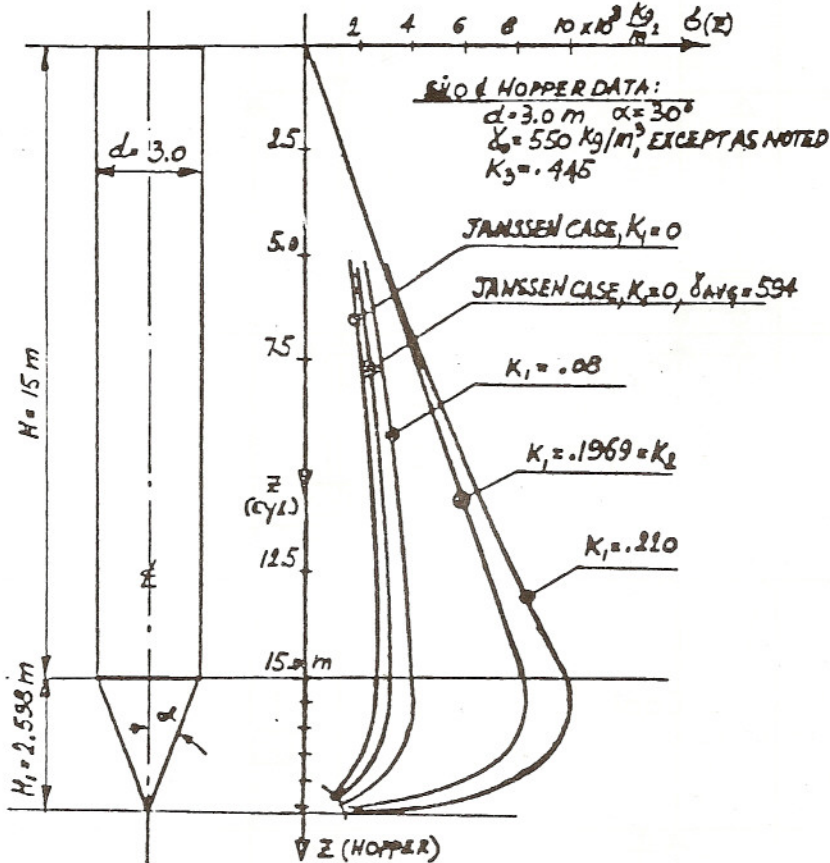
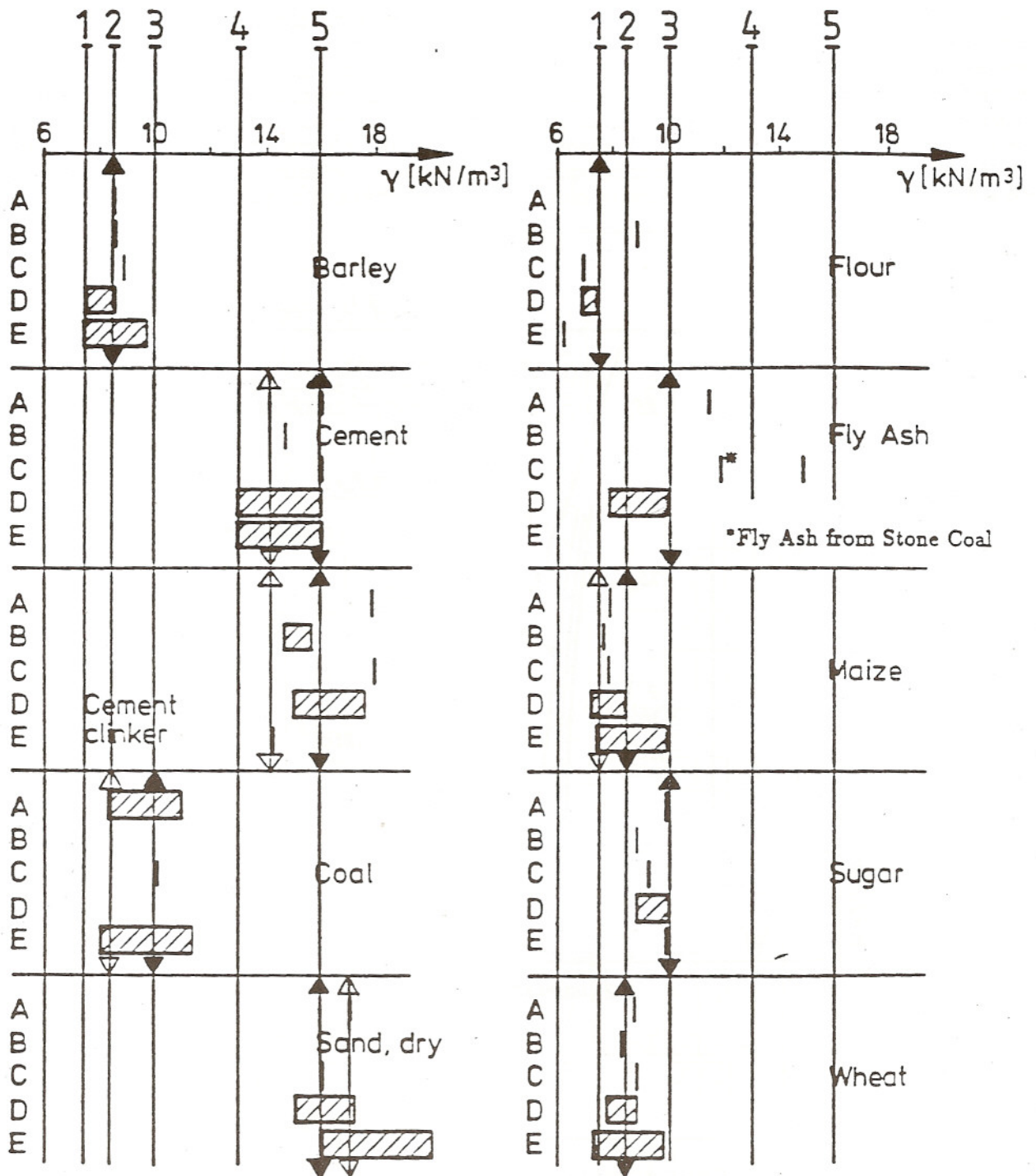


Figure (13) variation des pressions horizontales dans le cas d'un silo de 15 m de haut et de 3 m de diamètre avec une trémie de 30°. le matériau ayant un poids spécifique de 5.50 KN/m³ de valeur de référence.

TABLEAU [4] Valeurs de densité défini dans certains codes.



Legende

A = Austr., B = France, C = W.-Ger., D = UK, E = USA

II. 3. CONCLUSION

En conclusion de cette première partie i. est possible de constater que dans les calculs classiques des efforts engendrés par les matériaux en vrac les pressions ou contraintes établies à partir :

* de l'exploitation de méthodes identiques ou analogues varient en fonction du choix des paramètres physiques et mécaniques caractéristiques des matériaux.

* de l'exploitation de paramètres identiques pour caractériser les matériaux varient en fonction des hypothèses choisies pour traduire la répartition des contraintes au sein du matériau ensilé en équilibre.

* de normes ou de codes de calcul utilisant des théories identiques et des paramètres de matériau identiques varient en fonction des objectifs techniques et économiques.

Avec toutes ces considérations il faut remarquer que pour ne pas compliquer à l'extrême la présentation nous n'avons pas fait intervenir ni mis en évidence le rôle tout aussi important des paramètres suivants :

- humidité des matériaux
- température
- géométrie des silos et réservoirs
- techniques de transports, etc...

Une autre remarque très importante s'impose également à ce niveau de considérations en effet tous les résultats sont conditionnés par la relation qui existe entre les valeurs des pressions et le mode d'écoulement et de remplissage des matériaux.

Cet aspect mérite à lui seul un développement spécifique dans la mesure où il est impératif de connaître le fonctionnement d'un silo avant de choisir une quelconque technique de calcul des efforts. Ceci est encore plus délicat lorsque l'écoulement évolue en cours de vidange entraînant des perturbations aussi bien au niveau des paramètres physiques des matériaux que dans les effets dynamiques contribuant ainsi à des valeurs de pressions ou surpressions imprévisibles.

L'approche et l'interprétation des problèmes liés à l'écoulement des matériaux granulaires nécessite la prise en compte de l'évolution des paramètres physiques et mécaniques en phase dynamique tout comme de l'évolution des paramètres cinématiques traduisant de grandes déformations donc d'importants cisaillements provoquant ainsi l'apparition de phénomènes d'instabilités.

Afin de rendre compte de ces perturbations il est nécessaire d'utiliser des lois de comportement

capables de prendre en compte directement le comportement statique et dynamique. C'est en effet dans cette voie que se développent actuellement les recherches comme nous le montrons dans le chapitre suivant.

III. MODELES NUMERIQUES

III. 1. Introduction

Les modèles numériques résultent de nombreuses recherches sur le comportement des matériaux granulaires et pulvérulents en général et de la mécanique des sols en particulier.

C'est à partir de modèles utilisant la théorie de la plasticité et le concept d'état critique, les lois élastoplastiques, les lois hypoélastiques et les lois incrémentales, ... que ce sont développés les différents modèles numériques appliqués aux calculs des efforts dans les silos.

Parmi les développements récents on peut citer :

* les travaux de G. BISHARA et al. (22), (23), depuis 1977 étudiant le comportement des matériaux ensilés à partir d'une loi de comportement viscoélastique qui ont conduit à la mise au point d'une méthode de calculs par éléments finis non linéaires pour déterminer.

D'abord les pressions statiques en cours de remplissage fig. (14)

et ensuite l'étude de la vidange en masse fig. (15) dans le cas d'un silo cylindrique de 7.3 m de diamètre et de 22.8 m de hauteur avec une trémie d'angle variable de 18° ou de 25° le matériau ensilé est du blé avec un angle de frottement interne de 25° et de 33° respectivement.

* Depuis 1986, K. RUNESSON et L. NILSSON (24) ont développé une étude de simulation de la vidange d'un silo avec un modèle de comportement viscoplastique.

Dans ce cas, la matière est assimilée à un fluide newtonien auquel s'ajoute une composante plastique d'écoulement définie par la critère de DRUCKER-PRAGER.

* De nombreux travaux à l'Université de Braunschweig et à l'Université de Karlsruhe (RFA) parmi lesquels on peut citer les noms suivants : G. GUDEHUS, D. KOLYMBAS, H. LANDHAL, U. HAUSSLER, J. EIBL, G. ROMBACH, etc., ont exploité entre autres à l'aide de méthodes par éléments finis deux types de formulations :

— la première à partir de la loi de LADE traduisant un comportement élastoplastique à laquelle est superposée une partie visqueuse pour les écoulements à fort taux de cisaillement.

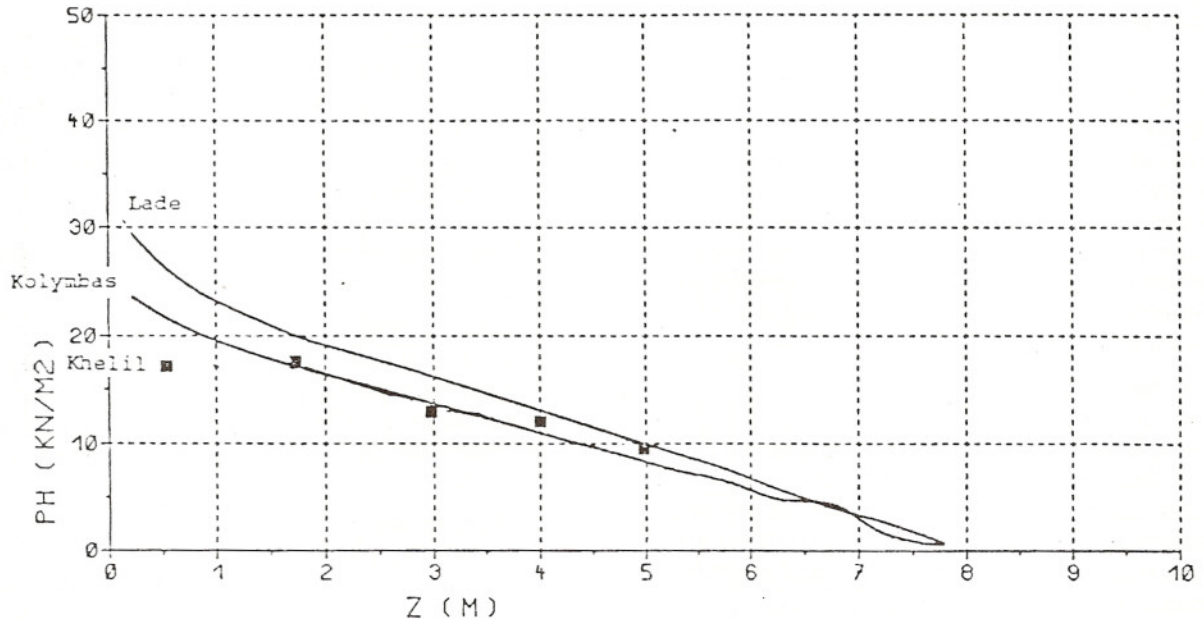
— la seconde à partir d'un, des modèles, de loi de comportement de KOLYMBAS qui exprime une nouvelle approche du comportement des milieux granulaires.

Ces deux dernières lois feront l'objet d'un

III. 2. Travaux développés par J.M. ARIBERT et E. RAGNEAU

Le modèle développé dans le cadre de la mission silo par MM. Ragneau et Aribert (12) se veut avant tout une loi de comportement pas trop complexe adaptée aux mesures expérimentales tout en étant bien conditionnée vis-à-vis du calcul numérique.

BLE : SILO D (CHARTRES) MU=0.3



PRESSION HORIZONTALE (LADE, KHELIL, KOLYMBAS)

développement ultérieur dans les paragraphes III. 3. a et III. 3 b.

* Un grand nombre de travaux sont également en cours par ailleurs comme c'est le cas en France avec le programme par éléments finis mis au point par J.M. ARIBERT et E. RAGNEAU pour dans un premier temps établir le calcul des actions de la matière ensilée sur les parois de silo en phase de remplissage.

La loi de comportement élasto-plastique de Boyce a été développée dans un premier temps pour suivre fidèlement les différentes étapes de remplissage en opérant par superposition de couches d'éléments finis.

Cette méthode a été largement détaillée dans la revue construction métallique N : 2 juin 1989, nous signalons simplement que les premiers résultats numériques en liaison avec la base expérimentale de Chartres sont satisfaisant comme l'illustre la figure (16).

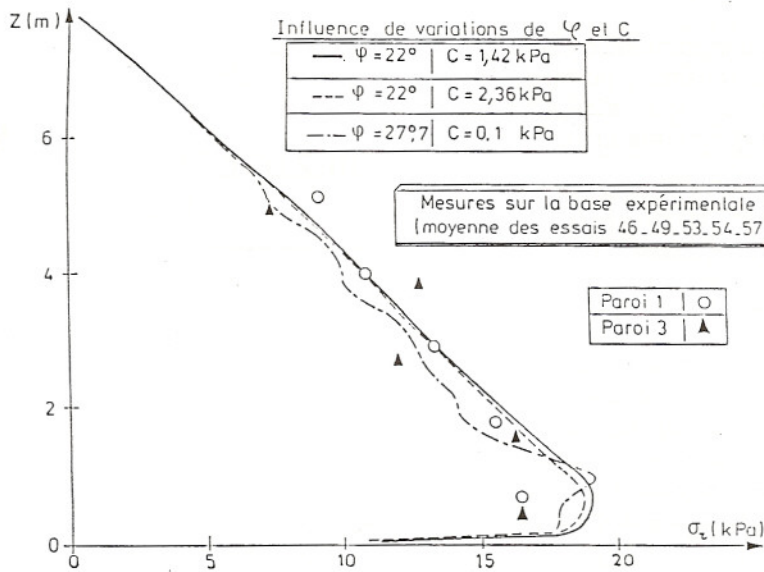


Figure (16) Comparaison des résultats numériques obtenus par J.M. ARIBERT et expérimentaux de la base de Chartres.

III. 3 Modèles développés en R.F.A.

Quant au modèle développé à Karlsruhe (13), il est basé sur les équations classiques de mécaniques des milieux continus. L'écoulement de la matière est caractérisé par l'équation de quantité de mouvement (eq 13).

T : le tenseur des contraintes de Cauchy.

l : densité

b_v : Forces de volume

V : la dérivée particulaire de v

La dérivée particulaire v du vecteur vitesse s'écrit :

$$\dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla v \cdot v \quad (14)$$

Dans un silo la densité de la matière change et passe de l'état dense après remplissage à l'état lâche durant la vidange. Cet effet est pris en compte dans les calculs. La densité est donnée à partir de l'équation de conservation de masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{tr}(\nabla \rho v) = 0 \quad (15)$$

Pour les calculs du tenseur de la contrainte T les relations cinématiques suivantes sont nécessaires :

$$d = 0.5 (v + vT) \quad (16. a)$$

$$w = 0.5 (v - vT) \quad (16. b)$$

Le tenseur de vitesse de déformation d et le tenseur de vitesse de rotation w peuvent être calculés à partir de la dérivée particulaire du vecteur vitesse v.

Les équations différentielles (13-16) sont résolues par éléments finis dans l'espace et par la technique de différences finies dans le temps. La matière ensilée est discrétisée par des éléments isoparamétriques.

Il est évident que les résultats de calcul dépendent fortement du modèle de comportement de la matière ensilée. Durant le stockage ou le remplissage la matière se comporte comme un solide par contre à la vidange son comportement est plus proche de celui d'un fluide. Le comportement simple traduit par le critère de Mohr-Coulomb ou les approches similaires ne donnent pas satisfaction comme nous l'avons déjà vu. Aujourd'hui il n'existe aucune formulation théorique complète capable de rendre compte à la fois des conditions statiques avec de fortes contraintes et faibles taux de déformation et des conditions dynamiques avec de grands taux de déformation et de faibles contraintes.

Par conséquent le taux de contrainte co-rotationnel due à Jaumann T (eq 17) est divisé en une partie indépendante de la vitesse T_s et en une partie dépendante de la vitesse T_v .

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} + Tw - wT \quad (17)$$

$$\dot{T} = \dot{T}_s + \dot{T}_v = Hd + G\dot{d}$$

Les propriétés physiques de la matière ensilée sont représentées par les deux tenseurs du quatrième ordre H et G. Pour la partie statique H deux différentes formulations sont utilisées. La première est la formulation élasto-plastique de Lade (14), la seconde est la formulation tensorielle de Kolymbas (15).

Pour le calcul de G une formulation similaire à la partie déviatorique du tenseur d'un fluide Newtonien, ou le paramètre de viscosité dépend de la trace du taux de déformation a été utilisé.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = G \dot{d} \quad G_{ijkl} = 2 \sqrt{\text{tr } \dot{d}^2} \left(\delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \quad (18)$$

D'après les comparaisons faites par Eibl et Rombach (13), dans les calculs utilisant ces deux modèles, il ressort que durant le remplissage les résultats sont approximativement identiques. Par contre, une différence très significative apparaît durant la vidange. Nous rappellerons dans ce qui suit ces deux lois de comportement utilisées dans la modélisation des matières ensilées.

III. 3. a Loi de comportement de Lade

Ce modèle développé par Lade initialement pour les sols sans cohésion est employé aujourd'hui pour les milieux granulaires ensilés. Ce modèle fait appel aux concepts d'élasticité et de plasticité du matériau (les aspects visqueux du matériau ne sont pris en compte, ce qui peut constituer une lacune dans certains cas de vidange des silos).

La mise en oeuvre du modèle rhéologique de Lade nécessite 14 paramètres caractéristiques du matériau qui peuvent être entièrement déterminés à partir de deux types d'essais en laboratoire, à savoir : des essais de compression isotrope et des essais conventionnels drainés de compression triaxiale.

L'analyse du comportement des sols sans cohésion a conduit à diviser l'incrément de déformation totale en une composante de déformation élastique, une composante de déformation plastique contractante et une composante de déformation plastique déviatorique dilatante. = $d\epsilon_{ij}$

$$\text{soit: } d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^c + d\epsilon_{ij}^d \quad (19)$$

Ces trois composantes sont évaluées séparément :

La composante de déformation élastique est déterminée à partir de la loi de Hooke.

— La composante de déformation plastique contractante déjà est déterminée par une règle d'écoulement associé avec un écrouissage isotrope. La surface de charge est de forme sphérique dans l'espace des contraintes.

— La composante de déformation plastique déviatorique dilatante $d\epsilon_{ij}^d$ est déterminée par une

règle d'écoulement non-associée avec une règle d'écrouissage isotrope.

III.2.b LOI DE COMPORTEMENT DE KOLYMBAS

La loi de KOLYMBAS permet une nouvelle approche du comportement de matériaux granulaires ensilés. Elle consiste en une seule équation tensorielle qui exprime le taux de contrainte en fonction des contraintes et du taux de déformation.

Cette équation tient compte des déformations non élastiques. L'intérêt de cette loi consiste en sa simplicité à la détermination des paramètres rhéologiques. Contrairement à la théorie de la plasticité, la loi de comportement de Kolymbas ne fait pas de distinction entre les déformations élastiques et les déformations plastiques et n'utilise pas la notion de surface d'écoulement.

La loi de comportement s'écrit :

$$T = h(T, D) \\ = C1(TD + DT)/2 + C2 \text{tr}(TD)1 + C3T\sqrt{\text{tr}D^2} \\ + C4 \cdot C4 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\text{tr}D^2} \cdot C4$$

T est le tenseur des contraintes de Cauchy

T est le tenseur taux de contrainte de Jaumann

D est le tenseur des taux de déformation

$$T^3 T - WT + TW \quad (21)$$

$$D = 1/2 (\text{grad } V + \text{grad } vt) \quad (22.a)$$

$$W = 1/2 (\text{grad } vt) \quad (22.b)$$

V : vitesse

C1, C2, C3, C4 sont des paramètres liés aux matériaux

Cette loi de KOLYMBAS ne tient pas compte des effets visqueux. Pour des chargements cycliques l'introduction d'un paramètre tensoriel devient nécessaire. Ainsi l'équation (20) ci-dessus est uniquement valable si l'influence des chargements cycliques est négligeable. Les phénomènes visqueux peuvent être décrits en ajoutant le terme :

$$AD_2 / \sqrt{B^2 + \text{tr}(D)^2}$$

ou A et B sont deux paramètres liés au matériau et $D_2 =$ pour un mouvement irrotationnel.

III.2.c RESULTATS OBTENUS

L'exemple présenté ci-dessous extrait du rapport FIP/ISO n° 15/88 caractérise les pressions latérales dans le cas d'un silo modèle rempli de sable.

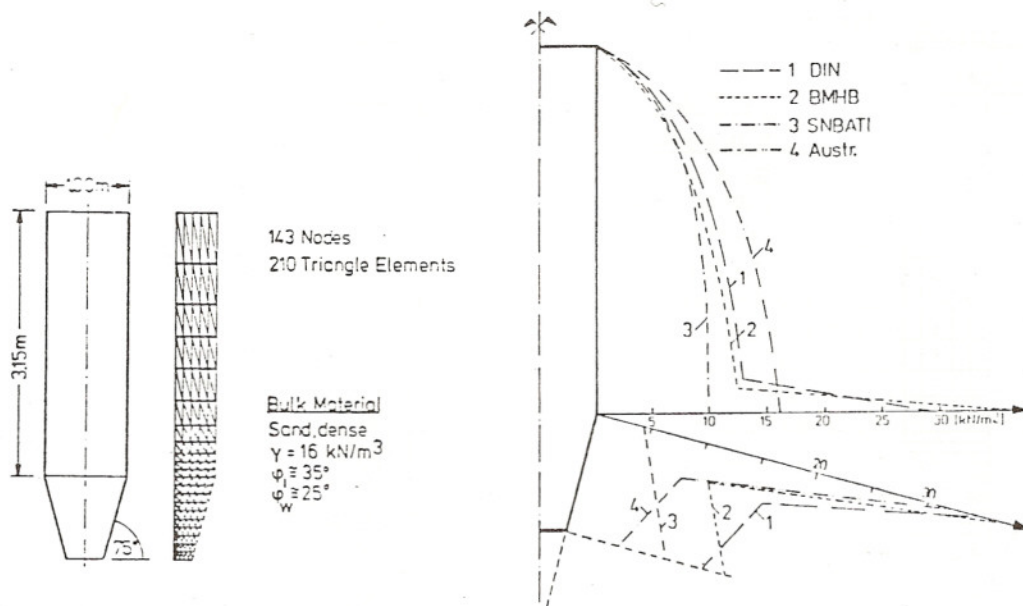


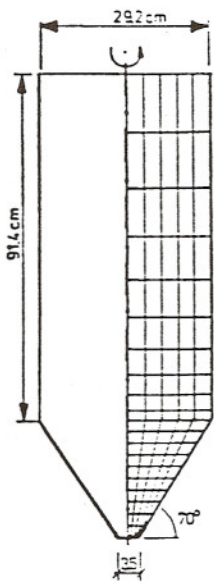
Figure (17) Schéma de discrétisation géométrique et diagramme des pressions statiques.

III. 4 ETUDE COMPARATIVE DES RESULTATS DES METHODES NUMERIQUES, DES CODES ET DES TECHNIQUES DE CALCUL DE PRESSIONS TOTALES

Les courbes figures (18) et (19) montrent l'évolution des pressions latérales au cours du remplissage et de la vidange du sable dans deux silos modèles.

Extrait du rapport 15/18 des travaux du Groupe FIP/ISO les résultats du programme « SILO » pro-

posés par J. EIBL et G. ROMBACH font apparaître des valeurs concordantes ou très proches des résultats de la méthode de WALTERS ou de la norme, tout en montrant nettement l'existence des pics de pression ou encore appelés « switch stresses ».



Bulk Material
 Sand, dense
 ('Karlsruher Sand')
 $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
 $\mu = 0.36$

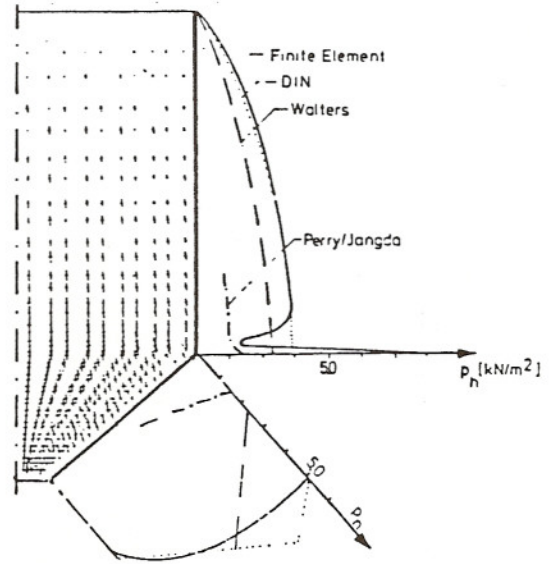
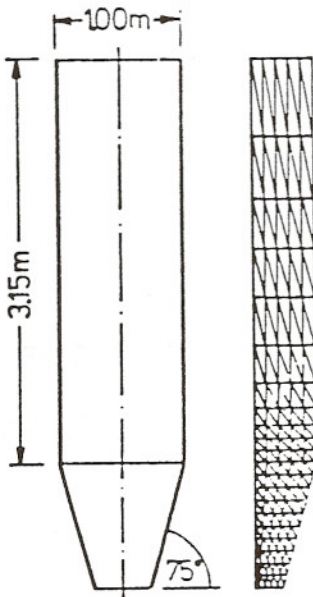
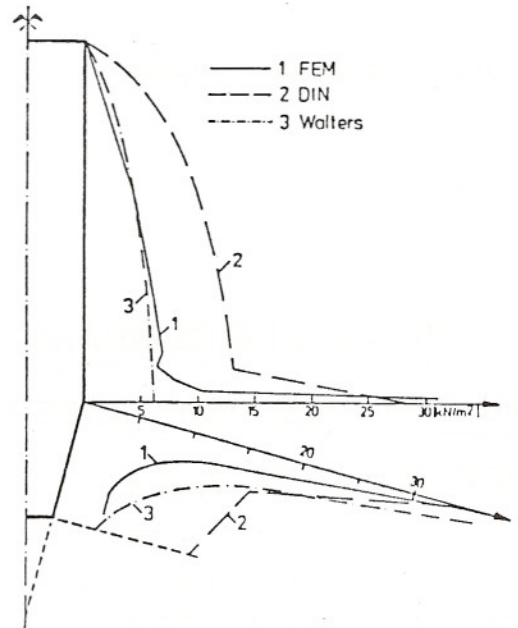


Figure (18)



143 Nodes
 210 Triangle Elements

Bulk Material
 Sand, dense
 $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
 $\phi_1 \cong 35^\circ$
 $\phi_w \cong 25^\circ$



Geometry and discretization

Figure (19)

III. 5 INFLUENCE DU POIDS VOLUMIQUE SUR LA CONTRAINTE HORIZONTALE

L'exploitation du programme « SILO » par J.C. REMESCH (25) pour caractériser l'influence du poids volumique du sable dense ou lâche de Karlsruhe (respectivement KSD et KSL) et de Braunschweig (respectivement BSD et BSL) sur les contraintes dans le cas d'un silo de 30 m de hauteur et de 6 m de diamètre fait apparaître une variation de contrainte horizontale entre le KSD (sable dense) de poids volumique 17.0 KN/m^3 et le BSL

(sable lâche) avec 14.3 KN/m^3 correspondant sensiblement à la variation de poids volumique (fig. 20 et 21).

Par contre les résultats ne sont pas aussi nets dans le cas des charges verticales ou l'influence d'autres paramètres se fait sentir. En effet, le BSD et le KSD ayant le même poids volumique présentent des écarts de pression verticale de 7 % environ (fig. 22).

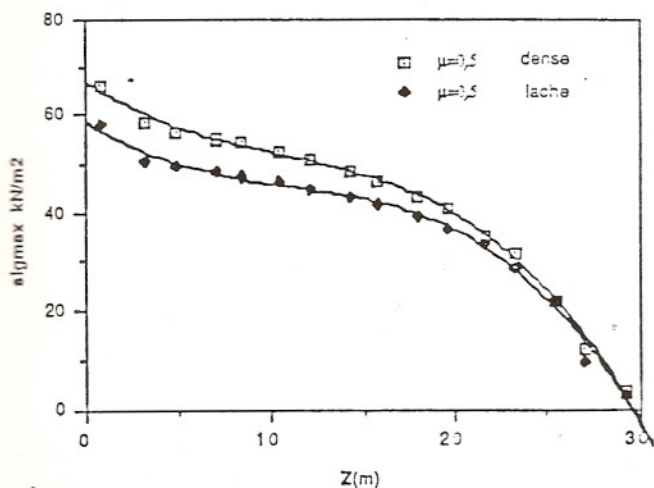


Figure (20)

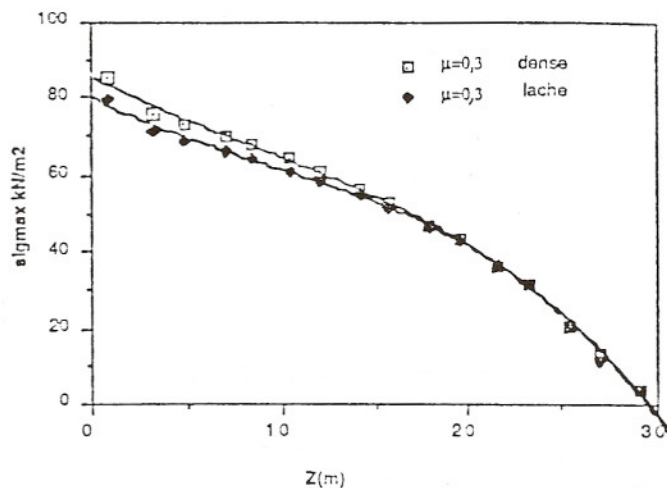
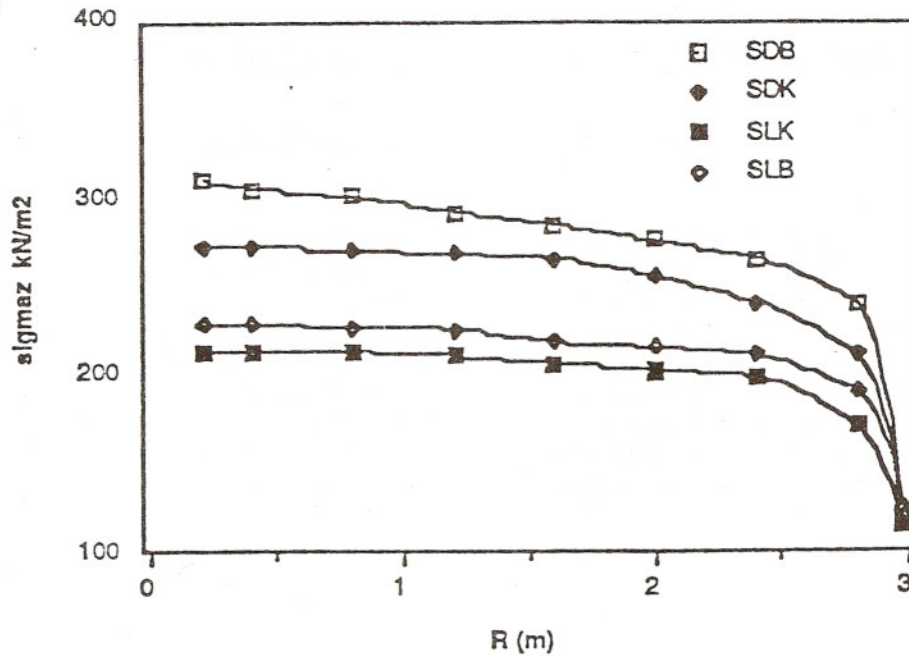


Figure (21)



— Distribution de la contrainte verticale sur le fond pour différents sables.

Figure (22)

III. 6 CONCLUSION

L'état des résultats à ce niveau confirme la conclusion du chapitre précédent, c'est à dire la nécessité de, non seulement, maîtriser les techniques de calculs à l'aide des éléments finis, capable de prendre en compte des aspects cinématiques et dynamiques mais encore, d'approcher avec plus d'exactitude le comportement réel du milieu granulaire et de comprendre le fonctionnement réel du silo. Il est en effet indispensable d'établir un lien

entre le comportement microscopique et le comportement macroscopique de la matière en mouvement lent au cours du stockage (tassement) et en mouvement rapide continu ou discontinu (remplissage et vidange) en fonction de la participation ou non de la structure de l'enveloppe c'est à dire de la géométrie et de la conception du silo ou du réservoir.

IV— COMPARAISON DES RESULTATS DE MESURES EXPERIMENTALES AVEC LES RESULTATS DES MODELES THEORIQUES ET DES NORMES

IV.1 Bref rappel historique de l'évolution des travaux expérimentaux de puis le début du siècle

C'est en 1909 que M.S. KETCHUM a décrit un ensemble de résultats expérimentaux réalisés en Europe et aux USA pour les comparer à ses propres travaux.

Ces premiers résultats, à cause du peu de sensibilité des capteurs utilisés dans les silos modèles n'ont pas permis de mettre en évidence l'augmentation des pressions en cours de vidange par rapport au remplissage. C'est pourquoi l'ensemble des résultats de calcul utilisant les modèles de JANSSEN et AIRY ont été confirmés et exploités en toute confiance à cette époque.

Depuis 1940 grâce à des équipements de mesure plus évolués de nombreux travaux expérimentaux ont été menés à travers le monde :

— d'abord en URSS dès 1941 jusqu'en 1943 par M. REIMBERT puis à partir de 1953 par le même auteur auquel s'est joint A. REIMBERET.

— ce n'est que dans les années 1960 sous l'impulsion de K. PIEPER, F. WENZEL et plus tard par P. MARTENS que des essais ont été réalisés en REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE, et à la même période aux USA avec les célèbres développements expérimentaux et théoriques menés par A. W. JENIKE de 1954 à 1968 auquel s'est joint J.R. JOHANSON dès 1969.

C'est à partir des années 1980 qu'un regain d'activités de recherches dans le domaine expérimental s'est affirmé dans la mesure où les nouvelles modélisations mettant en oeuvre de gros moyens de calculs ont conduit les chercheurs à mieux caler leurs modèles et donc à mieux définir les conditions aux limites dont la connaissance est impérative pour mener les calculs par éléments finis avec efficacité comme nous l'avons déjà constaté.

IV.2 — Nature des travaux exploités et développés

Les premiers travaux sur sites réels publiés dans les revues spécialisés étaient en général dus à l'intervention d'experts en calcul de structures pour expliquer et analyser l'origine des désordres survenus en cours d'exploitation des silos.

Pour déterminer l'origine des fissures, des ruptures de structures, des basculements d'installations, etc... il est apparu très vite qu'il fallait s'intéresser au comportement des matériaux en cours de remplissage et de vidange. Dans ces situations particulières, toute approche, même empirique, nécessitait la mise en oeuvre de mesures pour mettre en lumière la nature des efforts et des déformations en cours de manipulation de la matière dans les silos.

L'instrumentation réalisée sur silos réels en cours d'exploitation s'est heurtée dans les années 1940 à 1950 à des difficultés insurmontables non seulement en fonction des techniques de mise au point des capteurs mais encore au point de vue économique.

Il est donc logique qu'un grand nombre d'ingénieurs et de chercheurs se soient dès lors orientés vers les études de silos modèles afin d'analyser, en laboratoire, dans des conditions optimales, pour la métrologie, le comportement de la matière.

Dans l'impossibilité d'adapter la similitude géométrique des silos à la taille des grains de matière, ce qui fausse les données, ces travaux ont cependant permis une meilleure compréhension du fonctionnement des installations et une meilleure approche des techniques de calcul des pressions dans les cas réels.

Un certain nombre de chercheurs tels que NIELSEN et ses collaborateurs au Danemark, et plus récemment LEPERT et CORTE en France dans le cadre de la « mission silo » ont utilisé des modèles réduits en centrifugeuse pour compenser le défaut de similitude géométrique lié à la taille des grains en créant un champ de pesanteur variable au cours des essais.

En ce qui concerne notre expérience dans ce domaine, après avoir dépouillé de nombreux résultats de mesures sur modèles réduits en laboratoire dans des conditions de pesanteur normale ou en centrifugeuse les problèmes à résoudre restent délicats.

Actuellement nous sommes persuadés que seul de véritables essais en grandeur réelle pourront aboutir à des résultats incontestables à condition que des objectifs réalistes soient fixés.

Cette dernière forme de tests est la seule capable de satisfaire à la fois les théoriciens désireux de maîtriser le comportement des milieux granulaires et pulvérulents et les industriels cherchant des références pour concevoir des installations de stockage durables et économiques.

IV. 3 Comparaison des mesures de pressions dans les silos grandeurs réelles avec les méthodes de calculs de pressions totales et les résultats des normes

Les résultats présentés constituent une synthèse partielle des documents publiés et de nos travaux concernant essentiellement les mesures expérimentales de pressions dans les silos et réservoir sur sites réels ou de modèles de taille industrielle.

Nous nous intéresserons uniquement aux actions de la matière en ne faisant pas référence à la nature de la structure des silos étudiés.

La matière ensilée choisie pour effectuer nos comparaisons représente une gamme limitée de produits granulaires mais représentative des études réalisées : le blé, le charbon, le ciment et le sable. Il s'agit bien entendu de matière non cohésive dont l'écoulement est assuré.

IV. 3. a Etude du blé

Les résultats présentés dans le cas du stockage du blé font appel à des études comparatives effectuées par S. SAFARIAN et al. et par G. BLIGHT ainsi qu'à un grand nombre de publications de différents auteurs complétés par nos propres travaux exploitant la BASE EXPERIMENTALE DE CHARITRES. (Voir description en annexe 3)

Dans un premier temps il est nécessaire de présenter les différents résultats en fonction de l'élanement des silos :

Elancement important

— Figure (23) HARTLEN et al. proposent dans le cas d'un silo de 6 m de hauteur et de 7 m de diamètre avec écoulement par conduite oblique des résultats de mesures comparés avec les valeurs calculées à l'aide des codes allemand, australien et américain. Apparemment aucune correspondance n'existe entre ces différents résultats.

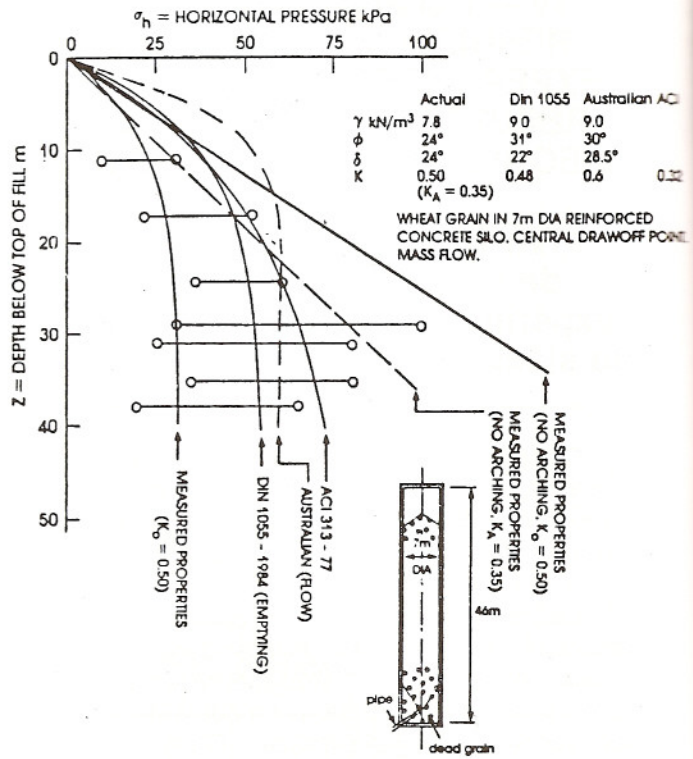


Figure (23)

— Figure (24) A. BORCZ utilisant les mesures de MITCHELL et de NIELSEN (rapport FIP/ISO 27/89) présente une comparaison avec les normes SNBATI (France), CSN (Tchèques), TGL (RDA), SN (Soviétiques), ACI (Américaines) et les évolutions de la norme DIN de 1964 à 1983.

Il existe dans ce cas une concordance acceptable entre les différentes valeurs pour l'empilage alors que pour la vidange les écarts sont importants.

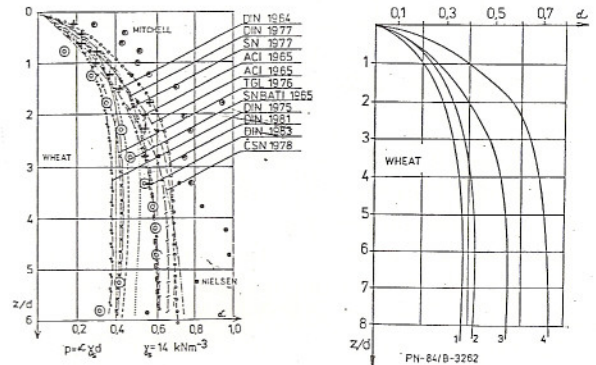


Figure (24) Comparaison dans le cas du blé Mesures et Calculs

Elancement faible

— figure (25) et (26) représentent les résultats de la BASE EXPERIMENTALE DE CHARTRES publiés par le GRRS

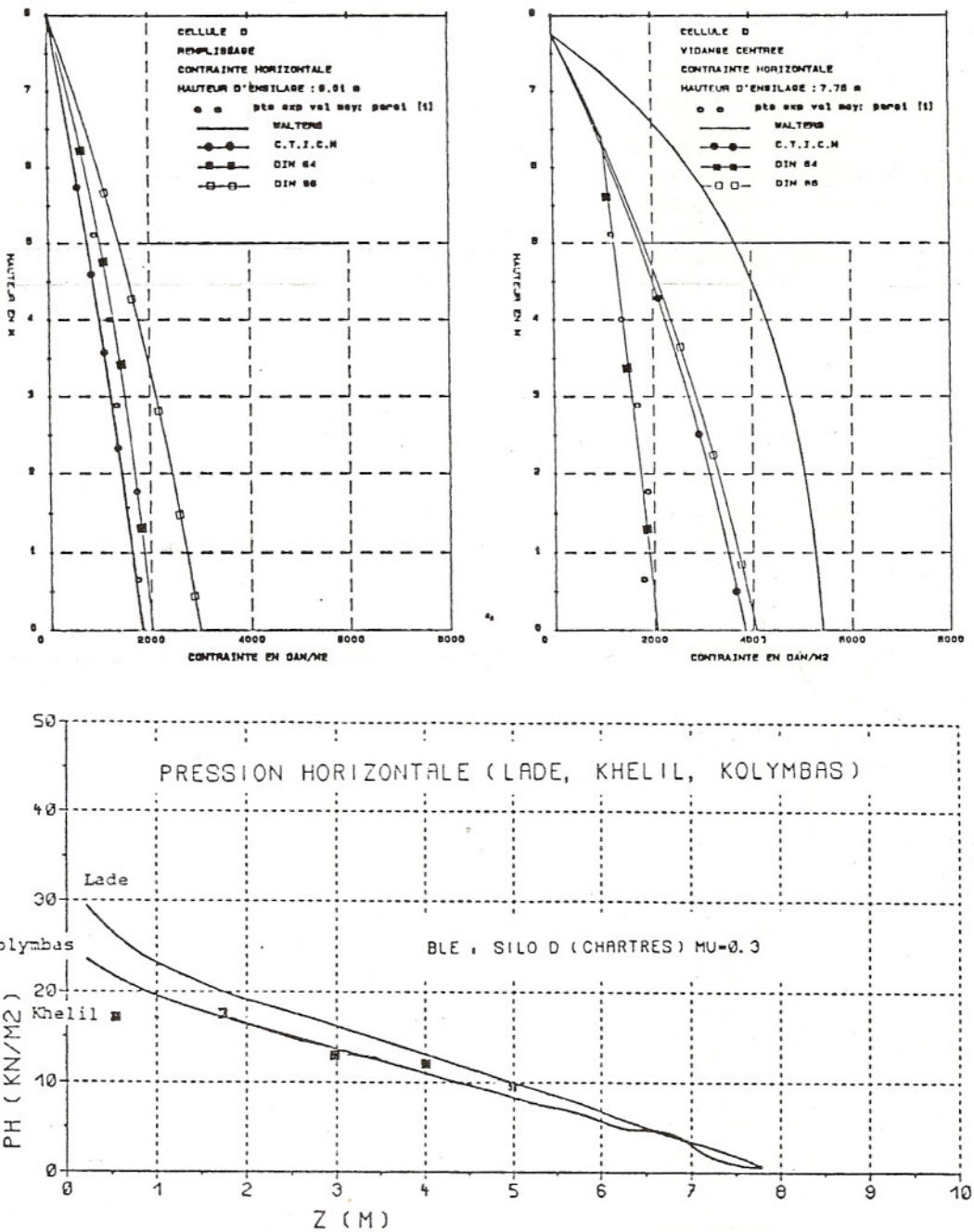


Figure (25): Silo "D" Comparaison des résultats des mesures et des différentes techniques de calcul.

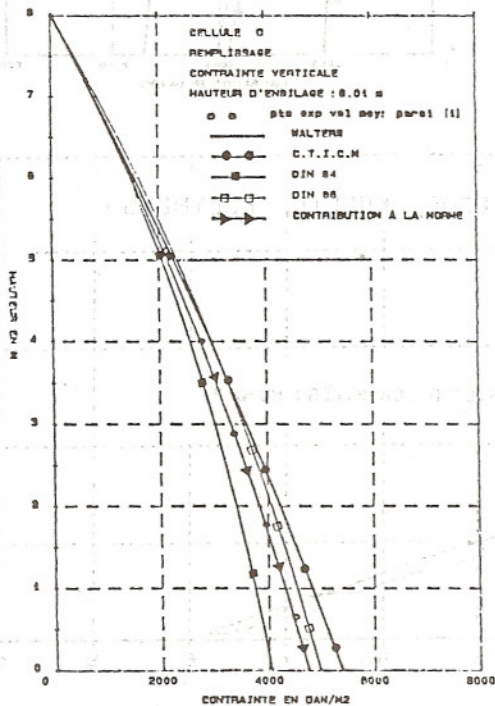
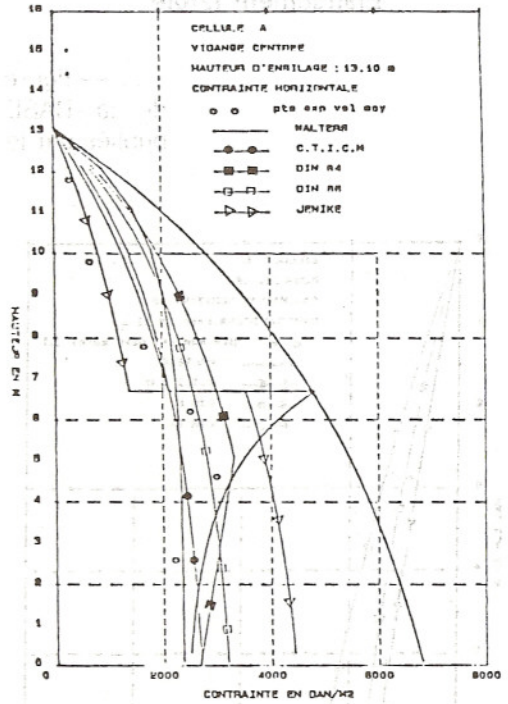
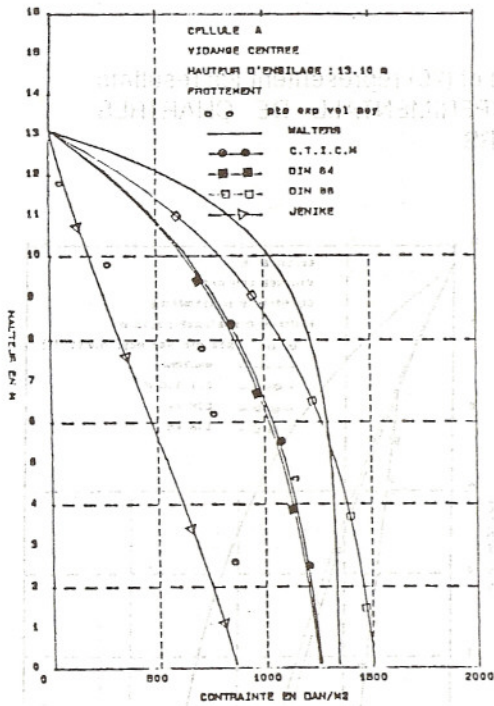


Figure (26): Silos "A" et "D" Résultats desmesures et des différentes techniques de calcul.

Nous constatons à la lecture et à l'analyse des résultats expérimentaux présentés dans le cas du blé qu'il existe un très grand nombre de travaux délicats à exploiter dans la mesure où les modes et techniques opératoires ne sont pas précisés, ni dans la détermination des caractéristiques des matériaux ni dans celles des capteurs.

Cette situation empêche toute vérification ou contrôle des résultats donc ne permet pas de valider les comparaisons, ce qui nous a amené à limiter l'ampleur des comparaisons et des conclusions.

IV. 3.b Autres matériaux

Comme il est impossible d'établir des comparaisons objectives nous nous contenterons de compléter cette étude comparative par la présentation de différents travaux expérimentaux réalisés dans le cas du stockage du ciment et du charbon.

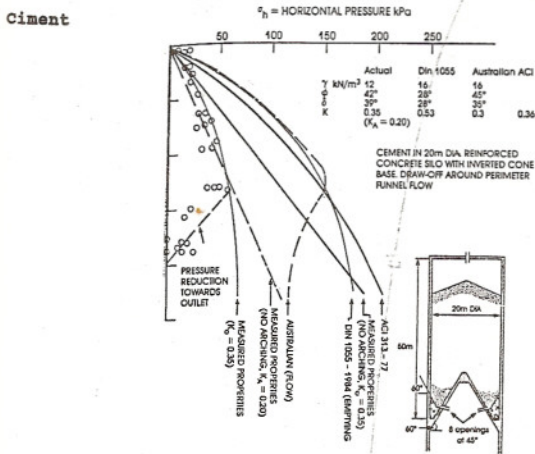


Figure (27)
Pressions horizontales cas du ciment en poudre d'après BLIGHT [27]

Dans le cas du ciment, matériau particulièrement pulvérulent les résultats proposés par SCHAFFNER et BLIGHT (figure 27) et FLISS et BLIGHT (figure 28) indiquent qu'en fonction des valeurs des paramètres utilisés (ici le poids spécifique passé de 12 à 16 KN/m³) dans les codes de calcul les pressions horizontales calculées sont nettement supérieures aux valeurs expérimentales.

Ces résultats sont confirmés par les études de BORCZ et al. (rapport FIP/ISO) membre du groupe de normalisation polonais qui étendent les comparaisons aux codes soviétiques, anglais et de R.D.A. comme le montre la figure 29.

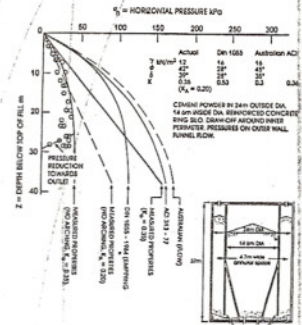


Figure (28) Pressions horizontales cas du ciment d'après BLIGHT [27]

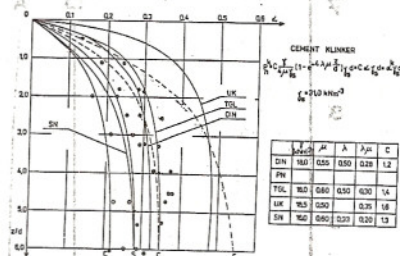


Figure (29) Comparaison des pressions horizontales pour le ciment

Dans le cas du ciment une étude comparative, théorique des pressions établie à l'aide des codes, français, anglais, allemands et américains fait apparaître des écarts allant jusqu'à 50 % par rapport à une moyenne générale. La seule particularité intéressante que l'on peut relever est de constater que l'allure des courbes est analogue à l'évolution des mesures de pressions, voir figure 30.

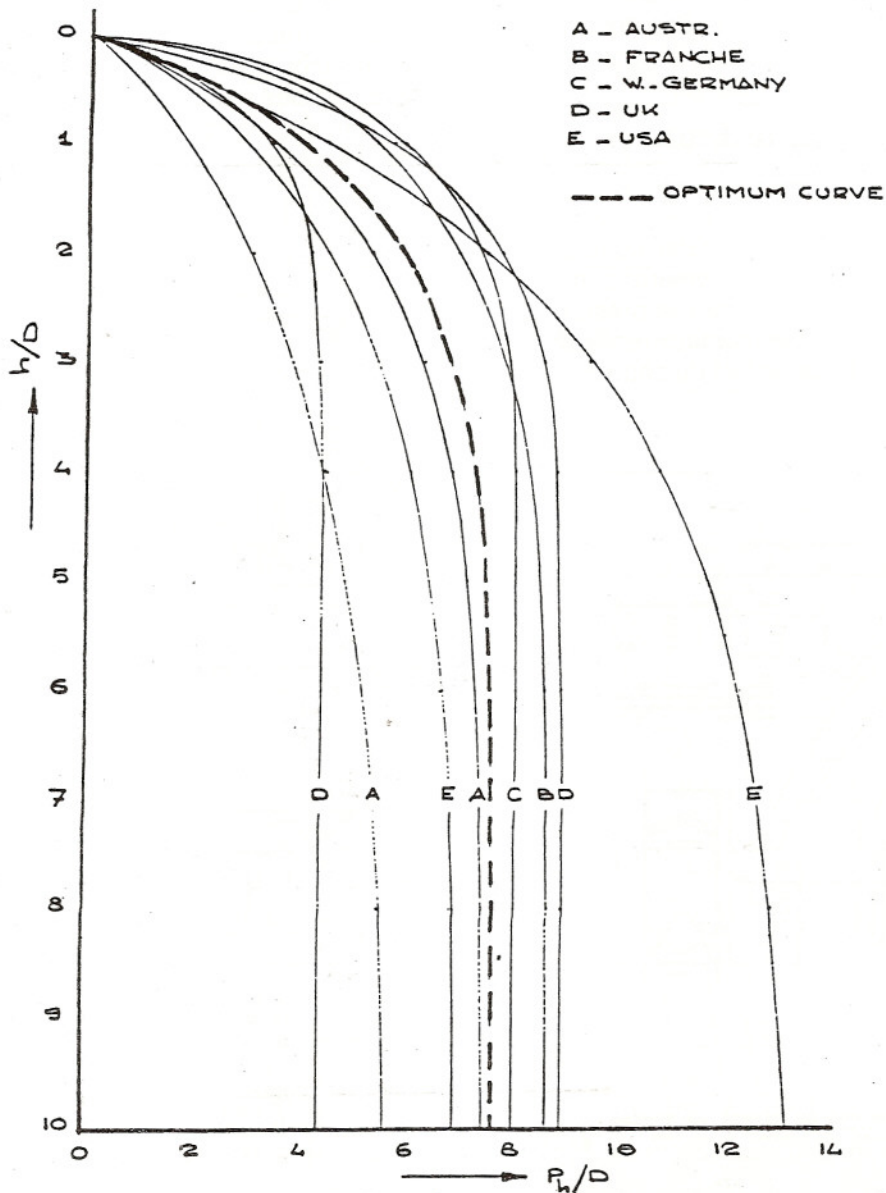


Figure (30) Etude comparative des pressions horizontales dans le cas du ciment à l'aide de différents codes (rapport FIP/ISO Silo Design)

Charbon

Les commentaires formulés par G.E. BLIGHT au sujet des résultats obtenus dans le cas du charbon par OMOTE et SUEKANE dans (27) confirment la difficulté d'exploiter des travaux publiés sans références précises.

Seul une modification des valeurs permettent l'exploitation des travaux de OMOTE et SUEKANE comme le préconise BLIGHT dans son étude de la pression horizontale expérimentale mesurée et calculée par les codes dans la figure 31.

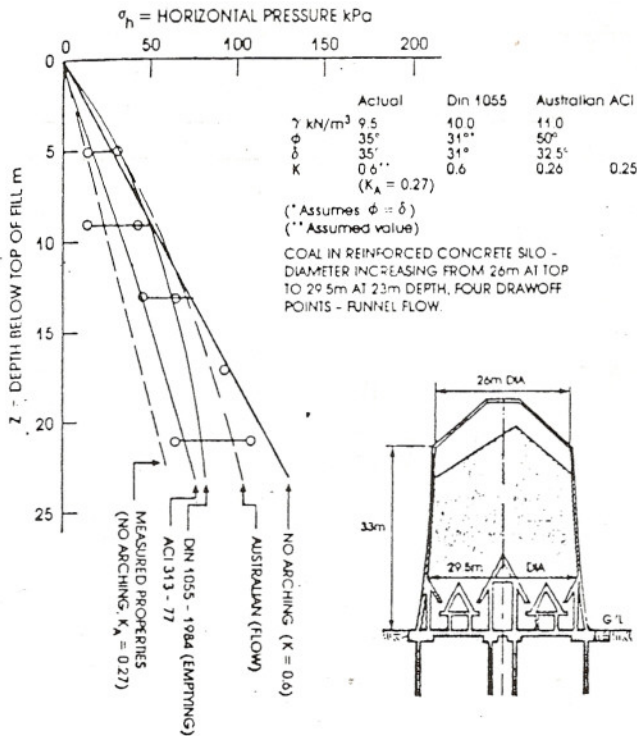


Figure (31) Résultats expérimentaux de OMOTE et SUEKANE avec corrections des mesures expérimentales par BLIGHT [27]

A partir des mêmes résultats expérimentaux de OMOTE et SUEKANE adaptés par BLIGHT, BORCZ effectue une comparaison (figure 32) avec plusieurs codes. Il est remarquable de constater

que les valeurs obtenues avec la norme ACI diffèrent totalement par rapport à la figure 31.

