



National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Canadian Theses Service    Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada  
K1A 0N4

## NOTICE

The quality of this microform is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Reproduction in full or in part of this microform is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30, and subsequent amendments.

## AVIS

La qualité de cette microforme dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

La reproduction, même partielle, de cette microforme est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30, et ses amendements subséquents.

**Analyse de la susceptibilité de sept cultivars de maïs aux attaques  
du Grand Capucin, *Prostephanus truncatus*, Horn.  
(Coleoptera:Bostrichidae).**

par .

**CONILH DE BEYSSAC Bernard**

**Thèse  
présentée à l'Université d'Ottawa  
pour l'obtention du diplôme  
de maîtrise ès Science  
en Biologie**

**Faculté des Sciences. Département de Biologie  
Université d'Ottawa**



Bernard Conilh de Beyssac, Ottawa, Canada, 1991



National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Canadian Theses Service    Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada  
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-68075-X

Canada



UNIVERSITÉ D'OTTAWA  
UNIVERSITY OF OTTAWA

A la mémoire de ma mère, Odette,

à Jacqueline, Gabrielle et Alexandra  
à mon père Dagot et à Edith.

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
1/ Les problèmes post-récoltes	1
2/ Le grain de maïs	4
3/ <i>Prostephanus truncatus</i> , sa biologie et son control	7
4/ Hypothèses et objectifs de cette recherche	14
MATERIELS ET METHODES	16
A/ CARACTERISTIQUES DES CULTIVARS DE MAIS	16
1/ Caractéristiques anatomiques et physiques du grain	16
2/ Caractéristiques biochimiques des grains de maïs	20
B/ <i>PROSTEPHANUS TRUNCATUS</i> , SON POUVOIR DESTRUCTEUR ET SON DEVELOPPEMENT	23
1/ Culture-mère	23
2/ Tests sans choix	24
3/ Taux de ponte	26

4/ Tests avec choix	26
5/ Analyses statistiques	28
<b>RESULTATS</b>	<b>29</b>
<b>A/ LES GRAINS DE MAIS ET LEUR VARIABILITE</b>	<b>29</b>
1/ Différences physiques et anatomiques	29
2/ Différences biochimiques	33
3/ Corrélations entre les caractéristiques des grains et classification des cultivars	38
<b>B/ PERFORMANCES DE <i>PROSTEPHANUS TRUNCATUS</i> SUR LES DIFFERENTS CULTIVARS</b>	<b>45</b>
1/ Transformations mécaniques des grains de maïs	45
2/ Physiologie et développement de l'insecte	47
3/ Etudes de corrélations et de comparaisons	47
4/ Corrélations entre les caractéristiques des grains et les performances de <i>Prostephanus truncatus</i>	52
5/ Régressions multiples	57

DISCUSSION	60
1/ Propriétés bio-physico-chimiques des grains	61
2/ <i>Prostephanus truncatus</i> et ses potentiels destructeur et reproducteur	85
3/ Effets des différentes caractéristiques des grains de maïs sur <i>Prostephanus truncatus</i>	88
4/ Proposition d'un modèle éco-physiologique pour la résistance des grains de maïs aux attaques de <i>Prostephanus truncatus</i>	107
CONCLUSION	119
BIBLIOGRAPHIE	120

### FIGURES

1. Coupe longitudinale d'un caryopse de maïs.	5
2. Larve, pupa et adulte de <i>Prostephanus truncatus</i> .	8
3. Procédures d'extraction des acides phénoliques du grain de maïs.	21
4. Arène pour la réalisation d'un test avec choix.	25
5. Structures moléculaires des acides phénoliques du grain de maïs et leurs teneurs dans les cultivars testés	37
6. Dendogramme des sept cultivars analysés à partir des distances euclidiennes entre les moyennes des caractéristiques physico-chimiques	