Il est donc, comme nous l'avons déjà signalé, très difficile de tirer des conclusions de ces études.

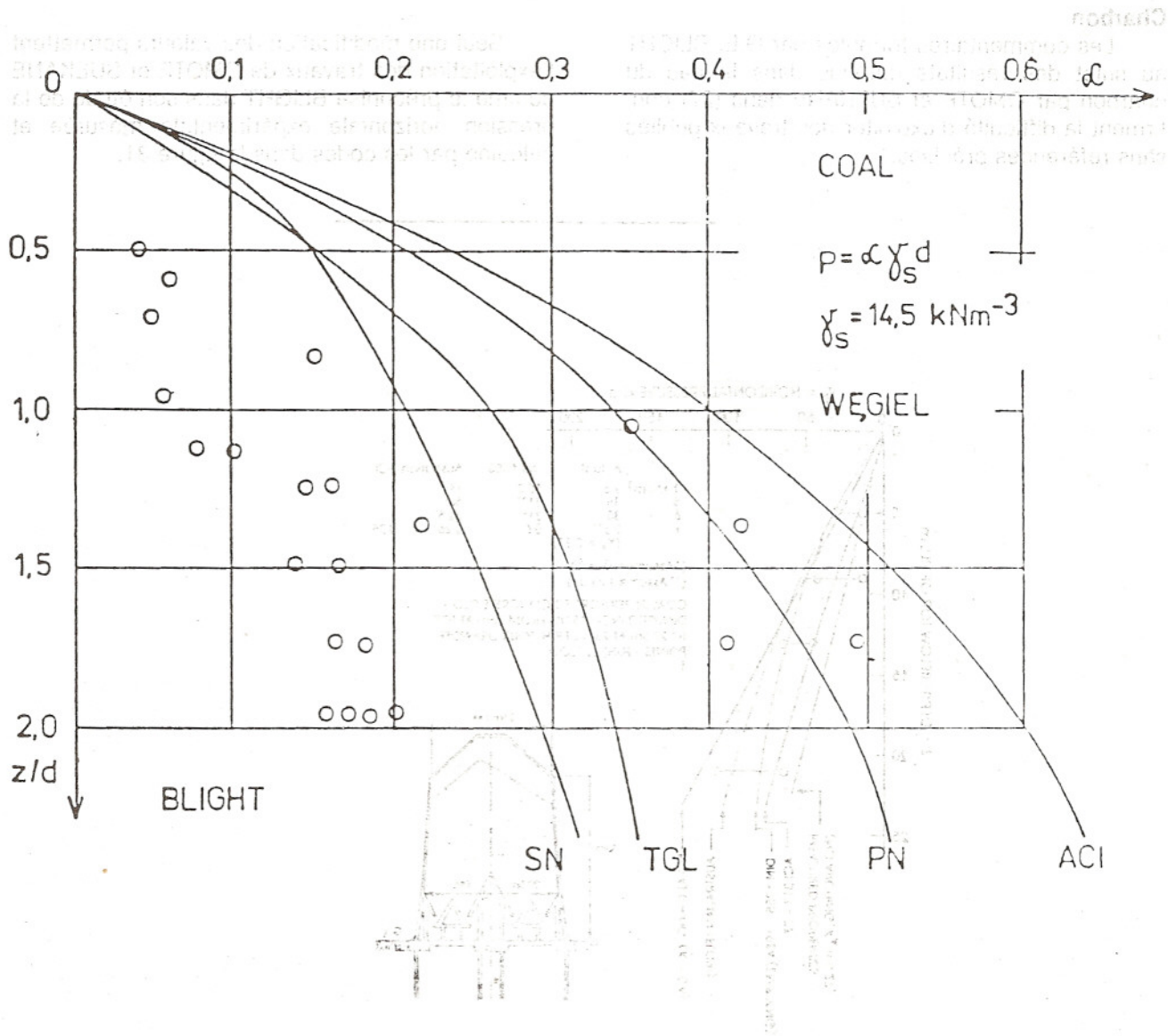


Figure (31) Résultats expérimentaux de GOMTE et SUKRAMB avec correction des mesures expérimentales par BLIGHT [27]

Figure (32) comparaison des mesures expérimentales exploitées par BLIGHT et des calculs dans le cas du charbon avec les normes SN (soviétiques), TGL (allemand de RDA), PN (polonaises) et ACI (américaines).

A partir des mêmes résultats expérimentaux de GOMTE et SUKRAMB exploités par BLIGHT, BOROS effectuait une comparaison (figure 33) avec plusieurs codes. Il est remarquable de constater que les résultats de tir des conclusions de ces études, il est donc, comme nous l'avons déjà signalé, tout à fait en accord avec la figure 31.

CONCLUSION

Nous avons d'abord décrit l'évolution des différentes méthodes de calcul des pressions engendrées par les matériaux en vrac en cours d'ensilage. Si dans le cas du remplissage le calcul des pressions grâce à l'adaptation de la théorie de JANSSEN donne satisfaction il n'en est pas de même pour la vidange.

Les travaux en cours à l'aide des méthodes de calcul par éléments finis exploitant les modèles de lois de comportement établis à partir de la micro-mécanique laissent entrevoir des possibilités réelles pour traduire l'état des contraintes et le champ de vitesse au cours de la vidange.

Les résultats expérimentaux présentés ne représentent qu'une petite partie des essais et mesures réalisés sur silos et réservoirs en vraie grandeur ou sur sites réels.

L'étude comparative entre résultats expérimentaux et calculs ne constitue qu'un essai très incomplet qui a cependant le mérite de mettre en évidence la nature des problèmes posés.

D'une façon générale il faut reconnaître qu'il est impossible dans la situation actuelle d'établir une synthèse efficace et objective entre mesures et résultats de calculs même pour un seul matériau et à plus forte raison donc pour une famille de matériaux.

La présentation de ce travail sous sa forme actuelle est déjà le résultat de notre participation à plusieurs organismes de consultation et de concertation nationaux et internationaux. Très incomplet et loin d'atteindre l'objectif ambitieux annoncé dans l'avant propos et dans l'introduction, notre étude prend en compte les nouvelles orientations de la recherche dans le domaine des matériaux ensilés en faisant état de l'activité grandissante des échanges internationaux.

DOCUMENTS EXPLOITES DANS LE TEXTE ET NON REFERENCES

* S. SAFARIAN et C. HARRIS, Design and construction of silos and bunkers — Van Nostrand Reinhold 1985.

* GAYLORD (E.H. et G.H.) Design of steel bins for storage of bulk solids. Prentice-hall Inc. Editor

* Rapports du GROUPE DE TRAVAIL de la MISSION SILO

M.R.T. 1986—1989. Paris—FRANCE

* RAPPORTS du GROUPE de NORMALISATION FIP/ISO 1987-1990

Responsable : Prof.Dteur Ing. J. EIBL

* SILOS-FORSCHUNG UND PRAXIS TAGUNG'88 Sonderforschungsbereich 219 « Silobauwerke und ihre Spezifischen Beanspruchungen » UNIVERSITAT KARLSRUHE

* CONSTRUCTION METALLIQUE Revue CTICM N° 2 1989, Saint Rémy Les Chevreuse — FRANCE

BIBLIOGRAPHIE

[1] H.A. JANSSEN Versuche uber Getreidedruck in Silozellen VDI—Zeitschrift 39 (1895), S. 1045

[2] W. AIRY The pressure of grain. Minutes of proceedings, Institution of Civil Engineers, London, V. 131. 1897

[3] M. et A REIMBERT Silos theorie et pratique. Eyrolles 1982

[4] D.W. WALKER An approximate theory for pressure and arching in hoppers. Chem. Engng. Sc. vol 21 1966

[5] J.K. WAITERS A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls. Chem. Engng. Sc vol 21 1973

[6] J.K. WALTERS A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers. Che. Engng. Sc vol 28 1968

[7] A.W. JENIKE, J.R. JOHANSON Bin loads. Journal of structural division St4 April 1968

[8] A.W. JENIKE, J.R. JOHANSON, J.W. CARSON, Bin loads part 2/3. Concepts Journal of Engng for Industry Feb 1972

[9] CAQUOT A. et KERISEL J. Traite de mécanique des sols pp. 457-464 4ème édition Gauthier Villars Ed. Paris 1966

[10] FREESE B. Druckverhältnisse in zylindrischen Silozellen, Dissertation Universitat KARLSRUHE, 1979.

[11] L. SOKOL Bin loads in vertical silos. Interna-

« Analyse et interprétation des résultats expérimentaux de la base de silos métalliques de Chartres.

A. KHELIL ET J.C. ROTCH LEMTA UA 875 CNRS
GRRS IUTLEMONTET 54600 VILLERS LES NANCY

RESUME :

Cette étude, effectuée en collaboration avec le CITICM s'inscrit dans le cadre de la « Mission silos » qui a pour objectif l'établissement d'une nouvelle norme.

Le dimensionnement d'un silo nécessite une bonne connaissance des actions de la matière ensilée et des modalités de vidange. Nous présentons dans cette étude l'analyse des mesures de pression sur les parois de silos en vraie grandeur de Chartres. Ces mesures sont obtenues durant les différentes phases d'ensilage (remplissage, vidange centrées et excentrées). Les silos testés sont à fonds plats, de section carrée ou circulaire avec des parois verticales lisses ou ondulées.

L'action de la matière ensilée sur les parois est mesurée au moyen de capteurs spéciaux, donnant deux composantes d'effort : la pression horizontale et le frottement. Les résultats de mesure sont comparés aux calculs théoriques établis par les normes DIN 87, et la nouvelle norme P22-630.

— Introduction

Depuis la théorie de Janssen (1895) de nombreux chercheurs se sont intéressés au problème de la poussée dans les silos, diverses propositions de solutions ont été élaborées. Dans la littérature, on relève très peu d'expérimentation sur silos en vraie grandeur. Par contre les essais sur des modèles réduits de silos sont nombreux et constituent souvent un support de comparaison avec les théories de calcul et les normes. Les mesures rap-

portées dans cet article sont obtenus sur les silos en vraie grandeur de la base expérimentale de Chartres. Les efforts de pression sont obtenues au moyen de capteurs spéciaux (1) mesurant simultanément l'effort horizontal (normal à la paroi) et l'effort de frottement (tangential à la paroi). Ces

mesures sont réalisés en remplissage, en vidange centrée et en vidange excentrée. Le coefficient de pression ainsi que le coefficient de frottement sont déterminés à partir des mesures des capteurs de parois. Des capteurs sont également disposés au fond de chaque cellule pour mesurer la pression

verticale sur la base. Les résultats de ces capteurs de fond sont comparés à ceux issus du calcul par la prise en compte du frottement et du poids de la matière ensilée.

Enfin nous comparons les variations de pressions mesurées en fonction de la profondeur avec les résultats donnés par la Norme DIN 87 et la nouvelle norme P22630.

II Description de la base expérimentale de Chartres

La base comporte 4 cellules de divers types, permettant d'examiner l'influence des différents paramètres sur les pressions exercées par la matière ensilée (1).

Les caractéristiques principales des cellules sont montrées dans le tableau 1

Tableau 1 : caractéristiques principales des cellules

Cellules	A	B	C	D
forme géométrique	carrée	rectangulaire	circulaire	circulaire
forme des parois	trapézoïdale	trapézoïdale	ondulée	lisse
Dimensions (m)	6,42x16	2,25x6,42x 16	8x12,5	6x7,5
Rayon hydraulique	1,605	0,833	2	1,5
Fonction de vidange	centrée/ excentrée	centrée/ excentrée	centrée/ excentrée	centrée/ excentrée

III Fonctionnement de la base expérimentale

En phase d'essais, soit en opération de remplissage, soit en opération de vidange, la matière ensilée sera transférée d'un silo à un autre :

— En phase de mesure lors du remplissage, la matière ensilée sera extraite d'une cellule pleine et acheminée après pesage dans la cellule d'essais.

— En phase de mesure lors de la vidange, la matière ensilée dans la cellule d'essai sera

vidangée, pesée et stockée dans une cellule receveuse.

L'action de la matière ensilée sur les parois est mesurée au moyen de capteurs spéciaux, donnant deux composantes d'effort de pression : la pression horizontale T_x et le frottement t le tableau 2 donne la position de ces capteurs sur les parois des cellules A, C et D.

Tableau 2 : position des capteurs de paroi

Cellule "A"	[1A] : 5,8 m	[2A] : 8,2m	[3A] : 9,8 m	[4A] : 11,4 m	[5A] : 13,4m	
Cellule "D"	[1D]: 2,38 m	[2D] : 3,50 m	[3D] : 4,61 m	[4D] : 5,73 m	[5D] : 6,85m	
Cellule "C"	[1C]: 0,487	[2C]: 1,63 m	[3C] :2,7 m	[4C]: 3,9m	[5C]: 5,07 m	[6C]:
	[7C]: 7,3m	[8C]: 8,4m	[9C]: 9,6m	[10C] :10,7m	[11C]:11,9m	6,2 m

IV Expérimentation

Les mesures sont obtenues au cours de plusieurs cycles de remplissage et de vidange. Toutes les manipulations sont exécutées à partir d'une centrale de commande regroupant les appareils de mesure et autorisant le contrôle à partir d'un tableau synoptique général. La scrutation des voies de mesure se fait simultanément avec le remplis-

sage de la cellule et les résultats sont stockés dans des fichiers sur disquettes. La vidange se fait après une nuit ou plusieurs jours de stockage pour permettre à la matière de se tasser. La mesure se fait simultanément avec la vidange. La matière utilisée pour tous les essais est le blé de poids volumique 835 daN/m³ et d'angle de frottement interne 28.

Mode d'écoulement observé au cours de la vidange

Le mode d'écoulement de la matière durant la vidange joue un rôle essentiel sur la distribution des pressions sur les parois. La vidange de la cellule « D » s'effectue en cheminée; la matière s'écoule par une cheminée centrale. La matière ne glisse pas en masse sur la paroi. Dans la cellule « C » (un

peu plus élancée que la cellule « D ») la cheminée d'écoulement est moins bien marquée que dans la cellule « D ». Quant à la cellule « A » la vidange se fait en semi-masse : la partie supérieure fonctionne en écoulement en masse et la partie inférieure fonctionne en écoulement en cheminée.

V Analyse des résultats V-1 Cellule « D » V-1-1 Remplissage

La figure (1) représente les courbes donnant les contraintes horizontales en fonction de la profondeur pour des variations de 10 % de hauteur d'ensilage. Les différents points représentent les valeurs des contraintes mesurées par chaque capteur de paroi à la profondeur z correspondante.

Nous constatons que les courbes expérimentales ont une allure générale assez régulière. L'évolution des mesures ponctuelles capteur par capteur en cours de remplissage est progressive avec un accroissement régulier des valeurs, donnant lieu à une série de traits parallèles.

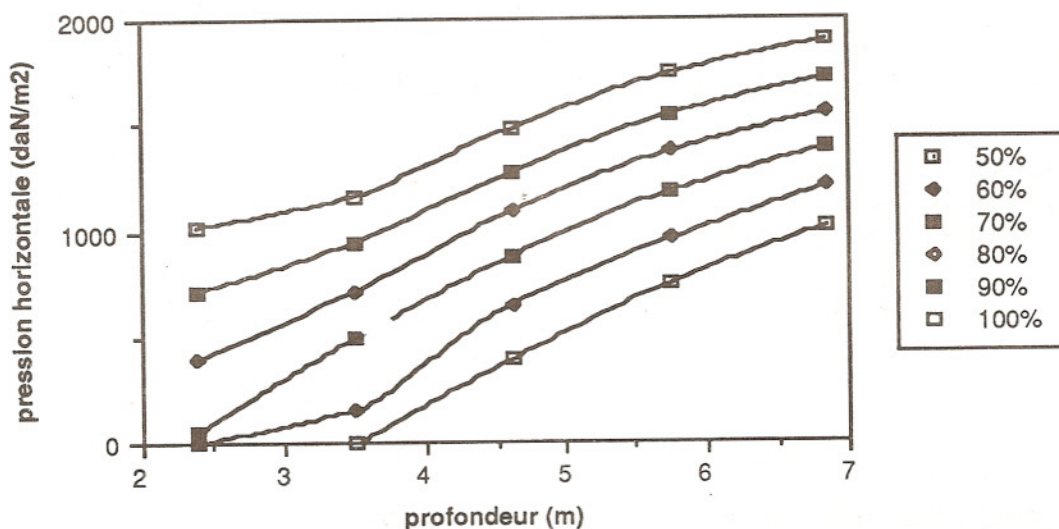


Figure (1) variation de la contrainte horizontale en fonction de la profondeur.

V-1-2 Vidange

Les figures (2) (3) représentent les variations des contraintes horizontales et de frottement au cours de la vidange pour les différents capteurs de paroi. On constate qu'au début de la vidange les contraintes n'augmentent que légèrement par rapport à celles obtenues à la fin du remplissage. Cette augmentation se fait sentir différemment sur la hau-

teur de la cellule. En effet le capteur (5D) situé dans la partie basse de la cellule, indique une très faible augmentation. La différence relativement faible entre les contraintes mesurées au remplissage et celles mesurées à la vidange est due essentiellement à l'élanement faible de la cellule.

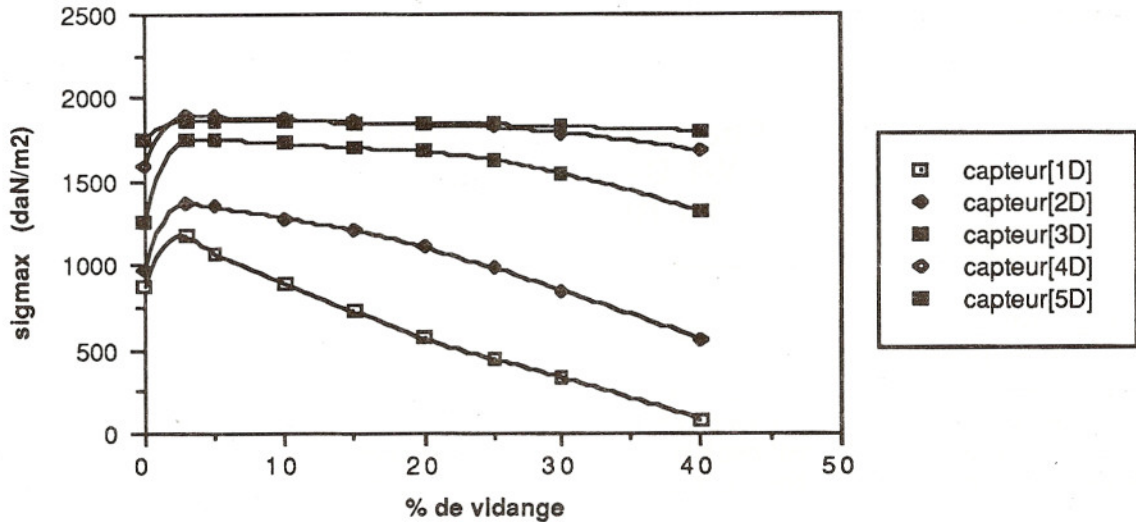


figure (2) : variation de la contrainte horizontale durant la vidange centrée

V-1-3 Coefficient de pression

Le coefficient de pression est l'un des paramètres essentiels intervenant dans les formules de calcul des pressions. Il est déterminé à partir des

mesures des capteurs de parois. La contrainte verticale est également déduite des mesures de frottement et du poids de la matière ensilée.

$$\lambda = \sigma_x / \sigma_z$$

Les valeurs de λ en remplissage et vidange centrée sont consignées dans le tableau 3

Tableau 3 : valeurs de λ en remplissage et vidange centrée

Capteur	Remplissage	vidange
[1D]	0,42	0,652
[2D]	0,431	0,597
[3D]	0,395	0,608
[4D]	0,436	0,582
[5D]	0,386	0,482

La figure (4) montre qu'au remplissage est pratiquement constant et qu'à la vidange il varie en fonction de la profondeur. Cette variation se fait notamment sentir sur la partie supérieure et près du fond de la cellule.

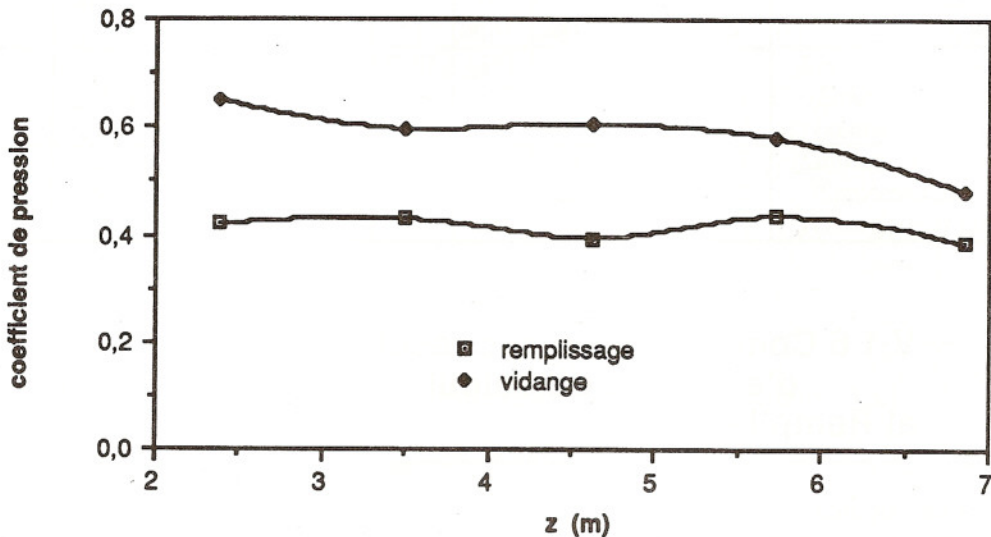


figure (4) : Coefficient de pression en fonction de la profondeur

V-1-4 Contrainte verticale sur le fond de la cellule

Les capteurs de fonds de cellule mesurent directement la contrainte verticale, il est par conséquent possible de faire la comparaison avec la contrainte verticale sur le fond déduite des mesures de capteurs de parois et du poids de la matière ensilée. Le tableau (4) fait apparaître cette comparaison. La différence relative maximale ne

dépasse pas 9 %. L'ensemble des mesures de parois et de fond permet de retrouver le poids de la matière ensilée à 8 % près. Ce résultat est très

satisfaisant car le calcul de la contrainte verticale est liée à des incertitudes sur la répartition du frottement sur toute la paroi.

Contrainte verticale (daN/m ²)	Remplissage	vidange
Contrainte verticale mesurée	4401	4065
Contrainte verticale calculée	4781	4362
Différence en %	7,95	6,8

V-1-5 Coefficient de frottement en paroi

Le coefficient de frottement en paroi est le rapport de la contrainte tangentielle (frottement) et de la contrainte horizontale. Le tableau (5) montre les valeurs de l'angle de frottement en paroi obtenu en remplissage.

Tableau 5 : angle de frottement en paroi (remplissage)

capteur	hauteur d'ensilage en m	3,13	3,58	4,48	4,92	5,82	6,27	6,72	7,16	7,61	7,97
[3D]	sigmax (daN/m ²)	0	139	548	827	939	1069	1172	1274	1367	1479
	taux (daN/m ²)	0	37	158	251	288	325	353	390	418	465
	atn (taux/sigmax) (°)	0	14,9	16	16,8	17	16,91	16,76	17	17	17
[4D]	sigmax (daN/m ²)	465	613	232	1134	1237	1348	1442	1544	1637	1739
	taux (daN/m ²)	121	167	874	306	344	362	390	418	446	474
	atn (taux/sigmax) (°)	14,5	15,2	14,84	15,5	15,5	15	15	15	15	15
[5D]	sigmax (daN/m ²)	790	911	1134	1339	1441	1534	1627	1720	1804	1897
	taux (daN/m ²)	251	288	372	437	465	502	530	558	586	613
	atn(taux/sigmax) (°)	17,6	17,5	18	18	17,7	18	18	18	18	17,7

V-1-6 Comparaison entre résultats d'essais et de calcul

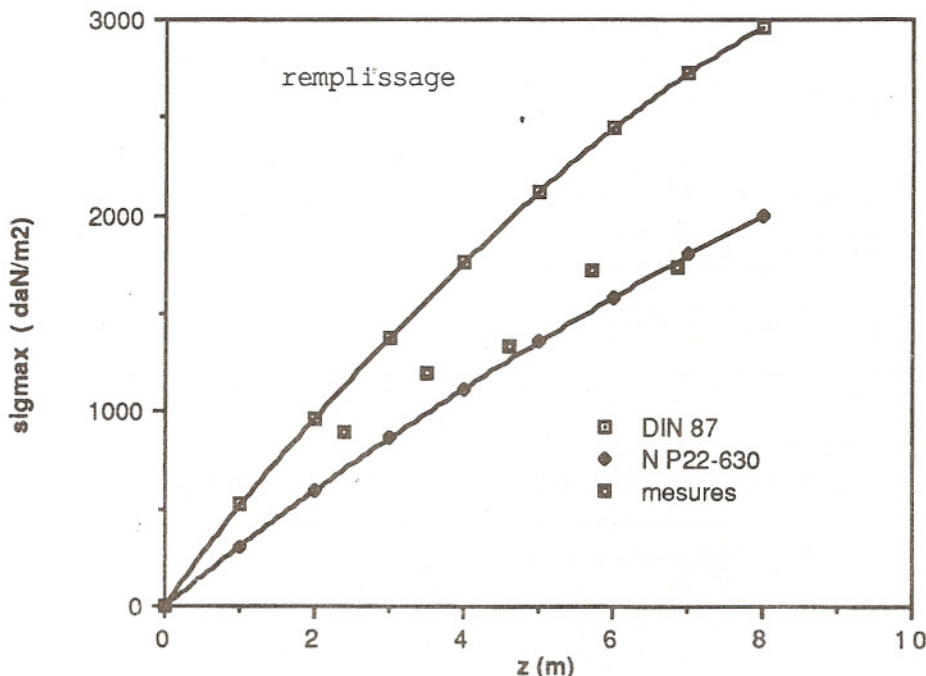
a) Remplissage

Les courbes des figures (5) et (6) donnent la répartition de la contrainte horizontale et de frottement en fonction de la profondeur suivant les normes DIN 87 et P22-630*. Sur ces courbes sont portées également les valeurs moyennes des mesures obtenues à la profondeur z correspondant à la position de chaque capteurs. Les caractéristiques de la matière ensilée considérées sont celles recommandées par les normes elles-mêmes.

La comparaison des mesures avec la courbe

théorique donnée par P22-630 fait apparaitre une zone à la partie supérieure du silo dans laquelle les valeurs expérimentales dépassent légèrement les valeurs théoriques. La norme DIN 87 donne des valeurs de contrainte horizontale trop élevées par rapport aux mesures. La courbe de frottement établie à partir de P22-630 couvre globalement les mesures de contrainte de frottement.

* P22-630 : projet de norme Française (version juillet 1990).



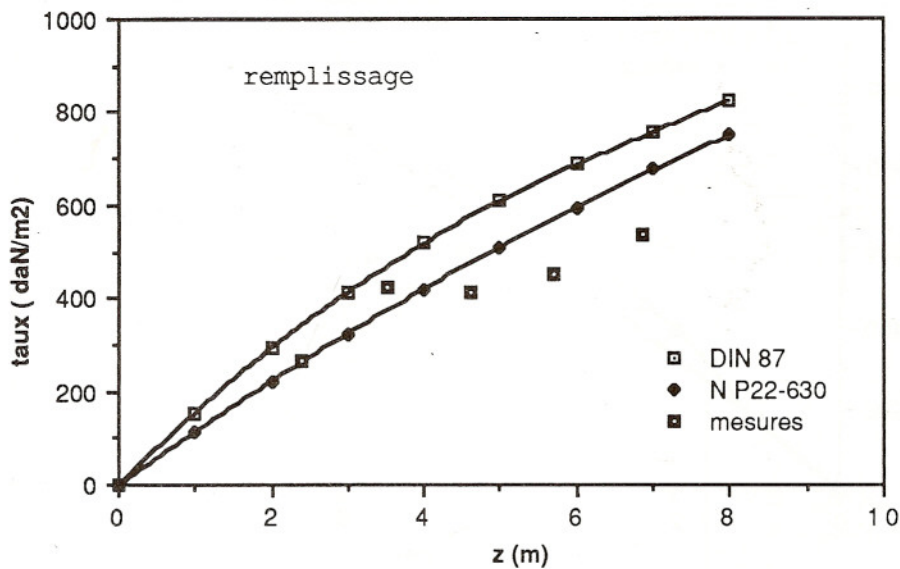


figure (6) : courbe frottement - profondeur (remplissage)

b) Vidange centrée

Sur les figures (7) et (8) sont représentées les courbes suivant les normes DIN 87 et P22-630 ainsi que les points expérimentaux. Signalons que le projet de norme P22-630 tient compte des modalités de vidange dans le calcul des pressions. Le

critère de classification (selon P22-630) des différents types d'écoulement appliqué à la cellule « D » donne un écoulement en cheminée pour cette cel-

lule (ce qui confirme les observations faites sur le site).

Pour la contrainte horizontale figure (7) la courbe donnée par P22-630 est très proche des points expérimentaux, par contre la courbe de la norme DIN 87 s'éloigne considérablement des mesures. On signale toutefois que ces résultats expérimentaux sur silos en vraie grandeur ont été le support du projet de norme P22-630.

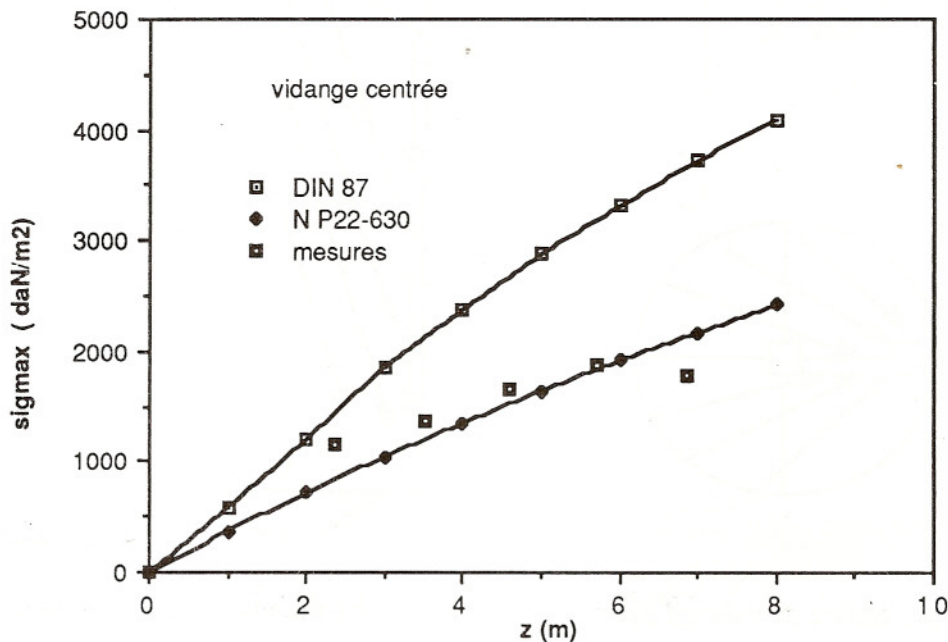


figure (7) : courbe contrainte horizontale- profondeur (vidange)

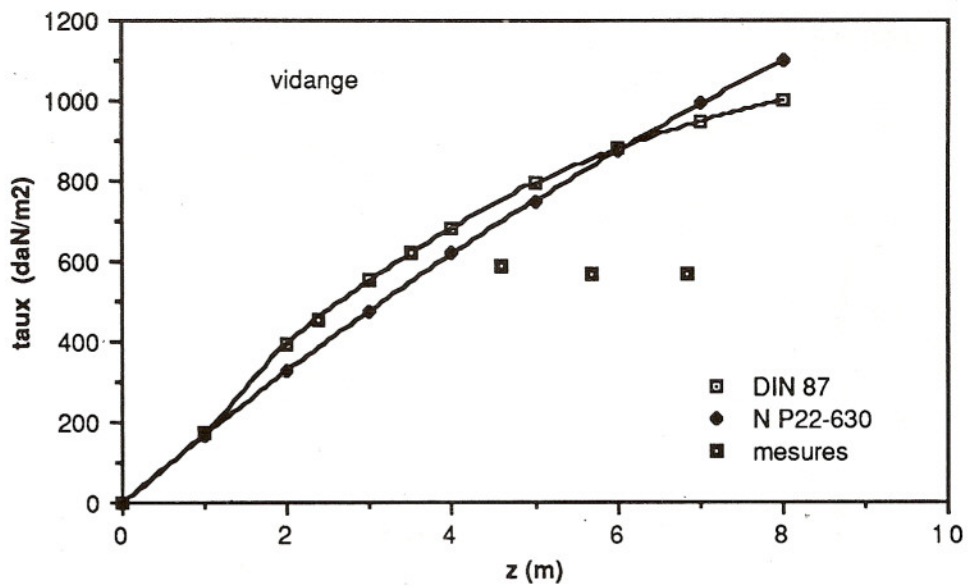
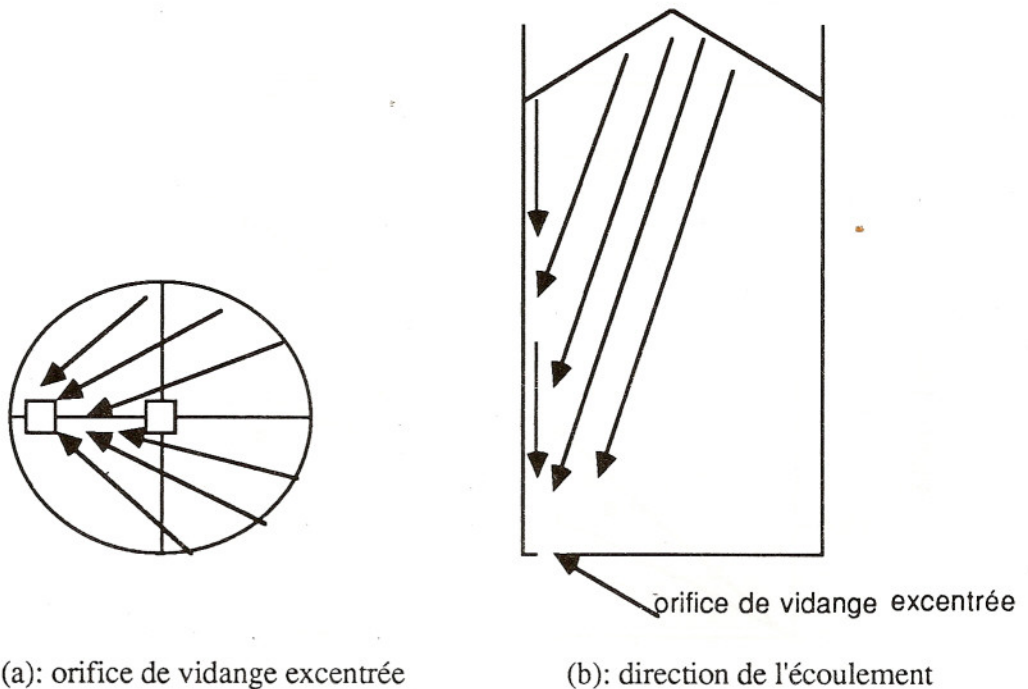


figure (8) : courbe frottement- profondeur (vidange)

V.1.7 Vidange excentrée

Le schéma d'un silo à vidange excentrée est représenté sur la figure (9) avec en (9a) une coupe horizontale et en (9b) une coupe verticale. L'écoulement dissymétrique obtenu dans ce cas (la direction des trajectoires des grains est indiquée par les flèches) entraîne une distribution dissymétrique des contraintes. Ces contraintes créent une déformation irrégulière du silo. Cette situation extrêmement

complexe au niveau du champs de vitesses et de contraintes n'a pas permis à ce jour d'établir une modélisation correcte du comportement des silos à vidange excentrée. Reimbert (3), a imaginé un système permettant d'annuler totalement les efforts de dissymétrie de vidange, en rétablissant une vidange centrée au moyen d'un tube de centrage.



(a): orifice de vidange excentrée

(b): direction de l'écoulement

figure (9) : silo à vidange excentrée

Les résultats obtenus sur la cellule « D » en vidange excentrée sont montrés sur les figures (10) et (11).

Les pressions obtenues sont mesurées sur deux génératrices :

— génératrice (1) située du côté de l'orifice de vidange excentrée

— génératrice (3) située du côté opposée à l'orifice de vidange excentrée.

On constate que les contraintes sur la génération (1) diminuent sensiblement en fonction de la profondeur et que sur la génératrice opposée elles varient comme si la vidange se faisait par un orifice centré. Il y a donc dissymétrie de répartition des efforts sur les parois.

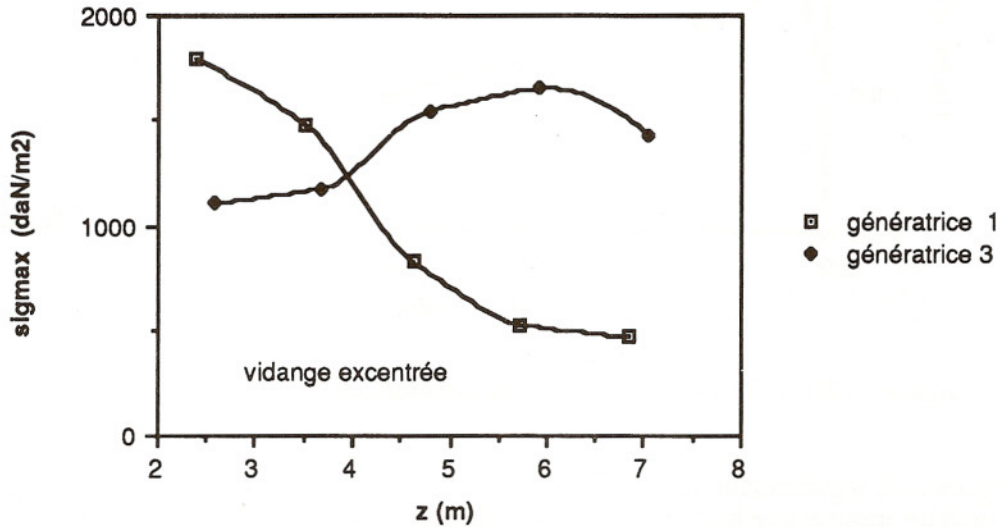


figure (10) : contrainte horizontale- profondeur

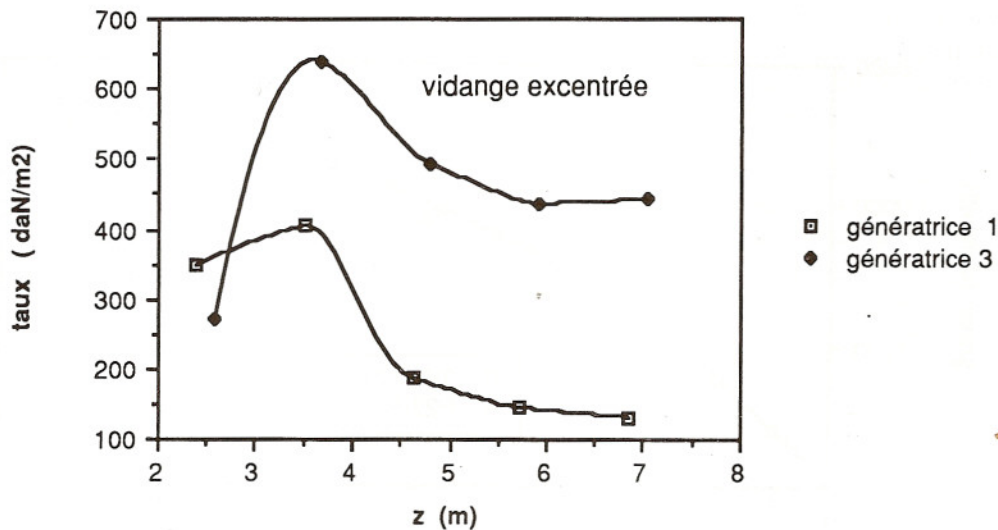


figure (11) : frottement- profondeur

V 2 Cellule « C »

La figure (12) représente les contraintes horizontales mesurées par les capteurs 2C.4C.6C durant la vidange. On constate une augmentation significative des contraintes au début de la vidange. L'amorce de l'écoulement fait passer l'état de contrainte statique de remplissage à l'état dynamique. Les contraintes horizontales et de frottement augmentent et la contrainte verticale diminue par rapport à l'état de remplissage.

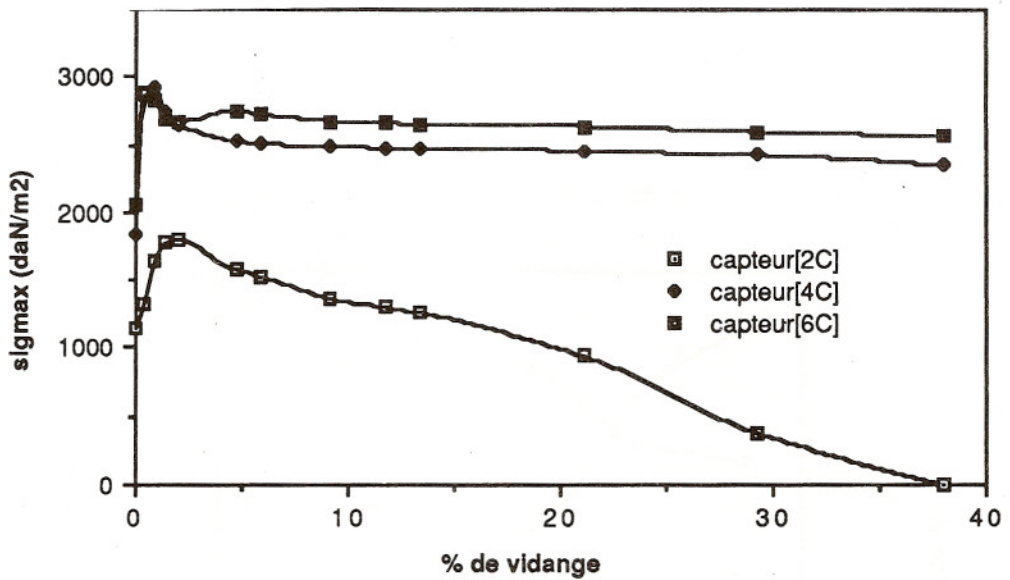
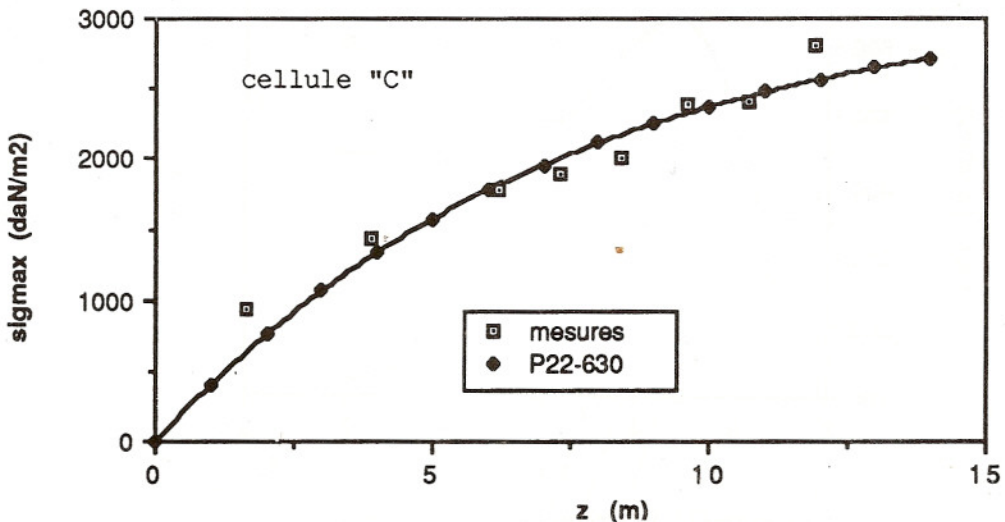


figure (12) : contrainte horizontale en fonction du % de vidange

figure (13) représentant les variations de la contrainte horizontale en fonction de la hauteur montre une bonne concordance des résultats de mesures avec les résultats lis à partir de la norme P22-630 .



VI Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus sur la base de Chartres ont permis pour la première fois de prendre en compte les modes d'écoulement en cours de vidange dans le calcul des pressions. Les résultats des théories s'appliquant pour le seul cas de vidange en masse ne concordent pas avec les mesures obtenues sur la cellule à faible élance-

ment dont le vidange s'effectue en cheminée. Le calcul de la contrainte verticale à partir du frottement conduit à la détermination du coefficient de pression à relatif au remplissage et à la vidange.

Les mesures des capteurs de fond confirment dans une marge de précision raisonnable les résultats issus des mesures des capteurs de paroi et de calcul.

Experimental Determination of Janssen's Stress Ratio

K. By Four Methods

A.O. Atewologun, G.L. Riskowski,
A.J. Muehling (1)

ABSTRACT

The stress ratio (K) used in design formulas of grain storage bins was determined by four different methods. Static stresses from soybeans were measured in a 0.91 m diameter x 2.74 m high model galvanized steel bin. For the first method, the vertical loads on the floor and the wall were determined separately and K-ratio calculated from Janssen's equation. The second method involved the measurement of vertical and hoop strains in the walls of the model bin. Six two-element rosette gages were spaced at equal distances around the outer circumference of the bin at 15.2 cm above the floor. The strains were reduced to stresses using Hooke's law for biaxial stress and membrane theory for thin-walled cylindrical shells. The third method was the use of dynamometric ring load cells to measure horizontal and shear loads at the bin wall, simultaneously. Three wall ring cells were placed at different heights on the model bin wall (15.2 cm, 61.0 cm, and 106.7 cm above the floor). The fourth method was by direct measurement of vertical and horizontal stresses within the grain mass using in-mass transducers (IMTs). These IMTs were used at four different heights at the center of the bin (15.2 cm, 61.0 cm, 106.7 cm, and 152.4 cm above the floor). A total of 18 runs was performed. The K-ratio decreased with increasing depth of material at shallow depths. At depths of three times the diameter of bin, K-ratio approached a constant value that may be approximated by $K_0 = 1 - \sin \phi$ where ϕ is the angle of friction of grain to grain.

RÉSUMÉ

La rapport K utilisé dans les formules de calcul des silos à grain était déterminée par quatre méthodes différentes. Les chargements statiques du Soya était mesurés dans un modèle cylindrique en métal galvanisé, 0,91 m de diamètre x 2,74 m de hauteur. Pour la première méthode, le chargement

vertical sur l'aire et l'espallier était déterminé séparément et le rapport K était calculé d'équation de Janssen. La deuxième méthode a impliqué la mesure verticale et un cercle aux tensions de l'entourage de l'aire et de l'espallier modèle à l'extérieur autour de la circonférence du silo. Les six deux-éléments gage rosette étaient espacés à des distances égales à 15,2 cm au-dessus de l'aire. Les tensions étaient réduites par la loi de Hooke pour deux axes tension et membrane théorie d'un espallier mince corps cylindrique.

La troisième méthode a usé d'un dynamométrique charge cellule pour mesurer la charge horizontale et la charge en cisailles du silo et l'espallier, simultanément. Trois cercles en cisailles étaient placés à différente hauteur, sur le modèle du silo (15,2 cm, 61,0 cm et 106,7 cm au-dessus de l'aire). Pour la quatrième méthode on a mesuré directement la tension verticale et horizontale à l'intérieur de la masse de grains avec masse transducer (IMTs). Les IMTs étaient usés à quatre hauteurs différentes au centre du silo (15,2 cm, 61,0 cm, 107,0 cm et 152,4 cm au-dessus de l'aire). Un total de dix-huit rampes étaient accomplies. Le rapport K a diminué quand la hauteur du grain a augmenté pour les petites hauteurs. Pour des hauteurs de trois fois le diamètre de silo, la proportion K s'était approchée une valeur constante $K_0 = 1 - \sin \phi$ — sin approximativement, où est l'angle de frottement interne du grain.

INTRODUCTION

Janssen's equation (Janssen, 1895) is used extensively for calculating grain loads. The accuracy of Janssen's equation is greatly dependent on the accuracy of the K-ratio. However, current K-ratio values are subject to controversy due to differences in definitions and questionable measurement methods (Sundaram and Cowin, 1979; Glastonbury and Bratel, 1966).

The experimental method of determining K-ratio on storage bins can be subdivided into three approaches according to the location of pressure measurement sensors :

1. The authors are : ADENUGA O. ATEWOLOGUN, Graduate Research Assistant, GERALD L. RISKOWSKI, Assistant Professor, and ARTHUR J. MUEHLING, Professor, Agricultural Engineering Dept., University of Illinois, Urbana, IL.

- on the bin wall
- on a separately supported floor
- in the mass of the granular material

Wall pressure measurements have been taken using strain gages on steel reinforcement in concrete bins (Pieper, 1969). Pressure diaphragms mounted flush to bin walls have also been used to give direct stress values (Williams et al. 1987), and outward wall deflections have been measured with linear variable differential transformers (LVDTs) or dial gages. Wall pressure measurements give direct information about the response of the designed structural member and the material and installation costs for prototypes are reduced. However, the flexibility of the wall distorts the results of model bin tests. There are also problems in dealing with wall friction values that are not accurately known and there are problems with very small strain ranges. Erratic results are thus common.

Floor pressure measurements involve the weighing of a floor that is supported separately from the bin walls (Janssen, 1985; Reimbert and Reimbert 1976; and Jamieson, 1903). Though this provides little information on the local response of bin sections, it has the advantage of averaging out local irregularities for determining the average K-ratio of the grain mass. Material and installation costs are reduced for model testing and there is less need for statistical evaluation.

Few investigators have taken pressure measurements within the mass of a granular material for many reasons :

- design focuses on bin walls
- introducing a foreign body within a granular mass may change the existing stress pattern
- special sensors are needed
- calibration of sensors is difficult
- the need for statistical evaluation increases

Terzaghi (1920) used three vertical steel tapes in sand and he pulled the middle sandwiched tape out through a groove. The force to pull the center tape out was related to the horizontal force on the outer tapes. Perry and Jangda (1970) used a cylindrical diaphragm sensor sensitive to radio waves to monitor flow patterns of glass beads. Clower et al.

(1973) investigated the variation in K-ratio for sugar beet pulp, cornmeal, wheat and soybean meal by drawing horizontally and vertically oriented blades through the confined mass. Moysey (1983) used diaphragm sensors in model bins and Nichols et al. (1987) designed and tested a six-faced transducer embedded in soil to measure normal stresses in six predetermined directions under tractor load. Lee (1987) pulled thin plates coated with a monolayer of particles out of a plexiglass model bin filled with steel spheres to measure interior stresses.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

A model bin was constructed and instrumented to measure the K-ratio by four methods. It was an open-ended cylinder, 0.91 m in diameter by 2.74 m high and was fabricated from 0.93 mm thick smooth galvanized steel. The four methods were; 1) bin floor method; 2) wall strain method; 3) ring transducer method; and 4) in-mass transducers method. The arrangement of all the components of the apparatus is shown in figure 1. A dial gauge was mounted to measure the wall deflection at 38 cm from the bin floor to determine if the model bin was stiff enough to ensure at rest conditions.

Bin Floor Method

The bin floor was supported separately from the wall so the weight carried by the floor alone could be determined. A clearance of 3 mm between the floor and the wall prevented load transfer from wall to floor. The floor loads were measured with three cantilever load cells spaced evenly around the floor circumference. These load cells were calibrated on a Tinus Olsen universal testing machine prior to the grain load tests. A 10 cm diameter opening was cut in the center of the wooden floor and equipped with a sliding gate for unloading grain. The wall loads were transferred directly to the laboratory floor without being measured. The grain was weighed before it was loaded into the model bin. Wall loads were determined by subtracting the floor load from the total weight of the grain in the bin.

Wall Strain Method

Two-element strain-gage rosettes were fixed on the outside wall of the model bin at a height of 15.2 cm from the bin floor. Six rosettes were evenly spaced around the bin circumference at the same height to get an average strain at that height. Each rosette was bonded onto the bin so one strain gage was oriented in the horizontal axis and the other in the vertical axis of the bin to measure the hoop and meridional strain, respectively. The rosette system was not calibrated prior to the test runs. The strains were reduced to stresses using Hook's law for biaxial stress and membrane theory for thin walled cylindrical shells.

Ring Transducer Method

Ring load cells were developed for the simultaneous measurement of normal and shear stresses which were based on the principles suggested by Smid and Novosad (1971). Each circular

ring was designed as a thin curved bar, having a radius of curvature at least ten times the thickness of the ring. This constraint ensured that linear distribution of bending stresses could be assumed in the perpendicular cross section of the bar. Applied normal and shear stresses cause bending stresses in the ring which, in turn, cause deformations on the outer and inner periphery of the ring. These deformations are combined in pairs of equal positive and negative values by special wiring in a wheatstone full bridge circuit. This corresponds to the stresses exerted on the outer fibers of bent beams on opposite sides of the neutral axis. The sensitivity is amplified due to larger relative deformations. A detailed description of the design is given in Atewologun (1990). Normal and shear loads were transmitted to the ring by a 64 mm sensing plate. It was desirable to have a pressure sensing area of at least twenty times the maximum dimension of the grains (Perry and Jangda, 1967).

On one side of the model bin, three 6.4 cm diameter holes were cut out along the same vertical axis at 15.2 cm, 61.0 cm, and 106.6 cm heights above the bin floor to fit the sensing plates of the three wall ring load cells. A steel post held the three wall ring load cells in place. The wall ring load cells were mounted to the post with a bracket that could be adjusted in three directions. The sensing plates were adjusted to be flush with the inside of the wall and so they were free to deflect without touching the wall.

Each ring load cell was calibrated in radial and tangential directions using known weights. There was a small gravity effect, which was subtracted from strain readings to obtain the actual strain values that correspond to applied loads. The performance of each transducer circuit was very good because the calibration curves were linear and interference between the tangential circuit and the radial circuit was negligible.

In-Mass Transducers

Two in-mass transducers (IMTs) were designed to measure pressures within the soybean mass. Each IMT had three diaphragm sensors arranged to measure normal stresses in three planes (Figure 2). The three sensors were held in the desired orientation by a rigid wire frame. Each diaphragm sensor was designed as a circular thin plate with fixed all-around support. A detailed description of the diaphragm sensor design is in Atewologun (1990). Grains were glued to cloth which was fixed to the diaphragm of each sensor, which greatly reduced variation in data due to orientation of grains in contact with the diaphragm.

On the opposite side of the bin from the ring load, four 12.7 cm diameter holes were cut to allow the placement of the in-mass transducers. These four openings, located at 15.2 cm, 106.7 cm, and 152.4 cm from the bin floor were covered with plates after the IMTs were put in place.

The IMTs were calibrated in a special bin with an air inflatable diaphragm on top of a soybean mass which exerted uniform overburden pressures on the grain mass. This calibration bin was made of the same steel and diameter as the model test bin. The IMTs were embedded in the grain mass at the central axis of the bin.

A Measurement Group Inc. P-3500 strain indicator and two SB-10 switch and balancing units were used to measure strains of all cells, transducers, and strain gages. A Hamilton Baldwin ST-340 strain indicator and its accessory switch and balancing unit were used for measuring the strain readings from the cantilever load cells and the hopper weighing load cell.

Test Runs

Soybeans were used as the test grain in this study. Their average water content was 9.2 % (wet basis) and the average density was 7 KN/m³. A triaxial test done at Iowa State University gave an internal friction angle of 32° for the soybeans.

Soybeans were loaded into two hoppers and weighed with a 22,000 N ring load cell. After filling the bin, the hoppers were weighed again to determine the weight of grain in the bin. The hopper was lifted with a forklift to a height of 15.2 cm above the model bin and a gate was opened allowing the grain to empty into the bin. The hopper gate was located over the center of the bin for axisymmetric loading. Loading was stopped intermittently as required to place IMTs.

There were a total of eighteen runs. Grain was removed and reloaded for each experimental run. The same soybeans were used for all the runs. Readings were taken for the floor, wall rosette, and wall ring load cell methods for each of the eighteen runs with the bin full of soybeans which provided eighteen replicates for each of these three methods. Readings were taken immediately after filling the bin, one hour later, and again four hours after the original filling. The one-hour readings were used for analysis because they were essentially the same as those of the four-hour readings.

For the first twelve runs, the two IMTs were always placed in the concentric center of the bin and the heights of the IMTs varied randomly among the four given heights from run to run. The order of runs and the location of the IMTs was randomized for the test runs. This provided six replicates for the

IMT reading for each of the four heights. The final six runs were done exactly as the first twelve, except the IMTs were located only at the two bottom heights and on the bin floor. This set of runs was performed to investigate the radial variation of the horizontal and vertical stresses within the grain mass from the center to the bin wall. Readings were taken at grain height intervals of around 55 cm while loading and after the bin was full.

RESULTS AND DISCUSSION

Bin floor method

Bulk density was determined throughout the study by using total grain weight loaded into the bin and the known bin volume. The bulk densities remained essentially constant at around 7 KN/m³. The vertical stress, S_v , at the bottom of the bin was calculated by dividing the grain weight carried by the floor by the floor area. This value was substituted into Janssen's equation to solve for K . A value for μ of 0.25 was assumed (which corresponds to a friction angle ϕ of 14°) which is for soybeans at 9.2 % moisture content on galvanized steel (Mohsenin, 1986; Sitkei, 1986). The average K -ratio from the eighteen runs of the floor method was 0.55 with a standard deviation of 0.05, Table 1.

Wall strain method

Strain data were reduced to horizontal and vertical stresses by

- averaging the six strains in each direction
- calculating the magnitudes of the hoop (circumferential) stress and the meridional stress in the bin wall from the average strains, using Hooke's law for biaxial stress (Young, 1989).
- Calculating horizontal and vertical stresses using the membrane theory for thin circular shells (Billington, 1982).

The average K -ratio from the rosette strain gage method was 0.40 with a standard deviation of 0.08, Table 1. This K -ratio was computed without a need to assume any value for the coefficient of wall friction.

Ring transducer method

The horizontal stress at each load cell location was calculated using a sensing plate diameter of 64 mm. The resulting horizontal stresses were substituted into Janssen's equation to solve for K -ratio. A value of 0.25 was assumed for μ . The K -ratio at the bin wall was found to increase with height above the bin floor which means that it decreased as grain depth increased, figure 3. The

average K -ratio at the 15.2 cm height above the bin floor was 0.44 with a standard deviation of 0.10; for the 61.0 cm height, the average K -ratio was 0.69 with a standard deviation of 0.15, and at the 106.7 cm height, the K -ratio average increased to 0.80 with a standard deviation of 0.23 (Table 1).

In-mass transducer (IMT) method

The IMT method was a direct measurement procedure of obtaining K -ratio values. The observed strains were converted to pressures using the in-grain calibration curves for the IMTs which were obtained in a previous study (Atewologun, 1990). The results at each of the four heights are in Table 1. The average vertical (S_z) and horizontal (S_x) stresses both increased with grain depth. The vertical stress increased more rapidly than the horizontal stress. Figure 4. Therefore, the K -ratio at the center of the bin also decreased as grain depth increased, Figure 3.

In this study, three normal stresses were measured on different planes with the IMTs (horizontal, plane, 45° angle to the horizontal plane, and vertical plane). The 45° angle diaphragm was used as a check for the readings from vertical and horizontal planes. The vertical shear stress, S_{rz} is theoretically zero at the center of the bin and maximum at the wall because when grain is loaded into a bin, the vertical stress, S_z , tends initially to be the major principal stress. The shear stress S_{rz} was computed from :

$$S_{rz} = S_{45^\circ} - 0.5S_M - 0.5S_z$$

As expected, the IMT placed at the center of the bin gave shear stresses nearly equal to zero for all experimental runs. The readings from the diaphragm at a 45° plane thus confirmed the dependability of the readings from the vertically and horizontally oriented diaphragms. Future measurements of K -ratio in a grain mass with an IMT would only need the vertical and horizontal diaphragms.

Comparison of K-ratio Values From All Four Methods

Average K -ratio values obtained for the different load measurement methods and at the various heights is summarized in Table 1. There was close agreement between the Rosette strain gage method, the wall ring cell method at the 15.2 cm height, and the IMT method at the 15.2 cm height (0.40 to 0.46). An unpaired «t» test for these methods at the 15.2 cm height showed no difference in the K -ratio mean values ($P > 0.05$). However, as the height from the bin floor increased,

the agreement between the wall ring cell method and the IMT method diverged, Figure 3. Although the K-ratio increased with height from the bottom of the bin in both cases, the shapes of the curves differed.

An unpaired « t » test showed the means for all heights other than 15.2 cm to be statistically different ($P = 0.05$). The IMTs measured K-ratio at the center of the bin and the ring load cells measured it at the walls, so K-ratio may vary radially from the center of the bin at shallow grain depths.

For both the wall ring and IMT methods, the K-ratio was found to decrease with depth. Regression analysis of the wall ring and IMT data showed a strong variation with height ($P = 0.01$) in both cases. This trend corresponds with the results of Caughey et al. (1951), Reimbert and Reimbert (1976) and Pleissner (1906). Amundson (1945), Clower et al. (1973) and Pleissner (1906). Amundson (1945), Clower et al. (1973) and Lenczner (1963) found K-ratio to be constant with depth of grain while Ketchum and Williams (Ketchum, 1919) and Kramer (1944) reported that K-ratio increases with depth of grain in a storage bin.

The floor-load method gave an average K-ratio for the entire grain mass of 0.55. Interestingly, the

average K-ratio for the four heights of IMTs was 0.53. An unpaired « t » test showed that the difference between these two means was not statistically different ($P = 0.05$). This suggests that the floor method corresponds to the average K-ratio with height along the central axis of the bin.

In the shallow bin range, wall ring cells gave higher K-ratio than the IMTs which suggests that the measurement of K-ratio values at the wall by the piston-type sensor mounted flush to the wall will consistently yield higher K-ratio values than the IMT method.

The K-ratio values that have been obtained by some past investigators for soybean range from 0.38 to 0.54 (Table 2). The K-ratio values measured in this work by the floor method ($K = 0.55$) and the average of the IMTs over all heights ($K = 0.53$) were similar to the value of 0.543 reported by Sundaram and Cowin (1979) who used the floor method. The K-ratio value of 0.43 from wall pressure diaphragms (Sundaram and Cowin, 1979) agreed closely with the values from the rosette method and the wall ring cell method ($K = 0.40$ and $K = 0.44$, respectively) of the present study. Consistent differences in K-ratio therefore exist because of different measurement methods.

CONCLUSIONS

1. The floor method gave an average of the K-ratio for the entire height of grain above the floor at the bin center. Reproducibility of the results was very good. The main objection to using the floor load method is that the K-ratio values depend on the choice of the coefficient of friction (u'). Thus, unless u' is known accurately, the K-ratio values obtained from the floor method may be erroneous.

2. Wall load measurements obtained with wall load cells are good when combined with other methods. Improper alignment of the ring sensing plates with respect to the bin wall would alter the readings of the wall ring load cells substantially. It is recommended that special care be exercised in the alignment of wall diaphragms so that they are completely free from and flush with the wall of the grain bin. An accurate value for u' is needed for the wall load cell method.

3. The rosette strain gage method is good if several measurements are taken around the circumference of the bin. There was a wide variation of readings from one gage to another. Therefore an average of at least six measurements must be considered. Another limitation of the rosette strain gage method is that if the strain levels are small, the

readings are subject to external interference from temperature, humidity, or vibration.

4. In-mass measurements revealed a definite decrease in the K-ratio as the depth of grain increased. In the shallow bin range, K-ratio as high as 0.67 was obtained. At depths greater than twice the diameter of the bin, the K-ratio approached the value 0.47. The measurements of the K-ratio at the deep bin range (15.2 cm and 61 cm above the floor) of the bin were not statistically different.

The IMT method of measurement was successful. It has the advantage that measurements made away from the wall of the bin were not dependent on a choice of coefficient of friction of grain on the wall (u'). It compared favorably to the floor load method if averaged over the height of the bin.

5. Of all the four methods, only the floor method gave a different K-ratio at deep bin range. The floor method K-ratio corresponded to the average of K-ratios at all heights of the IMT method at the center of the bin. Regression analysis of data from the wall ring and IMT methods showed a strong variation with depth ($P = 0.01$) in the shallow bin depths. Although K-ratio decreased with

increasing depth of material for methods, the wall ring method gave higher K-ratios than the IMT method.

6. It can be concluded from the results of this study that the K-ratio is not a material property, because a true material property will not be affected by depth of material (or overburden pressure) or diameter of the bin. Therefore the use of the Rankine coefficient

$$K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$$

for the design of grain storage bins cannot be justified. Using an angle $\phi = 32^\circ$ in the above equation for the soybean material of the present study

gave $K_a = 0.307$, a value much below the K-ratio values obtained at deep bin depths from all four measurement methods. However the static earth pressure coefficient commonly used in soil mechanics ($K_o = 1 - \sin \phi$) applied to the test material used for this research becomes $K_o =$

0.470, which coincides with the K-ratio results of the IMT measurement method at deep bin depths of grain. The use of the Rankine active coefficient for design in the case of the storage of the material used in the present study would underestimate the vertical compression in the bin wall.

REFERENCES

1. Amundson, L.R. 1945. Determination of band stresses and lateral wheat pressures for a cylindrical grain bin. *Agricultural Engineering* 26:321-345. ASAE, St. Joseph, MI.
2. Atewologun, A.O.. 1990, Static stress distribution in tall cylindrical bins filled with pseudosolid grains. Unpublished Ph. D. Thesis. Library. University of Illinois, Urbana-Champaign.
3. Billington, D.P. 1982. Thin shell concrete structures. Second Edition. Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York.
4. Caughey, R.A., C.W. Toolles and A.C. Scheer. 1951. Lateral and vertical pressure of granular material in deep bins. Bulletin 173, Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames.
5. Clower, R.E., I.J. Ross and G.M. White, 1973. Properties of compressible granular materials as related to forces in bulk storage structures. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 16:478-481.
6. Glastonbury, B.E. and P.G. Bratel. 1966. Pressures in contained particle beds from a two-dimensional model. *Transactions, Institution of Chemical Engineers* 44:T128-T135.
7. Jamieson, J.A. 1903. Grain pressures in deep bins. *Transactions, Canadian Society of Civil Engineers* 17:554-654.
8. Janssen, H. A. 1885. *Versuche uber getreidedruck in silozellen*. *VDI Zeitschrift* 39:1045-1049.
9. Ketchum, M.S. 1919. The design of walls, bins and grain elevators. Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York.
10. Kramer, H.A. 1944. Factors influencing the design of bulk bins for rough rice. *Agricultural Engineering* 25:463-466. ASAE, Joseph, MI.
11. Lee, W. 1987. The rheological nature of solid pressures of granular media. *Powder Technology* 51:261-266.
12. Lenczner, D. 1963. An investigation into the behavior of sand in a model silo. *The Structural Engineer* 41:389-398.
13. Mohsenin, N.N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
14. Moysey, E.B. 1983. Static and dynamic pressures in grain storages. Phase III Report. DSS Contract No. OSG83-00004. Scientific Authority, Western Regional Headquarters Agriculture Canada, Saskatoon, Sask.
15. Nichols, T.A., A.C. Bailey, C. Johnson and R.D. Grisso. 1987. The stress state transducer for soil. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30:1237-1241.
16. Perry, M.G. and H.A.S. Jangda. 1970. Pressures in flowing and static sand in model bunkers. *Powder Technology* 4:89-96.
17. Pieper, K. 1969. Investigation of silo loads in measuring models. *Journal of Engineering in Industry, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 91:365-372.
18. Pleissner, J. 1906. *Versuche zur ermittlung der boden und seiten wand drucke in getreidesilos*.

Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure 30.976-988.

19. Reimbert, M.L. and A.M. Reimbert. 1976. Silos theory and practice. Series on Bulk Materials Handling. Vol. 1. No. 3. Translation Technical Publications. Clausthal, Germany.

20. Sitkei, Gy. 1986. Developments in agricultural engineering 8 : mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishing Company Inc. New York.

21. Smid, J. and J. Novosad. 1971. Pressure cell for measuring normal and shear stresses. Powder Technology 4:322-327.

22. Sundaram, V. and S.C. Cowin. 1979. A reassessment of static bin pressure experiments. Powder Technology 22:23-32.

23. Terzaghi, K. 1920. Old earth-pressure theories and new test results. Engineering News-Record 85 (14) : 632-637.

24. Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics. John Wiley and Sons, Inc., New York.

25. Williams, J.C., D. Al-Salman and A.H. Birks. 1987. Measurement of static stresses on the wall of a cylindrical container for particulate solids. Powder Technology 50:163-175.

26. Young, Warren C. 1989. Roark's for stress and strain, sixth edition. Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York.

Table 1. Average K-ratio values from all four measurement methods.

Heights from bin floor (cm)

Method	Replicates	15.2	61.0	106.7	152.4
Floor Load	18	0.55 (0.05)	*	0	0
IMT	6	0.46 (0.13)	0.47 (0.07)	0.52 (0.07)	0.67 (0.15)
Rosette Gages	18	0.40	*	*	*
Wall Ring Cells	18	0.44 (0.10)	0.69 (0.15)	0.80 (0.23)	---

* Height irrelevant to method

(standard deviation in parentheses)

Table 2. K ratio for soybeans as reported by some past investigators.

Reference	Methods	K ratio
Caughey et al (1951)	Floor load and wall pressure diaphragms	0.383
Sundaran and Cowin (1979)	Wall pressure	0.430
Sundaran and Cowin (1979)	Floor load alone	0.543

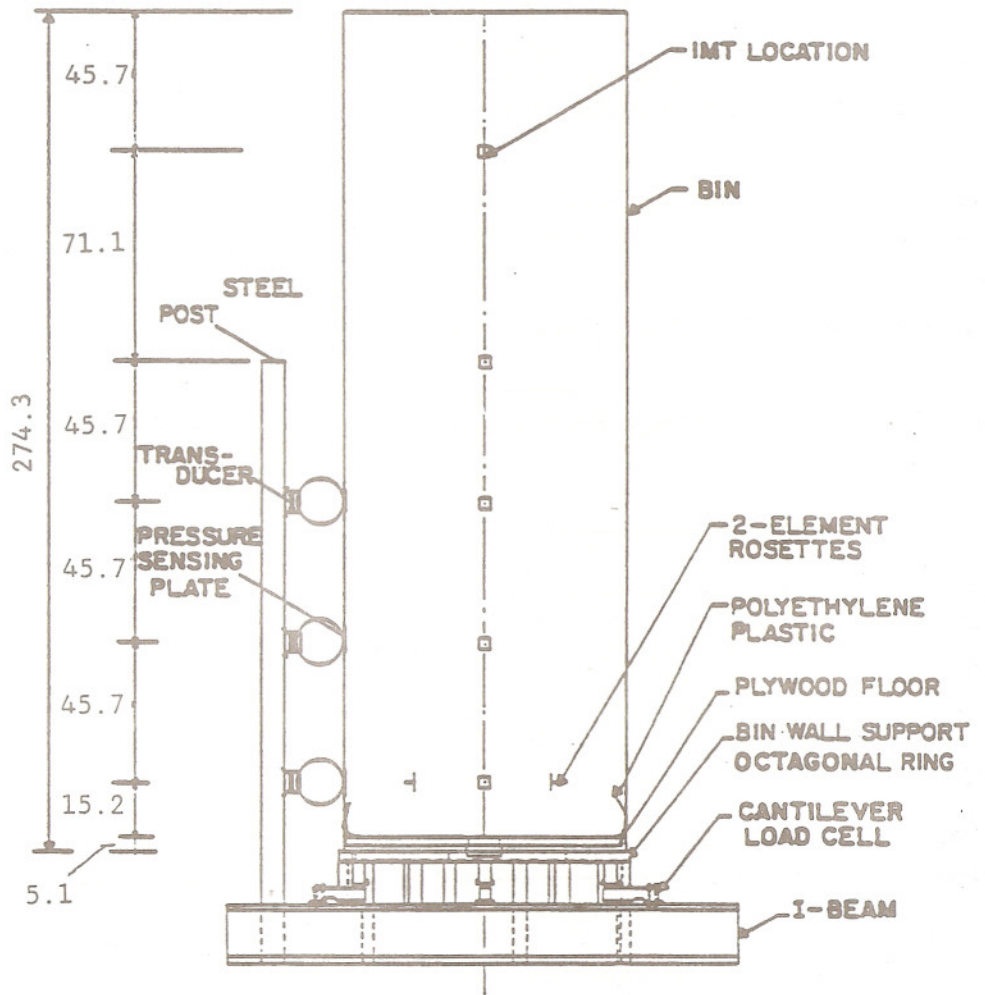
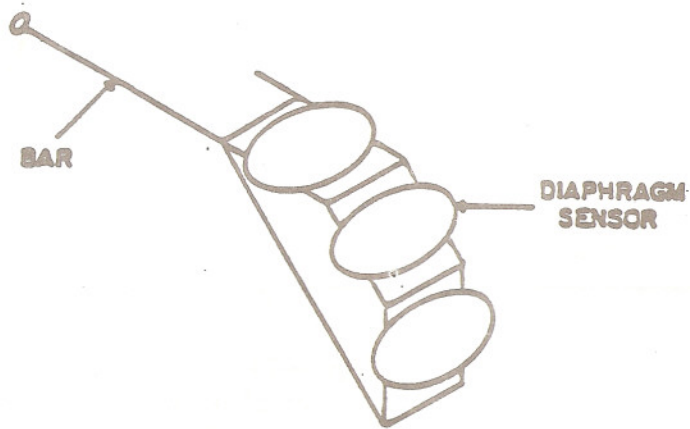
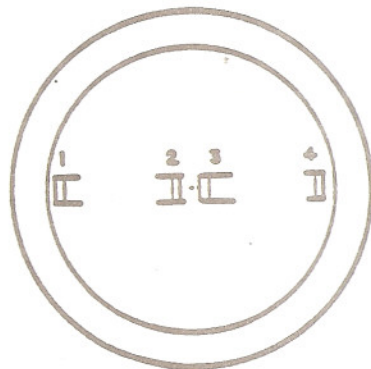
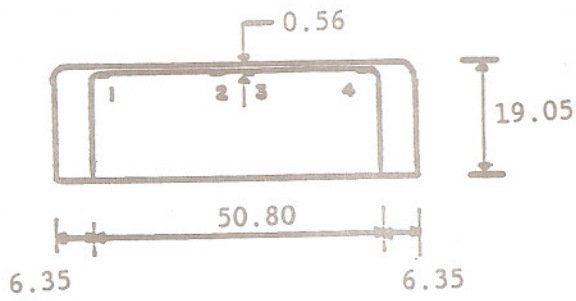


Figure 1. Model grain bin (all dimensions in cm)



In-mass transducer



Diaphragm sensor

Figure 2. In-mass transducer and its diaphragm sensor detail (all dimensions in mm)

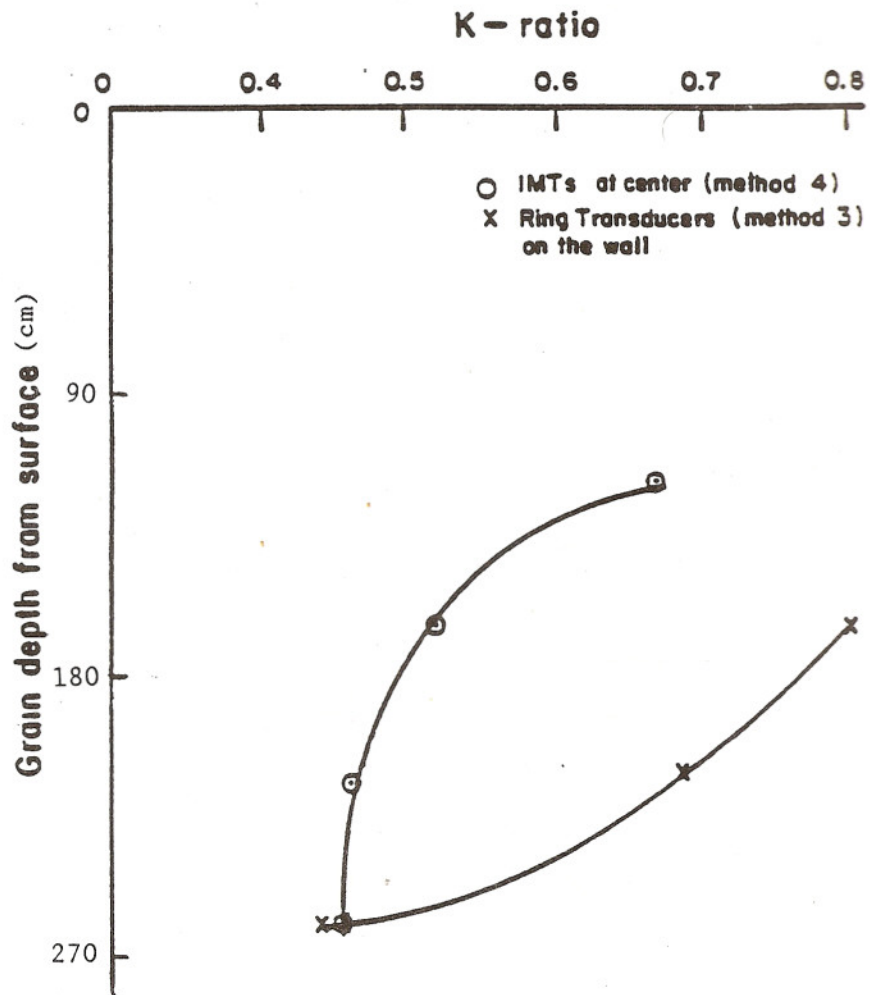


Figure 3. K-ratio variation with depth of grain at full load

THE EFFECT OF GRAIN ORIENTATION AND TIME ON THE RATIO HORIZONTAL/VERTICAL PRESSURE FOR WHEAT AND BARLEY

EXPERIMENTAL RESULTS FROM TESTS IN A LARGE TRI-AXIAL APPARATUS

Lennart Nilsson
 Departement of Farm Buildings
 Swedish University of Agricultural Sciences
 Lund, Sweden

SUMMARY

The knowledge of the ratio horizontal/vertical pressure, K , is essential in the modeling of and the interpretation of measured pressure patterns in silos and bins. The grain orientation is one factor that affects K considerably. Experiments in a large tri-axial test box have shown that K at rest (K_0) is 15 % greater for wheat with inclined grain orientation than for horizontally orientated grain. The difference is smaller for barley. K_0 decreased with 5 % after five hours and 10 % after 24 hours. In the passive stage, K_p , horizontal orientation gave 25 % and 18 % higher values than inclined orientation for wheat and barley respectively. K_a and K_p are highly time-dependent and will increase or decrease respectively with time.

INTRODUCTION

The ratio horizontal/vertical pressure in stored material is an important parameter used in models for the calculation of wall pressures in silos and bins.

Without extensive knowledge of how the ratio varies with the type of material, the particle orientation and time is it not possible to predict wall pressures or to interpret test results accurately. The ratio horizontal/vertical pressure at rest (K_0) as well as at the active (K_a) and the passive (K_p) limit stages need to be known in order to understand the measured pressures which otherwise may appear to be erratic in particular during the emptying of grain silos.

An attempt was made in the mid eighties at the Department of Farm Buildings of the Swedish University of Agricultural Sciences in Lund to show that imperfection of the silo walls may very well explain a great deal of the apparently erratic pressures which had been observed on full scale silos and test silos. In order to verify the theories better know-

ledge of the mechanical and rheological properties of grains was required. In order at least partly to overcome that problem a large scale (approximately 500 x 500 x 500 mm) tri-axial test cell was built. The apparatus made it possible to fill the cell with grain of different orientations and to measure the K -value directly on a moveable wall. The apparatus is shown in Figure 1. It is described in more detail by Kangro (1988).

The experiments were performed mainly in 1986 and 1987 but they have not been reported as yet. It is believed that the findings will be of interest to researchers and designers of grain silos and bins. This paper will only deal with some of the test results. The full report is expected to be published early in 1991.

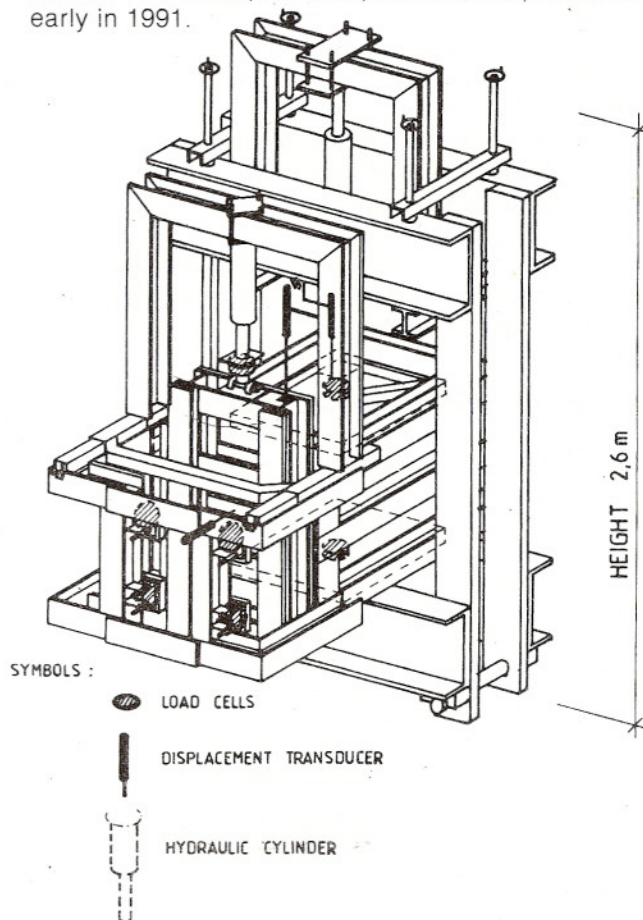


Figure 1. Triaxial testing machine, fully equipped.

MATERIAL SPECIMENS

Barley and wheat for the main tests in the tri-axial test apparatus were taken from large silos at Knästorp just outside Lund.

The water content was approximately 16 % at the start of the tests in November 1986. The grain was stored in the laboratory.

The water content remained at approximately 16 % up to January 1987. Then lower relative humidity in the laboratory caused the water content to decrease to 13-14 %. This was kept during the latter part of the experiments. The water content was checked continually with a rapid water content tester and cross-checked by drying in oven at 120°C for one hour.

METHODS USED AT TRI-AXIAL TEST BOX EXPERIMENTS

Test programme

The experiments can be divided into three main groups, namely :

Series I : Compression tests

Series II : Horizontal movement of wall

Series III : Vertical movement of inclined wall

See Figure 2. Only series I and III will be discussed in this paper.

Three different types of filling techniques (Figure 3) were used in order to give different particle orientations, namely :

- A. Horizontal orientation. Sprinkled filling.
- B. Inclined orientation. Filling from the back.
- C. Inclined orientation. Filling from the side.

Series I. Compression tests

The following number of compression tests were made :

Material	Initial height of sample, mm	Particle orientation		
		A. Horizontal	B. Inclined	C. Inclined
Barley	495	2	3	3
Barley	455	2	1	1
Wheat	455	2	2	2

The vertical force was applied with 0 to 30000 N in most of the tests. In five of the tests 40000 N was applied. The force was controlled automatically and the increase of the force was 500 N each 60 th second. Hence the full load was reached after one hour.

Full load gave a pressure of approximately 120 kPa and 160 kPa respectively on top of the grain and an average vertical pressure of approximately 100 kPa and 140 kPa respectively in the grain mass. Unloading was normally made at a rate of 1000 N each 60 th second. Long term tests were made once for barley and once for wheat.

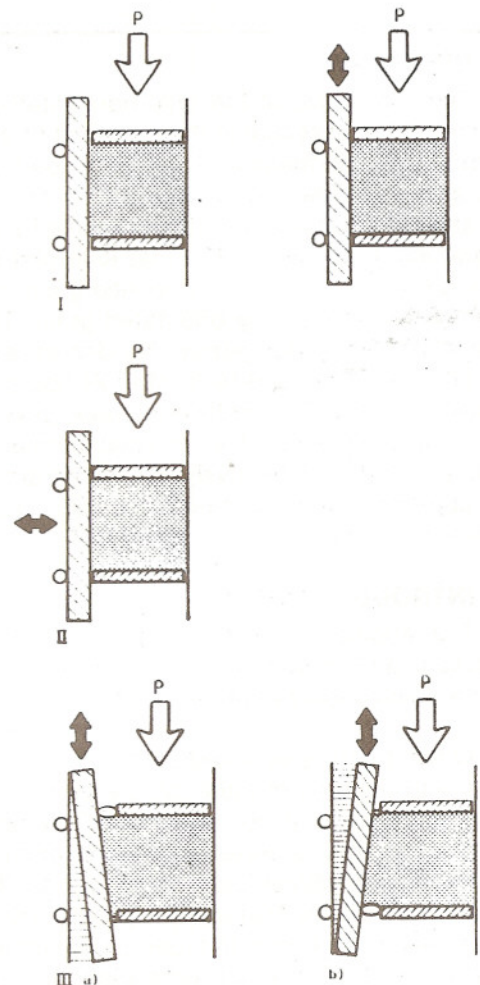


Figure 2. Series I. Compression test. Fixed wall.
Series II. Horizontal movement of wall.
Series III. Vertical movement of inclined wall.

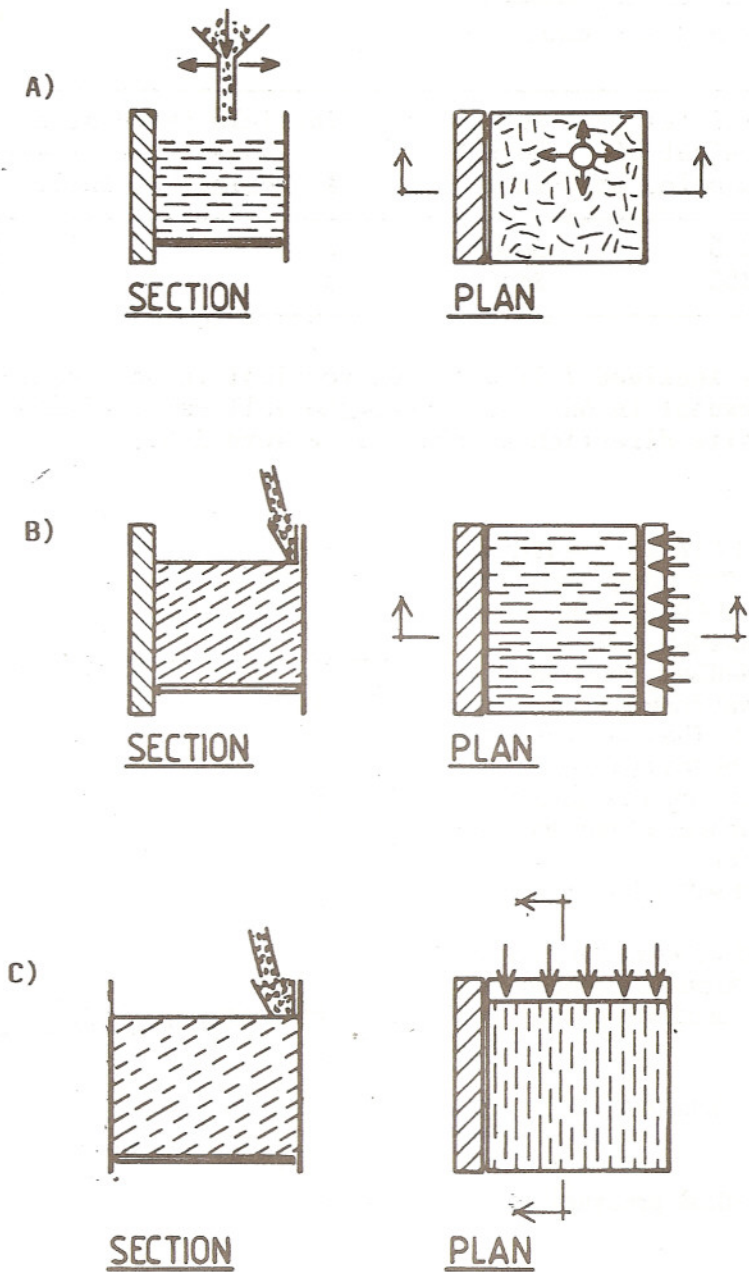


Figure 3. A) Horizontal orientation. Sprinkled filling.
 B) Inclined orientation. Filling from the back.
 C) Inclined orientation. Filling from the side.

Series III. Vertical movement of inclined wall

The following number of tests were made :

Material	Initial height of sample, mm	Surface of moveable wall	Particle orientation		
			A. Horiz.	B. Incl.	C. Incl.
Barley	355	Smooth	2	2	2
Wheat	355	Smooth	5	2	2

The wall was inclined 7.17 % to the vertical in accordance with Figure 2 a except in one test where the wall was inclined 4.06 % in the opposite direction as shown in Figure 2 b.

The wall was inclined 7.17 % to the vertical in accordance with Figure 2 a except in one test where the wall was inclined 4.06 % in the opposite direction as shown in Figure 2 b.

The vertical movement was achieved by the hydraulic cylindre which was controlled manually or in some case automatically. The maximum vertical movement was governed by the hydraulic cylindre and was approximately 20 cm. This gave a horizontal movement of 14.6 mm or 8.1 mm depending on the inclination of the wall.

The tests were made with teflon lining representing a smooth wall.

Seals were mounted between the moveable wall and the bottom and top plates as necessary to prevent the grain from escaping when the wall was moved.

RESULTS OF THE TRI-AXIAL TEST BOX EXPERIMENTS

Ratio horizontal/vertical pressure at rest, K_0 Barley

The obtained values of K_0 are shown in Figure 4. For sprinkled filling and filling from the side of the box there is a slight tendency for K_0 to decrease with higher vertical pressure. For filling from the back there is no such tendency.

A statistical analysis gave the following formulas for expressing the K_0 -value.

Filling	Particle orientation	Formula
Sprinkled	A	$K_0 = 0.505 - 0.0181 \ln(2.072 \sigma_v)$
From back	B	$K_0 = 0.446 + 0.0025 \ln(2.210 \sigma_v)$
From side	C	$K_0 = 0.538 - 0.0216 \ln(2.003 \sigma_v)$
All	All	$K_0 = 0.494 - 0.0114 \ln(2.101 \sigma_v)$

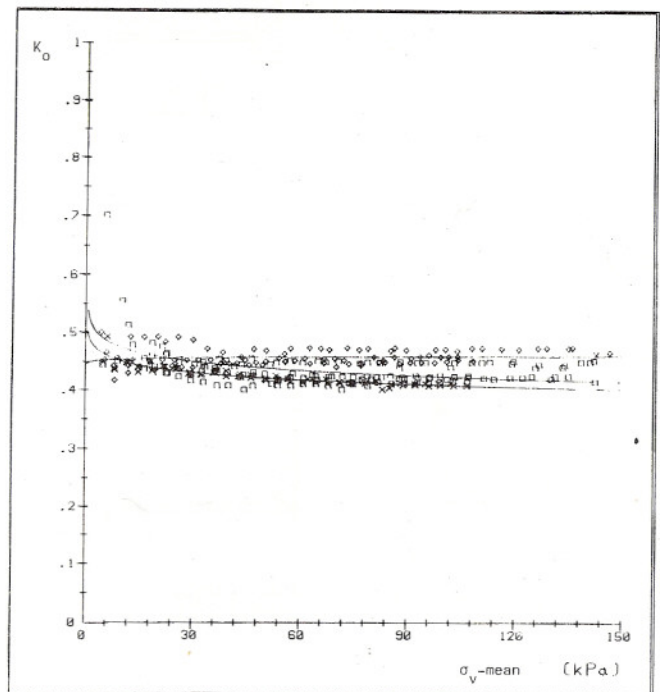


Figure 4. Barley, $m = 16\%$, K_0
 x sprinkled filling
 ◊ back filling
 ◻ side filling
 — regression curves.

The mean values over the measured pressure ranges and the standard deviations were :

Filling	Particle orientation	Mean	Standard deviation
Sprinkled	A	0.423	0.016
From back	B	0.458	0.015
From side	C	0.436	0.031
All	All	0.440	0.027

Wheat

The obtained values of K_o are shown in Figure 5. As for barley there was also for wheat a tendency of K_o decrease with pressure for sprinkled and sideways filling while filling from the back gave K_o -values almost independent of the pressure.

The statistical analysis gave the following formulas for expressing the K_o -value.

Filling	Particle Orientation	Formula
Sprinkled	A	$K_o = 0.613 - 0.0301 \ln(1.844 \sigma_v)$
From back	B	$K_o = 0.496 - 0.0002 \ln(2.108 \sigma_v)$
From side	C	$K_o = 0.655 - 0.0229 \ln(1.768 \sigma_v)$
All	All	$K_o = 0.591 - 0.0183 \ln(1.900 \sigma_v)$

The mean values over the measured pressure ranges and the standard deviations were :

Filling	Particle orientation	Mean	Standard deviation
Sprinkled	A	0.482	0.025
From back	B	0.495	0.011
From side	C	0.557	0.026
All	All	0.511	0.040

Time effect

The change of K_o with time was tested with barley filled from the side for 17 hours under approximately 90 kPa and wheat filled from the back for 65 hours under approximately 100 kPa pressure.

It was found that the K_o -values decreased with time and that the following equations well described the process :

$$- 0.196 t$$

$$K_o = 0.399 + 0.045 e^{-0.196 t} \text{ For barley}$$

$$K_o = 0.441 + 0.049 e^{-0.140 t} \text{ for wheat}$$

where t is time in hours.

The experimental results and the equations are show in Figure 6.

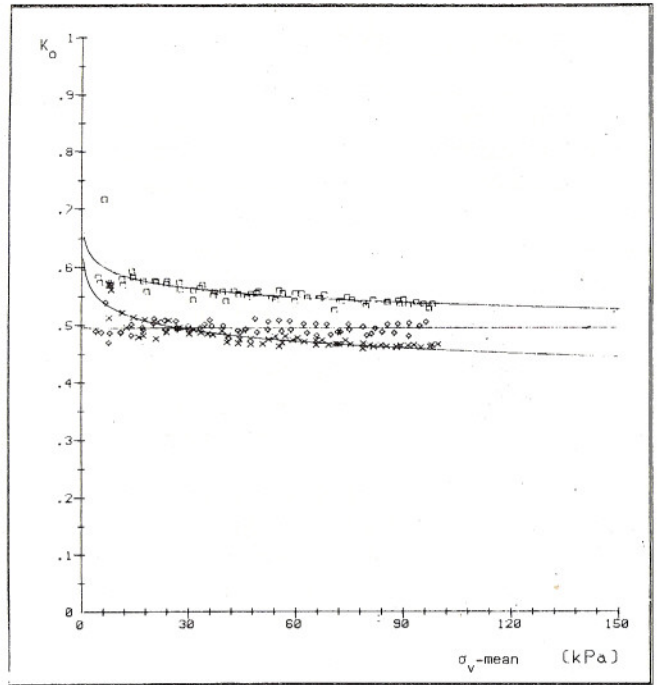


Figure 5. Wheat, $m = 13\%$, K_o
 x sprinkled filling
 ◊ back filling
 ◻ side filling
 — regression curves.

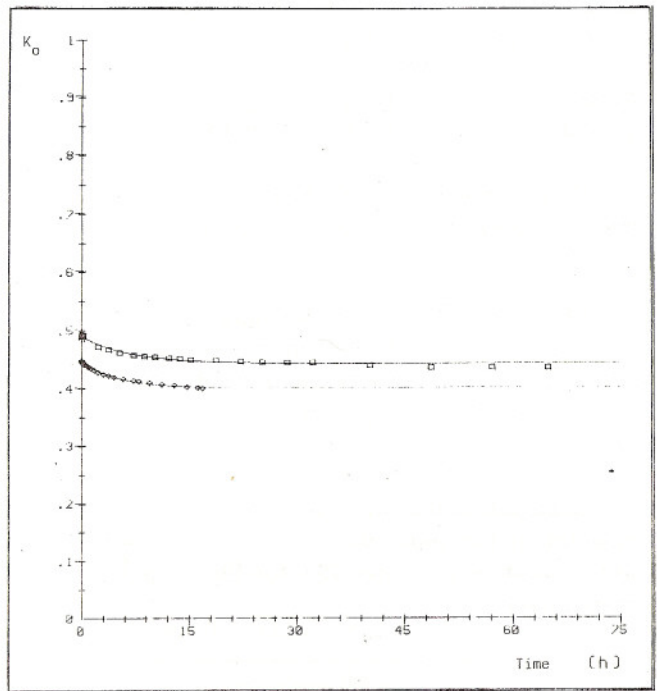


Figure 6. The effect of time on K_o
 ◻ wheat, back filling
 ◊ barley, side filling
 — regression lines.

COMMENTS AND CONCLUSIONS

The orientation of the particles affects the ratio horizontal/vertical pressure. The effect is more accentuated for wheat than for barley. Horizontal orientation achieved by sprinkling gave the lowest K_o for both grains. The highest K_o -values were obtained with filling from the back of the box with barley and from the side with wheat.

For barley K_o with horizontal orientation was approximately 7 % higher than for inclined orientation. For wheat the difference was about 14 %.

The decrease of the K_o -values as the pressure increased from 10 kPa to 100 kPa was approximately 6 % for both materials. K_o had declined with approximately 5 % after a period of five hours and with 10 % after 24 hours.

K_o is usually calculated with the formula $K_o = 1 - \sin(a)$ (a) or $K_o = 0.9(1 - \sin(b))$ (b). The latter formula is likely to give a better result. For horizontal orientation was determined to approximately 30° for barley and 28° for wheat using standard tri-axial tests. Calculated and measured K_o -values are shown below for sprinkled filling.

Material	$K_o = 1 - \sin$	$K_o = 0.9(1 - \sin)$	K_o at tests (initial)
Barley	0.50	0.45	0.42
Wheat	0.53	0.48	0.48

The simplified Jaky's formula $K_o = 0.9(1 - \sin)$ appears to give an acceptably accurate result from sprinkled grain.

If we assume that the formula is valid also for inclined orientation of the grains then the internal angle of friction can be calculated with the formula.
$$= \arcsin(1 - K_o/0.9)$$

Applied on the obtained K_o -values for inclined orientation the minimum was calculated to be approximately 29° and 22° for barley and wheat respectively.

RATIO HORIZONTAL/VERTICAL PRESSURE
AT VERTICAL MOVEMENT OF INCLINED SMOOTH
WALL

General

The passive and active conditions were achieved in two different ways. The first way was to move the vertical wall horizontally (Figure 2 II) and the second to move the inclined wall vertically, hence achieve an indirect horizontal movement (Figure 2 III).

The latter method gives conditions which are similar to the mass flow condition in a real silo when the grain slides along the silo wall during the emptying phase.

The vertical movement was about 20 cm and the inclination of the wall 7.17 %. The wall movement took place in about 10-15 minutes giving a vertical rate of about 1 m/hour and a horizontal velocity of about 80 mm/hour. The vertical load was kept constant during the tests giving a mean vertical pressure of 60 kPa. The height of the specimen was 340 mm and the mean depth (horizontal direction) 550 mm.

Barley

K as a function of the movement of the wall is shown in Figure 7 for barley, which has been filled from the back. Similar graphs have been drawn for sprinkled and barley filled from the side.

Regression analysis gave the following equations:

The mean K_p -values over the whole inward movement were 1.62, 1.38 and 1.36 for orientation A, B and C respectively. Hence, horizontal orientation gave about 18 % higher mean value than the inclined orientations.

The mean K_a -values were 0.62, 0.50 and 0.65 for orientation A, B and C.

The mean K_a -values over the whole cycle (movement in and out) thus became 1.12, 0.94 and 1.0 for the three orientations.

Wheat

K as a function of the movement of the wall is shown in Figures 8 and 9 for wheat which has been sprinkled and filled from the back. Figure 10 shows all three types of filling put together.

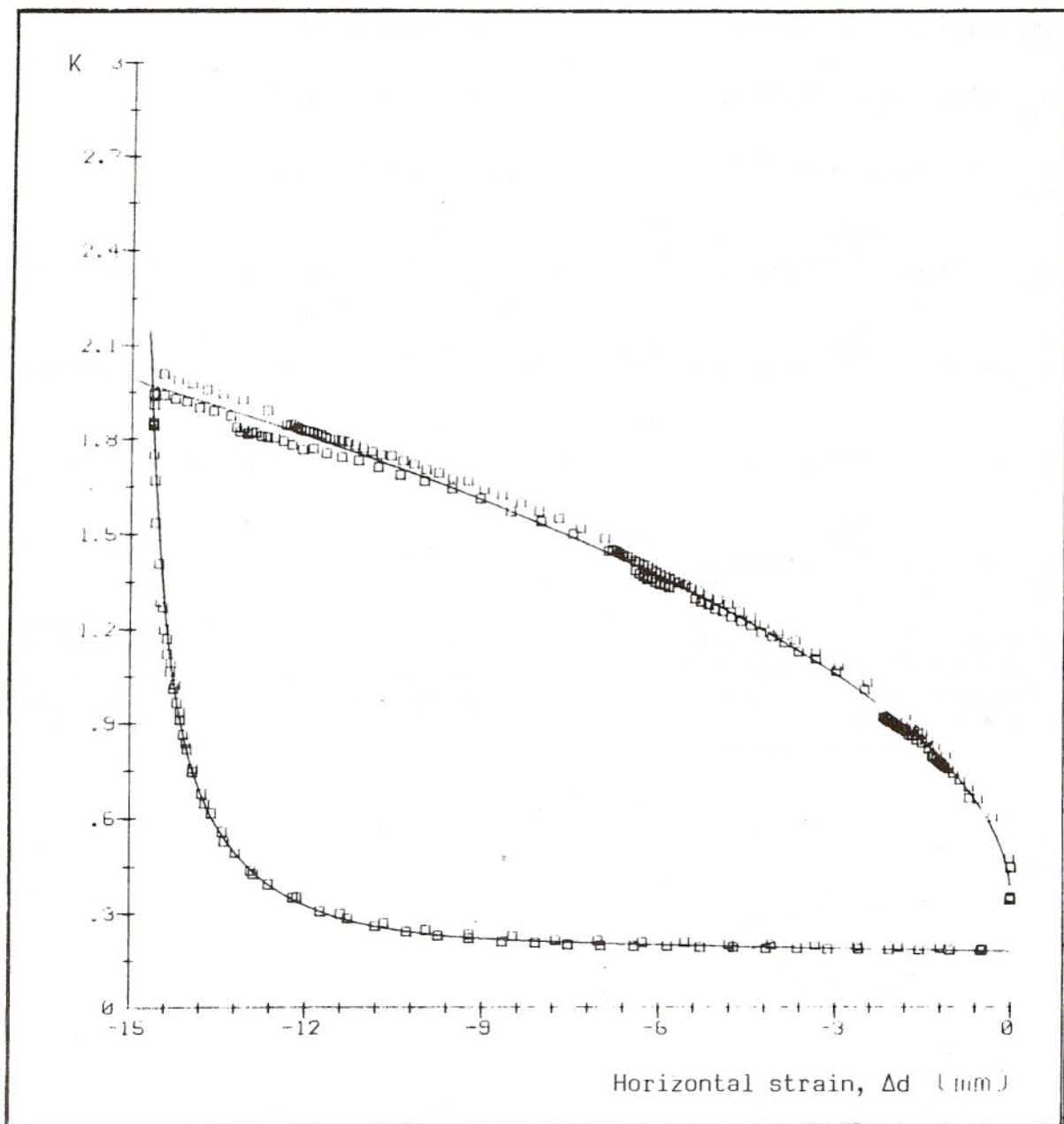


Figure 7. K at vertical movement of inclined smooth wall.
Barley, back filling.

Regression analysis gave the following equations :

$$K_p = 0.18 + 0.77 \Delta d^{0.39}$$

Horizontal orientation A

$$K_p = 0.33 + 0.43 \Delta d^{0.50}$$

Inclined orientation B

$$K_p = 0.10 + 0.79 \Delta d^{0.36}$$

Inclined orientation C

$$K_p = 0.16 + 0.71 \Delta d^{0.40}$$

All orientations

$$K_a = 0.30 e^{-\frac{\Delta d}{35.2}} + 0.73 e^{-\frac{\Delta d}{1.66}} + 1.16 e^{-\frac{\Delta d}{0.30}}$$

Horizontal orientation A

$$K_a = 0.24 e^{-\frac{\Delta d}{1914}} + 0.57 e^{-\frac{\Delta d}{1.02}} + 2.11 e^{-\frac{\Delta d}{0.88}}$$

Inclined orientation B

$$K_a = 0.27 e^{-\frac{\Delta d}{433}} + 0.50 e^{-\frac{\Delta d}{2.37}} + 1.26 e^{-\frac{\Delta d}{0.35}}$$

Inclined orientation C

$$K_a = 0.25 e^{-\frac{\Delta d}{112}} + 0.42 e^{-\frac{\Delta d}{2.45}} + 1.38 e^{-\frac{\Delta d}{0.45}}$$

All orientations

The mean K_p -values over the whole inward movement were 1.87, 1.40 and 1.60 for orientation A, B and C respectively. Hence horizontal orientation gave approximately 25 % higher mean values than inclined orientation.

The mean K_a -values were 0.64, 0.52 and 0.73 for orientation A, B and C. Thus, the mean K -values over the whole cycle (movement in and out) became 1.25, 0.96 and 1.17 for the three orientations.

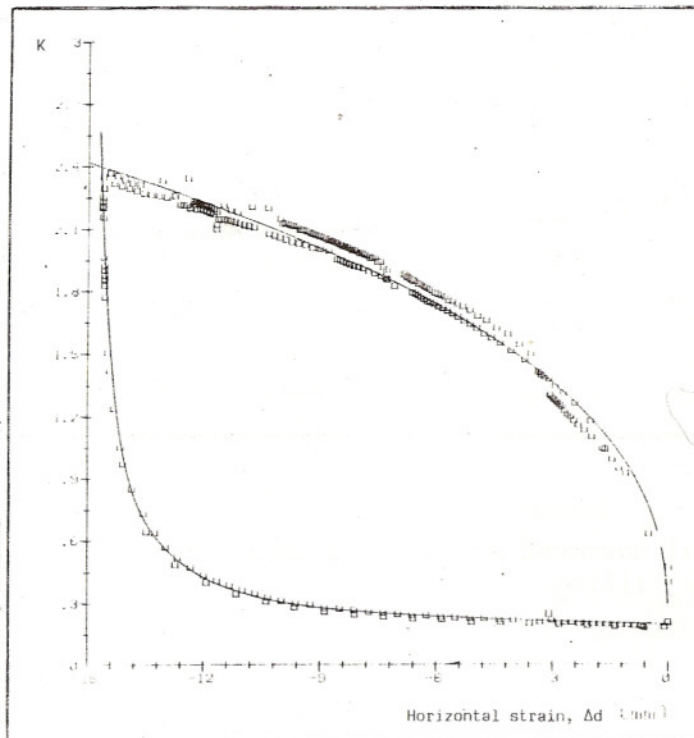


Figure 8. K at vertical movement of inclined smooth wall. Wheat, sprinkled filling.

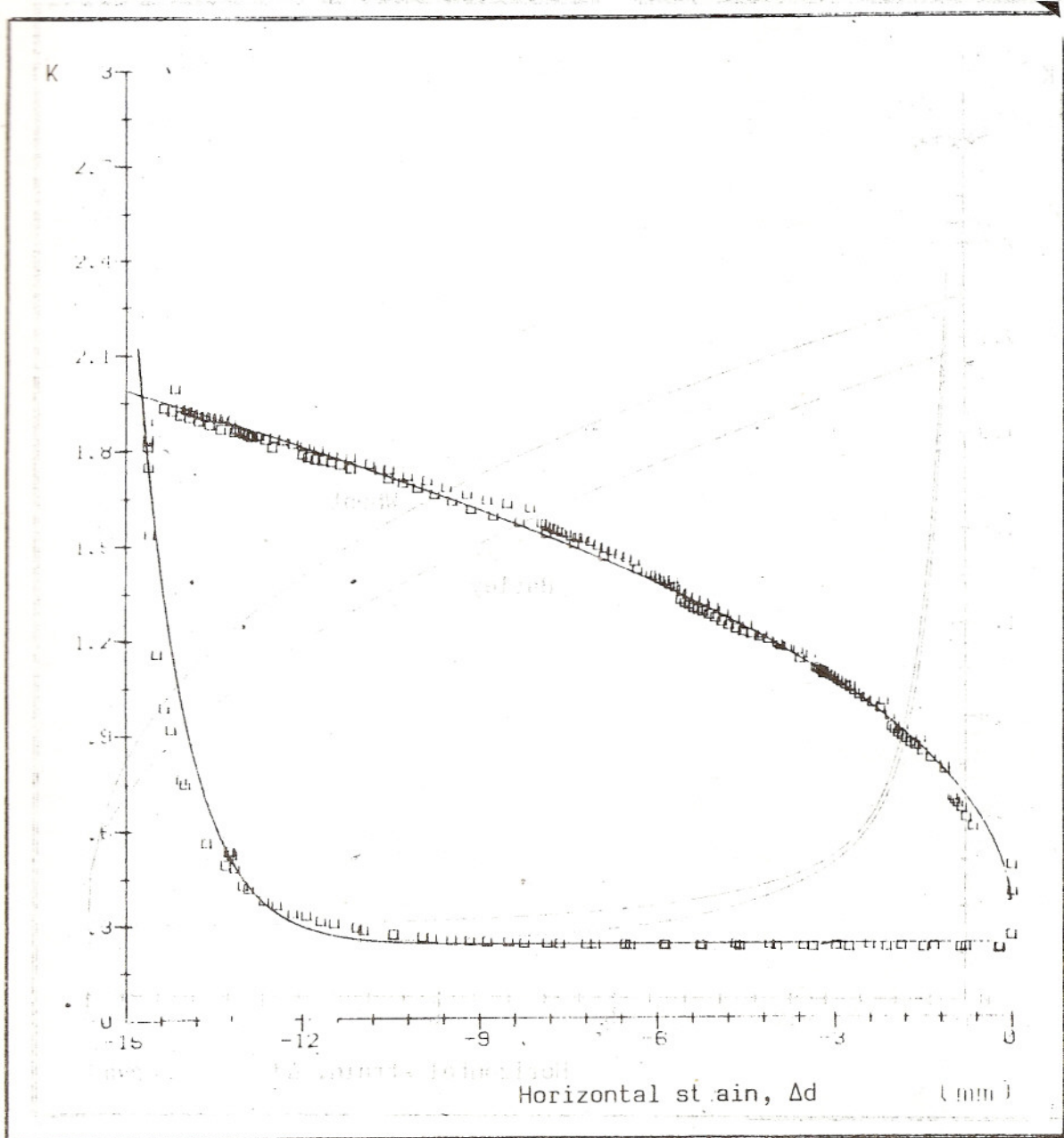


Figure 9. K at vertical movement of inclined smooth wall. Wheat, back filling.

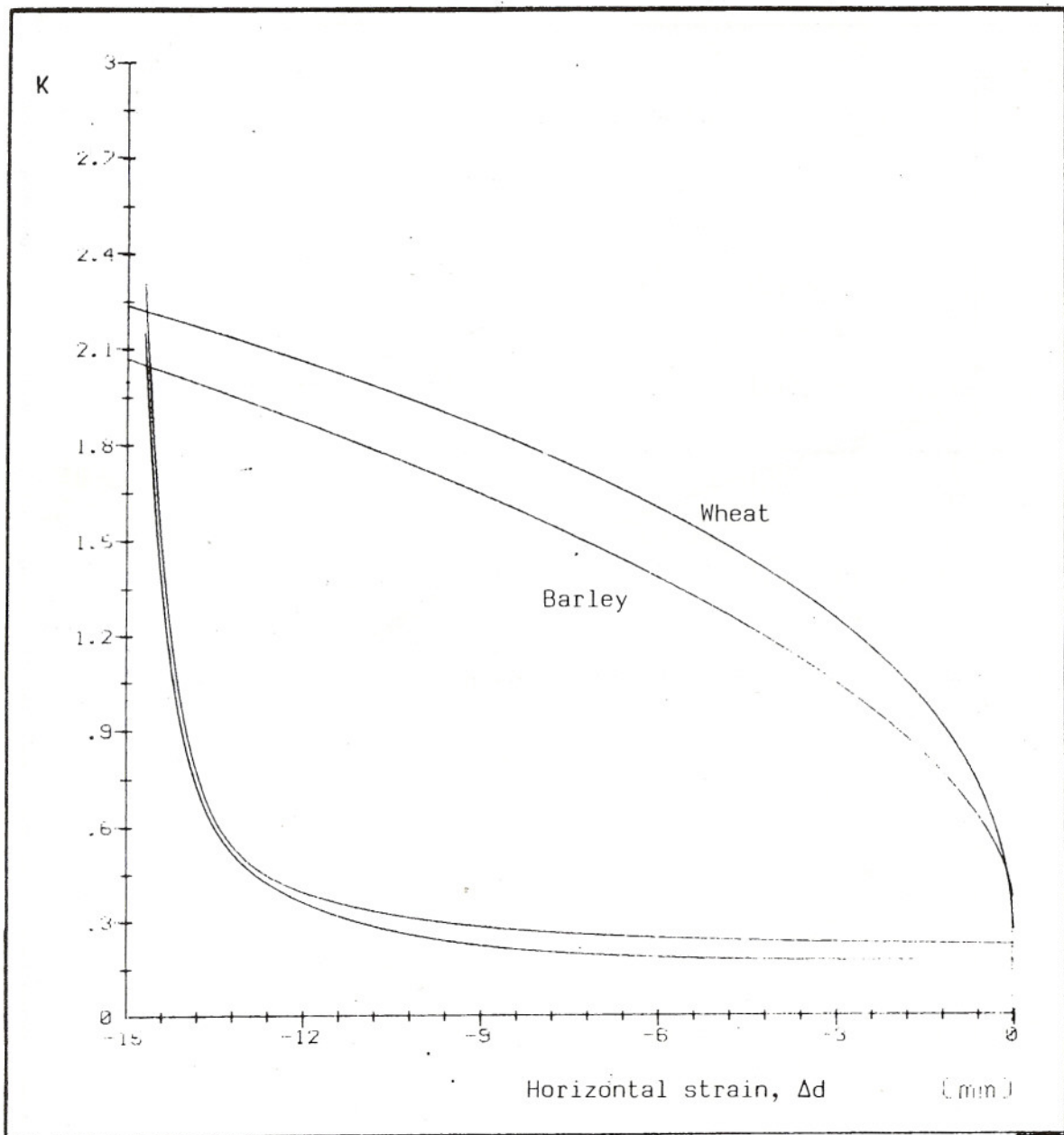


Figure 10. K at vertical movement of inclined smooth wall. Regression curves for barley and wheat. All types of filling.

CONFORTEMENT DES SILOS FISSURES

CAS DU SILO DE SAFI

Par Monsieur EL KHYARI MOSTAPHA Ingénieur Conseil, Spécialiste dans les domaines des silos et de manutention, en collaboration avec M. KHOUDMI NOUR EDDINE, Ingénieur à la Société des Silos Portuaires (SOSIPO).

RESUME

Le problème des silos est très spécifique et complexe. Lors des calculs et de la conception d'un silo, le non respect d'une réglementation cohérente, la sous estimation de l'importance de certains phénomènes encore mal connus de nos jours, voir une mal-çon lors de son exécution, peuvent amener à la réalisation d'un ouvrage « malade » à sa naissance. Auquel cas, un diagnostic rigoureux et scientifique est préalablement nécessaire, avant de proposer des remèdes. Tel est le thème général de la présente communication qui comporte 4 parties :

Dans la première partie, l'aspect théorique et réglementaire de la conception et les calculs de silos est abordé. La deuxième partie traite des dégradations du béton et principalement de la fissurabilité. La troisième partie résume les principales méthodes de réparation et de confortement d'ouvrages en B.A dégradés. L'étude du cas du silo à céréales de Safi, fissuré au lendemain de sa réalisation, à la fin des années 50 et conforté seulement à la fin des années 80, fait l'objet de la dernière partie.

ABSTRACT

The problem of silos is very specific and complex. When you design a silo and work out calculations for its construction, the non respect of consistent regulations, the undervaluation of the importance of some phenomena still unknown nowadays, and even a defect during its building may lead to the construction of a « diseased » work from birth. In this case a severe and scientific diagnosis is required before proposing any remedies.

That is the general topic of the present paper which contains four parts.

The first part deals with the theoretical and statutory aspect of silos design and calculations required for their construction. The second part deals with dilapidations of concrete and especially of its cracking. The third part sums up the main methods of repairing and strengthening dilapidated reinforced concrete works. Finally the study of the case of safi's cereals silo, fissured just after its building at the end of 1950 s and strengthened at the end of the 1980 s, is the subject of the last part.

1ERE PARTIE : PROBLEME DES SILOS

La conception et les méthodes de calcul des silos ont toujours fait l'objet d'un foisonnement d'idées, souvent suffisamment différentes pour créer chez les ingénieurs un grand désarroi, les poussant ainsi à choisir en toute liberté la méthode de calcul qui leur convenait, ou même parfois à opérer des mélanges d'éléments théoriques d'origines diverses.

Jusqu'à la fin des années 60, les calculs des silos étaient souvent opérés selon les recommandations des normes allemandes din 055 (1964) ou en s'appuyant sur les données numériques données dans les ouvrages de MM Reimbert.

En 1970, M. Lambroso, a apporté de nouvelles données dans son étude intitulée « Détermination numérique des sollicitations exercées par la matière ensilée dans les silos », publiée dans les annales de l'ITBTP.

Ces données ont été complétées en 1975 par la publication par le SNBATI, toujours dans les annales de l'ITBTP, des « Règles de conception et de calcul des silos en béton ».

Cependant, les mêmes causes produisant les mêmes effets, malgré l'application de ces règles, il a toujours été constaté des désordres d'origines souvent mal connues, ce qui a donné lieu à un projet de leur révision à la fin des années 80. Ce projet vient combler par ailleurs quelques insuffisances des règles de 1975 pour étendre leur domaine d'application aux silos en béton précontraint, aux silos-réservoirs et aux magasins de stockage.

On pourrait donc s'interroger utilement sur les raisons qui rendent si complexe le problème des silos. Nous pouvons les résumer principalement, ainsi :

1— Le même nom « silo » est souvent donné à des ouvrages de proportion, de dimensions et de destination très différentes, et pour lesquels pourtant, il n'y a aucune raison d'utiliser le même ensemble de formules et de données numériques.

2— L'influence fondamentale du procédé et du phénomène de vidange sur les actions exercées par les matériaux ensilés reste toujours très mal connue et par conséquent difficilement bien

estimée. Notons à cet effet, que des mesures effectuées sur des ouvrages en vraie grandeur, ou de dimensions réduites ont souvent révélé des efforts lors de la vidange des silos, très supérieurs à ceux préconisés par les normes et règles de calcul.

3— La mauvaise estimation dans certains cas particuliers de l'influence des causes de désordres naturelles, résultant de l'ambiance et de l'environnement.

La complexité de ce problème a par ailleurs été démontrée par M. Rigout dans son étude intitulée « comparaison de différentes méthodes de calcul des silos en béton ». (annales de l'ITBTP de juin 1977). Cette étude a mis en parallèle avec les règles SNBATI les règlements suivants :

— Le projet de nouvelles recommandations américaines ACI standards 313.

— La norme allemande DIN 1055/6 (édition 1964) assortie de certaines corrections.

— Le projet de nouvelle norme allemande.

Il ressort de cette comparaison les conclusions suivantes :

* Dans le cas de silos à blé ou à maïs à forts élancement (hauteur/diamètre) :

— Les normes DIN donnent des minorations d'acier de l'ordre de 15 % par rapport aux règles SNBATI, alors que les règles américaines ACI donnent des majorations d'acier de l'ordre de 30 % par rapport aux mêmes règles.

* Dans le cas de silos à blé ou à maïs de faible élancement, les normes américaines ACI et allemandes DIN conduisent à des quantités globales des aciers sensiblement identiques, mais de répartition très différente, la norme allemande imposant moins d'aciers en partie basse et plus en partie haute.

* Dans le cas de silos à ciment, quelque soit l'élancement, la norme DIN donne des minorations d'acier de l'ordre de 22 à 32 % par rapport aux règles SNBATI.

Une étude similaire a été établie par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE) en collaboration avec la société des Silos Portuaires, lors de l'expertise des fissures du silo nord de Casablanca en 1986. Cette étude basée également sur

les mesures expérimentales des contraintes supplémentaires engendrées par le phénomène de vidange a révélé les divergences suivantes :

. L'effort sur les parois des cellules calculé selon la méthode de M. Reimbert dépasse celui obtenu par l'application des règles SNBATI de l'ordre de 12 % pour un angle de frottement interne de 30°.

. Pour un angle de 25°, les règles DIN et SNBATI donnent des efforts voisins alors que la méthode de Reimbert conduit à des résultats plus élevés de l'ordre de 15 %.

. Les distributions des efforts obtenues par la méthode de Reimbert et par les relevés expérimentaux sont voisines.

. Le coefficient de majoration dynamique, en partie basse des silos, phénomène de vidange relevé expérimentalement, est de l'ordre de 2, alors qu'il est de l'ordre de 1,75 pour M. Reimbert et seulement de 1,15 pour les règles SNBATI. Notons à cet effet, que ce coefficient varie, pour les normes américaines selon l'élancement des silos, de 1,35 à 1,65 pour les parties hautes et de 1,65 à 2 pour les parties basses.

2 EME PARTIE : DEGRADATION ET FISSURABILITE

Le béton armé est parmi les matériaux de construction les plus utilisés et les plus performants. Ses caractéristiques et son comportement sont actuellement quasiment maîtrisés. Comme tout matériau, il vieillit naturellement et ne peut résister éternellement sans entretien.

Malgré ses qualités incontestables, il présente certaines particularités qu'il convient de ne pas perdre de vue.

Contrairement à son excellente performance à la compression, sa résistance à la traction et son élasticité sont assez faibles.

Son caractère poreux, entraîne une certaine perméabilité inévitable sans protection supplémentaire.

Par ailleurs, les réactions physico-chimiques, accompagnant la prise et le durcissement sont complexes et souvent difficiles à estimer. Elles se traduisent en pratique systématiquement par une micro-fissuration d'origine, pouvant se développer dans le temps et conduisant au vieillissement du béton. De même, du fait de la nature chimique du liant, il peut se produire des réactions, soit avec le milieu extérieur, soit avec le milieu interne (réaction entre les différents composants du béton lui-même).

La fissurabilité, phénomène aussi vieux que le béton lui-même, a toujours été l'objet de préoccupations des ingénieurs civils. Malgré la découverte de la précontrainte, la fissuration du béton est inévitable, puisqu'elle résulte du fonctionnement normal du matériau; en effet, la mise en charge des armatures ne peut s'effectuer que lorsque le béton qui l'enrobe travaille au delà de sa limite de résistance à la traction.

Si la fissuration est donc un phénomène inévitable, il convient cependant de distinguer les fissures non préjudiciables donc acceptables, de celles qui mettent en perle la durabilité de l'ouvrage, donc inacceptables. Il appartient aux Maîtres d'Ouvrages de définir de façon claires dans

leurs cahiers des charges la qualité des parois en béton désirée. Celles-ci étant classées en trois catégories :

. Parois de la 1ère catégorie :

Font partie de cette catégorie les parois pour lesquelles il est requis que la probabilité d'apparition de fissures soit aussi faible que possible.

. Parois de la 2ème catégorie :

Ce sont les parois pour lesquelles, il est requis que l'ouverture des fissures soit aussi faible que possible.

. Parois de la 3ème catégorie :

Il s'agit de parois dont la fissuration, tout en restant limitée, est considérée ne nuire, ni à l'exploitation, ni à la durabilité de l'ouvrage.

La définition du degré de fissurabilité des parois dans le cas des silos peut résulter implicitement des critères suivants :

- La susceptibilité du produit stocké à l'humidité.
- Le temps de séjour d'un stock donné à l'intérieur d'une cellule.
- La présence éventuelle d'un revêtement intérieur ou extérieur.
- L'éventuelle exigence d'une imperméabilité à l'air.
- La situation en atmosphère agressive (notamment au bord de la mer).
- La position relative de la paroi : intérieure (cas des silos en batterie ou en « as » de carreau) ou extérieure.

— Injection des gaines des barres de grimpage des silos exécutés par coffrages glissants, qui présentent un risque accru pour la fissuration.

Rappelons qu'il n'existe pas actuellement de normes classant les fissures suivant leur ouverture. Il convient cependant de distinguer les fissures

proprement dites, du « faïençage » et des « microfissures » auxquels sont attribuées les définitions suivantes :

. On entend par faïençage tout réseau caractéristique d'ouvertures linéaires superficielles de très faible largeur se présentant sous forme d'un dessin géométrique à mailles irrégulières et qui s'inscrivent généralement dans un carré n'excédant pas 20 cm de côté. Ce réseau n'intéresse le plus souvent que la couche superficielle du béton.

. Par microfissure on entend toute fissure très fine, au trace plus ou moins régulier, et le plus souvent discontinu. Elle peut évoluer jusqu'à former un réseau.

Il est à préciser, cependant, pour les parois de 3ème catégorie, que la valeur de 0,2 mm est universellement admise aussi bien par les normes européennes, américaines que soviétiques, comme étant l'ouverture maximum des fissures sans danger de corrosion des armatures, dans une atmosphère agressive.

Avant d'aborder les procédés de réparation et de confortement de béton en général, et des silos en particulier, il est utile de rappeler les causes des désordres que l'on peut rencontrer. Elles sont réparties en cinq grandes classes :

. Dégradations dues à des phénomènes physico-chimiques

Rentrent dans cette classe les causes suivantes :

— Carbonatation entraînant une neutralisation progressive de l'alcalinité du ciment et une dépassement des armatures due à l'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur la chaux engendrée par la prise du ciment.

— Action des chlorures.

— Action des sulfates entraînant la formation de sels expansifs

— Action de gaz ou vapeur industrielle

— Action de gel-dégel

— Action de l'érosion

. Dégradations dues à des phénomènes électrochimiques

Il s'agit de corrosion électrolytique des aciers résultant notamment de la porosité ou de la microfissuration.

. Dégradations accidentelles

Telles que chocs, surcharges anormales, incendies, séisme etc...

. Dégradations dues à des défauts de conception ou d'exécution

Ces dégradations peuvent entraîner, soit la rupture du matériau, soit la réduction de la protection des armatures et leur corrosion.

3 EME PARTIE : PROCÉDES DE REPARATION ET DE CONFORTEMENT

Les travaux de réparation d'un ouvrage ont pour but principal d'arrêter une évolution dommageable, de reconstituer l'intégrité du béton et de réaliser une protection efficace de la structure.

La nature de la dégradation, et la durée de vie désirée pour l'ouvrage après sa réparation, conditionnent le choix de la solution.

Nous nous proposons dans cette partie de lister les principaux procédés de réparation ou de confortement des bétons, ainsi que les précautions d'emploi à observer dans chaque cas particulier.

1— REPARATION DES SURFACES

Il s'agit ici essentiellement des traitements des micro-fissures et des faïençage définis ci-dessus, apparus sur des parois verticales ou dont l'inclinaison avec la verticale ne dépasse pas 30°.

Si ce type de dégradation, est généralement non préjudiciable, son évolution dans le temps, entraînant un vieillissement prématuré du béton, risque d'altérer les armatures et par conséquent mettre en perle l'ouvrage d'ou la nécessité de sa réparation.

Parmi les procédés de réparation applicables à ce type de dégradation on peut citer :

1-1 Traitement par peintures

Une peinture est définie comme étant un liquide contenant principalement un liant, des charges et des pigments.

Bien que leur usage est le plus souvent décoratif, les peintures assurent également une fonction de protection.

Il existe actuellement plusieurs types de peintures classées selon leur propriétés physico-chimiques et leur matières constitutives. On peut citer à cet effet :

- Les peintures séchant par la seule évaporation du solvant.
- Les peintures à plusieurs composants et durcissement chimique.
- Les peintures en émulsion à siecatifs.

— Les peintures à dispersion aqueuse.

Leur application se fait le plus souvent en deux couches : une couche d'impression assurant la fonction isolante, hydrofuge, neutralisante, d'accrochage, durcissante ou pénétrante, et une couche de finition donnant l'aspect esthétique et la couleur.

Elles sont appliquées soit à la brosse, soit au rouleau soit par projection.

Il est rappelé cependant que le traitement de fissures infiltrantes, hormis le rebouchage, n'est pas du ressort habituel des travaux de peinture.

1-2 Traitement par revêtement plastique épais

Les revêtements plastiques épais sont constitués principalement d'un mélange de liants synthétiques, de granulats et de charges minérales inertes, avec ou sans pigments. Ils se distinguent des peintures par leur consistance assez pâteuse qui leur confère la faculté supplémentaire de cacher les défauts de surface.

Leur application, comme pour les peintures, se fait généralement en deux couches : une couche primaire assurant la fonction pénétrante et fixante, régulatrice d'absorption, ou opacifiante, et d'une couche de finition donnant l'aspect définitif et la couleur. Préalablement à l'application de ce type de produit, les fissures sont traitées linéairement soit par mastic, soit par pontage.

Leur mise en oeuvre s'effectue au rouleau, soit à la taloche, soit par projection.

1-3 Traitement par revêtement d'imperméabilité

Il s'agit de revêtements élasto-plastiques à base de polymère en dispersion aqueuse, constituant des épidermes utilisés pour assurer l'imperméabilisation de supports verticaux.

Ce type de traitement convient parfaitement pour des faïençage ou microfissures dont l'ouverture peut aller jusqu'à 0,2 mm.

Sa mise en oeuvre se fait en 3 couches :

— Une couche pour la fixation des fonds ou d'accrochages.

— Une couche dite performante

— Une couche de finition.

La couche de fixation est nécessaire si les fonds sont poudreux ou pulvérulents. Sur des fonds sains, l'accrochage est réalisé par le produit lui-même dilué pour augmenter sa fluidité.

La couche performante est appliquée après le séchage de la 1^{ère} couche; les fissures sont traitées linéairement par pontage. C'est cette couche qui assure l'imperméabilisation et qui subira les sollicitations provenant soit du support même, soit du milieu extérieur.

La couche de finition est appliquée après le séchage de la couche performante. Elle a pour rôle, d'une part de donner l'aspect final au support, et d'autre part de protéger la couche performante en augmentant sa pérennité.

Les 3 couches ci-dessus sont mises en oeuvre au rouleau.

1-4 Traitement par revêtement d'étanchéité

Comme pour les revêtements d'imperméabilisation, les revêtements d'étanchéité sont également des produits elasto-plastiques à base de polymère en dispersion aqueuse avec la particularité de posséder en plus une armature en verre textile ou en fibres continues.

Leur efficacité s'étend ainsi pour des fissures dont l'ouverture peut aller jusqu'à 1 mm.

Il possèdent également une résistance mécanique beaucoup plus importante, leur permettant de supporter les contraintes de traction localement engendrées par les fissures actives.

La mise en oeuvre de ce type de traitement nécessite également 3 couches :

— Une couche de fixation ou d'accrochage

— Une couche dite performante

— Une couche de finition

La 1^{ère} et la 3^{ème} couche sont appliquées au rouleau, la 3^{ème} généralement par projection.

2— REPARATION PAR RECONSTITUTION DU BETON ARME

Lorsque la dégradation d'un ouvrage n'intéresse pas que les surfaces, mais la profondeur même des parois, le recours à une réparation par reconstitution du béton s'impose. Si les armatures sont également atteintes, il convient d'apprécier l'importance de leur altération, afin de se pro-

noncer sur la nécessité ou non d'adjonction d'armatures supplémentaires. On pourrait distinguer ainsi deux types principaux de réparation :

— Réparation sans adjonction d'armatures supplémentaires

— Réparation avec adjonction d'armatures supplémentaires

Les produits de réparation dans ce cas peuvent être classés en 2 types :

— Les mortiers et bétons à base de liant hydraulique, comme les ciments purs ou les mortiers à base d'adjuvants ou résines.

— Les mortiers et bétons à base de liant de synthèse comme les résines époxydiques ou polyuréthanes.

Notons que ces mortiers existent généralement sous forme de produits prêts à l'emploi ou préconditionnés qui facilitent leur utilisation sur les chantiers tout en garantissant le respect de leurs dosages.

Si les mortiers à liant hydraulique sont bien adaptés à ce type de réparation, puisqu'ils sont généralement de même nature que les supports traités (même coefficient de dilatation et module d'élasticité voisin), ils présentent cependant l'inconvénient d'avoir des retraits capables de causer des fissures, et par conséquent des défauts d'étanchéité, auquel cas un traitement supplémentaire s'impose.

Préalablement à toute mise en oeuvre de mortier, il est souvent nécessaire d'appliquer une couche d'accrochage pour assurer sa bonne adhérence.

Les armatures apparentes doivent par ailleurs subir un traitement particulier, le plus souvent par décapage, brossage et passivation. Le choix du passivant devra se faire de façon à assurer la compatibilité avec le matériau d'enrobage.

Le béton support doit de son côté être préalablement débarrassé de toutes les parties non adhérentes par repiquage, bouchardage, brossage ou époussierage.

L'adjonction d'armatures supplémentaires est le plus souvent nécessitée lorsque les aciers sont fortement corrodés ou coupés accidentellement, ou lorsque le renforcement de la structure s'impose.

Cette adjonction pourrait se faire soit par jonction avec les armatures existantes soit par ancrage des armatures supplémentaires dans du béton existant sain.

3— REPARATION PAR BETON PROJETE

La technique du béton projeté est utilisée depuis plus de 70 ans, tant pour construire des ouvrages neufs que pour réparer ou renforcer des constructions existantes.

Cette technique est donc actuellement parfaitement maîtrisée. Cependant, la liaison entre l'ancien et le nouveau béton devra être soigneusement étudiée afin de garantir le monolithisme de la réparation, et sa mise en oeuvre doit être effectuée par un personnel qualifié possédant les compétences requises.

La projection du béton peut se faire, soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans l'un et l'autre cas, l'équipement suivant est nécessaire :

— Une machine ou pompe où le mélange est introduit.

— Une conduite de transport pour l'acheminement du mélange.

— Une lance de projection fixée à l'extrémité de la conduite.

Dans le cas de la projection par voie sèche, le mélange granulats-ciment est introduit dans la machine à son humidité naturelle, puis transporté par de l'air comprimé jusqu'à la lance de projection où l'eau de gâchage est injectée.

Pour la voie humide, le béton est introduit gâche dans la machine où il est refoulé par pompage jusqu'à la lance où l'air comprimé, nécessaire à la projection est introduit.

La qualité du produit, résultant de la projection est celle d'un béton coulé ou pompé puis vibré.

L'avantage particulier de cette technique, réside dans sa souplesse de mise en oeuvre qui s'adapte à toute forme de travaux de bétonnage sur des supports de forme quelconque, les épaisseurs des réparations peuvent varier de 1 à 25 cm.

Pour les travaux de réparation, la projection par voie sèche est recommandée, compte tenu de sa bonne adhérence sur les supports existants.

Lorsqu'un renforcement de la structure est requis, il est associé au béton projeté une armature additionnelle pour constituer ainsi du « béton projeté armé », ces armateurs sont généralement constituées de nappes posées au fur et à mesure de la projection.

Dans tous les cas de réparation, la surface du béton support doit être préparée par repiquage, décapage, lavage, etc.

Pour éviter des dégradations dues au retrait, des arrosages fréquents peuvent être recommandés après la projection.

4— REPARATION PAR INJECTION

Ce type de réparation est généralement réservé aux fissures importantes : les faïençages ou microfissures n'ayant besoin que d'un traitement de surface.

Des fissures importantes laissent toujours prévoir un dépassement de la limite élastique du béton, c'est pour cela, qu'un traitement par injection doit toujours être accompagné de la recherche et de la suppression des causes qui les ont produites, autrement, dans le cas de fissures actives, une dégradation de même nature est souvent inévitable après l'injection.

Le produit d'injection est souvent choisi en fonction de l'importance (ouverture) et la nature des fissures (actives ou passives).

On pourrait classer les méthodes de traitement en 3 grandes classes selon l'ouverture des fissures :

- Les fissures d'ouverture supérieure à 10 mm, qui sont généralement traitées à l'aide de mortier à base de ciment avec éventuellement des adjuvants pour celles qui sont passives et à base de rejointement souple pour les actives.

- Les fissures d'ouverture comprise entre 1 et 10 mm qui sont traitées à l'aide de coulis en ciment, soit purs, soit additionnés à des produits tels que charges, résine ou minéraliseurs, ou à l'aide de résines chargées.

- Les fissures d'ouverture comprise entre 0,5 et 3 mm qui sont injectées à l'aide de produits à base d'époxydes, de polyuréthane ou d'acryliques.

Dans tous les cas de traitement, les fissures doivent être soigneusement préparées et leurs lèvres séchées à l'air comprimé avant leur injection.

5— RENFORCEMENT PAR ADJONCTION D'ELEMENTS DE STRUCTURE

Lorsque la stabilité d'un ouvrage dégradé, n'est plus garantie, un confortement de la structure existante devient nécessaire pour assurer sa pérennité. Ce type de confortement est accompagné le plus souvent de l'un ou plusieurs des types de traitement exposés dans les paragraphes 1 à 4 ci-dessus.

Les structures additionnelles peuvent être de différentes natures :

- Section de béton, armé ou non, accolée à la section existante.

- Structures métalliques porteuses associées à la structure existantes par des liaisons mécaniques.

- Armatures passives par plats métalliques, solidarisiées par collage à la structure existante.

- Armatures actives appliquant à la structure existante, une précontrainte destinée à lui apporter des efforts extérieurs renforçant sa résistance.

Les techniques de plats collés et de précontrainte additionnelle étant les plus courantes pour les confortements des silos, compte tenu de la forme particulière de ces derniers, nous nous proposons de nous limiter à ces 2 types de renforcement et de donner ci-après les principes et les recommandations de leur emploi.

Dans l'un et l'autre cas, une étude détaillée des efforts globaux engendrés sur les structures ainsi que des efforts que la structure existante est en mesure de retenir est nécessaire pour déterminer l'importance et les caractéristiques des éléments additionnels.

5—1 Renforcement par tôles collées

Il s'agit essentiellement de tôles plates collées par résine aux supports existants. Le procédé le plus utilisé est celui de UTI-L'HERMITE qui a fait l'objet de plusieurs brevets pour couvrir les différentes techniques de mise en œuvre.

Les précautions suivantes doivent être observées pour la réussite du procédé :

- La qualité des matériaux doit être parfaitement compatible avec celle des supports à conforter.

- La mise en œuvre du procédé doit être effectuée par un personnel qualifié et expérimenté.

- La résistance au cisaillement du béton existant doit permettre de supporter les efforts engendrés par les plats. A cet effet des mesures in-situ de cette résistance sont recommandées.

- La colle doit être choisie de façon à assurer une parfaite adhérence, aussi bien sur l'acier que sur le béton. Les résines epoxydes possèdent généralement une telle propriété.

- Les efforts, du support vers la tôle, doivent être intégralement transmis par adhérence. A cet effet le film résiduel de colle devra être de faible épaisseur (entre 0,5 et 1 mm) et d'une rigidité suffisante.

- La rigidité de la colle variant en sens contraire avec la température, des précautions parti-

culières doivent être prises lorsque cette dernière dépasse les 70°.

- Les tôles étant généralement de qualité courante, leur épaisseur doit être limitée aux alentours de 3 mm, pour leur permettre de suivre les courbures des supports. Lorsque les calculs nécessitent des épaisseurs plus importantes, il est préférable de superposer des tôles, plutôt que d'augmenter leurs sections.

- Les calculs doivent tenir compte du mode de fonctionnement des supports à conforter et suivre les recommandations parues aux annales de l'ITBTP N° 349 du mois d'Avril 1977.

- Les supports recevant les plats doivent avoir une résistance à l'arrachement compatible avec une contrainte de cisaillement de l'ordre de 15 bars, et une planéité ayant les caractéristiques minima suivantes : 5 mm sous la règle de 2 m et 2 mm sous la règle de 0,20 m.

- Les épaufures, nids de cailloux etc... doivent être préalablement traités par un ragréage de caractéristiques compatibles avec celles de la colle utilisée.

- Pour favoriser l'adhérence de la colle, les supports doivent être préalablement préparés par sablage, jet d'eau à haute pression, piquetage et bouchardage.

5-2 Renforcement par armatures actives complémentaires

Il s'agit de renforcement par armatures précontraintes additionnelles donnant à la structure existante, soit son état de service initial, soit un nouvel état de service.

Les aciers de précontrainte sont des aciers à très grande résistance généralement munis de protection spéciale contre la corrosion, par gainage, par graissage, par galvanisation ou par tout autre procédé donnant les mêmes garanties.

Les ancrages dépendent du type et de la forme des aciers utilisés (fils, torons ou barres) : dans tous les cas, ils doivent être choisis parmi les modèles agréés.

Les conduits pour les aciers peuvent être réalisés par forage dans la structure existante, par des tubes en acier, ou par des gaines souples en matériaux plastiques. Le type des conduits dépend des aciers utilisés, de leur mode de protection, de la pression d'injection et de l'environnement.

L'injection des câbles de précontrainte est

généralement assurée par des ciments adjuvants et/ou graisses. Le produit d'injection doit être préalablement agréé.

Les calculs doivent tenir compte des caractéristiques des supports existants qui doivent accepter les efforts supplémentaires dûs à la précontrainte additionnelle.

L'emploi de la précontrainte nécessite des précautions et une technicité particulières qui diffèrent en fonction de la méthode utilisée. Nous nous limiterons ici à en citer quelques recommandations qui pourraient s'appliquer à tous les types :

— L'implantation et le tracé des câbles de précontrainte doivent s'adapter au but recherché et tenir compte de l'état réel des supports de l'ouvrage.

— Les tracés doivent éviter les points anguleux sinon des déviateurs sont nécessaires.

— Les forages éventuels doivent tenir compte de la distribution des armatures existantes afin d'en

abîmer le minimum. Les diamètres doivent être réduits au maximum.

— Les surfaces d'appui des bossages d'ancrages et des déviateurs doivent être soigneusement préparées; l'application à ces endroits, d'une couche d'interposition, par mortier, résine ou autres, est souvent nécessaire pour éviter que les efforts ne se transmettent à travers des points durs.

— Les conduits doivent permettre de respecter le tracé prévu par l'étude, être étanches et ne pas présenter de points singuliers.

— Les précautions d'usage concernant le transport, la protection et le stockage des armatures de précontrainte doivent être scrupuleusement respectées.

— Pour les précontraintes additionnelles extérieurement à la structure, la tension initiale des câbles ne doit pas dépasser 75 % de leur force de rupture.

— La protection des ancres doit être soignée afin de garantir leur pérennité.

4EME PARTIE : CAS DU SILO DE SAFI

Bien que le renforcement des ouvrages en béton armé, à l'aide de précontrainte additionnelle, soit une technique plus ou moins courante, les particularités du silo de Safi, dûes à sa forme géométrique particulière d'une part, et à la nature et l'importance des dégradations qu'il a subi d'autre part, ont fait que les techniques utilisées pour son confortement soient considérées comme étant une première mondiale. En effet, si le même type de renforcement a déjà été réalisé sur des silos isolés à BURMA en extrême orient, il n'avait jamais encore été exécuté sur des silos dont la forme est aussi complexé que celle du silo de Safi.

Pour rendre le présent exposé aussi clair que possible, il nous semble opportun de présenter l'ouvrage lui-même dans une première partie, puis l'historique et la nature de ses dégradations dans une deuxième partie, avant de présenter enfin le procédé retenu pour son confortement et les particularités de sa mise en oeuvre.

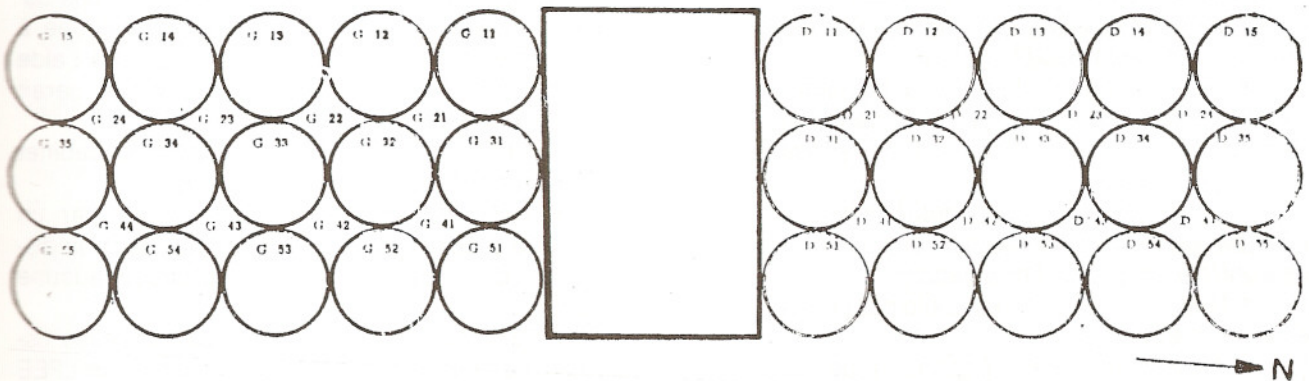
I — DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le silo à céréales du port de Safi, de 240.000 qx de capacité, est composé de deux batteries de cellules disposées symétriquement de part et d'autre d'une tour de travail.

Chaque batterie est constituée de 3 rangées de cinq cellules tangentés, à section circulaire, et de 2 rangées de quatre cellules à section en « as de carreau ». Ces cellules sont en béton armé. Le diamètre intérieure des éléments circulaires est égal à 5,70 m; leur hauteur est de 34,20 m. L'épaisseur des parois intérieures est de 12 cm, celle des parois extérieures de 13 cm.

La tour de travail est séparée de chaque batterie de cellules par des joints de dilatation.

La figure ci-dessous donne plus clairement la forme de l'ouvrage.



Les cellules reposent sur un plancher à poutres orthogonales; elles sont liaisonnées en leur partie supérieure par un plancher nervuré.

Le plancher support des cellules est supporté par des poteaux situés aux points de tangence des cellules, ainsi qu'à leurs extrémités extérieures.

Les fondations profondes, réalisées en pieux forés de diamètres 99 et 120, sont reliées en leur arase supérieure par des longrines en béton armé.

Le silo est destiné à stocker principalement des céréales et légumineuses et accessoirement des produits oléagineux.

La vidange des cellules est normale (centrée) : et l'érection des cellules a été exécutée en coffrage glissants.

Les armatures des parois des cellules sont constituées de deux nappes horizontales, de sections identiques, reliées régulièrement à des armatures verticales.

Les armatures de levage du coffrage glissant, de 25 mm de diamètre, ont été disposées dans l'axe des parois des cellules. Elles ont été laissées en place. Leur écartement moyen est d'environ 2 m.

II — HISTORIQUE DES DEGRADATIONS

- 1956-1957 : Construction des cellules
- 1958 : Mise en service du silo
- 1959-1960 : Observation de traces d'humidité dans cinq cellules et de micro-fissures horizontales imputées alors au coffrage glissant et au retrait du béton.
- Mars 1962 : Revêtement du silo par peinture étanche.
- Novembre 1962 : A l'issue de deux journées de forte pluie, observation de quantités importantes d'eau dans les cellules et notamment dans celles qui sont exposées Sud-Ouest.
- 1964 : La pénétration d'eau dans les cellules est de plus en plus importante et observation de fissures extérieures verticales. L'entreprise a été mise en demeure.
- 1964-1965 : Injection des fissures, sous le contrôle de l'ingénieur Conseil et d'un organisme de contrôle agréé, au latex naturel.
- 1966-1967 : Peinture du silo par une peinture extérieure étanche.
- Novembre 1968 : Apparition de nouveau, d'eau dans les cellules exposées Sud-Ouest. Le latex ayant perdu son élasticité par vieillissement d'une part, et sous les contraintes répétées d'ouverture et de fermeture des fissures d'autre part.
- Il a alors été décidé de revoir le problème de

façon plus approfondie pour aboutir à une solution donnant des garanties de pérennité plus sérieuse, et de saisir à nouveau l'Ingénieur Conseil et l'Entreprise.

- Juin 1969 : L'Ingénieur Conseil et l'organisme de contrôle vérifient les hypothèses de calcul. Les résultats de l'étude ont été jugés corrects. Ils ont alors proposé de réinjecter les fissures, soit à une résine époxydique soit de nouveau au latex naturel. Le Maître de l'Ouvrage préfère faire expertiser préalablement l'ouvrage par le LPEE.

- Novembre 1969 : Le Laboratoire Public des Etudes et Essais (LPEE) contrôle les mouvements d'une fissure verticale, sur toute sa hauteur, lors des opérations d'ensilage et de désensilage de la cellule correspondante. L'ouverture maximum se situait entre 6 à 7 m en dessous du niveau supérieur du grain. L'ouverture totale observée était de 1,6 mm et se décomposait comme suit :

- Ouverture initiale : 0,75 mm
- Fluctuation thermique : 0,25 mm
- Fluctuation mécanique : 0,60 mm

Par ailleurs, des mouvements de cisaillement verticaux des lèvres de la fissure, atteignant 0,15 mm ont été accessoirement observés.

Lors des mesures, une alternance journalière des températures de l'ordre de 15°C était observée.

Des décollements locaux du béton de recouvrement des cerces sous l'effet expansif provoqué par l'amorce de corrosion, ainsi que des fissures horizontales possédant la même origine, étaient également observés.

En conclusion dans son rapport, le LPEE recommande l'installation de cheminées antidynamiques brevetées par M. Reimbert, à l'intérieur des cellules afin de limiter le mouvement des fissures à la seule fluctuation thermique estimée à 0,25 mm et d'injecter ensuite les fissures à l'aide d'un produit d'étanchéité dont l'élasticité serait capable d'absorber ces fluctuations.

- 1970 : Premiers contacts avec le cabinet Reimbert par l'intermédiaire du LPEE.

- 1971 : M. Reimbert fait procéder par un géomètre à des relevés complémentaires de la distribution des fissures, mais ne propose aucune solution.

- 1974 : Suite à l'apparition de nouvelles fissures et à l'évolution de celles existantes, le LPEE propose une nouvelle campagne d'investigations par mesure directe des contraintes sur les armatures horizontales de la cellule la plus dégradée. L'ingénieur Conseil a alors demandé de surcoire à toute réparation avant la réception des résultats de ces investigations.

- 1976 : Création de la société des Silos Portuaires (SOSIPO) chargée de l'exploitation des silos portuaires au Maroc.

- 1977 : Le 1er Conseil d'Administration de la SOSIPO décide de confier au LPEE la mission d'investigations complémentaires proposée en 1974. Ce qui fut fait en octobre 1977.

- Juin 1977 : Réunion avec M. Reimbert qui a ensuite proposé une solution chiffrée, mais sans garantie.

- Mai 1978 : Réception du rapport du LPEE donnant les conclusions suivantes :

- La stabilité mécanique de l'ouvrage n'est pas mise en cause bien que l'ouverture des fissures risque d'évoluer sous l'effet de fatigue.

- L'état de corrosion des aciers au droit des fissures n'est pas alarmant, mais il convient d'y apporter un remède pour arrêter son évolution.

- La solution consisterait à traiter les épaufrures par microbéton, les fissures localement au moyen de pontages après élargissement de celles-ci, par un produit dont l'élasticité serait capable de supporter leur mouvement, et la rigidification des parois des cellules par raidisseurs ou par une couronne de nouvelles cellules autour des existantes.

- L'exécution de cheminées antidynamiques pourrait apporter les mêmes garanties que la rigidification des parois, mais son efficacité ne peut plus être garantie eu égard à l'évolution des dégradations.

- 1980-1983 : Consultation restreinte par la SOSIPO d'Entreprises spécialisées pour le confortement du silo avec l'exigence d'une assurance en garantie de la responsabilité civile décennale. Une seule société a répondu à cette consultation.

- 1985 : Les dégradations du silo s'aggravent et les fissures deviennent de plus en plus ouvertes atteignant dans certaines zones des ouvertures de l'ordre de 6 mm.

La SOSIPO a alors décidé de suivre la procédure suivante :

1. Expertise des dégradations afin de se prononcer sur leurs origines, leur état d'avancement, et sur les risques encourus par l'ouvrage, contradictoirement par deux bureaux de contrôle internationaux en collaboration avec le LPEE.

2. Lancement d'un concours international pour le confortement du silo avec fourniture d'une assurance garantissant la responsabilité civile décennale des concurrents.

3. Etude des solutions des entreprises en collaboration avec les 2 organismes de contrôle et choix d'une solution.

4. Réalisation des travaux de confortement par l'entreprise retenue sous le contrôle de l'organisme

ayant donné le plus satisfaction.

III— ORIGINE DES DEGRADATIONS ET CHOIX D'UNE SOLUTION

III-1 Origine des dégradations

A l'issue des phases d'investigations supplémentaires effectuées par le LPEE et des expertises et vérifications confiées aux deux organismes de contrôle, il a été arrêté les conclusions suivantes :

- Les parois des cellules du silo de Safi peuvent être classées dans la 3ème catégorie, c'est-à-dire, des parois pour lesquelles la fissuration est tolérée, mais ne doit nuire ni à l'exploitation, ni à la durabilité de l'ouvrage.

- Les aciers ont perdu par corrosion, presque 20 % de leur section au droit des fissures. Les contraintes sur ceux-ci se trouvent donc majorées d'autant.

- L'évolution des dégradations est inévitable sans réparation. La stabilité mécanique et la pérennité de la structure existante est donc compromise.

- Les fissures les plus ouvertes se situent au droit des armatures de levage du coffrage glissant. Ces armatures devaient être retirées et leurs emplacements injectés lors de la construction de l'ouvrage.

- La densité et les espacements des armatures, tant horizontales que verticales, sont inférieurs aux minima préconisés par les nouvelles normes de conception et de calcul des silos en béton armé. (1975).

- L'épaisseur des parois extérieures de 13 cm est inférieure à celle de 15 cm préconisée par les nouvelles normes pour les coffrages glissants.

- Un gradient de température de l'ordre de 9°, cumulé aux contraintes statiques et dynamique, suffit pour l'apparition de fissures sur les parois des cellules.

- Une vérification de la fissuration sur ordinateur à l'aide du puissant logiciel HERCULE a prouvé que l'ouvrage devait être fissuré; la distribution et l'ouverture des fissures étant semblables à celle observées sur site.

Il ressort donc de ces conclusions que la fissuration du silo de Safi est due à plusieurs phénomènes tant de conception et de calcul que d'exécution, le rôle du gradient thermique étant prépondérant dans l'amorce de cette fissuration.

III-2 Choix d'une solution

Trois solutions étaient proposées dont deux seulement étaient techniquement réalisables :

- Une solution par l'adjonction de parois en béton projeté à l'intérieur des cellules pour reprendre les efforts statiques et dynamiques et

l'exécution d'un bardage isolant, extérieur pour annuler les effets du gradient thermique.

— Une solution par précontrainte additionnelle à l'aide de cerces constituées de monotrons gainés et graissés, traitement des fissures par pontage et peinture et réparation des bétons dégradés.

La 1ère solution présente plusieurs inconvénients dont principalement :

- La capacité du silo serait réduite par les parois en béton projeté.
- Les fondations du silo seront surchargées.
- L'aspect esthétique du silo serait touché.
- Aucune réparation du béton dégradé ou de traitement des fissures n'est prévu.

• Le confortement se faisant par deux procédés différents (béton projeté et bardage isolant) destinés, l'un à s'opposer aux efforts dynamiques, l'autre aux effets thermiques, la connaissance précise de l'influence de chacun des deux types de contraintes est nécessaire.

La 2ème solution permet d'éviter l'ensemble de ces inconvénients et principalement le dernier, puisque la précontrainte additionnelle sera calculée pour s'opposer à tous les efforts cumulés, sans se soucier de leurs origines.

C'est sur cette deuxième solution que le choix du Maître de l'ouvrage a été porté moyennant les précautions et sécurités supplémentaires suivantes :

• Le calcul de la nature et des espacements des cerces de précontrainte devra être effectué selon les nouveaux règlements de conception et de calcul de silos. (SNBATI).

• Les cerces de précontrainte doivent pouvoir à elles seules, s'opposer à l'ensemble des efforts pouvant être présents simultanément (mécaniques et thermiques). Les efforts que peut retenir la structure existante seront donc négligés.

• Tenir compte d'un coefficient dynamique égal à 1,30 au lieu de 1,15 prévu par les règles SNBATI.

• Tenir compte des effets d'un gradient thermique effectif de 15°.

• Toutes les fissures dont l'ouverture est supérieure ou égale à 0,3 mm seront traitées.

• Tous les aciers apparents doivent être passivés et enrobés.

• Toutes les épaufrures doivent être traitées.

• Une assurance garantissant la responsabilité civile décennale de l'entreprise, doit être fournie, cette assurance devra garantir aussi bien les éléments de structure que les peintures étanches.

IV— MISE EN OEUVRE DE LA SOLUTION RETENUE

Si le choix de la solution retenue n'est que la

conséquence logique de la nature et de l'importance des dégradations, le choix des matériaux et leur mise en oeuvre devraient être cohérents et répondre parfaitement aux besoins et buts recherchés, à savoir :

- Reconstitution du béton (ragréages)
- Traitement des fissures (pontage)
- Annulation des causes de dégradations (précontraints)
- Etanchéité de l'ensemble de l'ouvrage (peinture)

IV—1 Reconstitution du béton

Le matériau choisi pour cette partie de la réparation est le SIKATOP 122 F; il s'agit d'un mortier hydraulique prédosé et renforcé par des fibres synthétiques, particulièrement désigné pour les réparations d'épaufrures, et de protection des armatures en ambiance marine.

Sa mise en oeuvre était exécutée selon le procédé suivant :

— Piquage, brossage, bouchardage des zones épaufrées.

— Brossage à nu des aciers avec passivation à l'ARMATEC 108 lorsque la protection par mortier ne pouvait se faire dans la même journée.

— Application du mortier SIKATOP 122 F, après imprégnation du support à l'eau douce. L'épaisseur minimum des recouvrements des aciers était fixée à 5 mm, ce qui permet de donner aux aciers la même protection qu'un enrobage classique de l'ordre de 5 à 6 cm.

IV—2 Traitement des fissures

Les fissures étant toutes actives, leur traitement par pontage souple était donc nécessaire. Ce pontage a été effectué pour les fissures d'ouverture supérieure à 0,3 mm, par du Sikaflex 1.a, mastic au polyuréthane, à élasticité permanente, spécialement indiqué à cet effet. Les fissures de moindre importance ont été pontées par peinture étanche.

Afin de garantir l'efficacité du Sikaflex, des saignées de 5 mmx5 mm de section, ont été exécutées sur les axes des fissures, et les lèvres de ces dernières soigneusement nettoyées à l'air comprimé, avant l'application du produit. Ces saignées remplissent une double fonction : d'une part, elles favorisent l'adhérence du mastic sur les lèvres des fissures, et d'autre part, elles permettent d'augmenter son élasticité relative.

IV— Application de la précontrainte additionnelle

La précontrainte additionnelle a été réalisée à l'aide de cerces, entourant les cellules et régulièrement réparties en hauteur, pour préserver l'aspect esthétique de l'ouvrage. Compte tenu de la

disposition en batterie des cellules, chaque cerce devra traverser les cellules adjacentes, nécessitant ainsi des travaux de carottage considérables, plus de 7000 carottes de 60 cm de long et de 5 cm de diamètre ont été exécutées.

Ces cerces sont des monotrons, gainés et graissés, de 150 mm² de section; les aciers sont de la classe très haute résistance THR. 1770 MPa. Les gaines sont en polyéthylène de diamètre égal à 28/32mm pour les longueurs courantes et à 35,2/40 mm pour les manchonnages.

Les monotrons gainés et graissés sont protégés par une deuxième gaine en polyéthylène injectée à l'aide d'un coulis de remplissage à base de ciment CPA245.

Les ancrages, de type « croisé », spécialement conçus par le fournisseur pour les monotrons gainés graissés, ont tous été placés à l'intérieur des cellules en as de carreau. Ils ont été protégés par déflecteurs en béton armé, pour résister à l'abrasion des produits stockés et avoir une tenue au feu réglementaire en cas d'incendie. Le même type de protection supplémentaire a été exécuté pour les monotrons, de part et d'autre des ancrages, et sur toutes les situées à l'intérieur des cellules.

- L'exécution des travaux de précontrainte a été exécutée en respectant scrupuleusement les phasages et le mode opératoire du procédé que l'on peut résumer ainsi :

1. Découpe en atelier de chantier aux longueurs désirées des monotrons et des gaines.
2. Enfilage en atelier de chantier, d'une extrémité du toron dans l'un des orifices d'ancrage.
3. Enfilage de la gaine dans les carottages et son alignement à l'horizontal à l'aide de crochets sur les parois dans cellules.
4. Enfilage de l'ensemble toron-ancrage dans la gaine depuis les as de carreau.
5. Calfeutrement des vides entre carottage et gaines à l'aide de sikaflex 1.A. sur les faces extérieures des silos pour assurer l'étanchéité.
6. Injection du coulis de remplissage entre gaine et toron.
7. Mise en tension des torons, 36 heures au moins après l'injection des gaines.
8. Blocage des mors après vérification des allongements.
9. Recépage des torons au ras de l'ancrage.
10. Injection à la graisse de l'ancrage.
11. Installation de déflecteurs en B.A. dans les cellules pour la protection des ancrages et des câbles.

IV—4 Peinture

L'application des peintures a été exécutée en 3 couches :

— 2 couches pour l'imperméabilité des cellules, à l'aide d'une peinture résine époxy-uréthane sans solvant, FREYSSI 450.

— 1 couche pour la protection contre les ultra-violets à l'aide d'une peinture résine époxy-uréthane solvantée, FREYSSI 620.

L'ensemble des 3 couches formant, après polymérisation une protection d'une résistance et adhérence telles qu'il est difficile de laisser sur les supports, une marque d'éraflure par exemple, à l'aide d'un outil métallique pointu comme un clou ou un couteau. Des essais d'arrachement ont été exécutés à cet effet, l'arrachement a toujours eu lieu au niveau du béton.

Les supports ont été préalablement préparés par sablage et brossage afin d'éliminer les particules de mauvaise adhérence.

Une pose de 24 heures au moins était observée entre deux couches successives, et un contrôle des températures et de l'hygrométrie était continuellement opéré.

V— CONCLUSION

On pourrait affirmer que l'expérience du silo de Safi a été très riche d'enseignements scientifiques à plus d'un niveau :

Au niveau théorique, sa conception et ses calculs selon des méthodes et des formules non encore réglementés à l'époque, la vérification de sa stabilité à l'aide des nouvelles normes et la sous-estimation de l'importance de certains phénomènes, nous ont montré, encore une fois, combien le problème des silos était complexe et nécessite une réglementation rigoureuse et spécifique sur le plan mathématique, et qui tienne compte de certaines expériences vécues dans le domaine pratique.

Aussi, le coefficient de majoration dynamique de 1,15 préconisé par les règles SNBATI nous semble-t-il insuffisamment apprécié et devrait être revu.

De même, lors de la conception et le calcul d'un silo, l'influence de certaines causes de désordre naturelles et particulièrement celle du gradient thermique, devrait être valablement estimée en tenant compte de l'ambiance et de l'environnement de l'ouvrage projeté.

Au niveau pratique, le suivi scientifique de l'évolution des dégradations, sur une période dépassant le quart de siècle, les erreurs d'appréciation et de réparation commises dans le passé et les diverses expertises, le plus souvent réalisées par des personnes hautement qualifiées, ont été porteurs de renseignements et d'une expérience dont il faudrait tirer profit lors de réalisations d'ouvrages similaires.

J.L. MULTON
Dr És-Sciences, Ingénieur ENSIA
Expert près la Cour d'Appel de Paris
Expert Agréé par la Cour de Cassation
Directeur de Recherches à l'I.N.R.A

Domaine de Vilvert
78352 JOUY en JOSAS Cedex
FRANCE

RESUME

La silothermométrie est la technique de mesure et de suivi des températures à l'intérieur d'un silo, à l'aide de capteurs disposés dans des câbles suspendus aux superstructures du bâtiment.

Celle-ci est généralement associée dans un silo moderne à une installation de ventilation forcée (air extérieur ou air refroidi artificiellement).

Le rôle de la silothermométrie est double :

— d'une part, détecter précocement les échauffements anormaux à l'intérieur des grains afin d'intervenir à temps pour éviter l'altération grave du stock et notamment le développement des insectes (grains secs), des moisissures (grains humides) et finalement la prise en masse des grains;

— d'autre part, permettre la gestion rationnelle de l'installation de ventilation forcée du silo (air extérieur ou air refroidi artificiellement) : choix du moment de la ventilation en fonction des propriétés de l'air (air extérieur), passage en totalité de la « zone thermodynamique d'échange » à travers la masse des grains, etc.

Toutefois, une silothermométrie mal conçue (emplacement des capteurs) ou mal exploitée peut être plus dangereuse qu'utile, car donnant une

fausse impression de sécurité, notamment dans les silos de très grande dimension.

En effet, l'efficacité des mesures de températures et la rapidité de détection sont obérées par la lenteur des transferts de chaleur (essentiellement convectifs) et de masse (vapeur d'eau) à l'intérieur du système poreux hétérogène que constituent les grains en vrac dans un silo.

A cet égard, l'auteur souligne les insuffisances des normes internationales (ISO) et des « règles de l'art » actuelles le plus souvent admises et précise quelques précautions indispensables :

— d'une part en ce qui concerne la conception de l'installation : nécessité absolue d'une sonde axiale, fixation des câbles, densité des capteurs, informatisation du système...

— d'autre part en ce qui concerne la gestion du système : préventilation avant toute mesure de température, scrutation quotidienne de l'ensemble des capteurs, déchargement de la colonne centrale compactée, élimination du cône de chargement, intervention immédiate en cas d'échauffement anormal...

L'auteur termine sur l'évocation des progrès que l'on peut espérer dans ce domaine.

ABSTRACT

The silothermometry is the technics of measurement and supervision of the temperature of grains in a grains elevator, with probes suspended inside the warehouse. In a modern installation, the silothermometry is generally associated with the forced ventilation.

The role of silothermometry is double :

— in one hand, to detect early any abnormal heating process inside the grains, in order to adopt the appropriate measures in due time and avoid the deterioration of grains : growth of insects (dry grains), of molds (wet grains) and at last the solidification of the bulk;

— in the other hand, the rational management of the forced ventilation of the elevator (natural outside air or artificially chilled) : choice of the appropriate time of ventilation with respect to the properties of outside air, entire passing of the thermodynamical zone of exchange through the bulk grains, etc.

However a wrong design (for example : place and density of probes) or a bad management of the installation can render it more dangerous than useful, because it could give an untrue feeling of security, particularly in very large elevator.

By fact, the efficiency of temperature measurement and the rapidity of detection are encumbered by the slowness of heat transfer (essentially convective) and mass transfer (water vapor) inside the heterogeneus and porous medium of bulk grains.

From this point of view, one points out the inadequacy of international ISO standards and present « art's rules », and describes some essential precautionary measures :

— from one hand, concerning the design of the installation : absolute necessity of an axial probe, hold-down clip, density of probes, automatic data processing,...

— from the other hand, concerning the management of the system : short ventilation before any temperature measurement, daily screening of all the probes, unloading of the central compacted column, elimination of the leading cone of grains ont the top of the cell, instant action in case of abnormal heating in grains,...

At last, one evokes the possible progresses of these technics in the future.

Une installation de « silothermométrie » est constituée par un ensemble de câbles suspendus aux superstructures supérieures du silo, suspendant verticalement dans celui-ci, et munis de capteurs de température régulièrement répartis sur toute la hauteur de ces câbles. Les capteurs sont généralement des résistances étalonnées en température. Les capteurs sont connectés à une centrale de lecture des valeurs mesurées. La lecture peut être manuelle et à la demande, ou mieux, gérée par un micro-ordinateur avec scrutation automatique régulière, enregistrement sur une imprimante, et connexion à des alarmes.

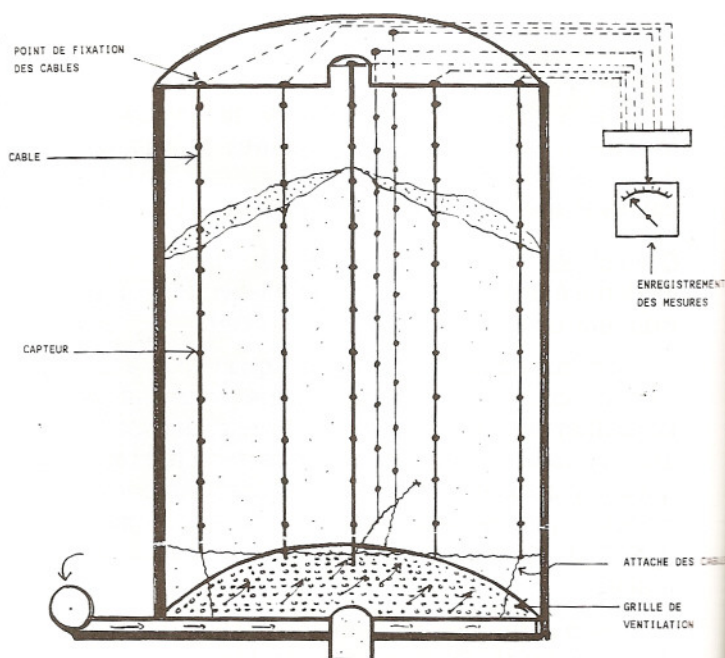


Figure 1.
Vue d'une installation de silothermométrie.

La « silothermométrie » est l'ensemble des techniques de mesure de la température des grains à l'intérieur des silos et magasins de stockage (figure 1).

1) ROLES DE LA SILO THERMOMETRIE DANS LE SILO

Le rôle de l'installation de silothermométrie dans un silo moderne est **double** :

1.1) Détection précoce et localisation des échauffements anormaux dans le silo.

Il s'agit là d'un rôle de **sécurité** qui touche à la fois :

— La sécurité « pondérale » du stock : dans la mesure où une température moyenne trop élevée peut signifier une activité respiratoire importante et donc une consommation de matière sèche, synonyme de lourdes pertes financières.

— La sécurité « qualitative » du stock : détection des échauffement biologiques, chimiques (auto-oxydation) ou de toute origine, de nature à altérer plus ou moins gravement les qualités alimentaires et technologiques des grains et à leur faire perdre tout ou partie de leur valeur commerciale (MULTON, 1982, 1988).

— La sécurité du personnel et du matériel (silo lui-même, systèmes de manutention, etc), dans la mesure où un échauffement très important peut conduire à des déformations des structures, à la carbonisation lente du contenu, voire à des incendies ou des explosions de poussières (MULTON, 1985).

La détection doit être la plus précoce possible, afin de connaître le phénomène d'échauffement avant qu'il ait pu se développer de façon grave et irréversible.

Cette obligation de précocité suppose que trois conditions soient remplies :

— une condition de « densité » suffisante des capteurs, et de répartition judicieuse de ceux-ci évitant de laisser des « zones d'ombre » non contrôlées dans le silo : c'est un problème de coût d'investissement;

— une condition d'exploitation : il est très utile d'effectuer une courte ventilation préalable à la mesure des températures pour favoriser la migration de la chaleur vers les capteurs;

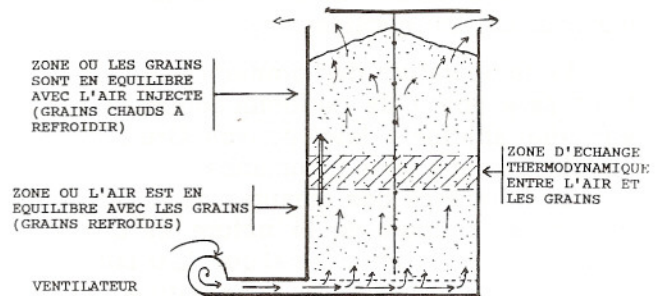
— une condition de périodicité : les mesures doivent être suffisamment rapprochées pour observer l'échauffement le plus tôt possible après son apparition et pour pouvoir déterminer les « tendances » sur une série de mesures successives : l'idéal à cet égard est une lecture automatique gérée par ordinateur.

1.2) Conduite raisonnée de la ventilation.

La silothermométrie est indispensable pour une conduite correcte de la ventilation (LASSERAN, 1981, 1982) :

— D'une part, pour la prise de décision de ventiler et pour le choix des périodes de ventilation, essentiellement basé sur la comparaison des températures des grains et de l'air extérieur utilisé pour ventiler (un mauvais choix à ce niveau peut conduire à un résultat inverse de celui recherché, à savoir à un réchauffement et/ou une réhumidification des grains).

— d'autre part, pour une conduite rationnelle de la ventilation elle-même : la « zone d'échange thermodynamique » (zone où s'effectuent les transferts de chaleur et éventuellement de vapeur d'eau entre les grains et l'air de ventilation circulant dans l'espace intergranulaire), zone qui se déplace du bas vers le haut dans le silo pendant la ventilation, doit impérativement traverser complètement le silo et ressortir en totalité de celui-ci (faute de quoi il se crée à la limite de cette zone des gradients de température générateurs de réhumidification, voire de condensation d'eau, phénomènes très préjudiciables à la bonne conservation). Seule la silothermométrie permet de suivre la progression de cette zone et de s'assurer de sa sortie complète.



1.3) Conclusion : importance extrême de la silothermométrie.

Ainsi se trouve mis en évidence le rôle primordial, essentiel, de l'installation de silothermométrie dans un silo : la sécurité physique de l'installation et la sécurité du stock, qui se chiffrent au total en dizaine de millions de F, en dépendent. Ce rôle est d'autant plus important que l'installation est plus complexe et que les cellules ont des volumes unitaires plus élevés, toute surveillance « artisanale » étant alors exclue.

L'importance même du rôle de la silothermométrie justifie donc que l'on apporte le plus grand soin à sa conception et que l'on n'économise pas sur sa réalisation, l'inverse étant malheureusement assez fréquent.

2) RECOMMANDATIONS MINIMALES CONSEILLÉES POUR UNE INSTALLATION : LES NORMES ET LES RÈGLES DE L'ART

Il n'y a pas en général de réglementation spécifiques pour les installations de silothermométrie. En France, le seul texte réglementaire y faisant allusion est l'arrêté du 11 août 1983 qui indique dans son article 14 (« surveillance des conditions de stockage ») :

« L'exploitant devra s'assurer que les conditions de stockage des produits en silo (durée de stockage, taux d'humidité...) n'entraînent pas de fermentations risquant de provoquer des dégagements de gaz inflammables.

La température des produits dans les cellules sera contrôlée périodiquement et toute élévation anormale devra pouvoir être signalée au tableau général de commande.

La fréquence des mesures de la température sera fonction de la nature et du taux d'humidité des produits ainsi que de la taille des cellules. La mesure de la température se fera par un dispositif fixe ou manuel ».

Par ailleurs, on trouve des recommandations techniques dans deux séries de documents publics :

2.1) La Norme française AFNOR et la norme internationale ISO.

L'AFNOR, après réunion d'une commission spécialisée pendant plusieurs années a abouti à la publication de la Norme NF V 30-106 (juillet 1972). Les principes essentiels de cette norme ont été repris au niveau international par l'I.S.O. (International Standardization Organisation) qui, en 1987

propose et adopte un projet de « Norme internationale » ISODIS 4112, aboutissement d'une longue série de discussions conduites au niveau international.

On notera à propos de ces normes :

— Qu'elles constituent le résultat d'un compromis entre des intérêts assez divergeants (constructeurs, équipementiers, bureaux d'étude, exploitants de silos, scientifiques), compromis qui reflète le minimum acceptable sur le plan purement technique. De ce fait, aucune installation ne devrait être en dessous de cette base minimale; et bien souvent, on le verra, il sera nécessaire d'aller bien au-delà, en fonction des spécificités propre d'une installation.

les Normes sont un « garde-fou » destiné à éviter les erreurs les plus grossières, mais ne sont aucunement l'optimum de l'art en la matière.

— Que toutefois, elles n'ont aucun caractère d'obligation légale : il s'agit de simples conseils.

— Qu'aucune entreprise sérieuse fabriquant des équipements de silothermométrie, aucun bureau d'étude, aucun exploitant, ne peut prétendre ignorer ces recommandations.

Les principes essentiels posés par ces normes sont les suivants :

2.1.1) Distances minimales entre capteurs.

La norme AFNOR NF V 30-106 prescrit :

« La répartition des sondes thermométriques ainsi que la distance entre les points de mesures doivent être prévus au moment de la conception de l'installation.

En général, les points de mesures sont disposés de telle façon que leur sphères d'incidences de 3 à 5 m de rayon se recoupent entre elles ».

Le norme ISO—DIS 4112 quant à elle indique :

« De façon idéale les autres points de mesurage devraient ne pas être à plus de 3 m les uns des autres.. En pratique, pour des raisons économiques, les points peuvent être à une distance allant jusqu'à 10 m; dans les grandes installations de stockage,... la distance entre les points de mesurage est telle que les sphères d'incidence, de 3 à 5 m de rayon, se recoupent entre elles (c'est-à-dire de 6 à 10 m entre les points de mesurage) ».

Ces dimensions sont très élevées quand on connaît le caractère très isolant thermique des grains, qui rend très lente la diffusion de la chaleur depuis le point chaud vers le capteur. Du reste, conscient de cette difficulté, les rédacteurs du projet de révision de la norme ISO-DIS 4112 (référéncé ISO-DIS 4112.2., en date du 12-12-89) sont beaucoup plus exigeant en précisant :

« ... les points de mesurage ne doivent pas être espacés de plus de 3 m ». Ce qui, en terme de rayon de « sphère d'incidence », signifie un rayon maximal de 1,5 m soit la moitié de la valeur minimale précédente.

Cette prescription qui vise à ne laisser aucune zone d'ombre dans le silo, qui ne soit sous le contrôle des sondes, postule :

— **explicitement**, que la zone d'influence ou de détection (dite « sphère d'incidence » dans la norme AFNOR) est sphérique et homogène dans toutes les directions de l'espace autour du capteur pris comme son centre (ce qui, on le verra, est loin d'être le cas);

— **implicitement**, que les câbles de silothermométrie restent verticaux et que leur position géométrique est bien déterminée, ce qui est éga-

lement loin d'être le cas : en effet au chargement les câbles sont repoussés vers les parois du silo, d'autant plus que le point d'attache est éloigné; les systèmes d'attache au fond du silo sont peu fiables, peu efficaces, et n'évitent pas une flèche importante du câble en son milieu.

Ainsi, les prescriptions des normes doivent bien être considérés comme des valeurs minimales en dessous desquelles la silothermométrie est plus dangereuse qu'utile !

2.1.2) Mesures sous la surface des grains.

La norme ISO—DIS 4112 précise (ce que ne fait pas la norme AFNOR) que :

« Un des points de mesurage doit être situé entre 1 et 2 m en dessous de la surface des grains pour permettre de détecter une activité aérobie ».

2.1.3) Ventilation préalable à toute mesure de température.

La norme ISO—DIS 4112 recommande explicitement cette opération :

« Si une ventilation est possible, une période d'aération de durée appropriée, effectuée avant la lecture des températures, se substituera partiellement à la mauvaise conductibilité de la chaleur dans le grain ».

2.2) Les « règles de l'art ».

Au-delà des Normes, il existe des « Règles de l'art », qui sont connues des spécialistes compétents. Celles-ci, bien que non codifiées, sont reprises dans un certain nombre de documents et de publications techniques qu'il est très facile de se procurer, et qu'aucun fabricant, installateur ou uti-

lisateur de silothermométrie ne peut ignorer (ITCF, 1983; LASSERAN, 1981, 1982; BOUMANS, 1985, pp 377; MILLS, 1989, pp 24 et 25).

Ces documents reprennent, en les justifiant, les principales recommandations qui figurent dans les normes précédemment citées.

Toutefois, un seul parmi tous ces documents, celui de MILLS, recommande explicitement une sonde axiale dans une installation de silothermométrie, ce qui montre que la prise de conscience de la nécessité d'une sonde axiale (démontrée ci-dessous) est très récente et encore timide.

3) INSUFFISANCE DE CES RECOMMANDATIONS AU REGARD DES CONNAISSANCES ACTUELLES

Toutes les recommandations évoquées ci-dessous ont certes le mérite d'exister et d'éviter le pire. Toutefois, elles apparaissent, au regard de travaux plus récents (qu'elles n'ont pu intégrer), et au regard des accidents de stockage observés par nous au cours de diverses expertises et des analyses que l'on peut en faire, comme tout à fait insuffisantes, notamment dans les installations de grandes dimensions. Les principales raisons en sont les suivantes.

3.1) La zone compactée dans les silos.

La zone centrale axiale des silos, notamment de ceux de grand diamètre (supérieur à 15 m), et singulièrement le haut de cette zone centrale, est sans doute la partie du silo où les risques d'échauffement biologique sont les plus élevés. En effet, il est bien connu que lors du chargement d'un silo se produisent les événements suivants :

— Les premiers grains tombant de toute la hauteur du silo frappent le sol (béton ou grilles métalliques de ventilation) avec violence : une partie d'entre eux se brise, donnant un « tapis » de brisures et de poussières plus ou moins fines.

— Par la suite, la chute des grains est amortie par ce « tapis », et le taux de casse diminue, d'autant plus que la hauteur de chute décroît au fur et à mesure du remplissage de la cellule, sans toutefois être jamais nul.

— Les grains forment au point de chute un cône de chargement (figure 3), dont le sommet est à l'aplomb de l'orifice de chargement du silo, et dont l'angle que forme l'horizontale avec une de

ses génératrices (dit « angle de talus »), est caractéristique du produit; pour les grains et graines, « l'angle de talus » est de l'ordre de 27°.

Ce cône créé une perte de charge supplémentaire pour l'air de ventilation, croissante au fur et à mesure que l'on s'approche de l'axe du silo, avec un maximum à l'aplomb de cet axe, à la verticale du sommet du cône.

De ce fait, l'air pulsé par la ventilation tend à passer préférentiellement à la périphérie de la cellule en « évitant » la partie centrale du cône où les pertes de charge sont maximales et qui est ainsi une zone où les risques d'altération sont plus élevés que dans le reste du silo (il est à noter que si le cône est inversé par soutirage de grains, le phé-

nomène est également inversé : l'air passe plus facilement dans le centre du silo que sur la périphérie).

— Les particules qui tombent de l'orifice de chargement du silo subissent un classement granulométrique le long de la « pente de talus » : les gros grains, les particules les plus sèches, celles dont les formes « le coefficient de frottement est le plus faible », glissent vers la périphérie du cône; les fines particules (grains cassés, poussières), les grains les plus humides dont le coefficient de frottement est le plus élevé, glissent mal et tendent à s'accumuler sur le haut du cône et donc à se concentrer dans la partie centrale du silo au fur et à mesure de son remplissage (figure 3).

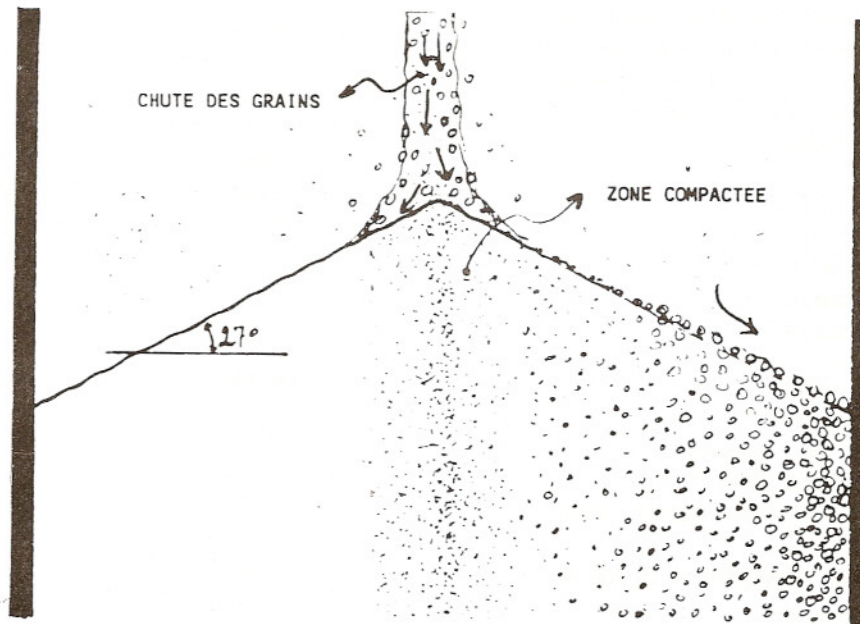
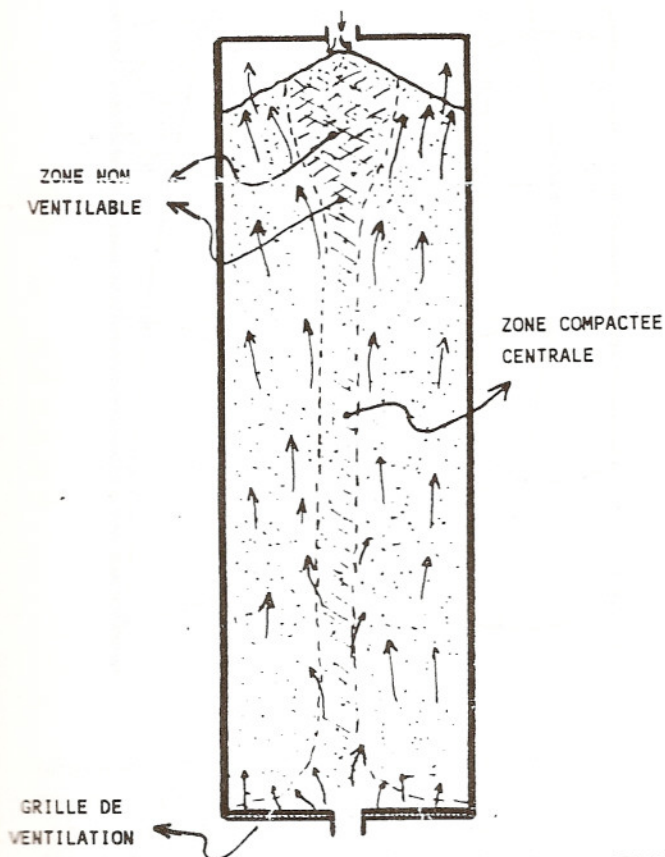


Figure 3
Cône de chargement et angle de chute; classement granulométrique le long de la génératrice du cône.

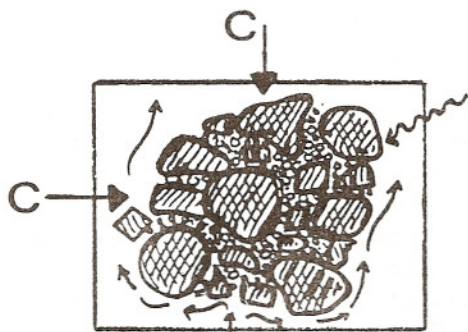
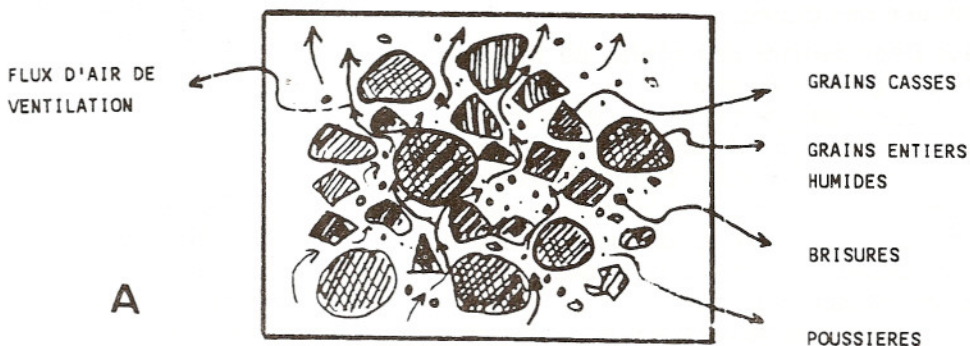
Ainsi se constitue dans le silo une « colonne » axiale et centrale de grains cassés et de poussières, de particules humides, colonne où les risques d'altération sont beaucoup plus élevés que dans la périphérie du silo (figure 4).



Il faut cependant noter que si le silo est équipé d'un système de chargement à multiples orifices, ou d'un système d'éparpillement des grains, la situation à cet égard peut être nettement améliorée; mais si le système crée d'autres zones d'accumulation des grains cassés et des poussières (sur les bords, ou de forme annulaire), le phénomène de compaction se produit dans ces zones qui sont alors les plus sensibles à l'altération.

En outre, sous l'effet de la pression exercée par les couches supérieures, sous l'effet des vibrations et des chocs, les particules hétérogènes constituant la « colonne centrale » tendent à s'organiser en une structure où les fines particules s'intercalent dans les espaces existant entre les particules plus grosses; l'espace intergranulaire se réduit et tend à se colmater progressivement, selon un processus tout à fait comparable à celui du compactage des sols en cailloutis utilisé pour fabriquer des routes ou des pistes non goudronnées (figure 5).

Et, même dans l'hypothèse favorable où l'on aurait arasé le cône de chargement pour équilibrer les pertes de charges, l'air de ventilation ne pénètre plus dans cette zone centrale compactée où les résistances à son passage sont beaucoup plus élevées que dans le reste du silo.



B

Figure 5.

Phénomène de compactage des particules; en « A », particules non compactées de dimensions diverses; en « B », les mêmes particules compactées, les particules s'organisant de façon à occuper un volume minimal, sous l'effet des contraintes (« C ») et des vibrations.

Ainsi la zone centrale est une zone à haut risque d'altération pour deux raisons : d'une part, elle est constituée de particules plus altérables, d'autre part, elle n'est plus protégée car l'air de ventilation n'y passe plus. La zone centrale au niveau du cône, encore moins accessible à la ventilation en raison de la perte de charge accrue, est, de loin, la région du silo la plus sensible aux altérations : c'est du reste en général celle où l'on observe le plus souvent les prises en masse.

La bonne pratique consiste pour l'exploitant du silo à « décharger » la colonne centrale en effectuant un soutirage partiel mais suffisant pour vider la partie centrale et élimine du même coup le cône de chargement. Cette opération est malheureusement souvent négligée. Lorsqu'elle est réalisée, on se contente souvent de retransférer les grains sur le dessus du silo, recréant ainsi le cône; parfois aussi l'opération se trouve contrarié par l'existence d'une vis d'extraction dans le fond du silo (notamment des silos à fond plat), vis dont la tête placée au centre gêne ou bloque la vidange de la « colonne ».

Quoiqu'il en soit la zone d'accumulation et de compactage des brisures et des poussières apparaît comme étant la plus sensible aux phénomènes d'échauffement. Il est donc **impératif que cette zone soit bien sous le contrôle de la silothermométrie. La zone compactée étant en général la zone centrale, et le démarrage des altérations, notamment aérobie, se faisant à environ 1 à 2 m de la surface des grains, on conclut à la nécessité de prévoir un câble de thermométrie dans l'axe du silo, avec des capteurs situés en haut de ce câble, à partir de 0,5 ou 1 m sous la surface des grains.**

3.2) Déplacement des câbles de thermométrie au chargement du silo.

Les câbles de silothermométrie sont habituellement suspendus au plafond de la cellule (qui doit être conçu en conséquence pour résister aux tractions considérables que les grains exercent sur ces câbles lors de la vidange du silo, tractions qui peuvent atteindre 50 kN à la vidange), et pendent librement dans la cellule.

Lors du chargement de la cellule les câbles qui ne sont pas directement sous un orifice de chargement reçoivent de la part des grains tombant en cascade une poussée latérale qui tend à les écarter de la position verticale qu'ils occupent naturellement.

Il résulte de ce phénomène une grande incertitude sur la position géométrique des capteurs : le plus souvent les « sphères d'incidence » qui étaient théoriquement tangentes ou séquentes entre elles, ne le sont plus et il se crée une « zone d'ombre » qui n'est plus sous le contrôle de la silothermométrie (figure 6).

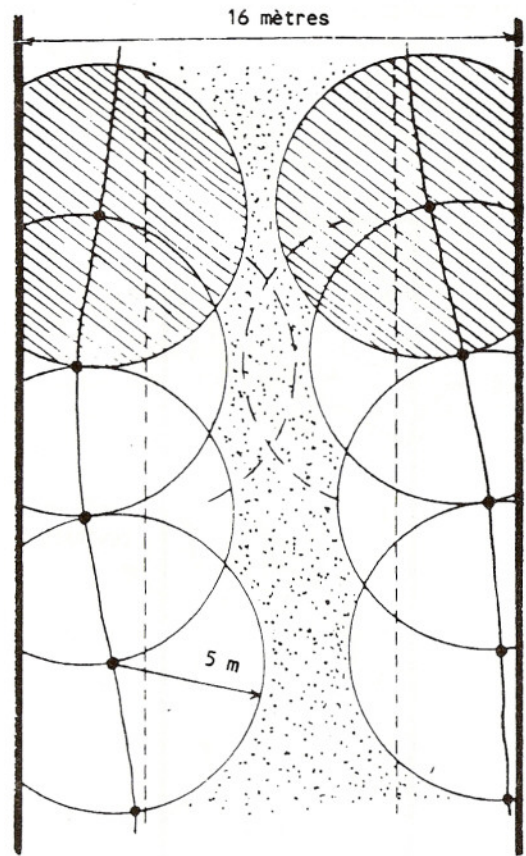


Figure 6

Déplacement latéral des câbles de thermométrie sous l'effet de la poussée latérale des grains; zones d'ombre créée de ce fait entre les « sphères d'incidence des capteurs dans la partie axiale de la cellule où les risques d'altération sont les plus grands.

Ce phénomène est particulièrement grave dans une cellule ne comportant pas de sonde centrale: en effet, l'écartement des câbles vers la périphérie du silo dégage complètement la zone centrale qui n'est plus du tout surveillée.

On essaye de pallier ce défaut en attachant les câbles par des dispositifs appropriés au fond du silo. Mais d'une part ces dispositifs sont peu fiables et peuvent casser au cours du chargement, et d'autre part, ils n'évitent pas l'écartement des câbles dans leur milieu (la flèche pouvant atteindre ou dépasser 1 m pour un câble de 40 à 50 m de haut).

Ce défaut, pour lequel on ne possède pas véritablement de solution, renforce encore la nécessité d'un câble dans l'axe du silo, afin que la température de cette zone fragile soit réellement surveillée.

3.3) Transmission de la chaleur dans les grains.

Les grains en vrac constituent un milieu particulièrement isolant sur le plan thermique. où la transmission de la chaleur à partir d'une source calorique (point chaud) se fait selon les trois modes classiques :

— la conduction (grains à grains), qui est négligeable;

— le rayonnement (infra-rouge thermique), qui est faible;

— la convection de l'air intergranulaire, qui apparaît comme étant le phénomène essentiel (MULTON et al., 1977, 1985).

Or, la convection dans les grains en vrac est un phénomène :

★ Lent : d'où le fait que la migration de chaleur dans une masse de grains est très lente : ceci implique que les capteurs soient suffisamment proches les uns des autres si l'on veut déceler en temps utile un échauffement anormal; par ailleurs, la convection est quasi nulle dans les espaces compactés où l'air ne peut circuler.

★ Non isotrope : la convection de l'air chaud est verticale ascendante : il en résulte qu'un capteur détectera une émission de chaleur venant d'un point situé en dessous de lui, jamais s'il est au-dessus.

★ Non homogène : ainsi que l'a bien montré une étude de transfert thermique réalisée conjointement par l'I.N.R.A. et l'I.T.C.F. (Multon et al., 1977, 1980), le flux d'air chaud diffusant par convection à partir d'un point chaud tend, au fur et à mesure où il s'élève, à s'élargir en prenant approximativement la forme d'un cône renversé et centré sur le point chaud (figure 7); au fur et à mesure où le flux d'air chaud s'élève et s'élargit, l'intensité de ce flux s'atténue et l'élévation de température correspondante diminue.

Sans entrer dans une discussion de détail de ces phénomènes, qui sortirait du cadre de cette note, on peut dire qu'il résulte de tout ceci que la notion de « sphère d'influence » des capteurs définie dans les normes AFNOR et ISO à une époque où ces phénomènes étaient moins bien connus, est à reconsidérer totalement.

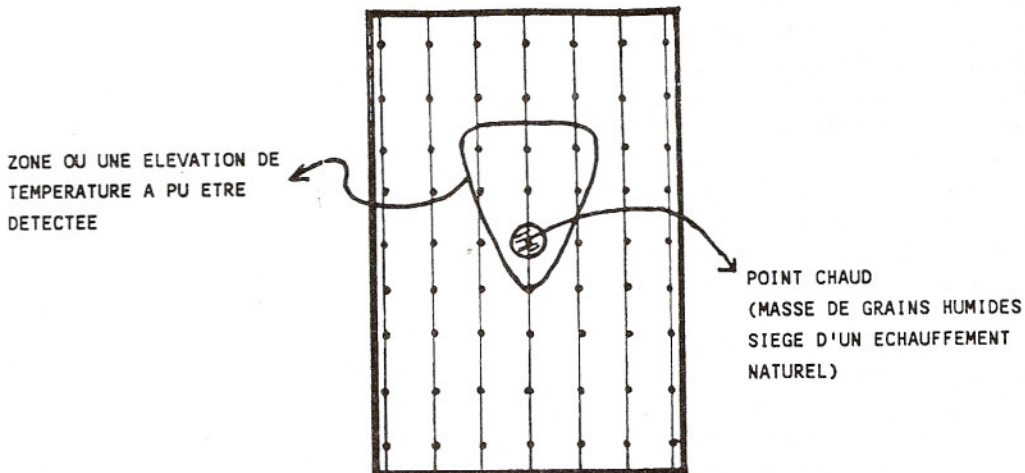


Figure 7.

Zône de diffusion de la chaleur au-dessus d'un point chaud en forme de cône renversé (MULTON et al., 1977, 1980).

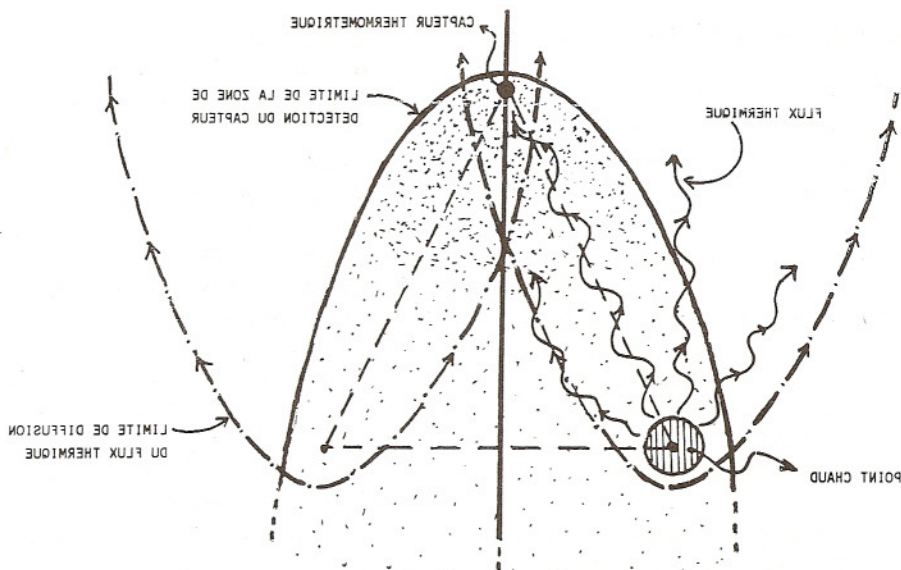


Figure 8.
Forme schématique (cône à l'endroit) de la zone de détection d'un capteur, susceptible de réagir aux flux thermiques issus de points chauds situés en dessous du capteur (Cette zone d'influence est très différente de la sphère d'influence définie dans les Normes).

Il faudrait plutôt parler d'un « cône d'influence », cône à l'endroit (sens inverse de celui du flux thermique) dont le sommet serait le capteur, la hauteur de l'ordre de 2 m, et la base constituée d'un cercle de 2 m de diamètre environ (figure 8).

En tout état de cause le volume de grains sous la surveillance d'un capteur est nettement plus faible que celui prévalance d'un capteur est nettement plus faible que celui prévu par la « sphère d'influence » de la Norme. Il est situé exclusivement en dessous du capteur, dans un volume conique, et non tout autour dans un volume sphérique.

Il est à noter que pour favoriser une détection précoce des points chauds, il est souhaitable d'effectuer une courte pré-ventilation avant toute mesure de température, afin de favoriser le phénomène de migration de la chaleur accumulée dans la zone particulière où elle est produite, vers les capteurs situés au dessus.

4) CONCLUSIONS PRATIQUES

Si l'on veut bien tenir compte de ce qui vient d'être dit ci-dessus :

- Zone axiale compactée du silo présentant les plus grands risques d'altération,
- migration de chaleur convective ascensionnelle, lente, ineffective dans les espaces compactés,

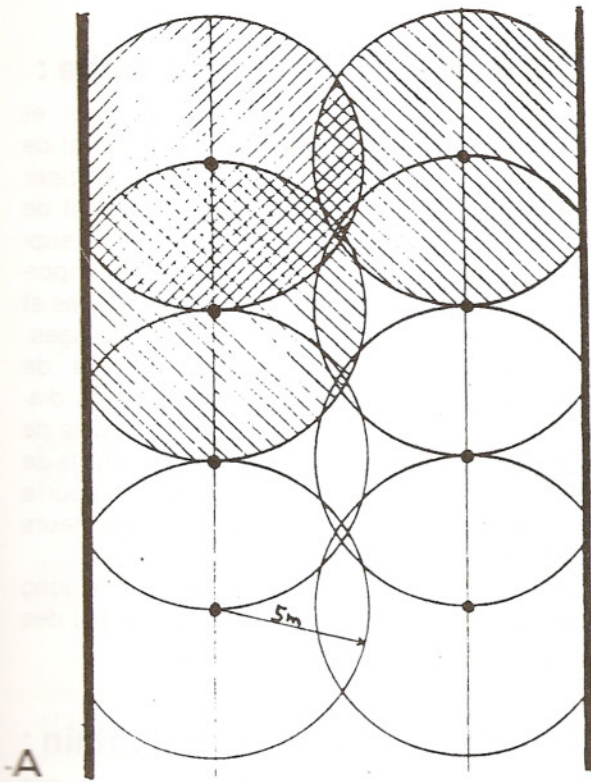
On conclura que pour espérer une détection précoce et efficace de tout phénomène d'échauffement anormal dans un silo, il faut remplir les conditions minimales suivantes :

- ★ L'installation doit comporter une sonde centrale, au moins dans la partie haute du silo; à défaut, les sondes les plus proches ne doivent pas être à plus de 50 cm de l'axe vertical du silo. Ceci implique qu'au niveau de la conception du gros-oeuvre, la résistance des poutreset/ou du toit soit prévue en conséquence (traction des grains à la vidange du silo sur les câbles pouvant atteindre 50 KN au centre).

- ★ Les câbles doivent être suffisamment rapprochés les uns des autres, et répartis selon un réseau dont les dimensions de maille sont de l'ordre de 2 à 3 mètres. En effet et ainsi que le montrent les figures 9A, et 9C, un maillage moins serré laisse des zones d'ombre très importantes dans le silo.

- ★ La pré-ventilation avant toute mesure doit être rendue automatique par un asservissement approprié.

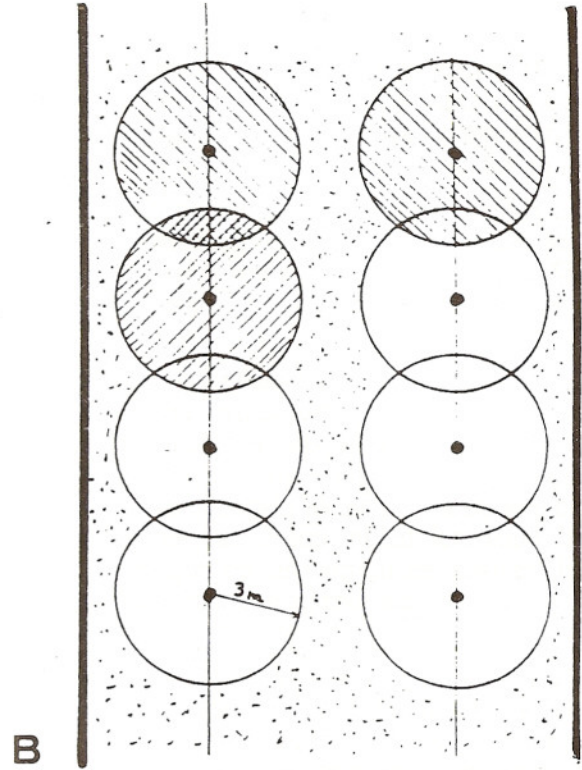
- ★ La scrutation de l'ensemble des capteurs doit être faite au moins une fois par jour, si possible deux. L'ensemble de ces données, saisies automatiquement sur micro-ordinateur, doit être soumis à une analyse statistique et/ou à une analyse de tendance.



A

Zones d'influence des capteurs et zones d'ombres résultantes dans une cellule :

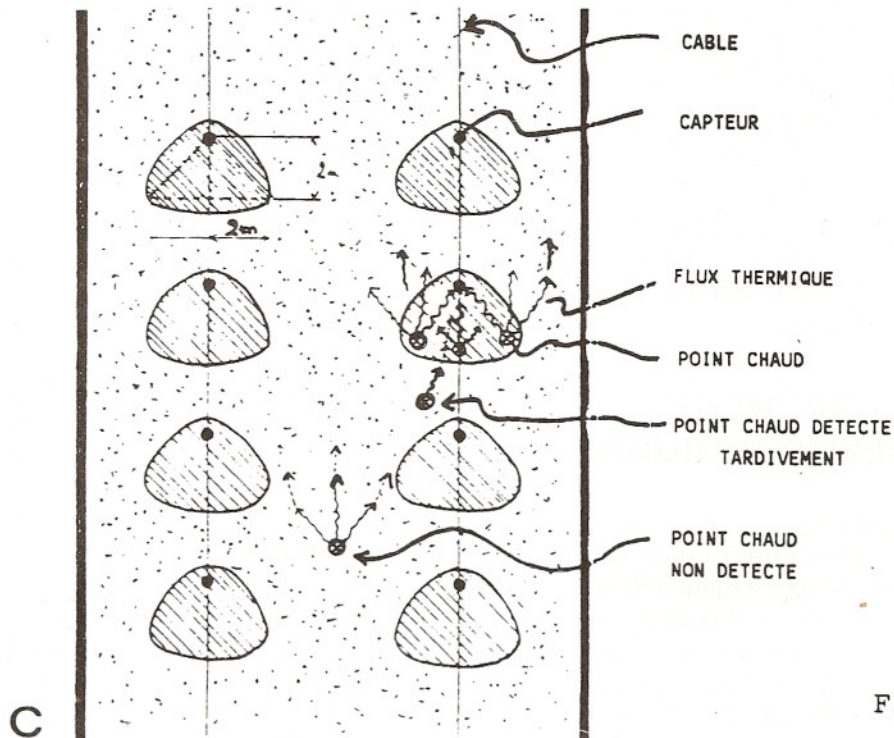
« A » : sphère d'influence selon les normes AFNOR/ISO (rayon maximal 5 m) : aucune zone d'ombre en théorie.



B

« B » : sphère d'influence selon les normes AFNOR/ISO (rayon minimal 3 m) : apparition d'une zone d'ombre axiale.

« C » : zone d'influence réelle (cône de 2 m de hauteur et 2 m de rayon du cercle de base) : les zones d'ombre sont très importantes et correspondent à un risque élevé.



C

Figure 9.

★ Tout doit être prévu pour un dépannage immédiat en cas de panne du système (stock de pièces détachées essentielles disponibles sur place, contrat de maintenance, etc).

Au niveau de la gestion technique du silo, on doit « décharger » la colonne compactée et araser ou supprimer le cône de chargement (en évitant de créer un cône inverse) pour former une surface de grains horizontale.

C'est à ce prix qu'une installation de silothermométrie remplira bien son office, et ne constituera pas une sécurité illusoire ou insuffisante. Il fallait sans doute, pour le savoir, vivre un certain nombre d'accidents de stockage, et disposer de certaines études. Mais maintenant que le fait est acquis, il faudrait réviser les normes et les règles de l'art pour les mettre en conformité avec la réalité scientifique.

Il convient de noter que la tendance actuelle à construire des cellules de très grandes dimensions, et notamment de très grande hauteur, ne fait qu'accroître les risques et imposent d'autant plus de rigueur dans la conception de l'installation de silothermométrie (MULTON, 1988). On évoquera à cet égard au moins deux difficultés particulières :

— d'une part, lorsque la hauteur dépasse 30 ou 40 m, la perte de charge totale que doit vaincre l'air de ventilation pour traverser toute l'épaisseur de grains est telle que l'on doit mettre en place des ventilateurs très puissants, qui compriment l'air dans des proportions telles que la température de cet air est élevée, du seul fait de la compression, d'une dizaine de degré : si l'on veut éviter de réchauffer les grains au lieu de les refroidir, il convient donc de gérer les mesures de température avec une grande précision.

— D'autre part, les temps de traversée de la zone d'échange thermodynamique sont très longs et nécessitent d'autant plus qu'on en contrôle la progression avec soin.

5) DEVELOPPEMENT FUTURS DE CES TECHNIQUES

Que peut-on espérer comme progrès dans l'avenir en matière de mesure de la température des grains dans les silos ? Etant donné le caractère inéluctable de la faible conduction thermique des grains, qui rend très difficile la détection précoce des échauffements, ce que l'on peut envisager comme amélioration de la technique de silothermométrie relève des aspects suivants :

5.1) Dans un avenir très proche :

— Mise au point de logiciels de suivi et d'analyse automatique de tendance permettant de gérer un très grand nombre de capteurs, d'anticiper efficacement les évolutions de température et de piloter automatiquement la ventilation (ce qui suppose des puissances de ventilation très importantes et l'automatisation complète des registres et des moteurs des ventilateurs, voire des transilages.

— Augmentation sensible du nombre de câbles mis en place grâce à la diminution du diamètre de ces câbles et à la diminution sensible de leur coefficient de frottement, limitant les efforts de traction à la vidange, limitation à laquelle pourra contribuer la mise au point de dispositifs réducteurs d'effort efficaces.

— Mesure de température continue le long des câbles (et non plus discontinue, au niveau des capteurs).

5.2.) Dans un avenir plus lointain :

Mesure associée de l'humidité grâce à des capteurs miniaturisés, permettant de gérer les migrations d'eau.

— Mesure des flux d'émission thermique en surface des cellules par l'utilisation de camera à balayage infra-rouge, permettant de repérer les cellules qui « chauffent » et émettent de ce fait un flux thermique anormalement élevé : le développement au niveau des silos de cette technique qui est déjà utilisée par ailleurs est liée à la diminution de prix du matériel.

— Eventuellement, peut-être, mesure du rayonnement infrarouge dans la masse même des grains grâce à des fibres optiques saisissant celui-ci à l'intérieur du silo : outre la diminution du prix des matériels, cette technique supposerait que soit résolus les problèmes d'empoussiérement des fibres.

— Mesure par des méthodes spectroscopiques de la composition des gaz dans l'atmosphère intergranulaire, grâce aux mêmes fibres optiques.

Ainsi qu'on vient de le voir les équipements de silothermométrie existant offrent déjà d'excellentes garanties s'ils sont bien conçus et bien implantés. Le contrôle des températures bien utilisé est donc un puissant instrument de gestion de la qualité des grains dans un silo.

Il n'y a pas de révolution à attendre dans ce domaine, du moins dans un délai bref, mais des améliorations très significatives, en attendant qu'à plus long terme la baisse du prix des matériels de mesure infra-rouge ne permettent, peut-être, d'espérer des progrès plus décisifs.

LA VENTILATION DES GRAINS CONDITIONS D'UTILISATION EN CLIMAT TEMPERE CHAUD

Jean-Claude LASSERAN
Institut Technique des Céréales
et des Fourrages (ITCF)
Département Qualité et Débouchés
Station Expérimentale
de Boigneville
91720 MAISSE
FRANCE

RESUME

En climat tempéré chaud, la ventilation des grains stockés en cellules ou en magasins est tout autant justifiée et recommandable que dans les régions où la saison hivernale est plus marquée.

Malgré une teneur en eau à la récolte assez basse, de l'ordre de 10 à 12 %, les grains ont besoin d'être refroidi pour être conservés dans de bonnes conditions en raison de leur température initiale souvent très élevée, de 30 à 40 % C. Les risques encourus par les denrées entreposées en l'état sont de plusieurs natures :

- Dégradation des caractéristiques technologiques (valeur boulangère, pouvoir germinatif, etc...);

- transferts d'eau des zones chaudes vers les zones plus froides sous l'effet de courants naturels de convection, amplifiés dans les cellules métalliques par l'insolation, avec pour conséquences la formation de points de condensation et de réhumidification;

- enfin, la prolifération des insectes (charençons du riz et du maïs, sylvains, capucins, tribolium, trogodermes, etc...) en l'absence de traitement chimique, ou une fois celui-ci devenu sans effet.

Une analyse des conditions climatiques en zone tempérée chaude montre que l'on dispose de 6 à 12 heures utilisables chaque jour, en toutes saisons, de part et d'autre du minimum diurne, généralement situé entre 4 et 6 heures solaires le matin. La remontée de l'humidité relative de l'air ne constitue pas, contrairement à des concepts

erronés, un inconvénient susceptible de réhumidifier le grain, dès lors que l'air injecté dans le grain est plus froid que ce dernier. Ainsi, dans l'hémisphère Nord, il est possible de refroidir le grain vers 22°C en juillet-août, vers 18°C en septembre-octobre, vers 14°C en octobre-novembre, vers 10°C en décembre-janvier-février, en utilisant seulement l'air ambiant. En dessous de 20°C, tous les insectes autres que les charençons ne peuvent plus se développer (inhibition de l'instinct de reproduction et stérilisation des œufs. Pour les charençons, il faut atteindre le seuil de 15°C afin d'observer les mêmes effets. Une température égale ou inférieure à 10°C maintenue pendant 90 jours (3 mois) devient mortelle sur tous les stades de développement de l'insecte (œufs, larves, adultes).

Afin d'atteindre ces objectifs de refroidissement, il est impératif de disposer d'installation conçues correctement et utilisées de façon judicieuse. A cet égard il faut souligner plusieurs points importants :

- le débit de renouvellement de l'air doit être au moins de l'ordre de 10 m³ par heure et par m³ de grain de façon à obtenir l'équilibre thermique au bout d'un temps total cumulé de fonctionnement du ventilateur de 80 à 120 heures;

- si le montage du circuit de ventilation est prévu pour travailler par soufflage, ou en pression, la hauteur du silo ou du magasin ne devrait pas excéder 15 mètres, sinon la pression statique du ventilateur dépassera 200 mm CE (2000 Pascals) et réchauffera l'air ambiant de plus de 2°C;

- au-delà de 15 mètres de hauteur de grain, il est préférable de faire fonctionner le ventilateur par aspiration, ou en dépression, afin d'éviter cet effet de réchauffement;

- de façon à rendre le refroidissement plus efficace, il y aura avantage à travailler en « semi-automatique » c'est-à-dire en asservissant le fonctionnement du ventilateur sur un régulateur thermo-statique dont on réglera le seuil d'enclenchement en fonction de la saison et du potentiel de refroidissement de l'air ambiant nocturne, à partir des données fournies par une installation de silo-thermométrie;

- enfin, on aura toujours intérêt à refroidir le grain au niveau le plus bas possible en hiver afin d'éviter que sa température ne dépasse le seuil de 15°C à la fin du printemps.

Cette façon de concevoir le rôle de la ventilation dans le stockage des grains en zone tempérée chaude permet de limiter les dépenses d'énergie électrique, et surtout d'assurer une meilleure qualité sanitaire des stocks par combinaison du refroidissement avec des techniques de désinsectisation chimique moins coûteuses, et peut-être moins nocives pour le consommateur, en privilégiant les traitements par fumigation à effet choc qui ne nécessitent pas d'avoir à transiler le grain.

ABSTRACT

In warm temperate climate, the aeration of grains stored in bins or warehouses is all as much justifiable and recommendable as in the regions where the winter season is more marked.

In spite of a rather low moisture content at harvest, in the order of 10 to 12 % w.b., grains need to be cooled down to be preserved under favourable conditions because of their initial temperature often very high, from 30 to 40°C. The risks run by the products stored as they are at harvest are of different nature :

- damaging of the technological properties (baking quality, vitality, etc...);

- water transfers from warm to cooler zones under the effect of air convection currents amplified in metal bins by solar radiation, leading to the creation of water condensation and rewetting spots;

- finally, the proliferation of insects (rice and maize weevils, grain beetles and borers, confused flour and khapra beetles) in the absence of chemical treatment, or once the latter becoming ineffective.

An analysis of the weather conditions in warm temperate areas shows there is, in all seasons, a 6

to 12 hour available period per day on both sides of the diurnal minimum, in general between 4 to 6 o'clock by the sun in the morning. The rise in the relative humidity does not imply, contrary to a wrong concept, a disadvantage liable to rewet the grain when the air blown into the grain is cooler than the latter. Thus, in the northern hemisphere, it is possible to cool the grain down to 22°C in July-August, 18°C in September, 14°C in October-November, 10°C in December-January-February by using only ambient air. Below 20°C all insects other than weevils cannot multiply because their reproductive instinct is inhibited and the eggs sterilized. As for the weevil, the threshold of 15°C has to be reached in order to observe the same effects. At a temperature equal or lower than 10°C applied for 90 days (3 months), all the stages of development of the insect (eggs, larvae, adults) are killed.

In order to reach these cooling targets, it is imperative to have correctly designed and judiciously used installations :

- the air-flow rate must be approximately 10 m³ per hour and per m³ of grain so as to get the thermal equilibration within a total cumulated fan's running time of 80 to 120 hours.

- if the setting of the aeration circuit is designed to run by blowing, or under pressure, the bin or store height should not exceed 15 meters, otherwise the static pressure generated by the fan will heat the ambient air by more than 2°C;

- for a grain height superior to 15 meters, it becomes wiser to have the fan running by sucking, or under depression, in order to avoid this heating effect;

- so as to make cooling more efficient, there is an advantage of working in a half-automatic way, i.e. with a thermostat controlling the fan's running : the switching on threshold will be adjusted according to the season and the cooling potential of the nocturnal ambient air from the data given by a bin temperature monitoring system;

- finally, it will always be profitable to cool down the grain as low as possible during the winter season so as to prevent its temperature to exceed again the 15°C threshold by the end of the spring.

This manner of conceiving the role of aeration in grain storing under a warm temperate climate allows the limitation of power expenses, and above all a better sanitary quality of the stocks, by combining cooling with less costing chemical disinfection techniques, and maybe less nocuous to the consumer, preferring shock effect treatments by fumigation which do not imply a turning over of the grain.

INTRODUCTION

Dans une structure moderne de stockage, l'installation de ventilation a pour fonction de refroidir le grain afin de permettre sa conservation dans de meilleures conditions. En abaissant la température des stocks de réserves alimentaires, on contribue :

— à maintenir les caractéristiques technologiques des productions à un niveau proche de l'état initial, par exemple la valeur boulangère, le pouvoir germinatif, etc...;

— à limiter le développement de la flore de stockage, surtout dans les zones des silos sujettes à réhumidifications;

— à minimiser les pertes de matière sèche en bloquant la respiration du grain et des microorganismes;

— à éviter les transferts d'eau et de chaleur à l'intérieur des cellules, ou des magasins, en égalisant la température des stocks et en supprimant ainsi des gradients hydro-thermiques responsables de condensations et d'échauffements;

— enfin, à réduire ou arrêter la prolifération des insectes, voire même à les détruire, rendant ainsi sans objet les traitements chimiques insecticides à effet rémanent.

Il est normal de penser que les zones géographiques à climat tempéré froid sont plus favorisées que celles à climat tempéré chaud pour bénéficier des avantages de la ventilation. Toutefois, sous les climats chauds, un certain nombre de facteurs justifient que l'on s'intéresse à cette technique :

— à la récolte, les grains sont en général très secs (8 à 12 % d'eau) et très chauds (30 à 40 °C);

— les insectes, en particulier ceux de la famille des curculionides, ou charençons, sont moins résistants au froid.

Ces informations amènent à penser qu'un abaissement prononcé de la température du grain n'est pas nécessaire, et qu'un potentiel de refroidissement même amoindri sera quand même très performant par rapport aux températures initiales du grain. Par ailleurs, le fait de pouvoir égaliser la température des masses entreposées réduit les risques d'accumulation locale d'humidité et les effets préjudiciables qui en découlent (1) (figure 1). Enfin, les structures de stockage implantées dans les zones géographiques à climat tempéré chaud peuvent bénéficier de l'amélioration progressive des connaissances en matière de conception, réalisation et utilisation des installations de ventilation.

PROBLEMATIQUE DE LA VENTILATION EN CLIMAT TEMPERE CHAUD

Il convient d'examiner si la ventilation est possible, ou plus exactement à quel niveau on peut

refroidir le grain, et quel intérêt pratique cela présente, en particulier à l'égard des insectes.

A. CONSIDERATIONS CLIMATIQUES

Seules les températures seront examinées, puisqu'il a été prouvé théoriquement et expérimentalement qu'une humidité relative, même très élevée, ne constitue pas un obstacle pour ventiler (2 et 3). Dès lors que l'air utilisé est plus froid d'au moins 5°C que le grain, il n'y a pas lieu de craindre des réhumidifications. On va porter une attention particulière à la période nocturne de la journée où, malgré la remontée de l'humidité relative, l'air ambiant est le plus froid et l'électricité le moins onéreuse dans beaucoup de pays.

Sur le graphique de la figure 2, on a reporté les températures maximales et minimales moyennes mensuelles d'ORLEANS (latitude 47°59'), TOULOUSE (43°38') et MEKNES (33°55') sur 25 ans, de 1961 à 1985. On remarque que les écarts sont plus marqués sur les maxima que sur les minima : par exemple, entre MEKNES et ORLEANS (figure 3), ils sont en moyenne annuelle de 8,0°C sur les valeurs maximales et de 5,5°C sur les valeurs minimales. Entre MEKNES et TOULOUSE cet écart est seulement de 3,0°C.

Le minimum diurne est en général observé entre 4 et 6 heures solaires le matin. De part et d'autres de ce minimum on dispose, quelle que soit la saison, d'un certain nombre d'heures favorables pour ventiler. En raisonnant sur les moyennes, la température moyenne de la plage de temps qui encadre le minimum est égale ou inférieure aux résultats des formules suivantes :

— sur 12 heures : $tm_{12} = (\text{Maxi} + 3 \text{ mini})/4$

— sur 6 heures : $tm_6 = (\text{Maxi} + 7 \text{ mini})/8$,

Avec tm_{12} et tm_6 , températures moyennes sur 6 ou 12 heures de part et d'autre du minimum.

Sur le graphique de la figure 4 on a reporté les températures minimales moyennes mensuelles de MEKNES ainsi que les valeurs calculées de tm_{12} et de tm_6 . Sous réserve que les installations de ventilation soient correctement conçues, réalisées et exploitées, et que sur une période de 1 à 2 mois les températures réelles ne soient pas trop supérieures aux normales saisonnières, il est possible de refroidir le grain, initialement entre 30 et 40°C au chargement des silos, vers 22 à 24°C en juillet-août, puis progressivement par étapes successives entre septembre et janvier vers 8 à 10°C. En pratique, 4 à 5 ventilations seront nécessaires pour atteindre ce résultat. Si les productions doivent être stockées jusqu'à la nouvelle récolte, un refroidissement hivernal aussi bas est suffisant pour ralentir le réchauffement naturel au printemps, ou au début

de l'été, en raison de la grande inertie thermique du grain (faible conductivité de la chaleur).

B. CONSIDERATIONS ENTOMOLOGIQUES

Dans une communication récente (4), il a été montré qu'un froid modéré, de 7 à 0,5°C, était suffisant pour tuer toutes les formes du *Sitophilus granarius*, ou charençon du blé, à condition que la durée d'exposition soit au moins de 3 mois. Il est permis d'avancer que les chareçons dits du riz et du maïs, *S. Oryzae* et *S. Zeamais* (figure 5), seuls insectes de la même famille sévissant en zone plus chaude, ont un seuil de mortalité proche de 10°C. Il est sûr qu'à 15°C leur instinct de reproduction est inhibé. Quant aux autres principaux ravageurs (figure 5), *Rhizopertha dominica* ou capucin, *Tribolium confusum* et *Togoderma granarium*, trogoderme ou dermeste des grains, leur développement est arrêté entre 18 et 20°C, les œufs deviennent stériles à 17°C et le seuil de mortalité en 3 mois doit se situer vers 15°C. Ces données ont été reportées sur le graphique de la figure 4.

Si les possibilités de refroidissement mentionnées ci-dessus sont effectives, la période de vie active des insectes présents dans le grain devrait être assez courte. Seul l'insecte le plus résistant, donc le plus dangereux, *S. Oryzae*, aurait 3 à 4 mois pour se reproduire. Toutefois, la faible teneur en eau des grains à la récolte (1), induisant une humidité relative de l'ordre de 30 à 50 % dans l'atmosphère des silos, combinée avec des températures inférieures ou égales à 20°C, allonge notablement la durée du développement préimaginal (2) de la seconde génération de chareçons (5) : en devenant supérieure à 3 ou 4 mois, cela laisse une chance au refroidissement de la détruire en automne ou en hiver.

Cette analyse rapide montre l'intérêt potentiel de la ventilation en région tempérée chaude.

ELEMENTS TECHNICO-ECONOMIQUES

La ventilation sera plus efficace, et surtout plus crédible, si certains aspects techniques et économiques sont bien compris afin d'être pris en compte dans les futurs projets. La marge de manœuvre dans la conduite étant plus étroite en région tempérée chaude, il importe d'intégrer toute l'expérience acquise plus au Nord, parfois au prix d'erreurs de conception.

(1) En principe, les chareçons ne survivent pas dans des grains dont la teneur en eau est inférieure à 10 %

(2) Temps total s'écoulant entre la ponte de l'œuf et l'apparition de l'adulte

A. VITESSE DU REFROIDISSEMENT ET TEMPS DE VENTILATION

Il est bien connu que l'injection d'air frais dans une masse de grain plus chaude provoque l'alignement de sa température sur celle de l'air, à plus ou moins 2°C près selon l'humidité relative (6 et 7) : on observe la propagation d'un front ou onde de refroidissement dans le sens du flux d'air. Par ailleurs, le fractionnement des phases actives de ventilation (par exemple, fonctionnement de nuit, arrêt de jour) est sans effet sur la masse déjà refroidie : seul compte le temps cumulé de fonctionnement du ventilateur.

Comme la durée des périodes favorables pour ventiler (température de l'air inférieure d'au moins 5°C à celle du grain, optimum 7 à 8°C) est réduite à quelques heures par nuit, il convient que la vitesse de propagation de l'onde de refroidissement soit suffisamment élevée pour achever le processus dans un délai acceptable. En effet, bien souvent, le même ventilateur est utilisé en alternance sur plusieurs cellules. La théorie, mais surtout l'expérimentation, nous enseignent qu'il faut entre 800 et 1500 m³ d'air pour refroidir un m³ de grain. En pratique, on peut retenir le rapport de 1200 m³/m³. La grandeur technique traduisant la dynamique de la ventilation est le débit spécifique d'air, ou coefficient de renouvellement de l'air, exprimé en m³ d'air par heure et par m³ de grain (m³/h — m³). Le tableau 1 indique le temps de refroidissement en fonction du débit spécifique d'air et de la durée journalière d'utilisation du ventilateur. En pratique, on recherche une valeur de 10 à 15 m³/h — m³. Dans les silos de grande à très grande hauteur (20 à 45 m), pour des raisons qui seront examinées plus loin, on est obligé de la réduire à 5 m³/h — m³. Compte tenu du nombre élevé de jours nécessaires pour refroidir le grain avec les débits spécifiques mentionnés, un ventilateur ne pourra être utilisé que sur un nombre réduit de cellules. Avec un débit spécifique de 10 m³/h — m³, on peut envisager un ventilateur pour 3 ou 4 cellules, avec 5 m³/h — m³ une ou deux cellules.

B. PRESSION STATIQUE DU VENTILATEUR ET MODE DE CIRCULATION DE L'AIR.

Le grain, matériau poreux lorsqu'il est en vrac, permet la circulation forcée de l'air, mais résiste à son écoulement en occasionnant une perte de charge ou de pression. Le ventilateur qui génère le débit d'air est choisi sur sa capacité à fournir une pression statique au moins équivalente. Par ailleurs, les circuits d'air et les gaines de ventilation doivent être dimensionnés et construits correctement de façon à minimiser les pertes de charge dans le système de distribution de l'air. Les pertes de charge dans les différents grains ainsi que dans

les réseaux aérauliques sont quantifiables. On trouvera les méthodes de calcul divers ouvrages (2, 6, 7 et 8).

À titre d'exemple, on a rassemblé dans le tableau 2 la pression statique minimale pour ventiler du blé à différents débits spécifiques d'air sur une hauteur variable. On voit que la pression augmente très rapidement en fonction de ces deux paramètres. Bien qu'il existe des ventilateurs adaptés à chaque situation, en pratique il n'est pas conseillé de dépasser 10.000 Pascals, ou 1000 mm CE, en raison de l'accroissement des difficultés de réalisation, des coûts d'installation et de fonctionnement. Ainsi, pour les silos de grande à très grande hauteur, le débit spécifique dépasse rarement 5 m³/h — m³. Par ailleurs, lorsque le ventilateur fonctionne par insufflation, ou sous pression, l'air qu'il fournit est réchauffé de 1°C pour 1000 Pa ou 100 mm CE. Il devient donc absurde de concevoir une installation où l'air ambiant soit réchauffé de plus de 2°C par une compression supérieure à 2000 Pa. Dans ces conditions (figure 6), le montage du ventilateur et le mode de circulation de l'air, seront fonction de la pression statique : ainsi le fonctionnement par insufflation sera réservé aux silos ou magasins de faibles hauteurs c'est-à-dire inférieurs à 15 mètres; on lui préférera le fonctionnement par aspiration, ou en dépression, pour des hauteurs plus grandes. Ce mode de ventilation, moins répandu que le précédent, présente quelques inconvénients dont il faudra tenir compte :

- avant toute ventilation, la cellule doit être complètement remplie, puisque le front de refroidissement circule de haut en bas;

- la détection de la fin de l'échelon de refroidissement est moins aisée que dans le montage par insufflation : les sondes de température doivent être installées au niveau des gaines de reprise d'air;

- on signale parfois un colmatage des gaines à perforations (fentes ou trous) par aspiration des brisures ou à cause de condensations faisant des bouchons avec la poussière des grains : dans ces conditions on privilégiera les gaines à contact direct grain-air;

- enfin, avec des cellules en béton dont le fond cônica est enterré, il y a un risque d'infiltration d'eau sous l'effet de la dépression : dans ce cas prévoir un béton étanche.

Indépendamment du mode de circulation de l'air, on aura toujours intérêt à choisir un ventilateur centrifuge plutôt qu'un hélicoïdal, sauf cas particulier des cellules agricoles de très faible hauteur. En effet, la courbe débit-pression des ventilateurs centrifuges a une allure très plongeante dans sa partie utile, occasionnant une faible variation de débit pour une grande variation de pression. Dans

un projet, lorsque plusieurs espèces de grains sont susceptibles d'être stockés dans la même cellule, on positionnera le point de fonctionnement de ventilateur au bas de la courbe avec les grains à forte porosité (maïs, soja, haricot, ...), de façon à avoir un débit d'air encore acceptable avec les grains à porosité plus faible (blé, tournesol, orge, colza).

C. CONDUITE DE LA VENTILATION ET AUTOMATISATION

En zone tempérée chaude, la ventilation sera surtout conduite de nuit et tôt le matin, pendant les heures les plus fraîches, avant et après le minimum diurne. L'enclenchement et l'arrêt des ventilateurs peut être fait à heure fixe, manuellement (consignes données à un membre du personnel) ou automatiquement à l'aide d'un contacteur horaire. Ce mode de conduite est encore assez fréquent en zone tempérée plus froide. Pourtant, cette façon de travailler n'est pas très rationnelle, car d'une nuit à l'autre la température minimale varie. Dans certains cas, on s'informe auprès de la station météorologique la plus proche afin de moduler les durées de ventilation pendant les nuits à venir.

Aujourd'hui de plus en plus d'installations fonctionnent en semi-automatique avec asservissement des ventilateurs sur un thermostat dont le capteur de température est placé à l'extérieur du silo sous abri. En fonction de la saison et des objectifs, le chef de silo règle avant chaque ventilation le seuil de température à partir duquel les ventilateurs vont fonctionner. Ainsi, seules les heures favorables sont mises à profit, variables en durée d'un jour à l'autre. L'avancement du refroidissement est suivi et noté régulièrement si les cellules ou le magasin sont équipés d'une installation silothermométrique. Une fois la température de toute la masse de grain alignée sur celle de l'air injecté, le chef de silo décide d'un nouvel objectif, par exemple en baissant de 5 à 7°C le seuil du thermostat. Si les ventilateurs sont amenés à fonctionner en hiver pendant les « heures de pointe » (tarification très élevée de l'électricité), un contacteur horaire (horloge à réserve de marche de 24 heures au moins), ou un relais d'impulsions, permettent d'effacer les tranches horaires coûteuses.

D. CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

Les centres de collecte ou de report destinés au stockage de longue durée doivent être adaptés à leur fonction tant au niveau technique qu'économique. Pour ce qui concerne la ventilation, il est intéressant de savoir à la conception du silo ce que va coûter en consommation d'électricité et en argent un échelon ou palier de refroidissement. Tout d'abord il y a lieu de préciser que la durée d'une ventilation varie peu en fonction de l'importance du refroidissement : il faut autant de m³ d'air

pour refroidir le grain de 2, 5 ou 10°C. D'où l'intérêt d'avoir des échelons de refroidissement d'une certaine ampleur (au moins 5°C). La consommation spécifique d'électricité en kWh/t dépend de la pression totale du ventilateur et de son rendement, ainsi que du poids spécifique du grain. En supposant le rendement égal à 70 %, le poids spécifique à 0,8 tonne/m³, et la pression totale égale à la perte de charge dans le grain augmentée de 40 %, on arrive à une expression simplifiée dans laquelle la consommation spécifique d'électricité ne dépend que de la pression statique minimale du ventilateur, donc en définitive, de la hauteur de grain et du débit spécifique d'air. Les valeurs calculées sont rassemblées dans le tableau 3. La consommation d'électricité par tonne augmente comme le débit spécifique élevé à une puissance entre 1 et 2, et comme la hauteur élevée à une puissance entre 2 et 3. Ainsi, pour un débit spécifique de 10 m³/h — m³, la consommation spécifique est 11 fois plus élevée dans un silo de 30 m de hauteur que dans un silo de 10 m.

La consommation d'électricité peut être convertie en coût de fonctionnement sur la base d'hypothèses concernant le nombre d'échelons de refroidissement et de leur répartition sur les mois d'été et d'hiver. Sur le tableau 4, on a reporté les coûts correspondant à 4 échelons (2 en été, 2 en hiver) sur la base de la tarification française actuellement en vigueur (tarif EDF « vert A5 courtes utilisations » et heures creuses de nuit). Les valeurs calculées sont purement indicatives, car la tarification de l'électricité varie entre pays. Si l'on compare les coûts obtenus avec ceux des traitements insecticides à effet rémanent, on voit que la ventilation avec un débit spécifique de 10 m³/h — m³ et une hauteur de 15 mètres coûte approximativement l'équivalent d'un traitement (3), transilage non compris. Une fois de plus, il apparaît que le stockage sur une hauteur ne dépassant pas 15 mètres est plus économique au coût de la ventilation.

CONCLUSIONS

Dans cette communication, on s'est efforcé de montrer que la ventilation des grains paraissait tout autant justifiée et bénéfique pour la préservation des ressources alimentaires sous un climat

(3) 2F/t : traitement à base de chlorpyriphos-méthyle ou de pyrimiphos-méthyle, durée maximale de protection 6 mois; un traitement à base de malathion, ou malathion + DDVP, coûte 50 % moins cher, mais la durée de protection n'est que de 3 mois. Coûts valables uniquement en France (source : SVP, Bordeaux).

tempéré chaud que sous un climat plus froid. L'inconvénient d'avoir à travailler avec des températures plus élevées ne constitue pas un handicap majeur dans la mesure où les grains sont beaucoup plus secs et susceptibles d'être infestés par des insectes plus sensibles au froid. Une attention particulière a été portée au problème des insectes, car en l'absence de refroidissement ils peuvent causer des dommages importants par pertes physiques et qualitatives. Des conseils pratiques en matière de conception et de conduite des installations de ventilation ont été rappelés, car un climat tempéré chaud exige plus de rigueur aux plans technique et économique. De plus, la maîtrise de la conservation des grains est mieux assurée dans des silos adaptés à leur fonction de stockage de longue durée, c'est-à-dire avec un stockage de type horizontal et une hauteur réduite. S'il s'avère indispensable de procéder à des désinsectisations chimiques, la combinaison avec le refroidissement peut être très efficace à condition de privilégier les traitements par fumigation à effet choc qui ne laissent pas de résidus et qui ne nécessitent pas d'avoir à transiler le grain.

REFERENCES

- (1) FOSTER G.H., TUIE J., 1982. Aeration and Stored Grain Management. in CHRISTENSEN C. M., **Storage of cereal grains and their products**. AACC, St Paul, Min., USA, 117-143.
- (2) LASSERAN J.-C., 1981. La ventilation des Grains. **Perspectives Agricoles**, numéro hors série, mars 1981.
- (3) BERHAUT P., LASSERAN J.-C., 1986. Conservation du blé par la ventilation. **Perspectives agricoles**, n° 97, 32-39.
- (4) LASSERAN J.-C., FLEURAT-LESSARD F., 1990. Aeration of grain with ambient or artificially cooled air : a technique to control weevils in temperate climates. Sth IWCSPP, Bordeaux, France.
- (5) BALACHOWSKI A.S., 1963. Entomologie appliquée à l'agriculture, tome 1, vol. 2, MASSON Edit., Paris.
- (6) LASSERAN J.-C., 1982. La ventilation des grains et les équipements par silothermométrie. in MULTON J.-L., **Conservation et Stockage des Grains et Graines et Produits Dérivés**. Tech. et Doc. LAVOISIER Edit., Paris, 687-771.
- (7) LASSERAN J.-C., 1988. The aeration of grains and measurement of grain temperature in storage bins. in MULTON J.-L., **Preservation and storage of grains, seeds and their by products**. Tech. and Doc. LAVOISIER Ed., Paris, 664-748.

DEBIT SPECIFIQUE ($m^3 h^{-1} m^{-3}$)	DUREE CUMULEE DE VENTILATION (heures)	TEMPS DE REFROIDISSEMENT (jours)	
		Ventilation 6 heures/jour	Ventilation 12 heures/jour
5	240	40	20
10	120	20	10
15	80	13	7

TABLEAU 1 : TEMPS DE REFROIDISSEMENT DU GRAIN EN FONCTION DU DEBIT SPECIFIQUE ET DE LA DUREE JOURNALIERE D'UTILISATION DU VENTILATEUR

Durée cumulée de ventilation (heures) # $\frac{1200 m^3 m^{-3}}{\text{Débit spécifique d'air } (m^3 h^{-1} m^{-3})}$

DEBIT SPECIFIQUE (m ³ h ⁻¹ m ⁻³)	HAUTEUR (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
5	0,08	0,34	0,78	1,42	2,28	3,36	4,69	6,27	8,12	
10	0,17	0,71	1,68	3,14	5,13	7,72				
15	0,26	1,12	2,71	5,15	8,56					

TABLEAU 3 : CONSOMMATION SPECIFIQUE D'ELECTRICITE PAR ECHELON DE REFROIDISSEMENT EN FONCTION DU DEBIT SPECIFIQUE ET DE LA HAUTEUR
 Valeurs calculées pour du blé, P.S. = 800 kg/m³

(1) Δp = perte de charge dans le grain ou pression statique minimale (cf. tableau 2)

Consommation spécifique d'électricité (kWh/tonne = $8,33 \times 10^{-4} \Delta p$ (Pascals) (1))

HAUTEUR H (m)										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
DEBIT SPECIFIQUE n (m ³ h ⁻¹ m ⁻³)										
5	99	404	934	1705	2732	4034	5626	7526	9748	
10	202	853	2017	3763	6156	9263				
15	312	1345	3250	6176	10272					

TABLEAU 2 : PRESSION STATIQUE MINIMALE (1) POUR VENTILER DU BLE (2) A DIFFERENTS DEBITS SPECIFIQUES D'AIR SUR UNE HAUTEUR VARIABLE

(1) Pression statique minimale = perte de charge dans le grain

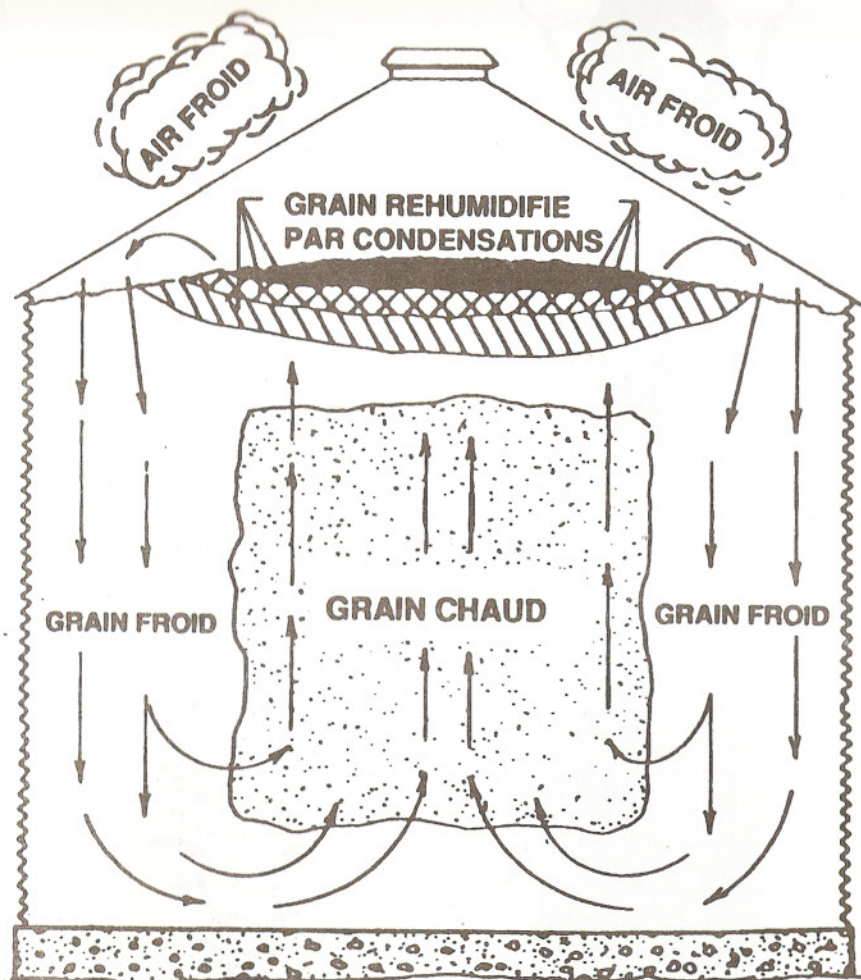
(2) Poids spécifique du blé après tassement : 800 kg/m³

$$\text{Pression statique (Pascals)} = 0,763 n H^2 + 8,86 E-4 n^2 H^3$$

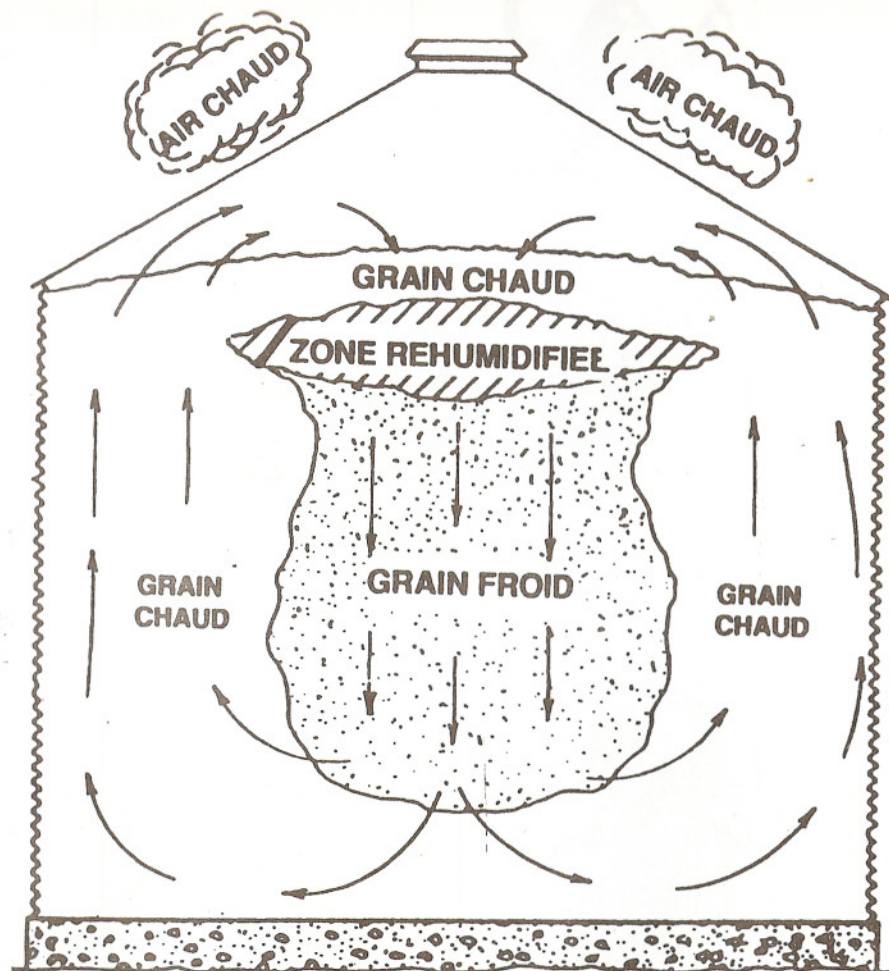
HAUTEUR (m)	DEBIT SPECIFIQUE (m ³ h ⁻¹ m ⁻³)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
5	0,08	0,36	0,80	1,46	2,34	3,44	4,82	6,44	8,32	
10	0,20	0,74	1,74	3,22	5,26	7,92				
15	0,28	1,14	2,78	5,28	8,78					

TABEAU 4 : COUT DE LA VENTILATION SUR DU BLE EN FONCTION DU DEBIT SPECIFIQUE D'AIR ET DE LA HAUTEUR (FR.F H.T./tonne)

Hypothèses : 2 échelons en "été" (avant le 30/10), prix du kWh : 0,11 F (tarification "heures creuses") et
2 échelons en "hiver" (après le 1/11), prix du kWh : 0,4027 F (tarification "heures creuses")

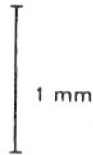


AUTOMNE - HIVER



PRINTEMPS - ETE

**FIGURE 1 : STOCKAGE SANS VENTILATION
TRANSFERTS D'HUMIDITE SOUS L'ACTION DE FLUX D'AIR CONVECTIFS**



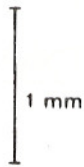
سوسة الأرز

Sitophilus oryzae (Charançon du riz) ; adulte.



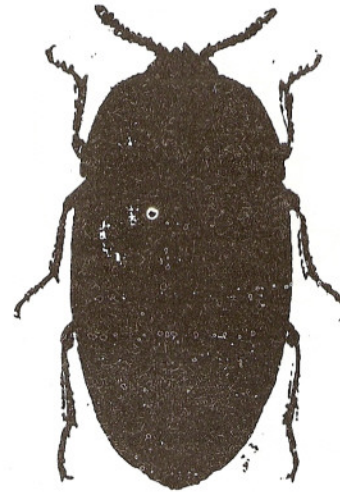
ثاقبة الحبوب الصغرى

Rhizopertha dominica (Capucin des grains), adulte et larve.



خنفساء الدقيق المشايخ

Tribolium confusum, adulte et larve.



خنفساء الصعيد

Trogoderma granarium (Trogoderme des grains), adulte et larve

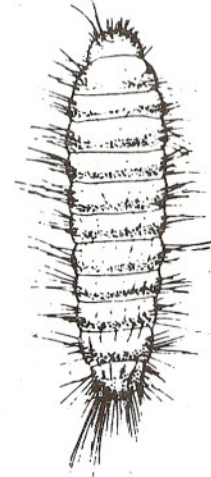
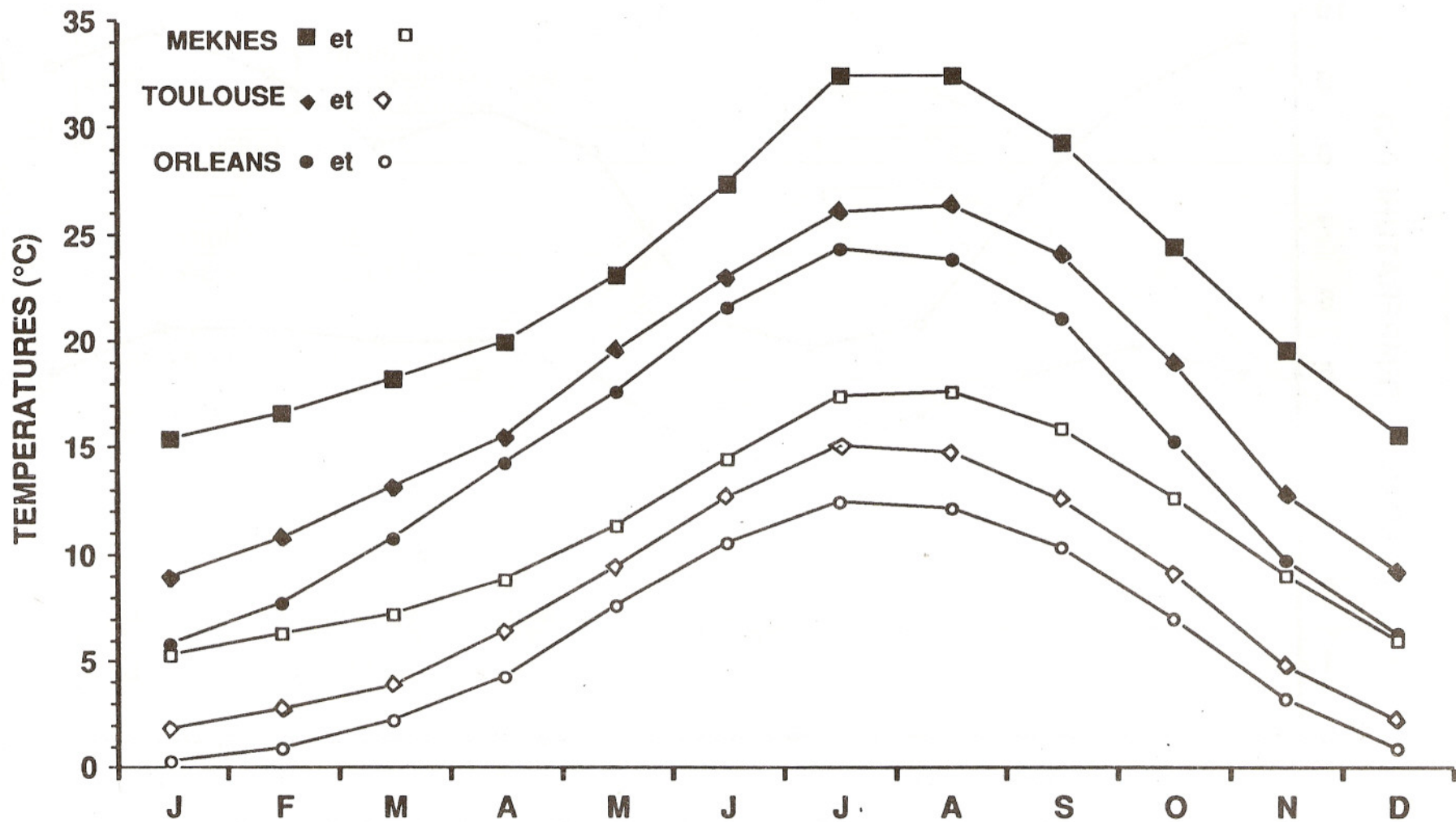


FIGURE 2 : PRINCIPAUX RAVAGEURS DES GRAINS DU BASSIN MEDITERRANEEN



**FIGURE 3 : TEMPERATURES MAXIMALES ET MINIMALES MOYENNES MENSUELLES (°C)
de 1961 à 1985
MEKNES - TOULOUSE - ORLEANS**

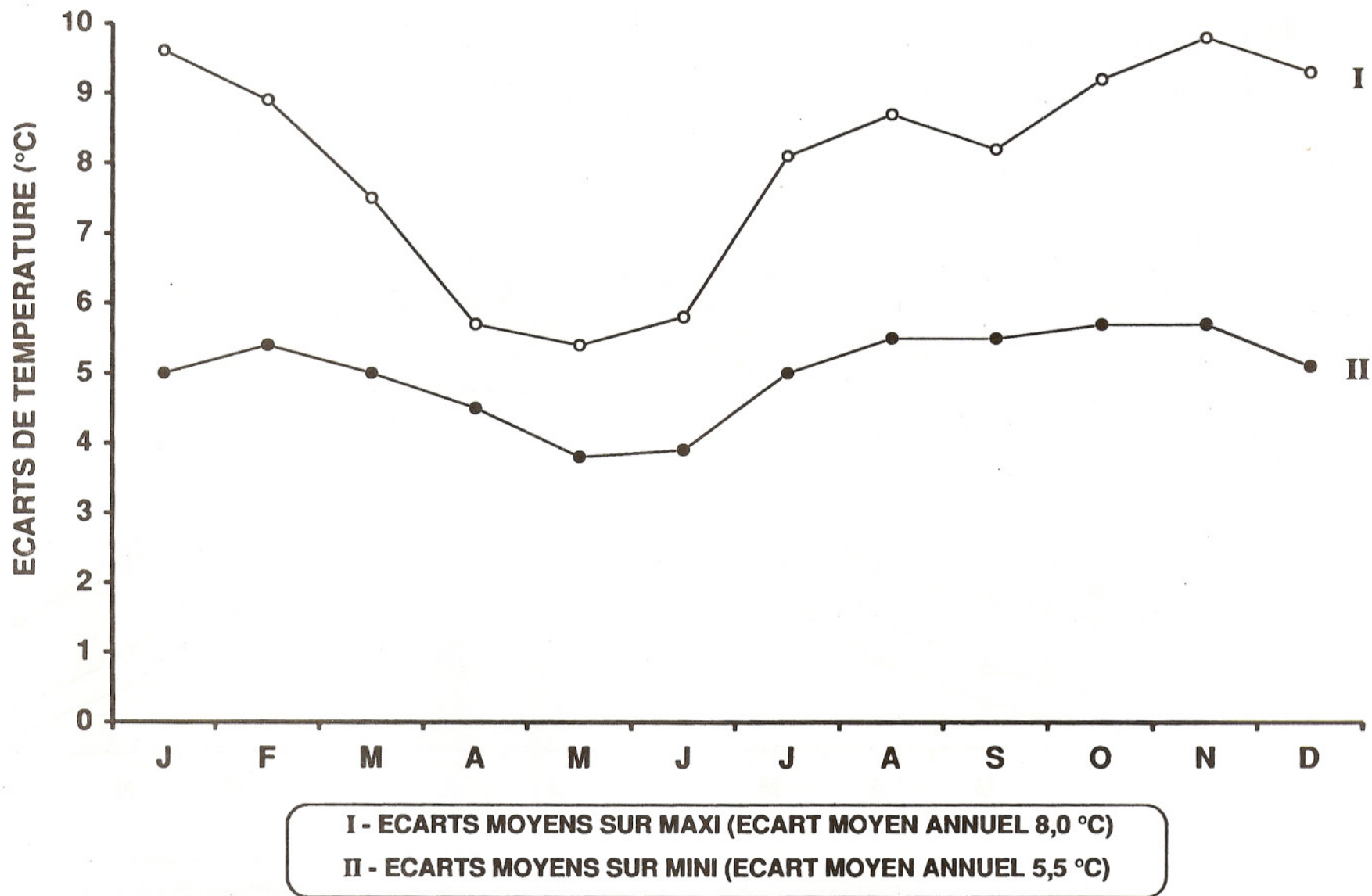
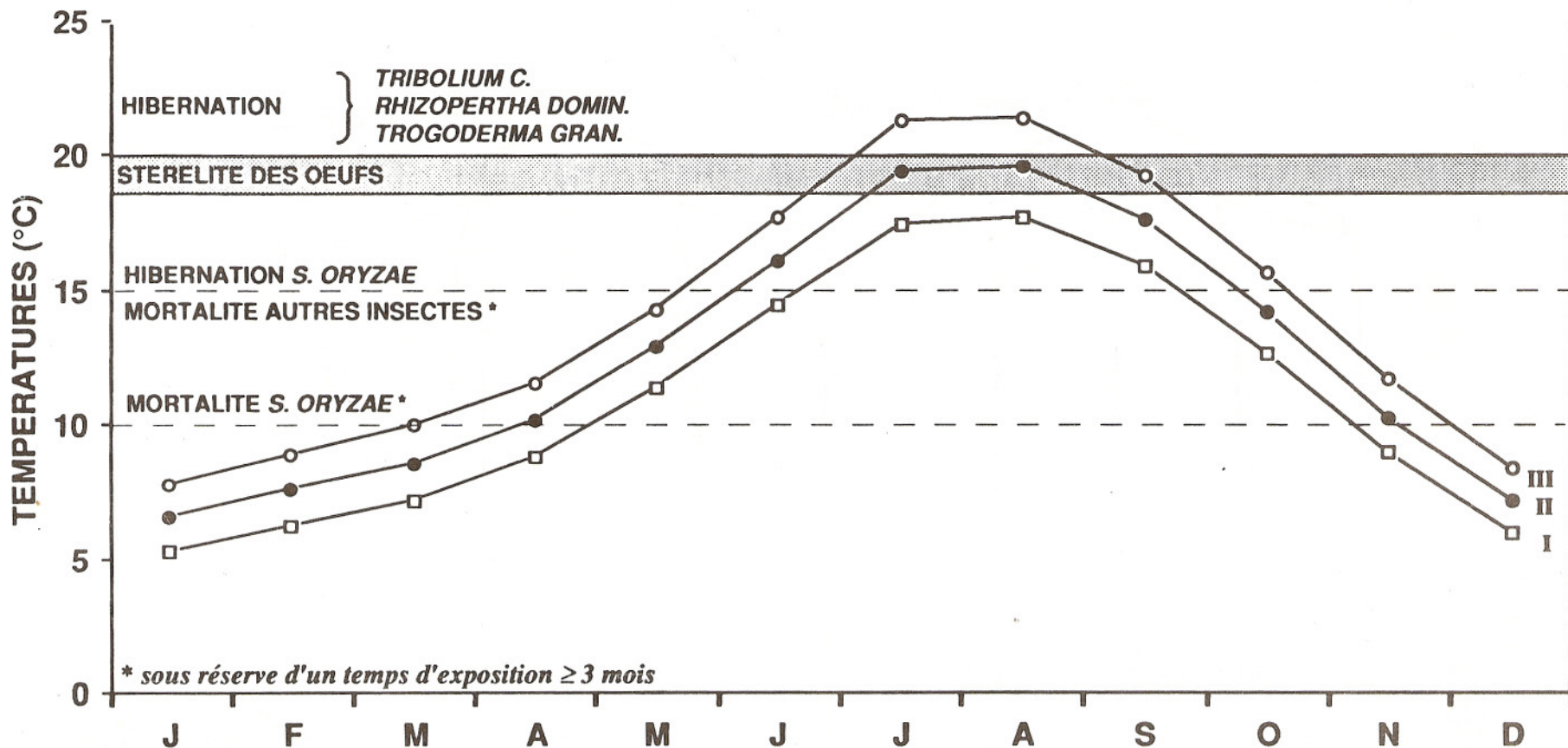


FIGURE 4 : ECARTS MOYENS MENSUELS ENTRE MEKNES ET ORLEANS DE 1961 à 1985



I. Températures minimales moyennes
 II. Températures moyennes sur 6 heures # $(\text{Maxi} + 7 \text{ mini})/8$
 III. Températures moyennes sur 12 heures # $(\text{Mini} + 3 \text{ mini})/4$

FIGURE 5 : MEKNES - MAROC
TEMPERATURES MINIMALES MOYENNES MENSUELLES (°C) DE 1961 à 1985
TEMPERATURES MOYENNES DE L'AIR PENDANT LES 6 OU 12 HEURES LES PLUS FRAICHES
EFFETS DE LA TEMPERATURE SUR LES PRINCIPAUX INSECTES

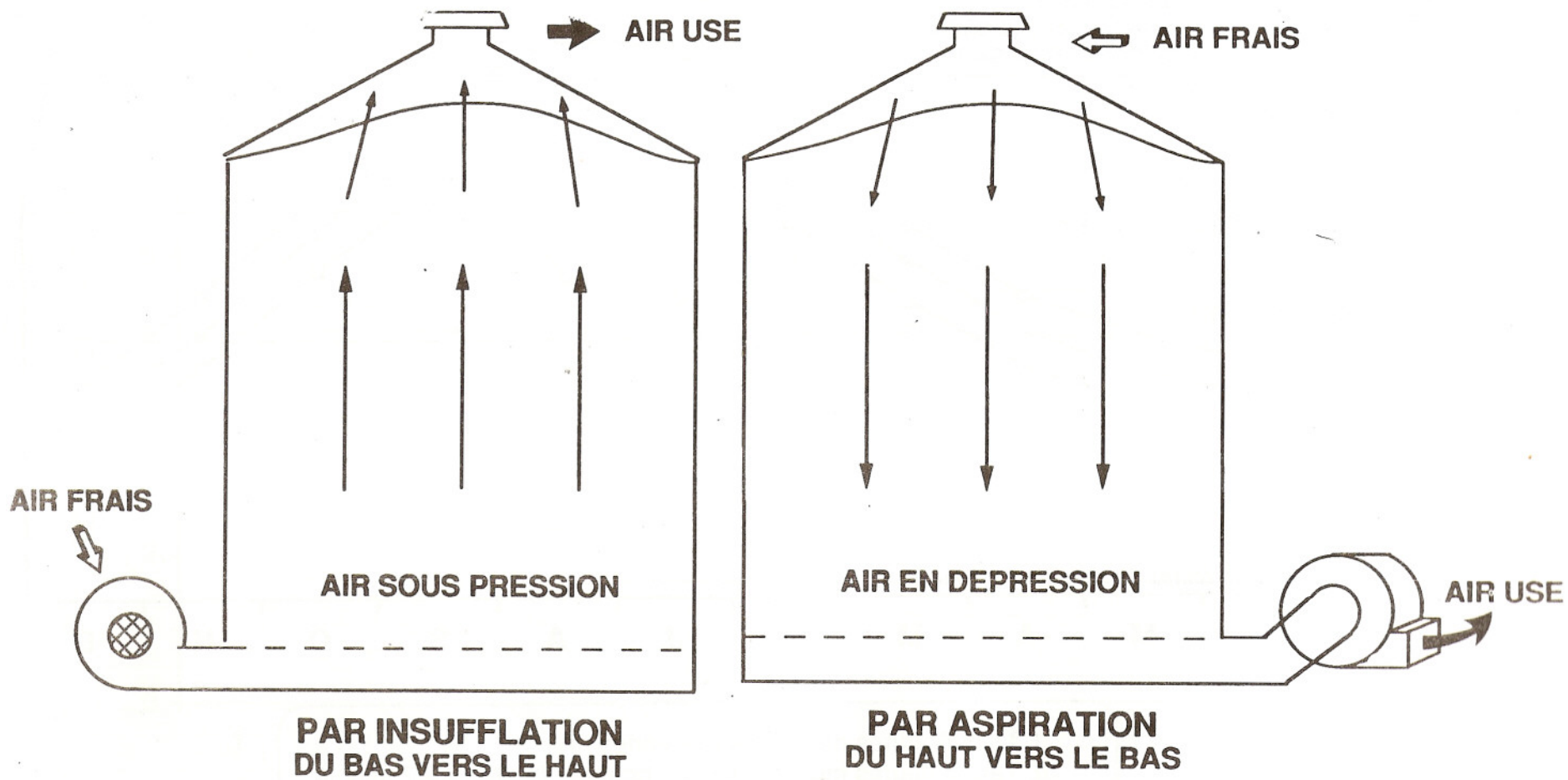


FIGURE 6 : VENTILATION : MODE DE CIRCULATION DE L'AIR

Surveillance du stockage par système d'acquisition à microprocesseur : application à la conservation de céréales

R. Amory, Sz. Szöke et E. Persoons

Unité de Génie rural — Faculté des Sciences agronomiques
Université Catholique de Louvain Belgique

Recherche subventionnée par le Ministère de la Région
Wallonne pour l'Agriculture

Résumé

En hiver, les céréales restent vivantes et continuent à respirer et l'importance des pertes de produits vivriers lors du stockage n'est plus à démontrer. Afin de réduire ces pertes, il faut conditionner le produit dans un état physiologique calme et l'air interstitiel à des conditions qui minimisent les échanges avec le produit.

Les paramètres des processus physiques et biochimiques sont de mieux en mieux connus. Ainsi, la mesure et l'enregistrement de la température du grain et des conditions de température et d'humidité de l'air ventilé ou de l'air interstitiel permet de suivre de près le produit et ses conditions de stockage.

L'évolution actuelle de la micro-électronique et de la microinformatique mène à la conception d'un outil d'aide pour le gestionnaire de stock de céréales. Un système d'enregistrement connecté à un micro-ordinateur permet de lire les valeurs instantanées des paramètres mesurés et de transférer les valeurs enregistrées qui pourront être mises en graphique ou être traitées par un logiciel adéquat.

Summary

During the winter, cereals are still living and breathing and food losses are recorded during the storage. In order to reduce these losses, stored material must be kept in a very stable physiological state and air exchanges must be controlled.

The knowledge about the parameters of the physical and biochemical processes involved is continuously improved. Therefore it becomes interesting to measure the heat of the grain and the temperature together with relative humidity of the ventilated air in order to follow correctly the storage conditions.

Electronic and informatic devices are now ready to offer a tool helping grain stock manager. A data logger connected to a computer records the measurements, picks up the values of the actual parameters and transfers the data to the computer for calculation and/or for the printing of graphs for the control.

1. Introduction

Les pertes de produits vivriers par manque de surveillance lors du stockage sont considérables. Trop souvent, le gestionnaire des stocks est totalement démuné de moyens qui devraient lui permettre de suivre l'évolution des produits dont on lui a confié la garde.

L'évolution actuelle de la micro-électronique et de la micro-informatique permet d'utiliser des ensembles d'acquisition et de traitement de mesures comme systèmes de surveillance. L'interprétation des mesures se basent sur les concepts théoriques régissant les équilibres et les échanges au sein de la masse de produits à conserver.

L'exposé de la démarche suivie est divisée en quatre présentations :

- * les trois diagrammes régissant le conditionnement des céréales;
- * les bases théoriques et les méthodes de conditionnement;
- * le contrôle de la conservation;
- * les appareils de contrôle.

2. Les trois diagrammes

2.1. Diagramme d'équilibre

air - produit

2.1.1. Diagramme

Rappelons d'abord qu'un grain se met en équilibre d'humidité avec l'air dans lequel il se trouve. Cette prise d'équilibre est caractérisée par une isotherme. La figure 1 ci-après illustre l'équilibre existant entre l'air et le froment. Ainsi pour $q = 65\%$, l'humidité sur poids humide (ou hp.H.) du froment à 20°C est de 14% .

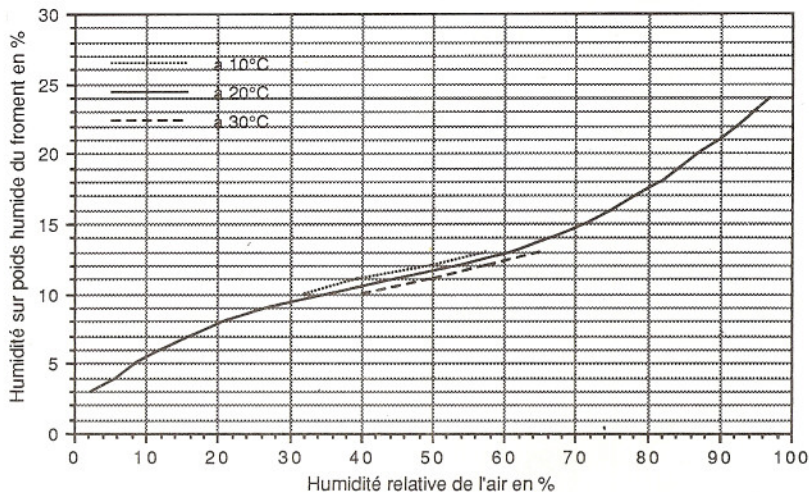


Fig. 1 : Courbe d'équilibre entre l'humidité de l'air et celle du froment

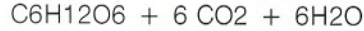
2.1.2. Chaleur spécifique d'une céréale en kJ/kg. °C.

La chaleur spécifique d'une céréale sèche est de $1,55$ à $1,67$ kJ/kg. °C.

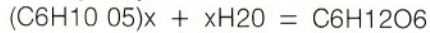
La chaleur spécifique d'une céréale humide se calcule comme suit, si la chaleur spécifique de l'eau vaut $4,18$ kJ/kg. °C.

2.1.3. Aspect biologique

Un grain vit et respire, consommant de l'O₂ et dégageant du CO₂ et de l'eau :



En fait, l'amidon de la céréale subit d'abord une hydrolyse :



Et, les sucres ainsi formés brûlent :



L'énergie dégagée correspond à environ 16.000 kJ par kg de sucre.

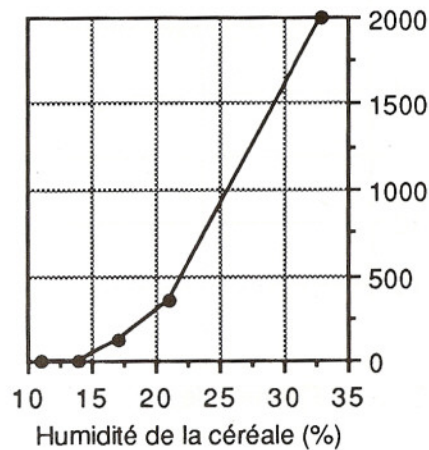
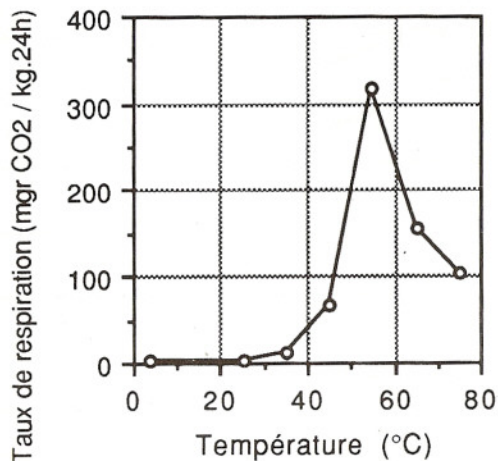
Une humidité du grain plus forte ou une température plus élevée augmente l'activité respiratoire, et donc le poids de CO₂ dégagé.

A ce métabolisme normal, se superpose le développement de micro-organismes (moisissures, levures, bactéries), d'autant plus marqué que l'humidité et la température du grain sont élevés; ils vivent aux dépens du grain et sont cause d'un dégagement supplémentaire de CO₂ et de H₂O. (J. Buré - 1952).

Ces « activations » par l'humidité, la température et les micro-organismes accroissent la production de CO₂, déterminent des pertes en poids, des échauffements et humidifications locales ou générales qui peuvent donner un grain « échauffé ».

d'aspect rougeâtre, ayant une odeur de moisi, de faible pouvoir germinatif et dont la valeur boulangère diminue (pain de mauvaise qualité). Par contre, si la vie du grain est ralentie, l'activité respiratoire est réduite et le grain peut conserver son pouvoir germinatif pendant de nombreuses années.

Les graphiques de la figure 2 ci-après illustrent l'influence de la température et de l'humidité relative sur l'activité respiratoire, mesurée par son dégagement de CO₂



Taux de respiration en mgr de CO₂ par kg de matière sèche de froment et par 24 heures :
 — en fonction de la température à l'humidité constante de 15 % (Bailey et Curjar - 1918)
 — en fonction de l'humidité relative à température constante (Seidel - 1951).

Le dégagement de CO₂ à l'humidité constante est maximal vers 55°. Au-delà, il y a dégradation progressive du grain. Il ne faut donc pas dépasser cette température lors du séchage. Par sécurité, il vaut mieux se limiter à 35 à 40°C pour la semence et 45°C pour les produits de meunerie. D'autre part, l'activité respiratoire du grain monte brutalement lorsque l'humidité atteint les environs de 16 à 18 %.

Si la céréale est aérée, la quantité de CO₂ produit s'accroît, mais simultanément, quand les caractéristiques de l'air sont bien choisies, le séchage et le refroidissement se poursuivent, et donc finalement la quantité de CO₂ produit diminue.

Inversement, en silo étanche, l'oxygène est rapidement consommé et la respiration doit ralentir, ce qui se traduit par une quantité de CO₂ dégagé réduit de moitié.

2.2 Diagrammes de conservation

Un grain est stable, si sa température et son humidité lui permettent de se conserver pendant un temps assez long, en gardant ses qualités germinatives et boulangères.

2.2.1. Les courbes de Nuret

Les courbes de Nuret (Fig. 3) résultent d'observations et définissent trois zones par rapport à l'humidité sur poids humide et la température du produit à conserver (Gatheray - 1953)

* La « zone de sécurité » ou de stabilité, le grain est d'autant plus grande qu'il est à gauche de la courbe limite de sécurité.

* La zone d'alerte », le grain est « instable » au point de vue conservation.

* La zone de danger immédiat », le grain est en voie d'altération rapide, il faut le traiter rapidement et le ramener dans la zone de sécurité.

On constate, qu'un grain à $t_g = 10\text{ °C}$ et d'humidité (sur P.H.) à 21 % serait aussi stable qu'un grain à 20 °C et 14 %. Ces courbes de con-

servation ne sont guère applicables en pays chaud car elle se limitent à des températures inférieures à 25 °C .

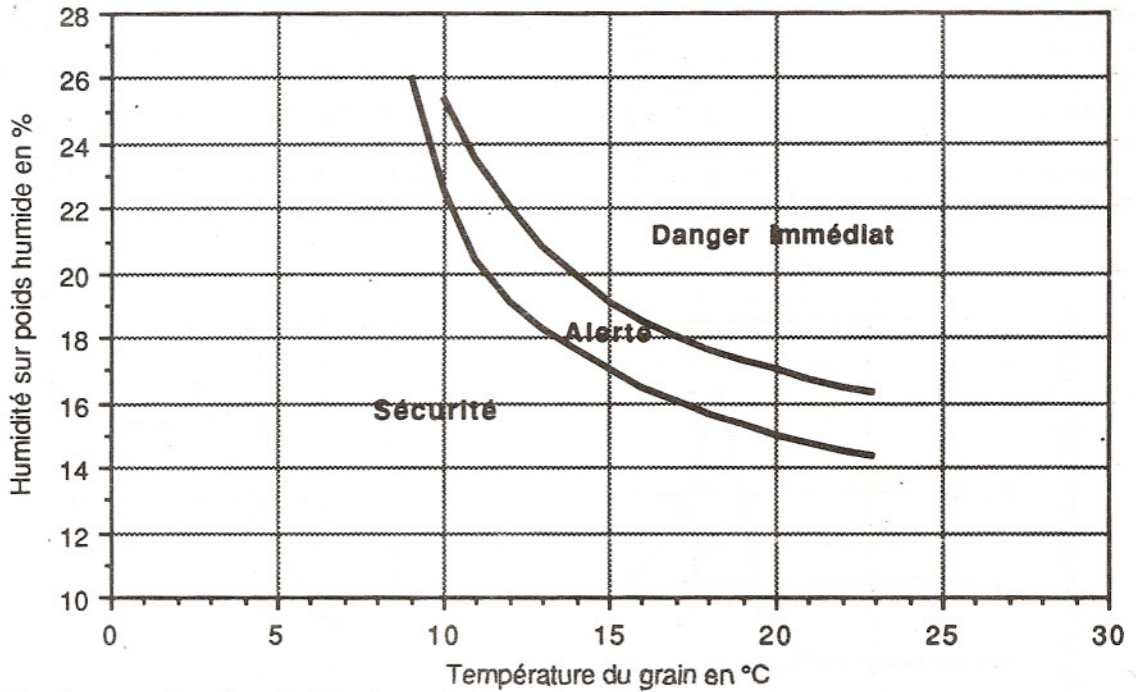


Fig. 3. : Courbes de Nuret pour le froment

2.2.2. Les courbes de la F.A.O.

D'autres courbes de conservation, proposées par la FAO, sont données à la Fig. 4 :

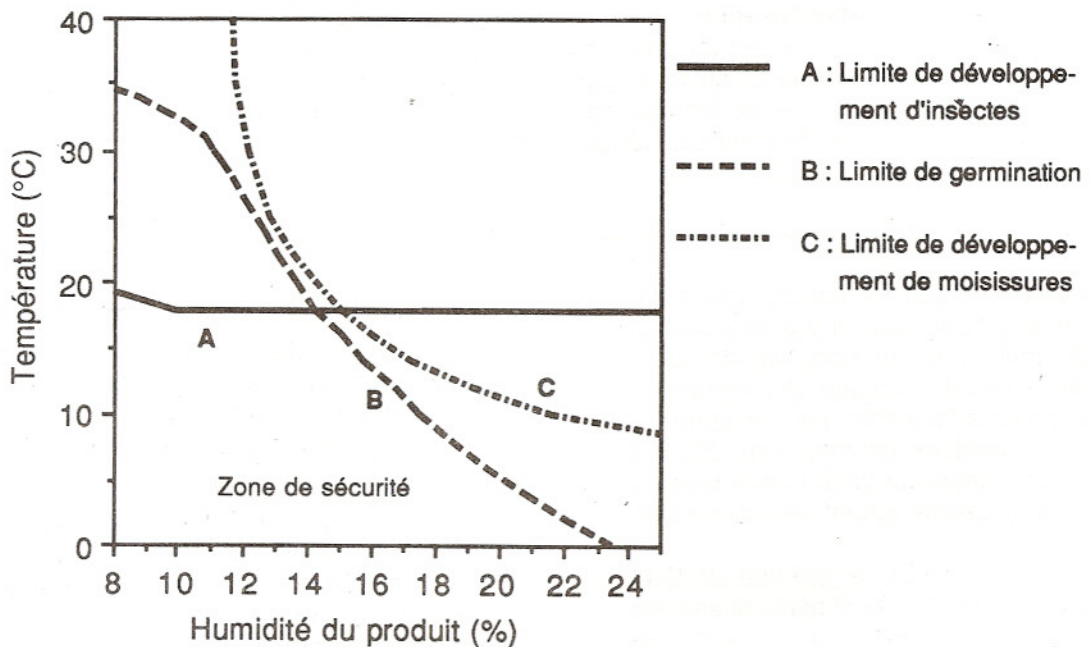


Fig. 4 : Valeurs de température et d'humidité garantissant une bonne conservation (Doc.FAO)

2.2.3. Températures maximales de séchage (d'après S.M. Henderson)

- Grain à destination d'alimentation animale 75 °C
- Grain à destination d'alimentation humaine 66 °C
- Grain pour la meunerie 60 °C
- Grain pour la brasserie 45 °C
- Grain pour alimentation humaine 45 °C
- Haricots pour alimentation humaine 35 °C

2.3 Diagramme de l'air humide

2.3.1. Caractéristiques de l'air

L'air sec est un mélange de gaz dont la composition est approximativement :
 $[O_2] = 0.210$, $[N_2] = 0.781$; $[Ar] = 0.009$

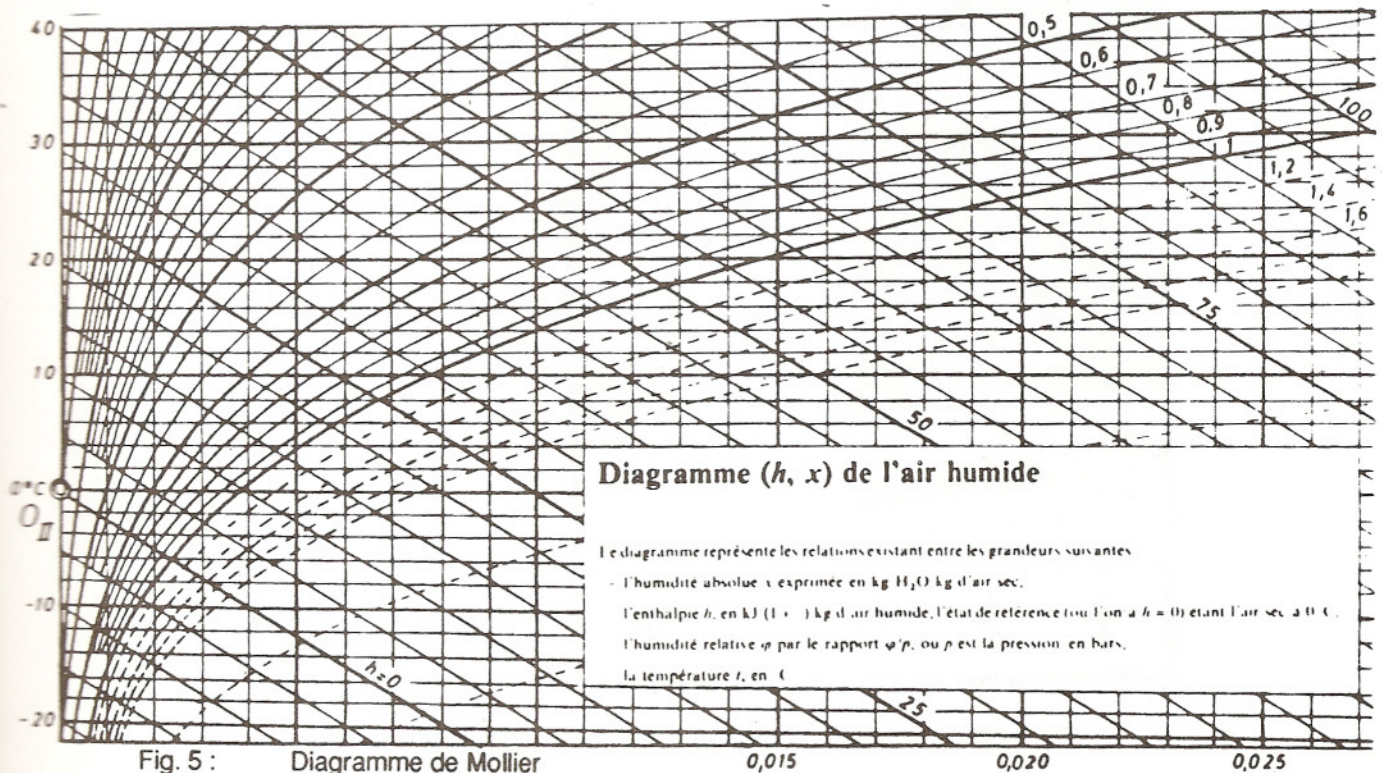
La masse volumique est généralement prise égale à $1,2 \text{ kg/m}^3$.

La chaleur spécifique, à 1 bar, est de $c_p = 1,009 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ entre 0 et $50 \text{ } ^\circ\text{C}$

2.3.2 Le diagramme enthalpique (h,x) de l'air humide

Le diagramme de l'air humide, ou diagramme de Mollier (cfr figure 5), permet d'associer quatre caractéristiques de l'air humide. A savoir :

- La température (sèche, humide et celle du point de rosée);
- L'humidité absolue x ;
- L'humidité relative q ;
- L'enthalpie représentant l'état énergétique du mélange ou de ses composants en référence à 0°C en KJ/kg .



3. Les bases théoriques et les méthodes de conservation

En séchage et ventilation de céréales en couches épaisses (2 à 4 m), différents principes doivent être compris avec précision afin de permettre une conduite efficace de l'installation.

3.1. Existence d'un front de séchage

Lors d'essais de séchage, on constate que le produit ne sèche pas uniformément sur toute la hauteur du séchoir. Après un certain temps de ventilation d'air séchant, trois zones sont distinguées dans le séchoir :

- La zone inférieure, où le produit est sec;
- la zone supérieure, où le produit est humide;
- et une zone de transition où le produit sèche qui est le « front de séchage ».

- pour l'air : — température « t » en °C;
- humidité relative « q »;
- vitesse frontale « v » en m/sec, telle que .
 $v = Q/$

où Q est le débit d'air en m³/sec et est la section de passage.

— pour le produit : — l'humidité du produit avant séchage; en fait, on fera intervenir la différence entre l'humidité avant et après séchage.

Expérimentalement, il a été établi que la vitesse de déplacement du front de séchage V en cm/heure répond à l'équation empirique suivante :

où V = la vitesse de déplacement du front de séchage en cm/h

t = la température de l'air séchant en °C

= l'humidité relative de l'air séchant

H = la différence entre l'humidité du produit avant et après séchage exprimé en % sur poids sec

v = la vitesse frontale de l'air en m/sec

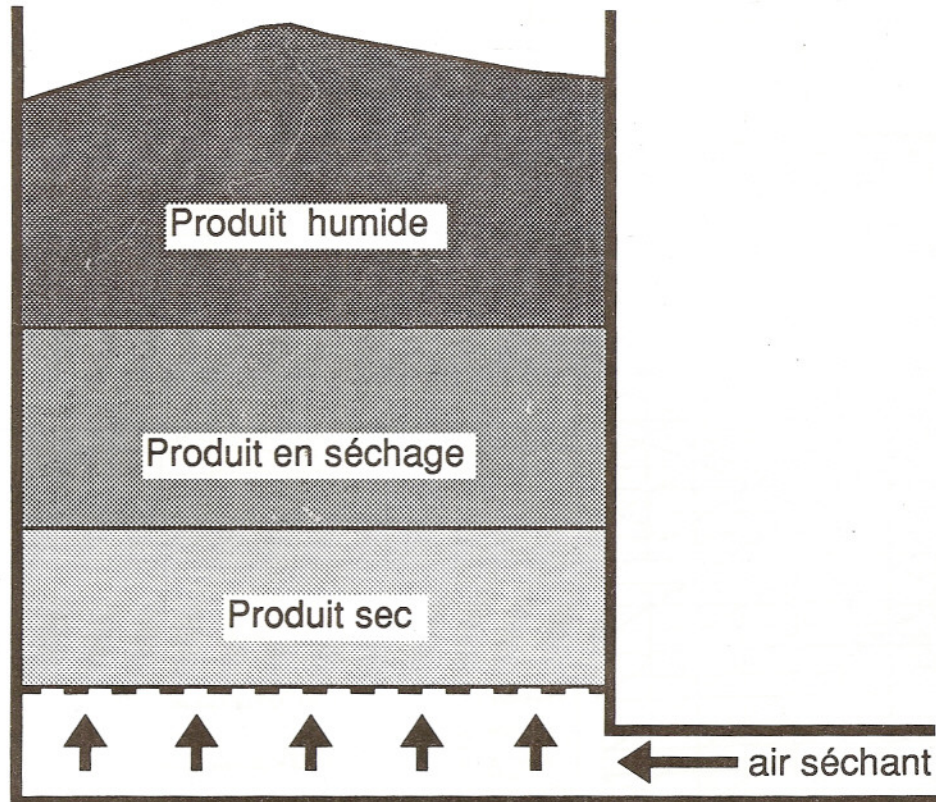


Fig. 6. : Front de séchage dans un silo subissant une ventilation d'air séchant

3.2. Vitesse de déplacement du front de séchage

Cette vitesse de déplacement est fonction des caractéristiques du séchage, à savoir :

En pratique, les caractéristiques de l'air séchant au cours de séchage ne restent pas constantes, mais l'introduction de la valeur moyenne des caractéristiques de l'air donne une approximation suffisante de la vitesse de déplacement.

3.3. Trajectoire du point de l'air séchant dans le diagramme (h,x)

Soit un séchage qui se passe dans les conditions suivantes : (cfr figure 6)

— air séchant :

$$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi = 0,50$$

— air en équilibre avec le produit à sécher :

$$t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi_{\text{équi}} = 0,95$$

3.3.1. Trajectoire ractiligne (erronée)

Si l'on effectue des mesures en début de séchage sur une telle cellule on constate que :

— l'air sort du produit à

$$t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi_1 = 0,95$$

— à l'entrée, on a

$$t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi_2 = 0,50$$

On serait tenté de considérer que l'air traverse le diagramme h,x en ligne droite. D'où lors du calcul d'un bilan on prendrait les caractéristiques de x1 et x2 telle que :

$$x_1 = 0,0102 \text{ kg eau/kg air sec}$$

$$x_2 = 0,0188 \text{ kg eau/kg air sec}$$

Ce bilan serait fortement faussé !

3.3.2. Trajectoire à enthalpie constante (bonne)

En fait la théorie et la pratique montrent que le séchage se fait à enthalpie constante. En effet, l'eau du produit a besoin d'énergie pour se transformer en vapeur. L'énergie d'évaporation est puisée dans l'air séchant et, l'air part avec l'eau évaporée, son enthalpie ne change pas.

Lors de la ventilation d'air dans une cellule de stockage deux phénomènes vont en fait se produire :

— Un front de température va modifier la température du produit sans en modifier l'humidité. Dans cette transformation, le produit va tendre vers la température humide de l'air séchant ou encore vers la même enthalpie que celle de l'air séchant. Ce front se déplace rapidement à des vitesses de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres à l'heure.

— Un front de séchage va modifier l'humidité du produit suivant cette isotherme humide ou encore gardant la même enthalpie que celle de l'air entrant. Ce front se déplace lentement à des vitesses de l'ordre d'un centimètre à l'heure.

3.4. Bilan d'humidité

Le calcul du temps de séchage se fait par un bilan d'humidité qui s'écrit :

$$g \cdot (x_1 - x_2) \cdot 3600 \cdot H = P \cdot (hp.s.1 - hp.s.2)$$

avec P le poids de produit à traiter

hp.s.1 : l'humidité sur poids sec du produit avant séchage

hp.s.2 : l'humidité sur poids sec du produit après séchage

g : le débit d'air séchant en kg d'air sec par seconde

x1 : l'humidité absolue de l'air séchant à l'entrée du séchoir

x2 : l'humidité absolue de l'air séchant à la sortie du séchoir

H : le nombre d'heures de ventilation.

Le nombre d'heures de ventilation pour sécher le produit est donné par :

$$H = \frac{P \cdot (hp.s.1 - hp.s.2)}{g \cdot (x_1 - x_2) \cdot 3600} \quad / \quad H$$

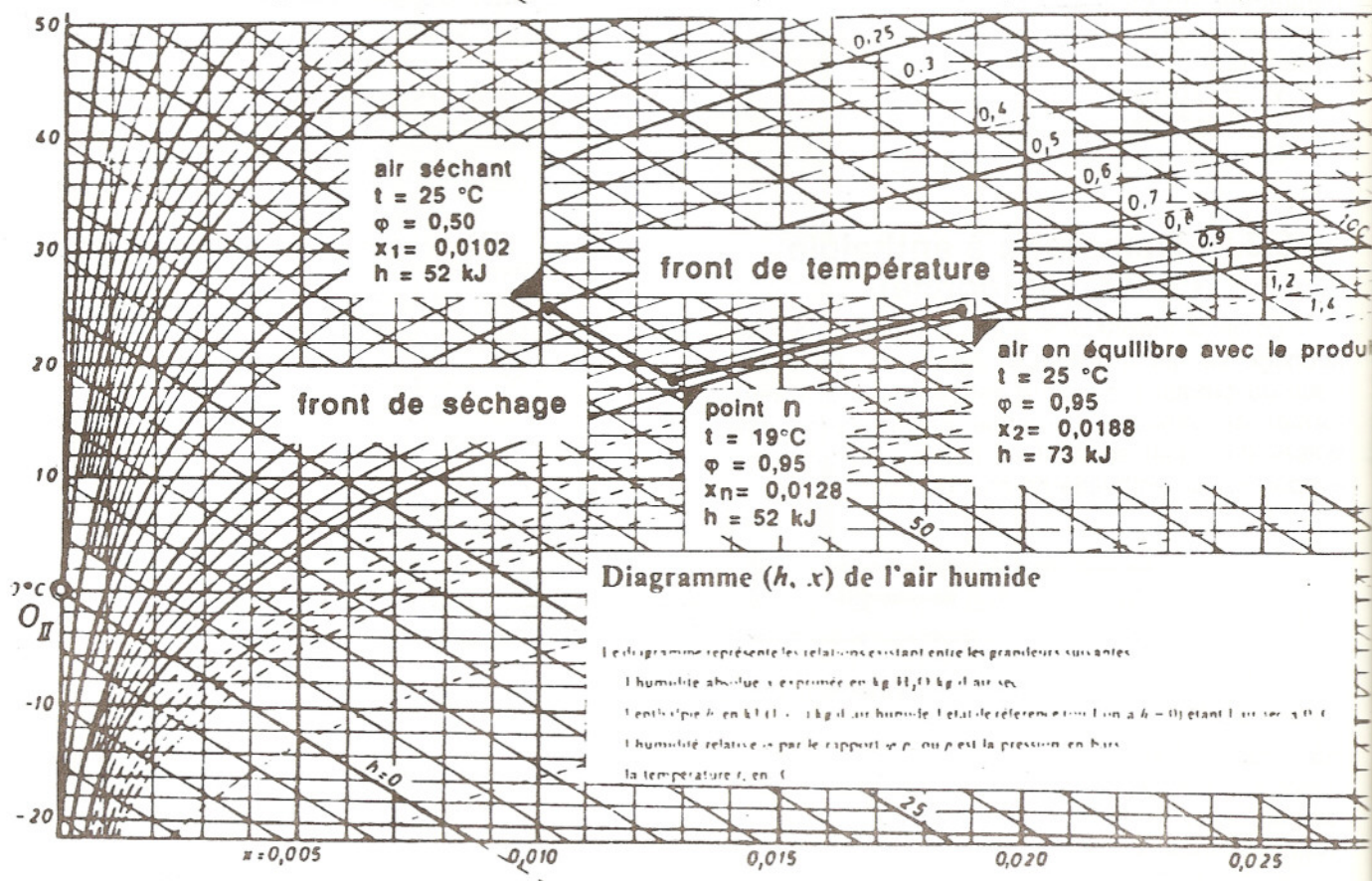
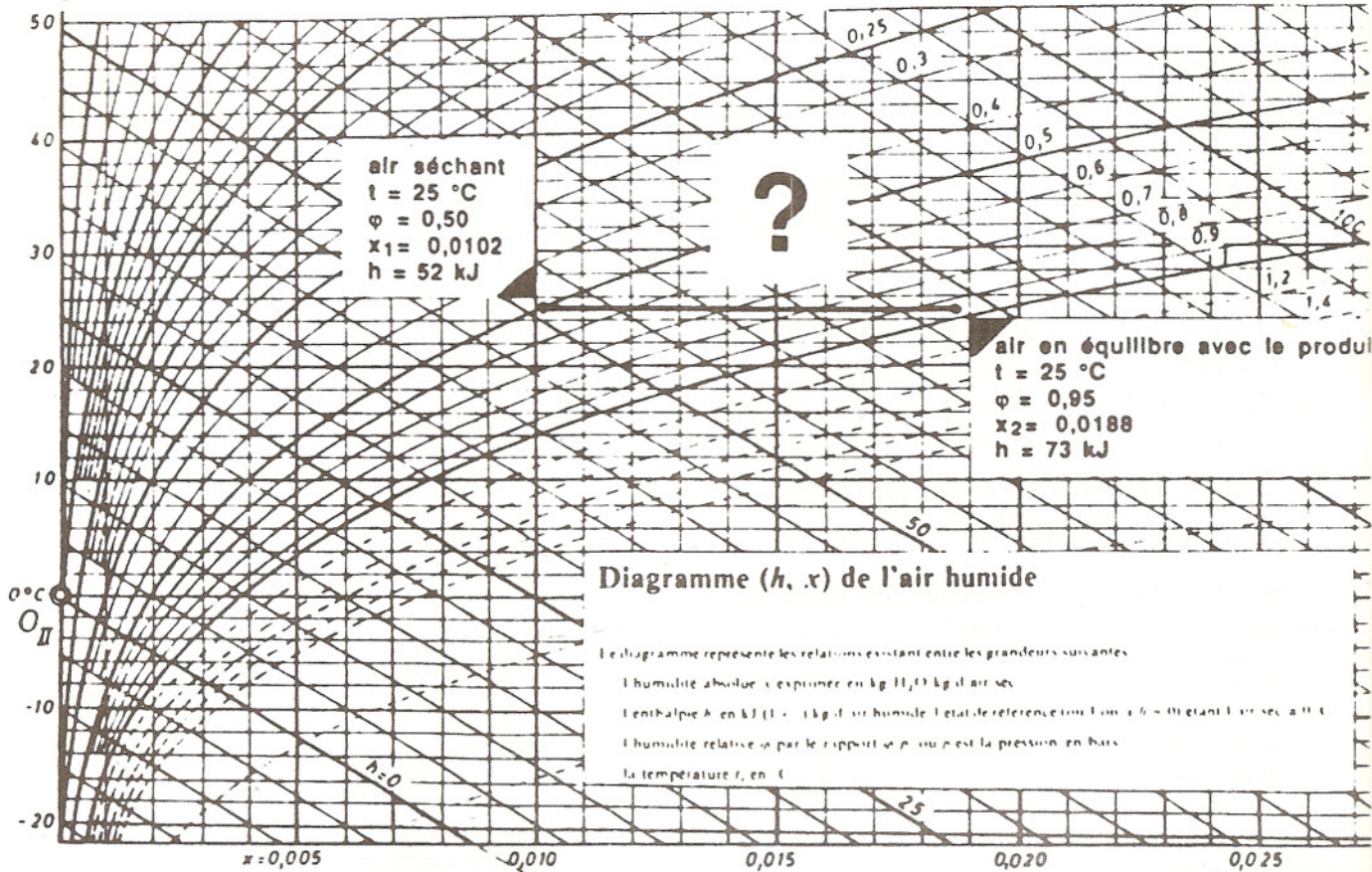


Fig. 7 : Trajectoire des caractéristiques de l'air séchant dans le diagramme de l'air humide

3.5. Règles à retenir

Cas de ventilation en couches épaisses

* Les caractéristiques de l'air dans les trois zones sont :

— dans la zone située au-dessus du front de mise à température, l'air est en équilibre avec le produit qui est encore aux caractéristiques avant la ventilation;

— dans la zone de mise à température, la température évolue entre la température du produit avant la ventilation et celle du point « n » c.à.d. le point caractéristique de l'air dont l'humidité relative est en équilibre avec le produit humide et dont l'enthalpie est égale à celle de l'air entrant dans la masse;

— dans la zone en dessous du front de mise à température, la température est égale à la température du point « n ».

* Le front de température se déplace à une vitesse de l'ordre du demi mètre par heure, pour une vitesse d'air de 2 cm/sec.

* Sa hauteur est de l'ordre du mètre.

* Pour établir un bilan de ventilation, nous pouvons considérer comme caractéristiques de l'air sortant celles de l'air en équilibre le produit avant la ventilation et comme caractéristiques de l'air entrant celles du point « n ».

Cas de séchage en couches épaisses

* Les caractéristiques de l'air dans les trois zones de séchage après la sortie du front de température sont :

— dans la zone supérieure, où le produit est encore humide l'air est à la température du point « n »;

— dans la zone en séchage, la température évolue entre la température du point n et celle de l'air entrant;

— dans la zone de produit sec, la température est égale à la température de l'air séchant.

* Le front de séchage se déplace à une vitesse de l'ordre du centimètre par heure, pour une vitesse d'air de 10 cm/sec.

* Sa hauteur est de l'ordre du mètre.

* Pour établir un bilan d'un séchoir, il faut prendre comme caractéristiques de l'air sortant celles du point « n » (et non celles de l'air en équilibre avec le produit).

Enfin, vu l'existence d'un front de séchage, l'air à souffler dans un produit doit être fonction des caractéristiques du produit que l'on désire obtenir. Ainsi, en se référant aux courbes d'équilibres air-produit, si l'on désire obtenir du froment à 15 % d'humidité sur poids humide, rien ne sert de souffler de l'air plus sec que 0,65. En effet, dans ce cas, on sèche trop fort la partie inférieure. Il a été montré que le front ne se déplace pas sensiblement plus vite.

4. Contrôle de la conservation d'un produit

4.1. Principe

Les rappels théoriques précédents font apparaître qu'il est indispensable de contrôler la conservation des céréales stockées. Or, tout indique que la mesure de la température dans la masse permet de suivre correctement :

* le degré d'activité biologique du produit (sa respiration)

* l'évolution du front de température et/ou du front de séchage.

4.2. Elévation de température due à la respiration

Dans le graphique de la figure 8, les enregistrements l'évolution de la température dans une masse de triticales pendant une période de 15 jours. Comme expliqué ci-dessus, il apparaît que l'échauffement s'accroît de plus en plus.

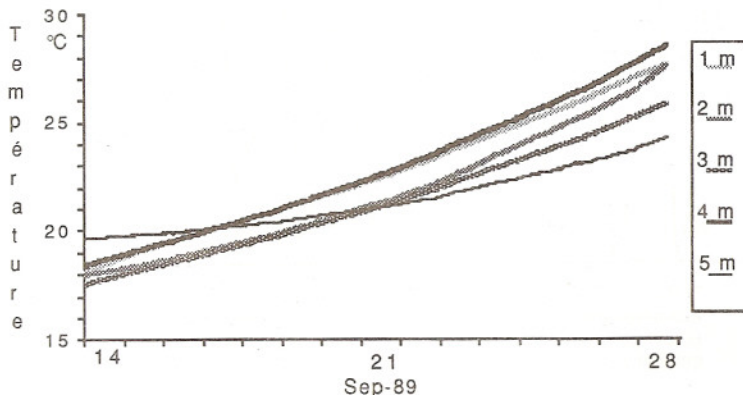


Fig. 8 : Mesure de température lors d'un échauffement dans un silo de triticales de 6 m de haut pendant deux semaines sans ventilation.

4.3. Résultat de la ventilation dans un silo

Le graphique de la figure 9 montre le résultat de périodes de ventilations successives dans une masse d'orge. Ce type d'enregistrement permet dans visualiser le résultat des ventilations et de les optimiser.

4.4. Résultat d'échauffement dû à l'ensoleillement

Il s'agit dans le cas de la figure 10 d'un suivi de température dans un silo métallique installé à Dkhissa (Meknès). Dans le cadre d'une expérimentation de différents types de stockage implantés à cet endroit par le DEH de l'IAV (E.H. Bartali, 1989), des capteurs permettent d'enregistrer et de suivre l'évolution des températures en différents endroits de la structure de stockage.

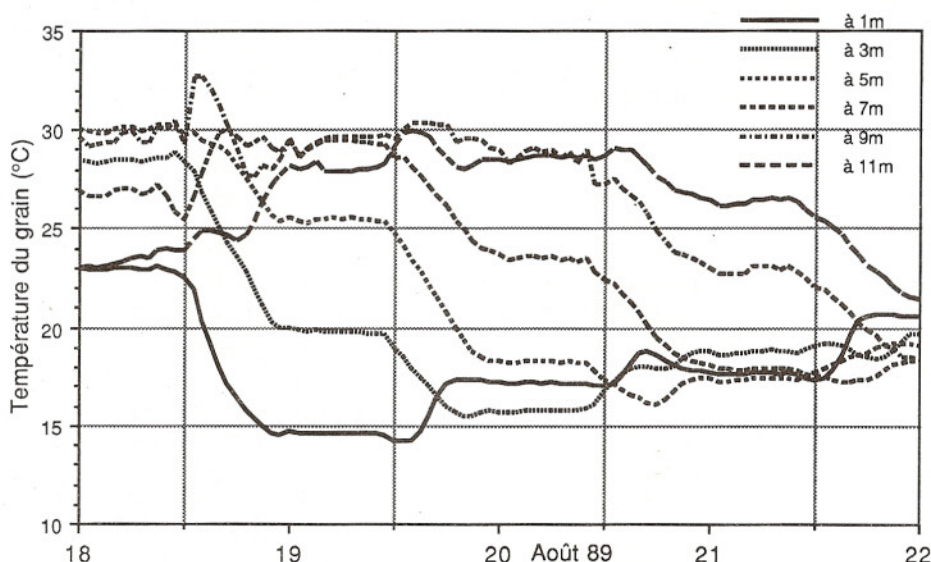


Fig. 9: Refroidissement d'un silo d'orge ($\varnothing=9,6m$; $H=13m$) par ventilation durant quatre nuits.

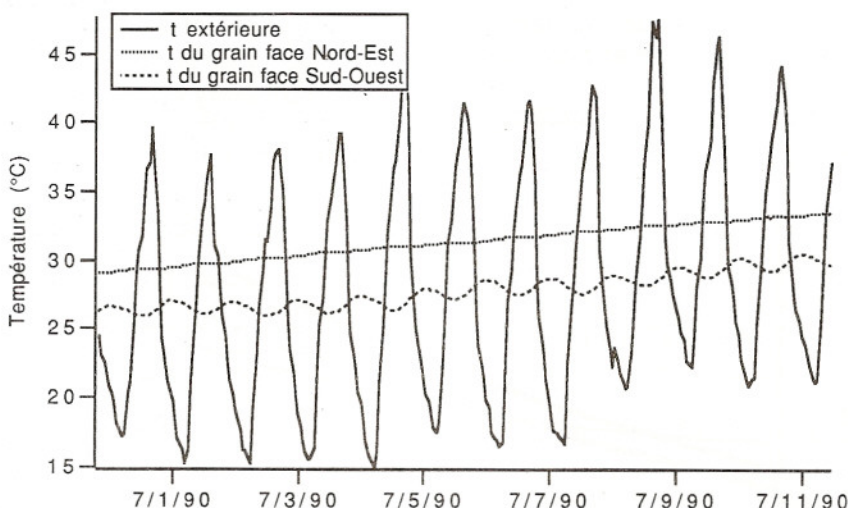


Fig. 10: Echauffement journalier dû à l'ensoleillement, enregistré par un capteur situé à 60 cm de la paroi du silo du côté Sud-Ouest, débouchant sur un échauffement général visible aussi sur les enregistrements du capteur du Nord-Est.

5. Appareillage de contrôle

L'association de systèmes d'acquisition à microprocesseur, reliés d'une part à des capteurs de température et d'autre part à un micro-ordinateur, et de logiciels de traitement appropriés offre des solutions élégantes aux gestionnaires.

Les graphes décrits ci-dessous ont été obtenus grâce à de tels systèmes.

On y trouve :

- * des capteurs de température qui sont des thermistors de type CTN (résistances à Coefficient de Température Négatif)

- * un ou deux capteurs d'humidité relative
- * un système d'acquisition à microprocesseurs permettant de :
 - * effectuer les mesures suivant un programme préétabli;
 - * enregistrer ces mesures;
 - * transmettre ces mesures vers un micro-ordinateur via la liaison RS232;
- * un micro-ordinateur pour le traitement et la présentation des mesures.

Le gestionnaire peut, en se connectant au système d'acquisition à microprocesseur :

- * obtenir les mesures actuelles
- * tracer un graphe de l'historique des mesures
- * simuler une ventilation ou un séchage.

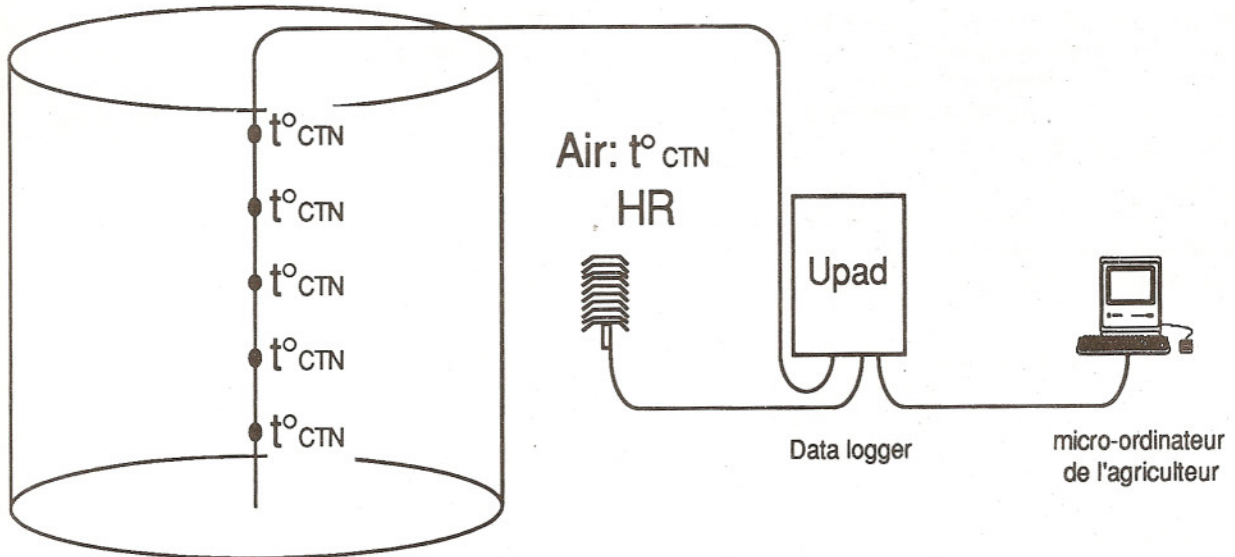


Fig. 11 : Chaîne complète de mesure formant le système de contrôle.

L'exposé intitulé « Simulation des ventilations sur micro-ordinateur présenté par Sz. Szôke et issu du même laboratoire donne plus de détails sur les prévisions de ventilation par simulation.

6. CONCLUSIONS

La céréale est un être vivant qui doit être surveillée et traitée pour garantir une bonne conservation. Le gestionnaire en tant que banquier de produits vivriers doit disposer de systèmes de contrôle de la conservation de ses stocks.

L'association des courbes de prises d'humidité d'équilibre, des courbes de conservation et du diagramme de l'air humide permet de conditionner correctement par une ventilation ou un séchage.

Ces connaissances intégrées aux techniques actuelles d'acquisition et de traitement de mesures réalisées par microprocesseurs, micro-ordinateurs et logiciels, sont des aides à la gestion indispensables.

7. Bibliographie

BARTALI. H., 1989 : Station expérimentale sur le stockage des céréales. IAV, Rabat.
BARTALI E.H., S. AFIE, E. PERSOONS, 1989 : Stockage des céréales dans des entrepôts souterrains. Céréales en Régions Chaudes : Conservation et Transformation, AUPELF-UREF, Ed. J. Libbey Eurotext, pp. 27-38.

BURE J., 1952 : La vie des grains. Compte-rendu de la Journée Préparatoire d'Etude sur le séchage. Association Générale des Producteurs de Blé et autres Céréales, Paris, pp. 15-45.

ELOIR P., 1989 : Conservation des céréales : aide à la décision. Mémoire de fin d'études, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Génie Rural.

GILLIQUET M., J.C. VERBRUGGE, 1989 : Le stockage enterré : réponse aux problèmes du Tiers-Monde. Céréales en Régions Chaudes : Conservation et Transformation, AUPELF-UREF, Ed. J. Libbey Eurotext, pp. 39-46.

HALL D.W., 1970 : Handling and storage of food grains in tropical and subtropical areas. FAO Rome. ITCF, 1986 : Le séchage des grains. ITFC-Paris.

JORIS S., 1990 : Campagne céréalière 1988 chez INTERAGRI : pratique de la ventilation en cellules industrielles. Mémoire de fin d'études, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Génie Rural.

NURET, 1952 : La ventilation du grain. Compte-rendu de la Journée Préparatoire d'Etude sur le séchage. Association Générale des Producteurs de Blé et autres Céréales, Paris, pp. 67-90.

PERSOONS E., 1987 : Séchage, calcul d'un cas pratique. Journée d'études sur la conservation des Céréales à la Ferme. Société de Génie Rural, Tihange.

PERSOONS E. ET R. AMORY, 1990 : Comment conserver des céréales en climat chaud. Journée d'études : Les petits projets agro-industriels adaptés à l'Afrique. Semaine internationale de l'agriculture. Bruxelles 15 février.

TECHNIQUE DE CONSERVATION DU PADDY PAR REFROIDISSEMENT

Antonio FINASSI *, Paolo NORIS**

* Agronome chercheur **Assistant technique
Istituto per la Meccanizzazione agricola
CNR— Strada delle Cacce, 73— 10135 TORINO
(Italia)

RESUME

On reporte les résultats de 36 cycles de refroidissement qui ont concerné environ 2400 tonnes de paddy de quatre variétés de **Oriza sativa ssp. japonica**.

Conditions moyennes du paddy à l'entrée dans le silo de refroidissement : humidité 15 %, température 33-35 °C, humidité à la fin du refroidissement : 14,5 %, température 14-15 °C.

Caractéristiques de l'air de refroidissement : à l'entrée 8-10 °C et 75-80 % de H.R., à la sortie du silo à la fin du cycle : 16 à 18 °C et 60 à 65 % de H.R.; débit spécifique 22 à 25 m³/h par mc de paddy; durée moyenne du refroidissement : 26 h environ; volume spécifique d'air insufflé 650 m³/mc de paddy. Energie électrique dépensée : 3kWh/t.

Par le refroidissement, on a obtenu une réduction de 0,5 % du teneur en humidité du paddy.

Le temps de séchage a été réduit de 15 % et le produit a été conservé pendant dix mois sans interventions ultérieures.

La température du paddy à l'intérieur des silos pendant la durée de stockage a été influencée par la température de l'air ambiant; le minimum a été atteint pendant l'hiver; ensuite, elle a touché des valeurs d'environ 15°C, 200 jours après le traitement.

Le coût du traitement, y compris l'amortissement, a été environ 4500 liras/t (20 FF) et est compensé par le poids plus grand du paddy vendu et par l'économie conséquente à la réduction du coût de séchage.

Enfin, le recours à cette technique de conservation ne comporte pas de modifications essentielles aux structures de stockage existantes.

1— INTRODUCTION

C'est essentiellement par son caractère commercial que l'agriculture moderne diffère de l'ancienne : l'agriculteur ne produit plus seulement pour consommer lui-même mais surtout pour vendre. Cette nouvelle orientation découle du besoin de disposer de moyens financiers afin d'acheter les facteurs de production (semences, engrais, etc), de rémunérer le capital investi et le travail fourni. Mais, pour obtenir des revenus satisfaisantes, l'agriculteur doit livrer des produits de qualité et être à même de contrôler l'offre.

De la qualité dépend le prix, de la disponibilité au cours du temps la capacité d'utiliser au mieux l'évolution des prix de marché en adaptant l'offre à la demande.

Par conséquent, il faut non seulement produire de la quantité et de la qualité, mais aussi la conserver de la façon la meilleure.

Le paddy est soumis, lui aussi, à ces règles fondamentales et, s'agissant d'une céréale particulière sous de nombreux aspects, il exige un stockage approprié et soigné. En effet, le paddy n'est pas une céréale comestible directement; il doit subir un traitement ultérieur (usinage) de type mécanique qui a pour but de libérer le caryopse de glumes et des glumelles et de la couche périphérique. Pendant cette opération, le riz peut se casser et former des brisures peut dépendre également des conditions de stockage et surtout de celles de séchage. Durant la période de stockage, le paddy peut être attaqué par des insectes de différentes espèces qui se nourrissent du caryopse (*Sitophilus oryzae* L., *Rhizopertha dominica* F., *Oryzaephilus surinamensis* L., *Sitotroga cerealella* Ol. etc).

Au cas où le paddy a été emmagasiné à une teneur d'humidité supérieure à 15 % et à une température dépassant 18 °C des fermentations peuvent se déclencher avec pour conséquences l'attaque de la part de champignons et donc la production de mycotoxines ou le jaunissement du caryopse (fig. 1).

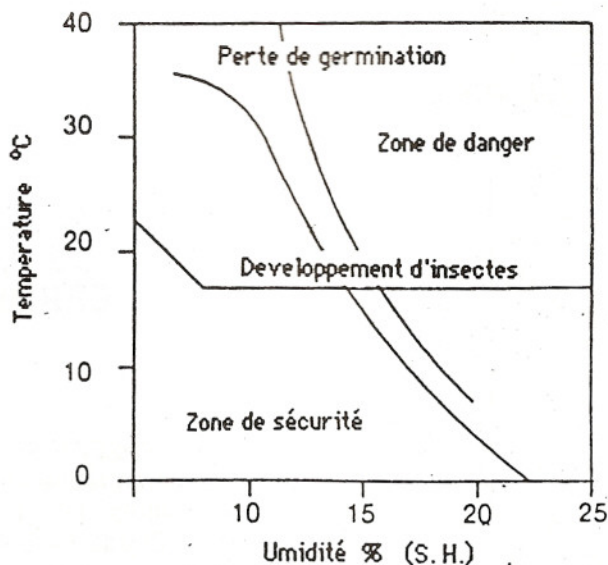


Fig. 1— Diagramme de conservation des céréales.

En définitive, alors que l'attaque des insectes provoque une réduction de la masse comestible, l'attaque de la part des champignons est cause d'une diminution de la qualité et parfois de la perte de l'utilisation alimentaire.

En règle générale, le séchage empêche le développement de champignons alors que des traitements spécifiques à l'aide de produits chimiques plus ou moins persistants bloque le développement des insectes.

2— BUTS

En Italie, c'est l'agriculteur qui sèche et stocke dans son exploitation le paddy produit. Etant donné que le séchage doit s'effectuer selon des modalités empêchant l'augmentation des brisures à l'usinage, avec pour conséquence une dépréciation, l'opération se fait lentement avec de bas rendements themiques. C'est pourquoi, il est avantageux d'interrompre le séchage lorsque la teneur d'humidité du paddy se situe autour du 15 % pour arriver ensuite, à l'aide du refroidissement à 13-14 °C, à des valeurs de teneur d'humidité autour de 14.5 %. Dans le climat de la plaine du Po, cette température permet d'éviter le traitement chimique de protection contre l'attaque des insectes pendant toute la période de stockage (fig. 2).

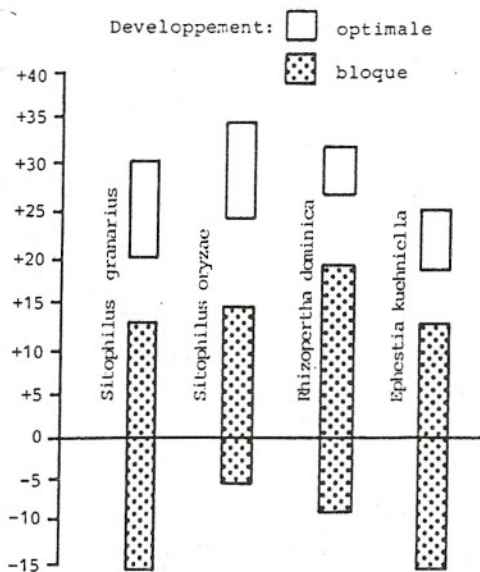


Fig. 2 - Développement des principaux insectes dans les céréales en rapport à la température (USDA)

Etant donné que l'opération de refroidissement comporte aussi une réduction d'humidité appréciable (0,5 à 1 %), la capacité d'usinage et le rendement thermique du séchoir sont sensiblement augmentés, car c'est précisément la phase finale du séchage qui exige une plus forte dépense d'énergie et qui peut déterminer l'augmentation des brisures à l'usinage. La technique du refroidissement présente donc des raisons valables aussi bien en ce qui concerne la phase de séchage que celle de stockage.

L'Institut pour la Mécanisation agricole di Turin du Conseil National des Recherches a effectué une recherche en vue de définir les paramètres de conduite optimaux et d'évaluer la validité économique de la technique du refroidissement du paddy par insufflation d'air refroidi et déshumidifié engendré par un groupe mobile.

3. METHODOLOGIE

Afin de procéder à l'échelle réelle, le groupe de refroidissement était installé dans une exploitation rizicole produisant environ 1300 tonnes de paddy qui est stocké dans une batterie de 20 silos de ciment d'une capacité moyenne de 70 tonnes, protégés par un grand hangar en maçonnerie. Les deux premiers silos ont été munis d'un diffuseur d'air et de 4 thermocouples de détection de la température et de l'humidité relative de l'air tant à l'entrée qu'à la sortie du silo. C'est dans ces deux silos que s'effectue le refroidissement à la fin duquel le paddy passe aux silos de stockage équipés de trois thermocouples qui détectent la

température à trois hauteurs différentes. Un groupe de refroidissement-conditionnement de type mobile a été utilisé (tab. 1); ce dernier est raccordé aux silos de refroidissement à l'aide d'un tuyau flexible de 300 m de diamètre (fig. 3). La température de l'air insufflé a été choisie en fonction de la courbe d'équilibre hygroscopique de système paddy-air (fig. 6) pour des valeurs d'humidité du paddy de 14,5 %. Le groupe opère à des températures comprises entre 10 et 13 °C et d'humidité relative de 75 à 80 %.

Tab. 1

- Données techniques du groupe de refroidissement (AGRISISTEM)

Model		20-35
Capacité de refroidissement	Mg/h	3-4
Air débit	m ³ /s	0.83
Air pression max	Pa	1960
Puissance réfrigérateur	W	19400
Puissance électrique		
Compresseur	W	6300
Ventilateur saturateur	W	5000
Ventilateur condensateur	W	1100
Puissance totale	W	12400
Mesures		
Longueur	mm	3500
Largeur	mm	1500
Hauteur	mm	1900
Joint tuyau	Ø m	300

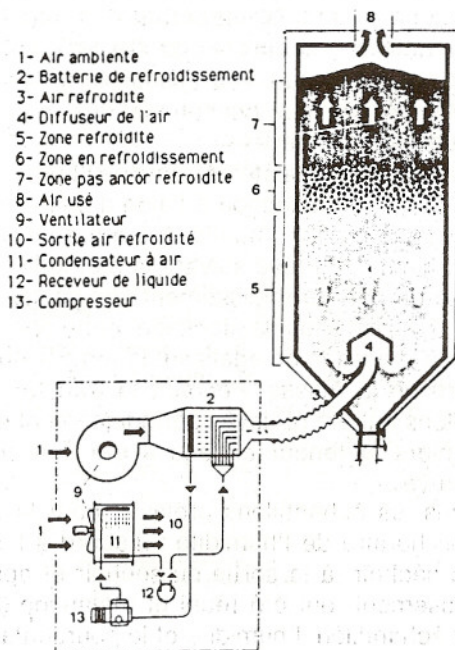
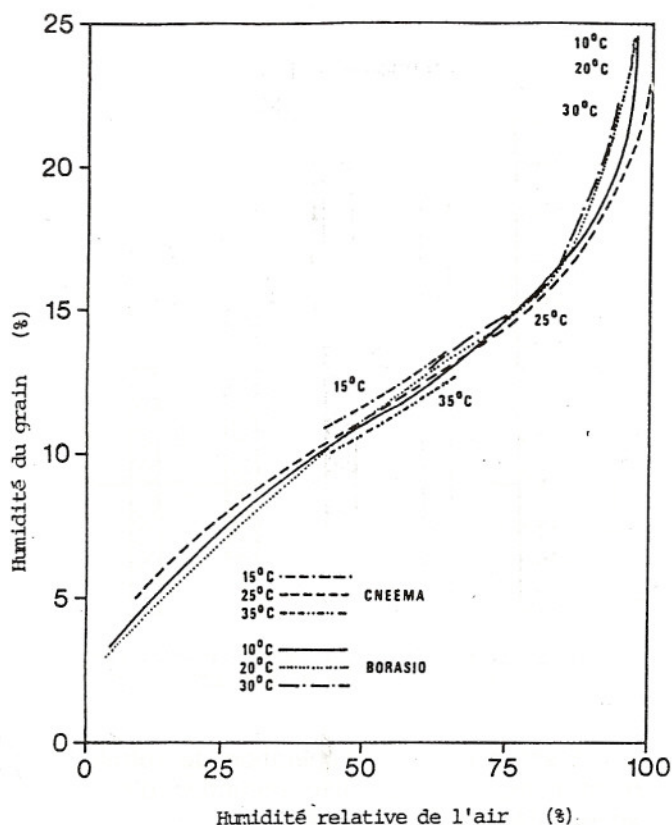


Fig. 3 - Schema de refroidissement en silo

Fig. 4 - Equilibre hygroscopique statique du riz en fonction de la température de l'air séchant (Angladette)



Le refroidissement a été interrompu lorsque la température moyenne du paddy a atteint 14 °C, valeur qui inhibe le développement des insectes. A chaque heure, il a été procédé à l'enregistrement de : la pression de l'air dans le tuyau d'amenée, la température et l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie du silo, la température du paddy à 4 hauteurs différentes dans le silo. De plus, la durée de fonctionnement du compresseur, le temps total de ventilation et les consommations d'énergie électrique ont été relevés.

A chaque heure a été déterminée l'humidité du paddy à la sortie du séchoir à l'aide d'un mesureur électronique; ensuite, l'humidité a été contrôlée à nouveau dans une étuve suivant la méthode ISO.

A la fin du refroidissement, le paddy était déplacé dans les silos de stockage, cette opération favorise le brassage en égalisant la température et l'humidité de la masse. Pendant le transfert, des échantillons ont été prélevés périodiquement et sur ces derniers la teneur en eau a été déterminée dans l'étuve.

Tous les échantillons prélevés pour la détermination horaire de l'humidité : d'abord à l'entrée dans le séchoir, à la sortie du séchoir et après le refroidissement, ont été réunis et mélangés (2 kg). Sur cet échantillon, l'humidité et le pourcentage de rendement à l'usinage ont été déterminés.

Le cycle d'exécution mis en oeuvre n'a pas entravé les opérations normales de l'exploitation.

Le schéma de travail adopté consiste dans :

- battage par moissonneuse-batteuse et transport en vrac;
- nettoyage du paddy humide (20-23 %);

- séchage dans un séchoir à colonne à zigzag à 5 passages à cycle ouvert jusqu'à atteindre 15-15, 2 % d'humidité;

- nettoyage du paddy séché;

- chargement dans le silo de refroidissement où il reste pendant 24 heures environ;

- déchargement du silo du riz refroidi et transfert dans les silos de stockage à une humidité de 14,5—14,7 % et une température de 14 °C;

- enregistrement et relevé périodique de la température du paddy à l'intérieur des silos de stockage jusqu'au moment de la vente;

- contrôle du poids et des qualités commerciales du paddy vendu.

4— RESULTATS OBTENUS

Cette expérimentation a eu lieu au cours des années 1988 et 1989 et a concerné les mois de septembre-octobre dans des conditions climatiques généralement favorables (fig. 5 a-b).

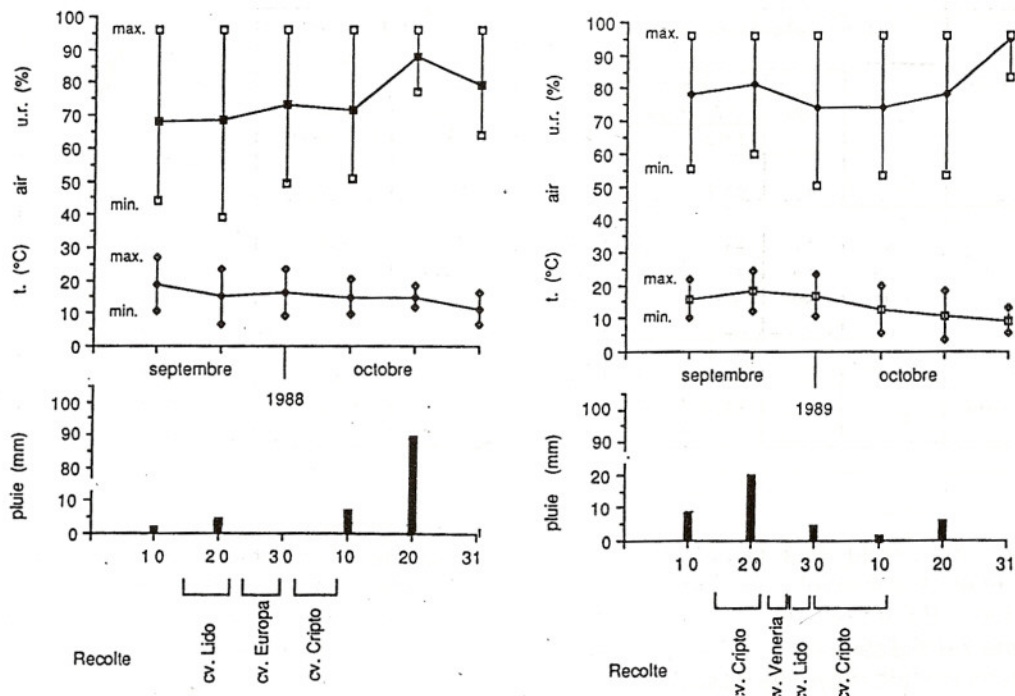


Fig. 5 - Diagramme du climat et de la période de recolte des variétés du paddy

4.1. Année 1988

Les tableaux 2-3 présente les données relatives à cette année se rapportant à 18 cycles pour un total de 1250 tonnes.

Les éléments les plus intéressants concernent l'énergie dépensée : 3 Kwh par tonne de paddy

traité, la durée du traitement : environ 26 heures et l'humidité éliminée : 0,5 % avec une consommation spécifique d'environ 1900 J/kg d'eau évaporée.

De plus, il a été intéressant de noter que le rendement à l'usinage est resté inchangé après le refroidissement.

Tab. 2 - Données des essais de refroidissement en 1988

P A D D Y								
Cultivar	Masse kg 10 ³	Cycles n°	Température		Umidité			eau évaporée kg
			avant °C	après °C	avant %	après %	reduc- tion %	
LIDO	350	5	33-36	13-15	14,55	14,06	0,49	1995
EUROPA	330	5	33-35	14-15	14,32	13,87	0,45	1733
CRIPTO	570	8	32-33	13-14	14,73	14,20	0,53	3520
Total	1250	18	-	-	-	-	-	7248
Moyenne	-	-	33,5	13,9	14,57	14,07	0,50	-

Tab. 3 - Données des essais de refroidissement en 1988

Cultivar	Air de refroidissement				Durée moyenne du cycle h	Consommation d'énergie relative au		Rendement à l'usinage	
	t. °C	U.R. %	Débit			Refroidis- sement kWh/t	Eau éaporée J/kg	avant % refroidissement	après %
			m ³ /m ³ paddy						
			Total m ³ /h	m ³					
LIDO	10	80	24,0	628	26,0	2,51	1587	57	57
EUROPA	8-10	80	26,7	780	29,2	3,51	2406	62	61
CRIPTO	10-11	80	26,4	628	23,8	2,95	1721	56	56
Total Moyenne	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			25,8	668	25,9	2,99	1904	57,9	57,6

Le paddy a été vendu dans la période comprise entre mars et août suivants, c'est-à-dire dans les 5 et 10 mois du traitement. Pendant cette période, aucune refroidissement ultérieur n'a été effectué et la température moyenne du paddy après dix mois de stockage était remontée à 17-18 °C.

Il n'y a pas eu d'attaques de la part d'insectes.

Cette première année d'expérimentation a permis de constater que : le groupe de refroidissement était bien proportionné et le système possédait une validité économique.

En particulier, l'examen du déroulement du refroidissement dans le silo, révélé par l'allure des températures relatives aux différentes hauteurs (fig. 6), montre que le débit de l'air refroidi était bien dimensionné à la capacité du groupe de séchage et que les temps de refroidissement permettaient d'éviter la formation de condensation à l'intérieur

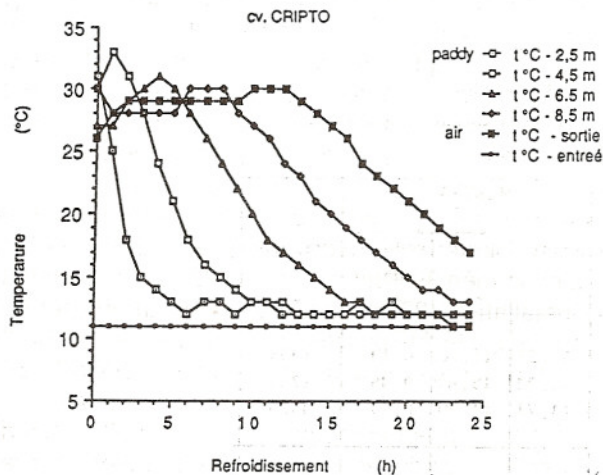


Fig. 6 - Changement de la température de l'air et du paddy pendant le refroidissement

de la masse du paddy par saturation de l'air de refroidissement, condition qui pourrait provoquer des microfissurations dans le caryopse à la suite de la réabsorption d'humidité (kunze).

Toutefois, il avait été constaté que le séchage avait été prudemment excessif et c'est pourquoi, il devait être interrompu lorsque le pourcentage d'humidité du paddy à la sortie du séchoir se situait autour de 15 %.

En conclusion, il est résulté que les potentialités de ce procédé n'avaient pas été pleinement utilisées en ce qui concerne la réduction des temps de séchage alors que le bas coût du traitement et son efficacité pour contrôler le développement des insectes et des champignons pendant les dix mois de stockage étaient confirmés.

4.2 — Année 1989

Les tableaux 4-5 représente les données relatives à cette année se rapportant à 18 cycles pour un total de 1088 tonnes.

La consommation d'énergie électrique a varié considérablement suivant les cultivars: la valeur la plus élevée (4.13 kWh/t) concerne le cultivar Veneria à cause du remplissage partiel d'un silo de refroidissement et du fonctionnement plus long du compresseur à la suite de la température ambiante plus élevée qui s'est vérifiée pendant le traitement (fig. 5b). Les deux autres cultivars Lido et Cripto ont fait enregistrer des consommations de l'ordre de 3 kWh/t. En moyenne, la consommation d'électricité était supérieure de 10 % par rapport à l'année 1988 (3.3 kWh/t); il n'a pas encore été possible de déterminer la raison de ce résultat.

Tab. 4 - Risultati delle prove di raffreddamento del 1989

P A D D Y								
Cultivar	Masse kg 10 ³	Cycles n°	Température		Umidité			eau évaporée kg
			avant °C	après °C	avant %	après %	reduc- tion %	
LIDO	165	3	31	14	15,0	14,50	0,50	965
VENERIA	155	3	34	15	14,95	14,22	0,73	1322
CRIPTO	768	12	30	14	15,23	14,68	0,55	4932
Total	1088	18	-	-	-	-	-	7219
Moyenne		-	30,7	14,1	15,15	14,58	0,57	-

Tab. 5 - Données des essais de refroidissement en 1989

Cultivar	Air de refroidissement				Durée moyenne du cycle h	Consommation d'énergie relative au.		Rendement à l'usage	
	t. °C	U.R. %	Débit			Refroidis- sement kWh/t	Eau évaporée J/kg	avant %	après refroidissement %
			m ³ /m ³ paddy Total m ³ /h	m ³					
LIDO	10-13	80	28,1	680	24,2	2,92	1797	65	66
VENERIA	10-13	80	27,7	572	23,3	4,13	1742	65	65
CRIPTO	11-13	80	24,1	565	23,4	3,24	1816	58	58
Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne			25,2	583	23,5	3,32	1786	60	60

Il est intéressant par ailleurs de noter que la consommation énergétique spécifique se rapportant à l'eau évaporée, s'élève à 1800 J/kg présentant des valeurs très semblables pour tous les cultivars expérimentés.

Pendant cette deuxième année, le séchage a été interrompu lorsque l'humidité du paddy se situait autour de 15 %, c'est-à-dire 0,5 % en plus par rapport à l'année précédente en réduisant d'environ 15 % le séjour dans le séchoir.

Il a été confirmé que la quantité d'eau éliminable avec le refroidissement est liée à la température moyenne initiale; en effet, la réduction la plus forte a été enregistrée avec le cultivar Veneria (-0,73 %), alors que pour les cultivars Lido et Cripto elle s'est réduite à 0,5 %.

Ce comportement, découlant des valeurs moyennes, est confirmé par l'examen des différents cycles qui font ressortir que la réduction mineure coïncide avec la différence la plus basse entre les températures de début et de fin de procédé.

Il s'ensuit donc que, avec les techniques de séchage actuelles adoptées et avec une différence de température d'environ 20 °C, il est possible de ne réduire l'humidité que de 0,5 à 0,8 %. Ce fait revêt une importance fondamentale en vue de déterminer l'humidité maximale admissible du paddy à l'entrée du silo de refroidissement.

En ce qui concerne le débit spécifique de refroidissement, des débits de 23-25 m³/h par m³ de paddy traité suffisent à assurer le refroidissement à 14 °C dans l'espace de 24 heures environ.

L'analyse du coût du traitement en tenant compte de : quantité de paddy traité 1200 t/an; augmentation de poids moyenne 0,5 %; énergie consommée 3 kWh/t (au pris de 220 £/Kwh); coût de l'installation (28 millions de lires); amortissement (10 ans); intérêts passifs (8 %) et entretien (3 %), le total des coûts fixes et variables correspond à 4500 lires/t.

Ce coût est compensé par le produit global de 4400 lires/t dérivant de 5 kg de paddy au prix moyen de 550 lires/kg (2750 lires/t) et par la réduction de

15 % du coût de séchage se chiffrent à 1650 livres/t (1200 livres de gas-oil et 450 livres de main-d'oeuvre). En regard du compte économique en équilibre, il faut ajouter l'économie réalisée sur le traitement de désinsectisation chimique du paddy.

Pendant la période de stockage, il a été procédé périodiquement à la détermination des températures du paddy à l'intérieur des silos à l'aide de thermocouples placés à 2,5-5 et 7,5 mètres de hauteur (fig. 7).

Les figures 8-9 et 10 récapitulent les données qui peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des silos observés.

Il est intéressant de noter que, dans les conditions d'essai :

— la température du paddy stocké a été influencée par la température ambiante et que, pendant la période hivernale donc, la température s'est abaissée en-dessous de la température initiale, sans que les interventions de refroidissement n'aient eu lieu.

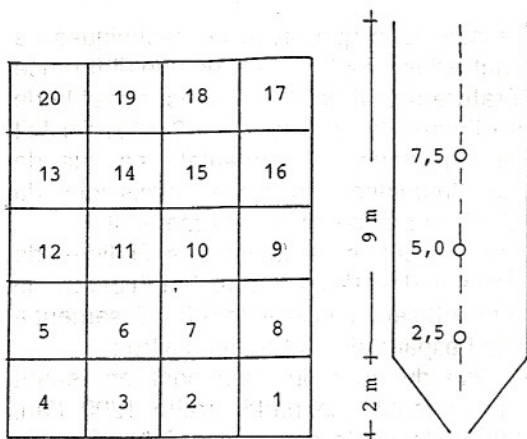


Fig. 7 - Plan du silos de stockage et de les sondes thermométriques

— Le déchargement partiel du silo provoque une augmentation sensible de la température du paddy, surtout dans la zone centrale correspondant au point de déchargement.

L'augmentation tend à atteindre des valeurs proches de celles de l'air ambiant (figure 8-9).

Par la suite, la température diminue de nouveau, mais sans toutefois atteindre les valeurs précédentes.

Par conséquent, il faut garder sous contrôle rigoureux la température du paddy, surtout lorsque le silo est vidé partiellement.

Positif s'est révélé l'effet du refroidissement sur la qualité commerciale, en interrompant le séchage lorsque la teneur d'humidité du paddy se trouve à 15 %, le rendement au riz entier à l'usage ne subit pas de réduction par rapport au potentiel maximum du riz récolté.

Le refroidissement par la suite, effectué selon les modalités décrites, n'a provoqué aucune réduction ultérieure, c'est pourquoi le rendement au riz entier est entièrement conservé.

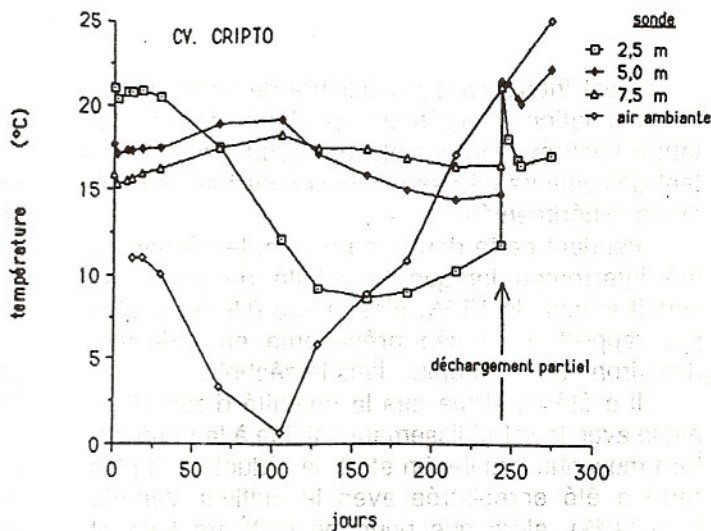


Fig. 8 - Silo n. 11

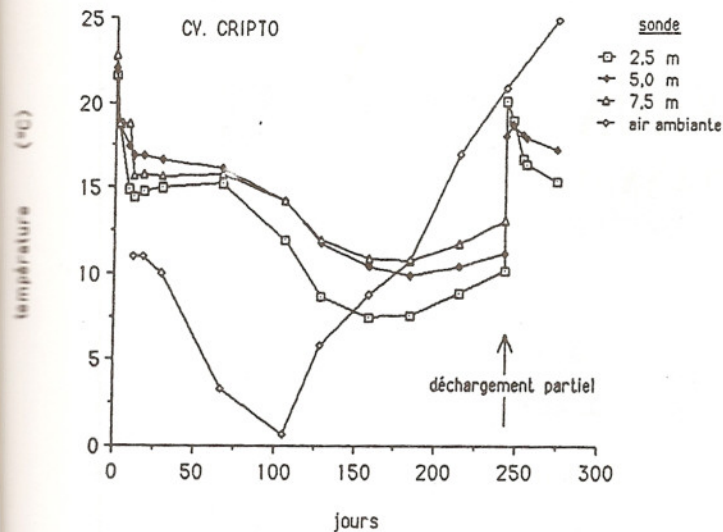


Fig. 9 - Silo n. 12

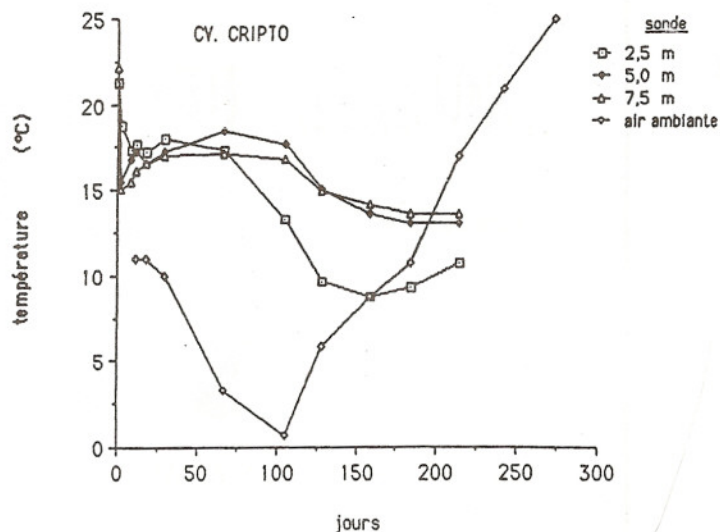


Fig. 10 - Silo n. 18

Fig. 8 - 9 - 10 - Changement de la température du paddy pendant la période de stockage.

5— CONSIDERATIONS FINALES

Le procédé de stockage par refroidissement, dans les zones rizicoles de la plaine du Po, est valable du point de vue technique. Sur le plan économique, il permet de stocker à la température de 14-16 °C le paddy, à une humidité de 14,5-14,8 %, ce qui permet une augmentation de la capacité de travail des séchoirs (+ 12-15 %) et de vendre une plus grande quantité de produit (+ 0,5 à 0,7 %) à cause de la plus forte teneur d'humidité (qui reste dans les limites admises et acceptées par le commerce). Le refroidissement empêche le développement d'insectes et de mycètes (champignons).

Par ailleurs, il existe un certain nombre de facteurs de limitation et des difficultés qui n'ont pas encore été entièrement résolues; la principale en est la mesure en temps réel et avec une approximation suffisante ($\pm 0,5$ %) de l'humidité du paddy à la sortie du séchoir. De plus, il faut procéder à un contrôle continu du procédé pendant le refroidissement et le stockage ensuite, et c'est pourquoi, il faut disposer d'un personnel formé ayant une certaine connaissance de la conduite des installations de refroidissement.

Il est nécessaire également d'équiper les silos de stockage de dispositifs de détection de la température et qui doivent être contrôlés périodiquement avec soin.

Compte tenu des conditions environnementales difficiles dans lesquelles s'effectue le stockage du paddy dans les zones tropicales, avec le danger permanent que constitue l'attaque des insectes et des champignons, la technique de stockage par refroidissement est jugée comme une application avantageuse surtout dans les grandes installations de stockage dans les rizeries ou dans les magasins des coopératives ou d'Etat.

BIBLIOGRAPHIE

- 1— ANGLADETTE A. 1962 : Le séchage du riz. Bulletin de renseignements n. 23 FAO, Roma.
- 2— CALDERWOOD D.L., COGBURN R.R., WEBB B.D. and MARCHETTI M.A. 1984 : Aeration of rough rice in long term storage. Transact. Am. Soc. Agric. Eng. 27, 1579-1585.
- 3— KUNZE O.R. 1979 : Fissuring of the rice grain after heated air drying. Transact. Am. Soc. Agric. Eng. 22, 1197-1207.
- 4— USDA 1978 : Stored-grain insects, U.S. Dep. Agric. Agric. Handbook 500, 57.
- 5— SHOVE G.C. 1973 : Low temperature drying. The university of illinois, Grain conditioning Conference Proceedings, Low temperature drying and chemical preservatives 2-7.

LA MODELISATION DE LA VENTILATION DES CEREALES SUR MICRO-ORDINATEUR

CORN VENTILATION MODELS APPLICATION ON PERSONNAL COMPUTERS

Sz. Szöke, R. Amory et E. Persoons

Unité de Génie rural - Faculté des Sciences agro-
nomiques Université Catholique de Louvain — Belgique

Recherche subventionnée par le Ministère de la
Région Wallonne pour l'Agriculture

Résumé

Le grand nombre de modèles traitant des échanges hydriques et thermiques dans un silo de céréales nous a poussé à mettre au point un programme de simulation et de séchage polyvalent. Un certain nombre de modules interchangeable sont créés de manière à pouvoir changer de modèle de calcul très facilement. L'optique « classique » du type expérimentation-modélisation-calage n'est pas suivie ici. L'idée est plutôt de suivre le chemin programmation-importation de modèles-calage-comparaison entre modèles. La même expérience sert donc au calage de tous les modèles testés. La gestion des variables nécessaire est présentée ci-dessous, ainsi que le test de deux modèles déterministes.

Summary

Numerous corn drying models have been developed in the literature. Our purpose is to create an informatic tool allowing comparisons between the results obtained by those models. Some interchangeable procedures are proposed and linked together in order to modify or the drying material side, or the algorithm side. The program is used for the adjustment of two different determinist models. The management of the involved parameters is also explained.

1. Principes généraux.

1.0 Introduction

La température et l'humidité du grain, comme celles de l'air soufflé, sont autant de données qu'il est indispensable de connaître pour pouvoir suivre l'évolution de la ventilation d'un silo de céréales.

Nous désirons profiter de l'essor spectaculaire de l'informatique pour mettre au point une méthode tout à fait générale de résolution numérique des problèmes de ventilation des céréales.

Cette méthode doit être applicable à toutes les céréales et doit également accepter tous les modèles qui se prêtent à une résolution numérique.

Le présent document se veut lisible sans difficultés majeures. Les développements mathématiques sont volontairement limités aux équilibres de masse et d'énergie et peuvent être passés sans dissoudre le fil conducteur du travail présenté.

1.1 Concepts de base

L'idée n'est pas nouvelle et a déjà été utilisée par J.C. Rouvet [1], ainsi que par P. Eloir [5], mais sous une forme simplifiée.

Elle consiste en la création de 4 modules informatiques différents qui contiennent successivement :

1) Le programme principal qui appelle les autres procédures.

2) La procédure « Froment », qui contient uniquement l'équation qui lie la température et l'humidité du produit, le froment dans ce cas, à celles de l'air en équilibre avec celui-ci.

3) La procédure « Mollier » qui contient un grand nombre de sous-procédures qui permettent de trouver, à partir de deux des entrées du diagramme de l'air humide, les deux autres entrées qui nous manquent.

Par exemple : calculer la température ($^{\circ}\text{C}$) et l'enthalpie (kJ/kg d'air sec) de l'air humide à partir de la teneur absolue en eau ($\text{kg d'eau/kg d'air sec}$) et de l'humidité relative.

4) La procédure « Calcul » qui contient l'algorithme utilisé pour étudier l'évolution de l'état du grain et de l'air dans un silo de céréales à tout moment et en tout lieu.

L'intérêt d'une telle méthode est évident :

1) Il suffit de remplacer la procédure « Froment » par une procédure équivalente « Mais » pour changer de céréale.

2) De même, une simple modification dans la procédure « Calcul » nous permet rapidement de changer de modèle. C'est ce que nous avons fait pour étudier deux modèles différents.

La programmation doit évidemment être très rigoureuse pour que les différentes procédures soient interchangeables.

1.2 Adaptabilité des modèles existants

Les modèles qui considèrent le séchage du grain sont nombreux, alors que ceux qui étudient les variations de température et d'humidité en début du séchage ou en ventilation le sont beaucoup moins.

Les modèles utilisables en résolution numérique peuvent aussi être de type stochastiques que déterministes.

Ils doivent impérativement être capables de calculer l'état de l'air et du produit à tout moment et tout endroit dans la masse de grain lors d'une ventilation avec de l'air entrant aux caractéristiques connues mais variables dans le temps.

Citons Pabis et Henderson [2] qui, en 1962, ont mis au point un modèle étudiant la température d'une mince couche de maïs, et qui se prête bien à un calcul numérique.

Les nombreux modèles qui étudient les variations de température et d'humidité du grain dans leur ensemble, en passant par exemple par une vitesse moyenne de séchage et qui ne calculent pas l'état du grain à tout moment et en tout lieux sont inadaptés.

Ces modèles gardent cependant l'avantage d'une grande simplicité et d'une possibilité de résolution sans grands moyens informatiques.

Tel est le cas des méthodes développées par exemple par M.E. Persoons [3], ou M. Bournas [4].

2. Methode

2.1 Introduction

L'application de cette méthode sera limitée dans un premier temps à un modèle se rapportant à la ventilation. Il est de type déterministe, et décompose l'évolution de la masse de grain à la fois d'une manière temporelle et spatiale.

Ce type de découpe à l'énorme avantage de permettre le calcul des différentes variables (température : t , humidité : q , etc...) à n'importe quel moment et à n'importe quelle hauteur dans un silo.

2.2 Variables générales

Les deux variables indispensables même aux modèles les plus simples sont la température (t_g) et l'humidité (q_g) du grain. Un grand nombre d'autres variables peuvent être ajoutées dans le but d'augmenter le rendu et la précision du modèle, tel que :

Pour les échanges thermiques :

- Température (s) interne (s) d'une graine.
- Température de l'air situé entre les grains.

Pour les échanges de masse :

- Humidité (s) relative (s) du grain.
- Humidité relative de l'air interstitiel.

Un certain nombre de constantes sont nécessaires :

- La vitesse de l'air, son débit massique, sa pression.
- Les dimensions géométriques du silo.
- Les caractéristiques du grain : chaleur massique, masse volumique apparente...

On le voit par ces quelques point : un modèle qui se voudrait complet devrait tenir compte d'un très grand nombre tant de variables, que de constantes. La quantité de paramètres à caler serait telle que le modèle deviendrait inapplicable.

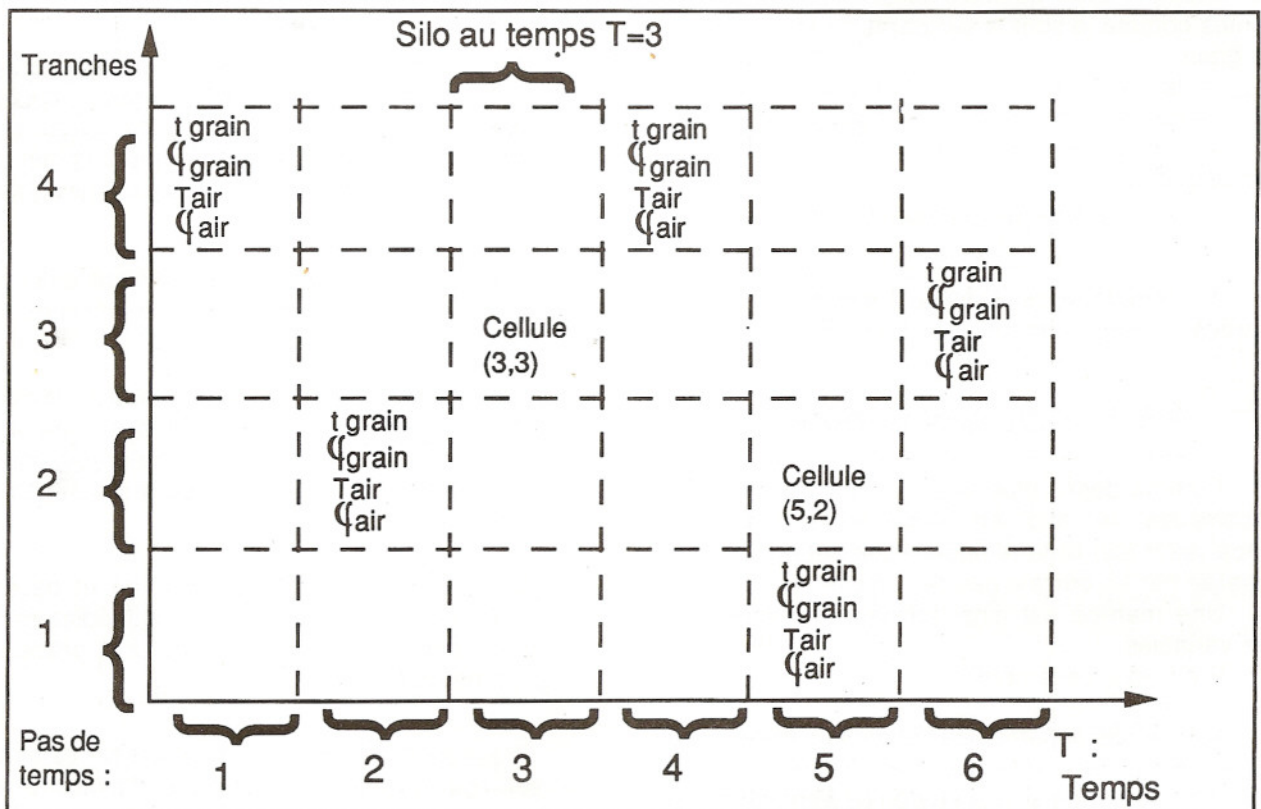
2.3 Développement

Considérons pour commencer la température du grain. Il est nécessaire de connaître cette température pour chaque hauteur dans le silo et à tout moment.

Nous allons donc décomposer le temps en une série d'étapes séparées par un certain pas de temps (ΔT).

De même, le silo va être découpé en une série de tranches superposées.

Une première matrice, c'est à dire un tableau, contiendra la température du grain. D'autres matrices, qui seront remplies par l'humidité du grain ou par d'autres variables sont également mise en place et toutes sont superposées. L'état de la cinquième tranche du grain au neuvième pas de temps, encore appelé cellule (9,5), est donc contenu par l'ensemble des éléments (9,5) des matrices successives.



Chaque cellule de ce schéma est définie par son abscisse (T), qui indique le temps, et par son ordonnée (z), qui indique sa hauteur dans le silo.

Il est évident qu'il faut autant de matrices superposées que de variables à étudier. On comprend tout de suite que l'influence du modèle étudié sur la quantité de données à gérer sera importante.

Une cellule est donc un certain volume de grains dans un état connu à un moment donné.

Un certain nombre d'algorithmes vont permettre de calculer l'état d'une cellule en fonction des états des autres cellules qui sont soit connues au départ, soit déjà calculées.

2.4 Gestion des variables

Dans un premier temps, il est possible de se limiter à deux variables : la température du grain (tg) et son humidité (qg). Les autres variables seront calculées à partir de celles-ci.

Il s'agit du modèle le plus simple que l'on puisse concevoir.

Mais pour des raisons de clarté d'écriture, 4 variables supplémentaires vont être utilisées, tout en rappelant bien qu'elles ne sont pas indépendantes comme le sont la température et l'humidité du grain :

- ta : température de l'air, en °C.
- qa : humidité relative de l'air, en %.
- xa : humidité absolue de l'air, en kg d'eau/kg d'air sec.
- ha : enthalpie de l'air humide, en KJ/kg d'air sec.

On remarque de suite qu'il s'agit des quatre entrées du diagramme de l'air humide.

2.5 Conditions initiales

Comme décrit plus haut, la méthode utilisée décompose le silo en couches successives d'épaisseur (dz) et le temps en une série d'étapes séparée par un certain pas de temps (T).

Une matrice est ainsi formée pour chacune des variables.

Prenons un exemple :

Soit un pas de temps de calcul de 5 minutes et un silo de 10 m de haut découpé en tranches de 0,2 m. Si l'on veut faire une prévision de ventilation de 24 h, il y aura 288 colonnes et 50 lignes. A titre informatif, si l'on veut utiliser sur ordinateur 6 matrices de 288 * 50 données, chacune stockée sur 4 octets, il faut 345600 octets de mémoire, rien que pour le stockage des données

Rappelons-le : chaque cellule est définie par ses coordonnées (T,z) et contient toutes les informations du volume de grain situé à la hauteur (z) au temps (T).

Une cellule est donc un certain volume de grain dans un état connu à un moment donné. Cet état est défini par les 6 variables citées plus haut :

- tg : la température du grain, en °C.
- qg : l'humidité relative du grain, en % hps.
- ta : la température de l'air sortant de la cellule, en °C.

— qa : l'humidité relative de l'air sortant de la cellule, en %.

xa : l'humidité absolue de l'air sortant, en kg d'eau/kg d'air sec.

— ha : l'enthalpie de l'air sortant, en KJ/kg d'air sec.

Il faut insister sur le fait que l'air considéré par les variables d'une cellule est l'air sortant de cette cellule. Ceci nous permet d'écrire directement la première ligne et la première colonne des matrices à calculer.

En effet si nous commençons l'indexation des matrices par l'indice 0°, la ligne contenant les cellules d'ordonnée 0° nous donne la température et l'humidité de l'air sortant des cellules (T,0°) au entrant dans les cellules (T,1), c'est à dire entrant dans le silo.

Il en va de même avec la première colonne, d'indice (0,z). Elle contient la température et l'humidité du grain au temps T = 0°.

Lorsque nous lançons une ventilation dans un silo, il est dnc possible de remplir directement la première ligne par les prévisions météorologiques et la première colonne par l'état du grain au départ de la ventilation.

Les valeurs de l'enthalpie de l'air et de son humidité absolue peuvent êtres immédiatement calculées pour cette ligne d'indice (z,0) grâce au diagramme de Mollier.

Il est évident que lorsqu'il s'agit de caler un modèle, on introduit dans la ligne d'indice 0 les caractéristiques réelles de l'air soufflé, et non plus les prévisions météorologiques.

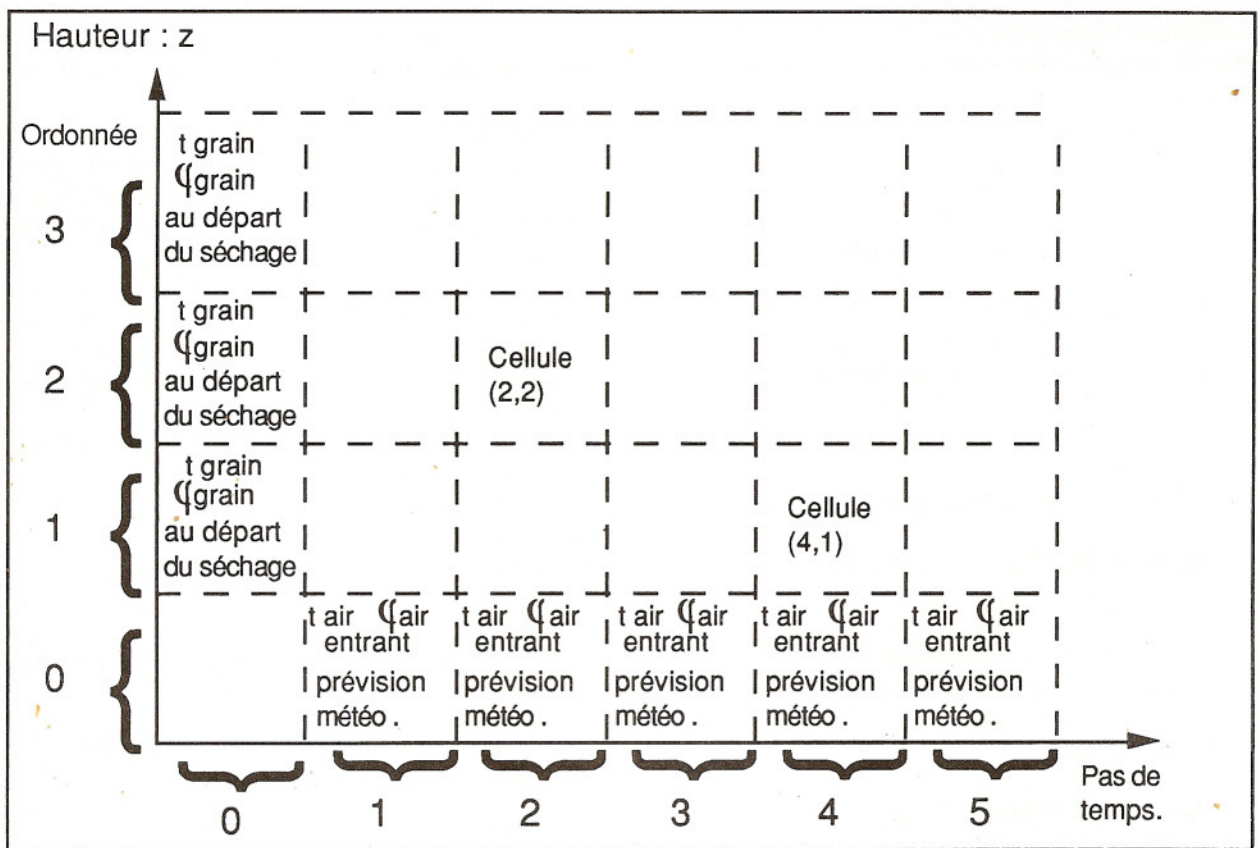


Schéma 2 : Remplissage des cellules au départ du calcul de prévision.

3. Application à un premier Modèle

3.1 Introduction

Nous venons de voir comment travaille le programme principal, combien de variables sont gérées et comment sont remplies les matrices de les soumettre au moindre calcul.

Les procédures « Froment » et « Mollier » ont été décrites en début d'exposé. Rappelons simplement que la première calcule la courbe d'équilibre entre le grain et l'air, alors que la seconde permet de nous déplacer librement dans le diagramme de Mollier.

3.2 Hypothèses

Un certain nombre d'hypothèses doivent être effectuées dans un premier temps :

1) Les tranches sont suffisamment hautes pour que l'air qui en sort soit en équilibre avec le grain qu'elle contient.

En d'autres termes :

Température de l'air = Température du grain
 $t_a(T,z) = t_g(T,z)$

(0)

2) La courbe d'équilibre t -grain, t air, a air est supposée connue et ne comporte pas d'hystérèse.

En d'autres termes :

humidité de l'air en équilibre = fonction

$(t_{\text{grain}}, a_{\text{grain}}) = f_e(t_g, g)$

$a = f_e(t_g, g)$.

(1)

C'est précisément la procédure « Froment ».

3) La masse d'eau et la température sont uniformément réparties dans une tranche à un moment donné, ce qui nous permet d'écrire :

humidité du grain = masse d'eau/masse de grain sec.

ou encore :

$Q_{\text{grain}} = M_{\text{eau}} - M_{\text{grain sec}}$

(2)

en % humidité sur poids sec, M_g étant en kg de grain sec.

3.3 La procédure « Calcul »

Le calcul est itératif.

La température du grain dans la cellule (T,z) est inconnue. On pose alors :

$t_g(T,z) = t_g(T-1,z)$

(3)

Comme la température, l'humidité du grain au temps (T) est considérée identique à celle au temps (T-1) :

$$g(T,z) = g(T-1,z) \quad (4)$$

On peut dès lors lancer les calculs de bilan d'eau, début du calcul itératif :

$$a(T,z) = fe [tg(T,z), g(T,z)] \quad (5)$$

$$Ta(T,z) = Tg(T-1,z) \quad (6)$$

$$Xa(T,z) = fm [ta(T,z), a(T,z)] \quad (7)$$

où fm est une fonction de calcul dans le diagramme de Mollier.

La variation de masse d'eau dans la cellule (T,z) est :

$$Meau = [Xa(T,z) - Xa(T,z-1)] * Mair \text{ sec} * AT \quad (8)$$

où Mair sec est le débit massique de l'air dans la tranche (ou dans le silo, ce qui revient au même), en kg d'air sec / seconde.

Et par définition :

$$Qg = Meau(T,z) = Meau(T-1,z) + Mgrain \text{ sec} - Mgrain \text{ sec} \quad (9)$$

Le bilan d'énergie donne :

$$[Mgrain \text{ sec} * CP \text{ grain sec} + Meau * CPeau] * [Tg(T-1,z)] + Meau * hv = hair(T,z) * Mair * T \quad (10)$$

où :

Mgrain sec est la masse de grain sec contenue dans la tranche, en kg.

CPgrain sec est la chaleur massique du grain sec, en kJ/kg° C.

Meau est la masse d'eau contenue dans la tranche au temps (T), en kg.

CPeau est la chaleur massique de l'eau, en KJ/kg° C.

Meau est la variation de masse d'eau ue ci-dessus.

hv est la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

hair est la variation d'enthalpie de l'air

Mair sec est le débit massique de l'air sec dans la tranche.

T est le pas de temps

D'ou l'on extrait tg (T,z) :

$$[tg(T,z)] = tg(T-1,z) + [hair(T,z) * Mair \text{ sec} * T] - [Meau * hv] \\ Mgrain \text{ sec} * Cpgrain + Meau * CPeau \quad (11)$$

La température de l'air étant supposée égale à celle du grain, ces deux températures sont donc connues et réintroduites en (5).

Après un certain nombre d'itérations, nombre qui dépend de la variation de tg (T,z) et de g entre deux calculs successifs, on passe à la cellule située directement au dessus de celle qui vient d'être traitée, et ainsi de suite.

Un test conditionnel est introduit pour arrêter le calcul itératif en cas de perte de convergence.

Quand on en a terminé avec toutes les tranches du silo au temps (T), on l'augmente du pas de temps.

(T) et on recommence de bas en haut à calculer chaque tranche.

On le voit tout de suite : le modèle présenté ici frappe par sa simplicité et ne fait appel à aucun développement mathématique fastidieux.

4. Expérimentation et calage du modèle.

4.1 Expérimentation.

Nous allons essayer de valider le modèle sur une ventilation réalisée en novembre 1988. Voici quelques caractéristiques de cet essai :

Silo : — métallique cylindrique abrité dans un bâtiment.

Diamètre : — 6.23 m.

Hauteur : — 8.5 m.

Soit environ 170 à 200 tonnes de froment.

Contenu : — froment.

Humidité hph : — 15 %.

Température : — de 13 à 15° 5

Ventilateur : — centrifuge de 9.05 kW.

Débit d'air : — 2.4 kg/seconde.

Mesures : — 7 capteurs de température de 1 à 7 m dans le grain.

— 1 capteur de température extérieure.

— 1 capteur d'humidité extérieure.

— 1 capteur de température dans les conduites d'air soufflé.

Pas de temps de mesure : — 30 minutes.

Durée de l'essai : — 113 heures

Autres mesures : — Energie électrique consommée.

— Intensité du courant alimentant le moteur.

Nous émettons immédiatement des réserves quand à la fiabilité des mesures d'humidité relative et dans une moindre mesure de débit d'air, très délicates dans le milieu agricole.

Nous ne reprenons ci-dessous que les valeurs de température des capteurs placés à 1, 3, 5 et 7 mètres de hauteur dans le but de ne pas surcharger inutilement les graphiques.

Mais avant de confronter le résultat des simulations avec les mesures prises dans la réalité, nous allons nous pencher sur deux problèmes propres à ce type de modèle.

4.2 Influence de la découpe temporelle.

La première question que l'on se pose est bien sûr la suivante :

Quelle est l'influence du pas de temps et de la hauteur d'une tranche de grain sur le résultat.

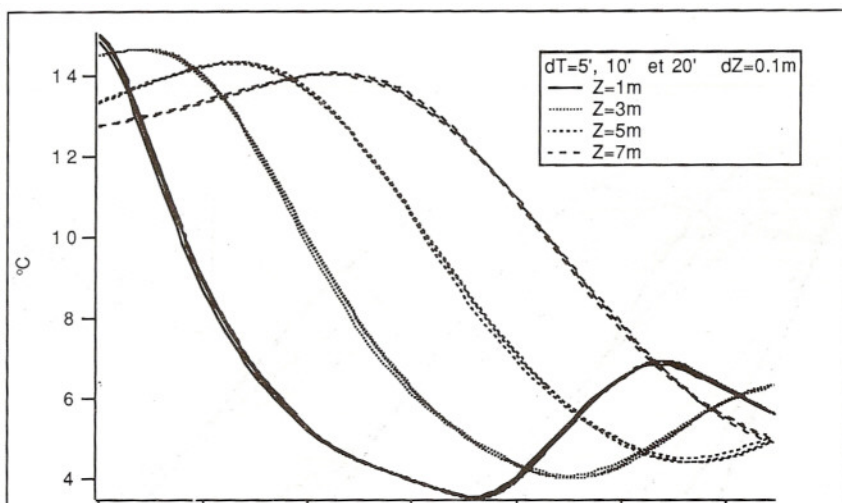
En ce qui concerne le pas de temps, on s'attend à ce que sa diminution augmente la précision de la simulation car de petites variations de température de l'air soufflé vont être prises en

compte. Il est cependant évident qu'un pas de temps très petit n'influencera plus le résultat.

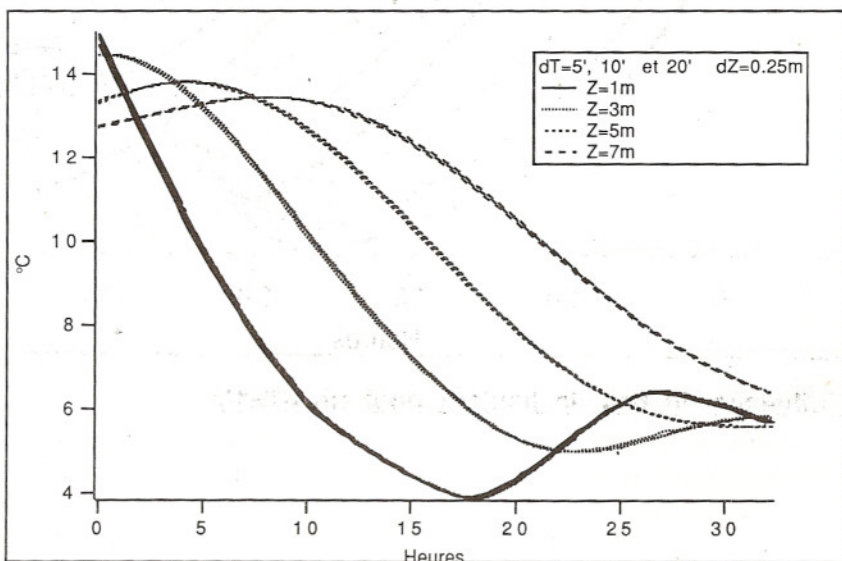
Sa valeur dépendra également de la vitesse du changement de température observé dans le grain, c'est-à-dire de la première dérivée des courbes de température par rapport au temps.

En pratique, on observe que la valeur du pas de temps n'influence que très peu la simulation.

Les deux graphes suivants nous donnent la température calculée à 1, 3, 5 et 7 mètres pour des pas de temps de 5, 10 et 20 minutes. Les pas de hauteur sont de 0.1 et 0.25 mètre respectivement pour les graphes n° 1 et n° 2.



Graph 1 : Influence du pas de temps pour un dz=0.1 m.



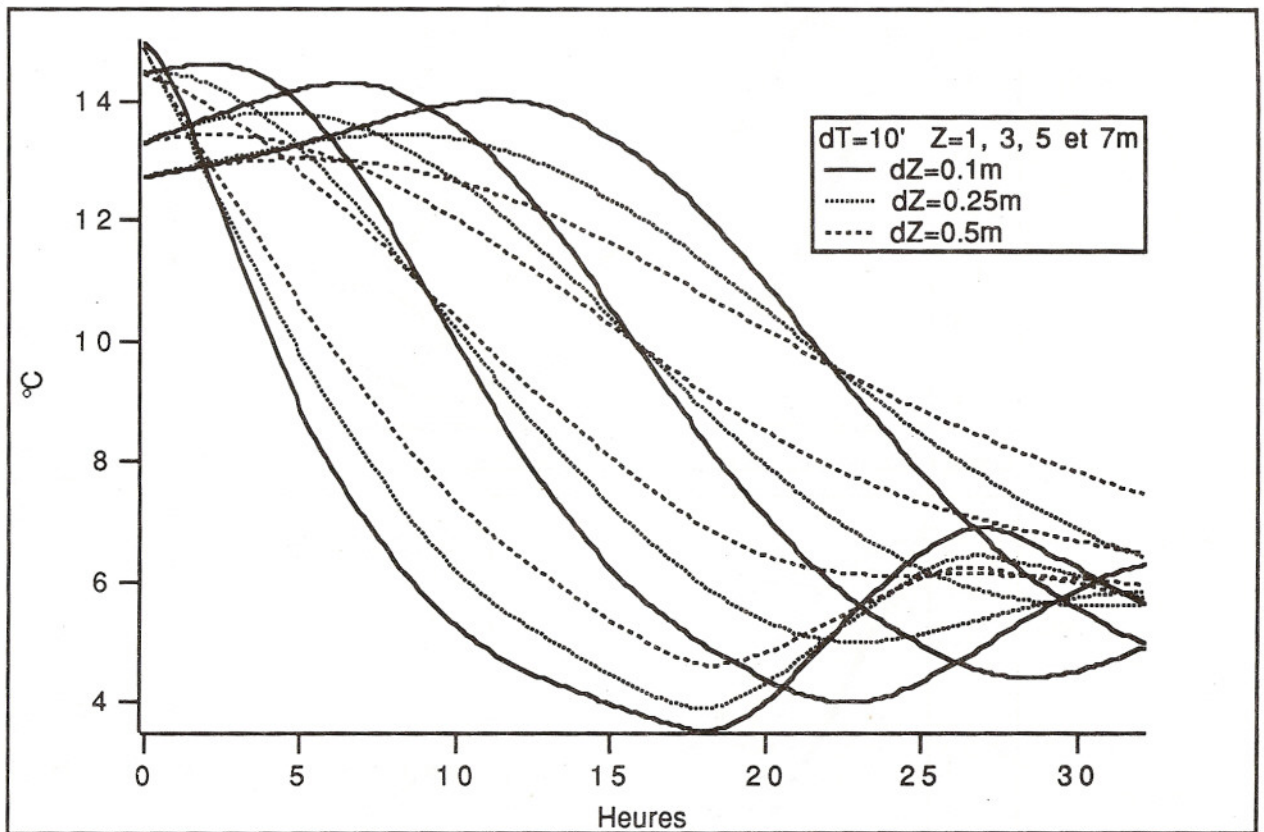
Graph 2 : Influence du pas de temps pour un dz=0.25 m.

4.2.1 Discussion

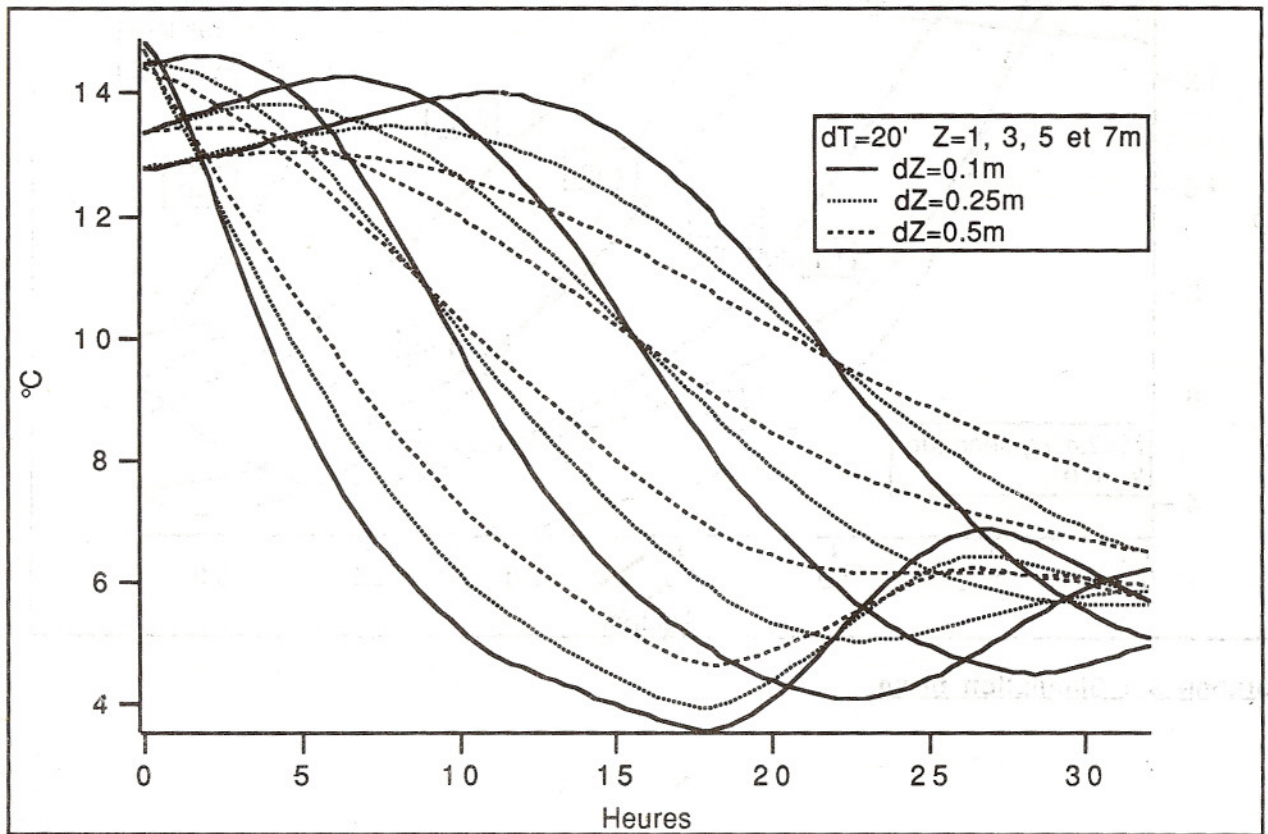
L'influence du pas de temps est inférieure à la précision des capteurs de température. Nous avons donc tout intérêt à utiliser le plus grand pas de temps possible pour diminuer le nombre de calculs à réaliser. Le pas de temps de calcul reste cependant inférieur au pas de mesure, ceci à la fois pour des raisons informatiques et pour prendre en compte toutes les variations de température mesurées dans l'air soufflé.

4.3 Influence de la découpe spatiale.

On observe que la hauteur d'une tranche de grain influence directement le résultat de la simulation. Les deux graphes suivants le montrent à suffisance. Ils donnent la température du grain calculée à 1, 3, 5 et 7 mètres pour des pas de hauteur de 0.1, 0.25 et 0.5 mètres. Le problème reste identique pour des pas de temps de 10 et de 20 minutes respectivement pour les graphes n° 3 et n° 4.



Graph 3 : Influence du pas de hauteur pour un dT=10'.



Graph 4 : Influence du pas de hauteur pour un $dT=20'$.

4.3.1 Discussion

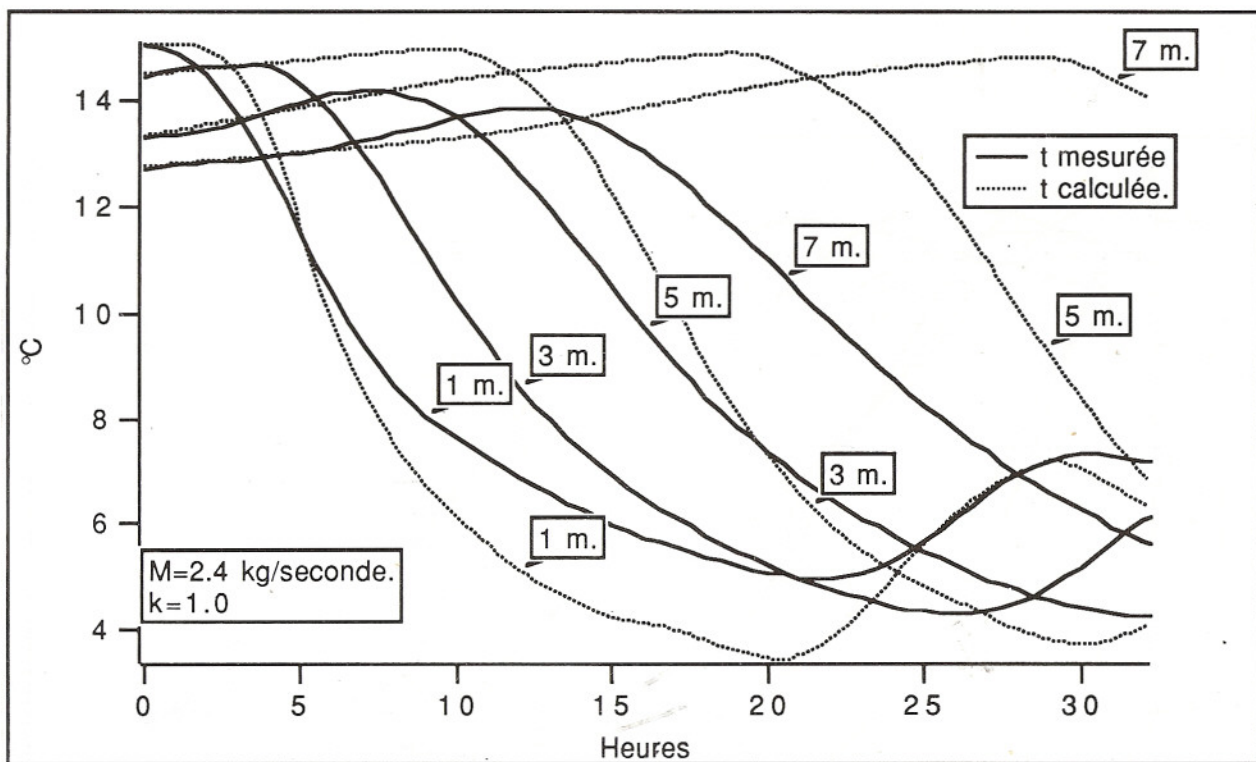
L'objectif est de se défaire de cette dépendance en modifiant le modèle présenté.

Pour chaque hauteur donnée, il apparaît un point absolument remarquable qui est l'intersection commune des trois courbes. Ce point correspond exactement au point d'inflexion. En ceci nous rejoignons l'avis de M. Bournas (4) qui utilise la pente au point d'inflexion pour caler son modèle. Notre approche est toutefois totalement différente

vu que nous nous cantonnons dans des considérations purement thermodynamiques, sans faire intervenir explicitement un coefficient de conductivité thermique.

4.4 Le facteur de débit:

Le graphe n° 5 donne la comparaison entre les courbes calculées et mesurées. Le pas de temps choisi est de 10 minutes, celui de hauteur de 0.1 mètre. Ces valeurs ont été choisies suffisamment petites pour permettre un calage fin du modèle.



Graphe 5 : Simulation brute.

4.4.1 Discussion.

Le résultat est très décevant. L'application thermodynamique telle qu'expliquée plus haut ne permet pas de prévoir les variations de température d'une masse de froment.

Ceci est dû, comme dans le cas de beaucoup d'autres modèles, aux simplifications outrancières réalisées dès le départ.

Le plus troublant dans ce résultat est que la température évolue beaucoup plus vite en réalité qu'en simulation. Qu'il y ait des freins aux échanges thermiques et hydriques paraît normal, mais que la prévision soit trop lente est pour le moins inattendu.

Un premier paramètre va être ajouté à ce modèle dans le but d'accélérer les échanges.

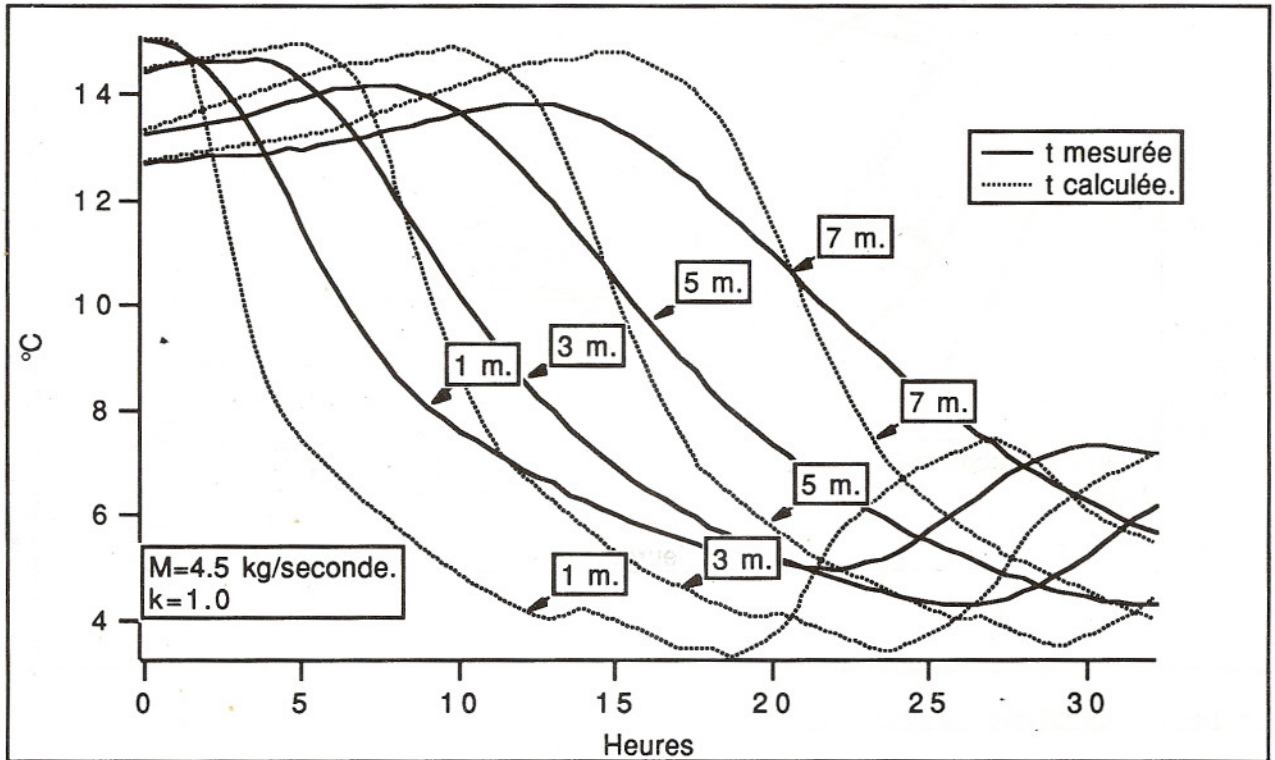
Il suffit pour cela de multiplier le débit par un facteur de débit F.

4.5 Le facteur d'équilibre.

Le graphe ci-dessous donne la simulation calculée avec un débit multiplié par un facteur de débit F valant 1.875.

4.5 Le facteur d'équilibre.

Le graphe ci-dessous donne la simulation calculée avec un débit multiplié par un facteur de débit F valant 1.875.



Graph 6 : Le facteur de débit.

4.5.1 Discussion.

Les courbes calculées sont maintenant plus proches des valeurs mesurées.

Leur pente est cependant trop forte.

L'explication en est simple :

L'épaisseur de la couche de grain a une influence sur l'état d'équilibre de l'air sortant d'une couche. En effet, l'air traversant une couche très mince de grain ne sortira pas en équilibre avec ce grain comme le veut l'hypothèse n° 1, mais seulement à un état intermédiaire entre son état initial et son état d'équilibre avec la céréale.

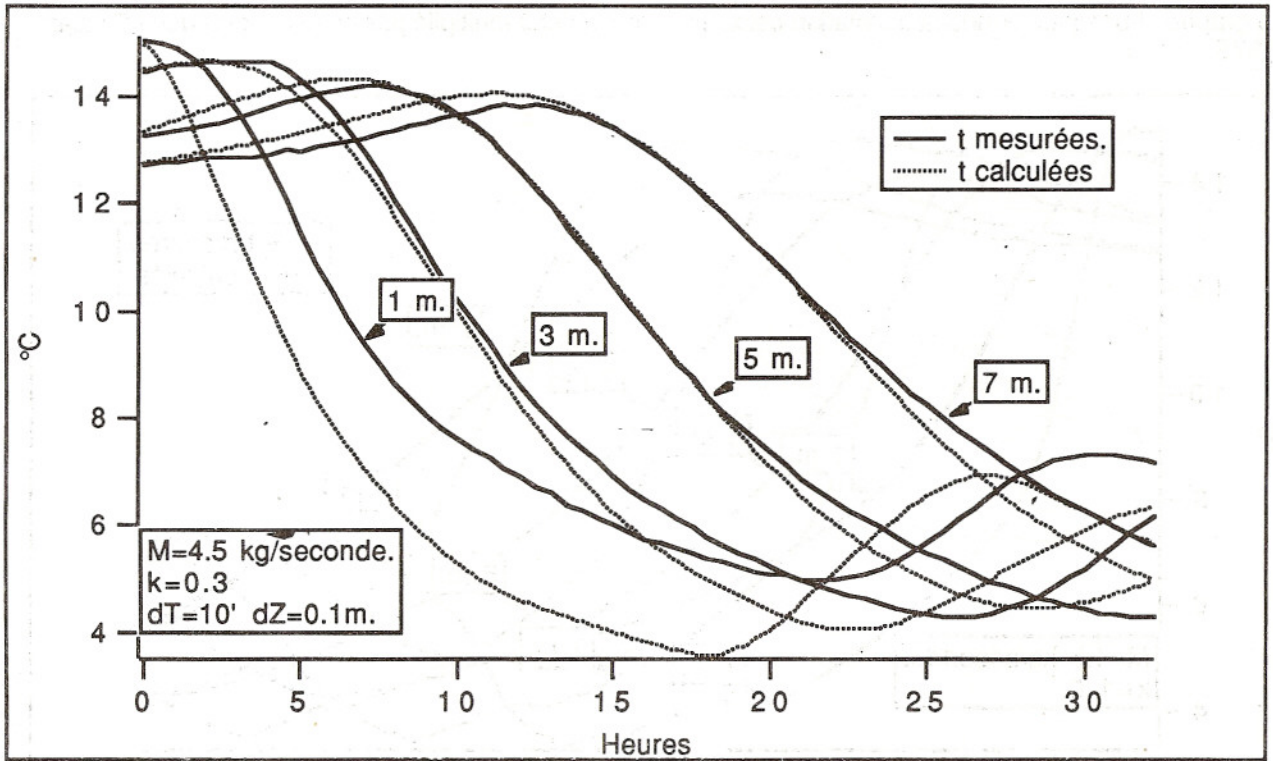
Afin d'introduire cette notion, un deuxième paramètre appelé **facteur d'équilibre** est ajouté au modèle et représente la fraction du chemin parcouru par l'air dans une couche de grain.

S'il rentre à un état 1 et sort à un état 2 à mi-chemin entre cet état 1 et l'état d'équilibre avec le grain, le coefficient d'équilibre vaudra 0.5. De même, un facteur d'équilibre de 1.0 signifie que l'air sort bien en équilibre avec le grain.

Ce coefficient intervient à la fois pour la température et pour l'humidité relative de l'air. Ceci est nécessaire vu qu'il faut au minimum deux variables pour définir un air humide sur le diagramme de Mollier. Il sera peut-être nécessaire ultérieurement de doubler ce coefficient en deux : un pour la température et un autre pour l'humidité relative.

Ce facteur d'équilibre sera d'autant plus proche de 1.0 que les couches de grain seront épaisses. C'est bien ce que nous allons observer d'ici peu.

Le graphe ci-dessous donne la simulation calculée avec un facteur d'équilibre de 0.3. Le facteur de débit reste calé à 1.875 pour cette ventilation.

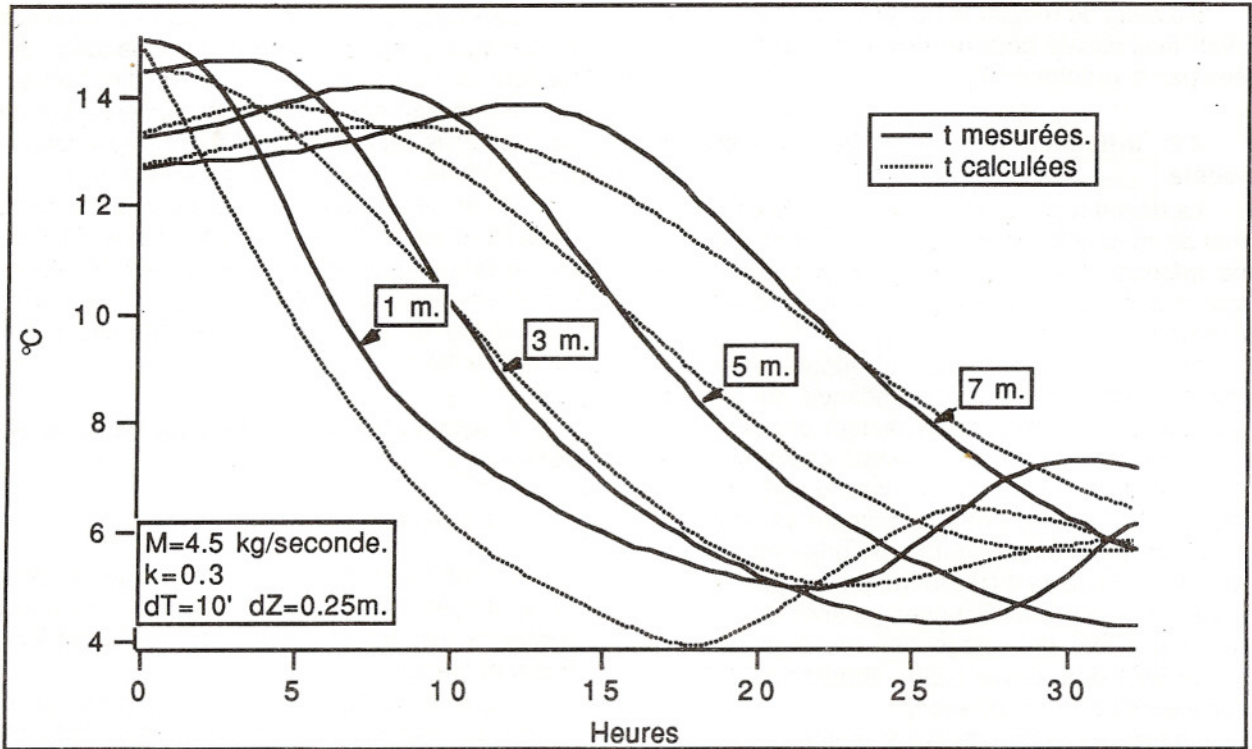


Graphe 7 : Le facteur d'équilibre.

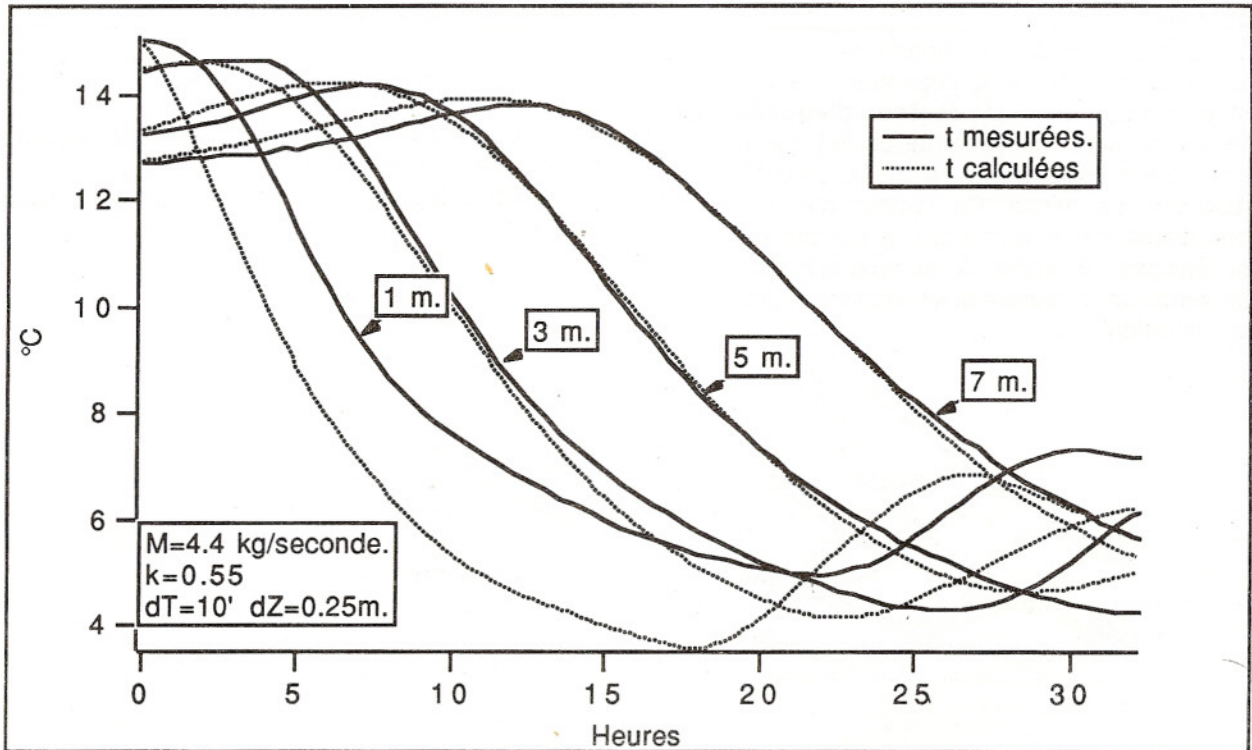
Ce premier calage rapide est réalisé avec un pas de hauteur fixé à 0.1 mètre et un facteur d'équilibre de 0.3. Rappelons-le, ceci signifie que le grain a parcouru 30 % du chemin séparant son propre état d'entrée dans une cellule et l'équilibre avec le grain de cette cellule.

La simulation suivante (graphe 8) se fait avec une tranche d'épaisseur 0.25 mètre.

C'est ce que nous donne le graphe suivant.



Grphe 8 : Essai avec une tranche épaisse.



Grphe 9 : Calage avec une tranche épaisse.

Il a suffi de recalculer le facteur d'équilibre à une valeur plus élevée pour retrouver les courbes données par le graphe n° 7.

4.6. Influence des deux facteurs sur le modèle.

La découpe du silo en tranches et le calcul de l'état de chaque tranche par petits pas de temps est une méthode très intéressante pour peu que les algorithmes de calcul se prêtent à ce genre de décomposition.

Le plus gros problème qui apparaît avec ce type de méthode est la dépendance du résultat avec les pas de temps et de hauteur choisis.

La grandeur du pas de temps choisi pour les calculs est sans importance dans une très large mesure. S'il est très petit, la moindre variation de température dans l'air soufflé est prise en compte mais le calcul devient très lourd. S'il est plus grand, un certain nombre de données ne sont plus prises en compte lors du calage des modèles mais la vitesse de calcul devient plus abordable pour les ordinateurs de faible puissance.

Le modèle ne colle bien à la réalité que si on lui ajoute un **facteur de débit** qui accélère la vitesse des échanges thermiques. Ce facteur transforme le modèle, déterministe jusqu'ici en un modèle hybride. Tout espoir n'est cependant pas perdu de revenir prochainement à un modèle purement déterministe.

L'air ne sort d'une tranche de grain en équilibre avec celui-ci que si l'épaisseur de la tranche est très importante. Un **facteur d'équilibre** doit être ajouté pour tenir compte du fait que l'air n'a pas le temps de se mettre en équilibre avec le grain d'une couche mince. Ce facteur d'équilibre est donc d'autant plus grand que la couche traversée est épaisse. Il arrive à compenser totalement l'influence de la hauteur des tranches de grain prise pour le calcul.

Le point d'inflexion des courbes simulées à l'étonnante propriété de n'être dépendant de la hauteur des tranches, ni du facteur d'équilibre.

Il apparaît dès lors que la meilleure méthode pour caler le facteur de débit soit de ramener les points d'inflexion sur les courbes mesurées.

Il est nécessaire ensuite de caler le facteur d'équilibre par une méthode statistique classique : minimisation de la somme des carrés des erreurs, éventuellement pondérés pour aggraver les erreurs les plus graves, c'est-à-dire celles proches du début de la simulation.

5. Application au modèle de Pabis et Henderson.

5.1 Introduction.

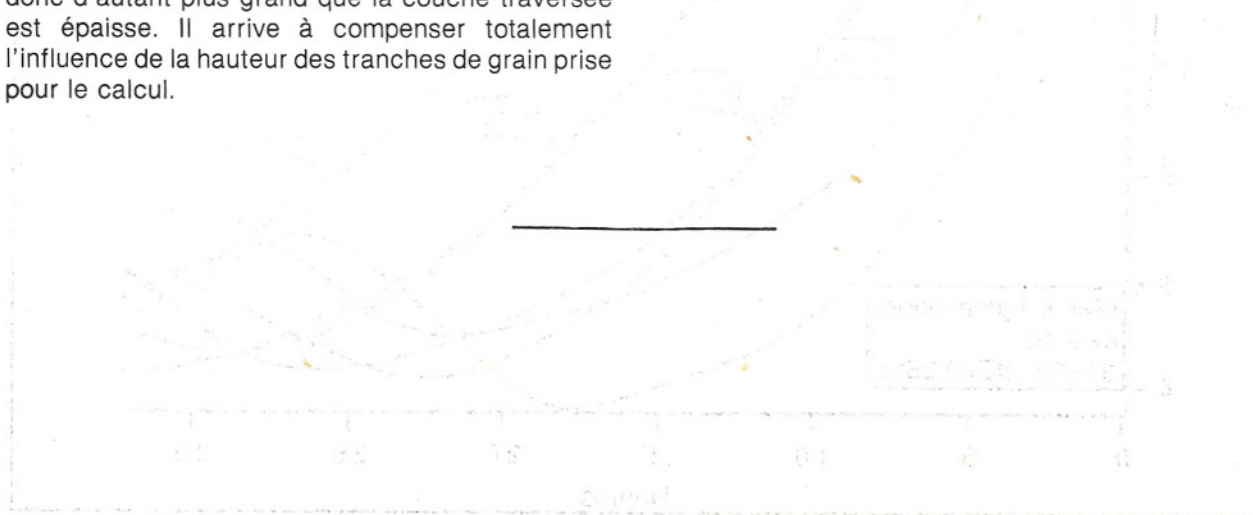
La méthode informatique expliquée ci-dessus et appliquée à un premier modèle thermodynamique va maintenant être testée sur le modèle de Pabis et Henderson (2).

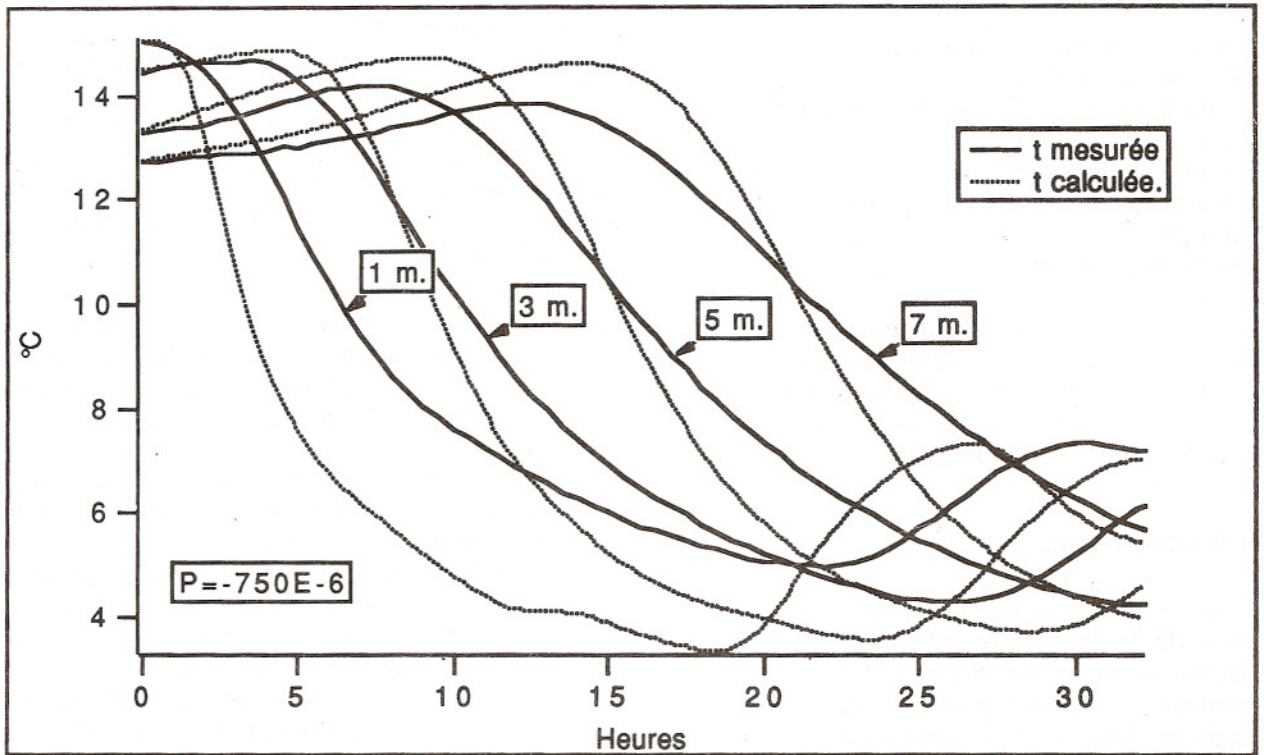
Nous renvoyons le lecteur à la bibliographie en ce qui concerne les développements mathématiques qui gèrent ce modèle. Notons simplement que son application à une résolution numérique est très aisée. Nous avons pris le modèle restreint, c'est-à-dire sans tenir compte de changements dans la teneur en eau du grain; ce qui était bien le cas lors de l'essai utilisé ici.

5.2 Application du modèle.

Le test est fait sur l'épisode de ventilation décrit par le paragraphe 4.1.

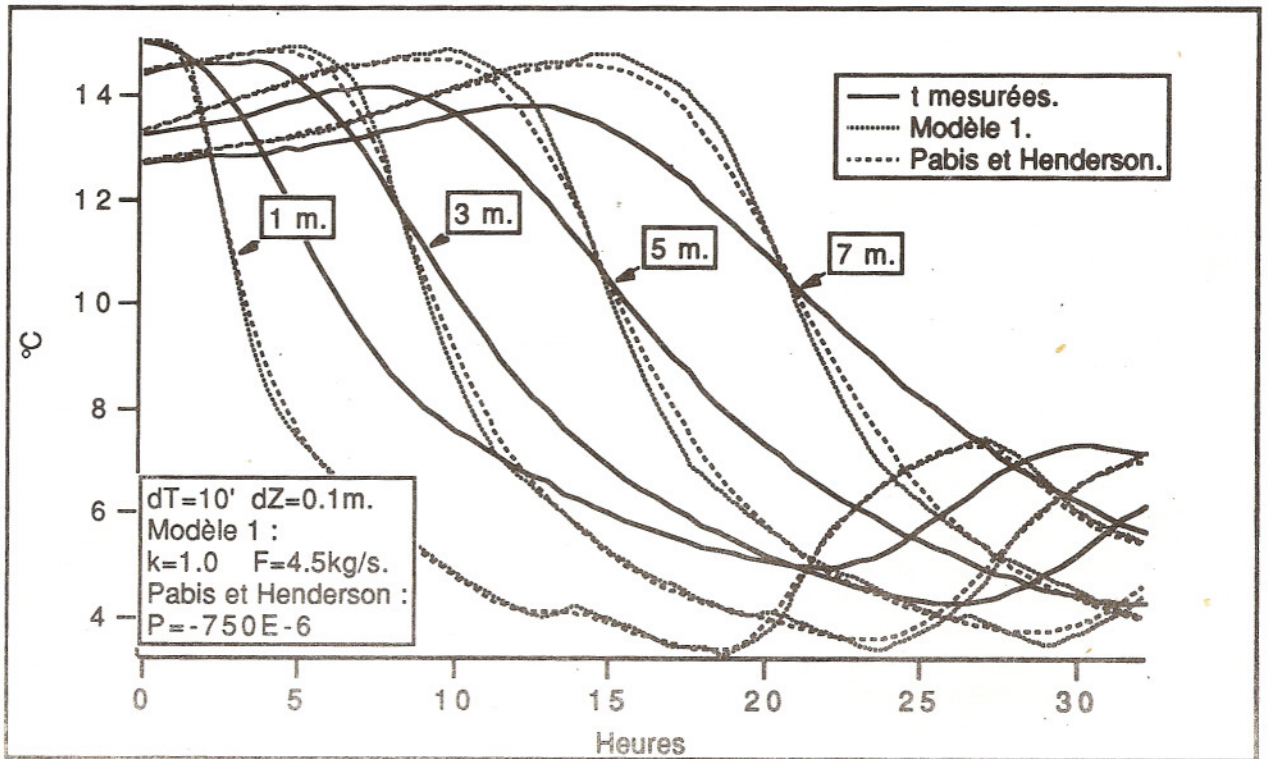
Un calage de ce modèle a donné le graphe suivant :





Graph 10 : Pabis et Henderson.

La comparaison avec le modèle précédent est intéressante.



Graph 11 : Pabis et Henderson face au modèle 1.

5.3. Comparaison des simulations.

Il est surprenant de remarquer que les deux modèles correspondent à merveille pour toutes les hauteurs. Ceci confirme un doute existant depuis le début des essais concernant une non-homogénéité importante du grain à la base du silo. En effet, il n'a pas été possible de caler les modèles en tenant compte de la courbe de température prise à 1 mètre de hauteur car l'essai a été effectué sur un silo d'environ 200 tonnes. Il est très difficile d'obtenir une telle quantité de grain parfaitement homogène. Il n'est pas possible, dans l'état actuel des essais effectués, de conclure que les deux modèles testés sont inadaptés de la même manière pour de faibles hauteurs de grain.

6. Conclusion.

Le développement de l'informatique à tous les niveaux de la recherche scientifique permet de considérer sous un nouvel angle un grand nombre de modèles ayant été mis au point depuis de nombreuses années. Certains d'entre-eux prennent un nouveau souffle car ils s'adaptent particulièrement bien à des résolutions numériques. D'autres, par contre, font preuve d'une grande efficacité en calcul manuel mais perdent tout intérêt une fois appliqués sur ordinateur.

L'avenir dans la recherche sur le séchage sera une confrontation informalisée, et donc rapide, des modèles existants pour déceler ceux qui méritent d'être améliorés.

Le tout est de disposer d'un outil informatique qui manipule les modèles avec facilité et qui permette de les mettre à l'épreuve en les testant sur une banque de donnée d'essais de ventilations ou de séchages.

7. Bibliographie.

(1) ROUVET J.-C., 1976 : Caractéristiques et simulations du transfert d'humidité dans le froment. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Génie rural.

(2) PABIS S. ET HENDERSON S.M., Grain drying theory. III The air grain temperature relationship, JAER 1962, vol 7, n° 1.

(3) PERSOONS E., 1969 : Etude du séchage du froment en couches épaisses. Thèse de doctorat. Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Génie rural.

(4) BOURNAS L. 1973 : Etude mathématique du refroidissement par ventilation d'une cellule de grain, CNEEMA, BI n° 189.

(5) ELOIR P., 1989 : Conservation des céréales : aide à la décision. Mémoire de fin d'études. Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Génie Rural.