des grains.	44
7. Dendogramme des sept cultivars testés à partir des distances euclidiennes entre les moyennes des performances de l'insecte .	51
8. Effets de la qualité de l'albumen sur la dureté des grains de maïs.	62
9. Effets de la proportion du germe et de la teneur en eau partielle sur la dureté du grain de maïs.	64
10. Corrélations entre la teneur en eau partielle et les proportions d'endosperme corné et du germe, du grain de maïs.	67
11. Coefficients de diffusion de chaque composant du grain de maïs.	70
12. Isothermes de désorption des composants du grains de maïs à 25°C.	71
13. Corrélations entre la teneur en eau partielle et les acides phénoliques endogènes du grain de maïs.	73
14. Effets des acides hydroxy-cinnamiques endogènes sur la dureté des grains de maïs.	77
15. Intensité de l'absorption des molécules d'acides phénoliques endogènes, excitées à 365 nm., dans une coupe longitudinale d'un grain du cultivar Muneng 8128.	79
16. Structures moléculaires de quelques acides hydroxy-cinnamiques conjugués.	80
17. Mécanismes possibles de formation de ponts phénoliques entre les polymères des parois cellulaires.	82
18. Intensité de l'absorption des flavanoïdes, colorés à l'acide borinique, excitées à 365 nm., dans une coupe longitudinale d'un	

grain du cultivar Muneng 8128.	83
19. Intensité de l'absorption des phénoliques conjugués à des amines, colorés avec le colorant Ehrlich, dans une coupe longitudinale d'un grain du cultivar Muneng 8128.	84
20. Corrélations entre la consommation journalière des adultes et le taux de ponte des femelles ainsi que la préférence, lors des tests avec choix.	86
21. Corrélations entre le choix des adultes de <i>Prostephanus truncatus</i> et le taux de ponte des femelles ainsi que le pourcentage de grains endommagés.	87
22. Corrélations entre la dureté des grains de maïs et le taux de ponte ainsi que la mortalité des adultes.	90
23. Corrélations entre la déformation des couches externes des grains de maïs et le poids des adultes ainsi que leur mortalité après deux semaines d'infestation.	91
24. Corrélations antagonistes des deux types d'endosperme présent dans les grains de maïs avec le coefficient de pénétration et la perte de poids des lots infestés pendant deux semaines.	94
25. Régressions linéaires entre la teneur en eau partielle des grains et la perte de poids des lots infestés pendant deux semaines d'une part et entre l'humidité totale des grains et le pourcentage de grains endommagés après deux semaines d'infestation.	95
26. Corrélations entre la teneur en acide p-coumarique et le pourcentage	

de grains endommagés et la perte de poids des lots infestés après deux semaines d'infestation.	97
27. Corrélations entre la mortalité des adultes et la teneur en eau partielle et en sucres des grains de maïs infestés.	98
28. Effet de la qualité de l'endosperme des grains de maïs sur le taux de ponte des femelles du Grand Capucin.	99
29. Corrélations entre la proportion du germe dans les grains de maïs et le taux de ponte ainsi que le coefficient de pénétration.	101
30. Corrélations entre la teneur totale en lipides des cultivars et le taux de ponte des femelles ainsi que le pourcentage d'adultes retrouvés dans chaque cultivar lors du test avec choix.	103
31. Corrélations entre la consommation journalière des adultes et la teneur totale en lipides ainsi que l'indice de forme des grains de maïs.	104
32. Corrélations entre la teneur en acide p-coumarique des grains de maïs et le taux de ponte et le choix du Grand Capucin.	106
33. Modèle des échanges d'énergie au sein de la relation grains/insecte.	113
34. Modèle des facteurs de résistance ou de susceptibilité des grains de maïs aux attaques du Grand Capucin.	115

## PHOTOS

1. Dommages de <i>Prostephanus truncatus</i> sur des grains de maïs.	
2. Les sept cultivars choisis.	
3. Types de dommages rencontrés.	
4. Effet corrosif de l'acide férulique sur les parois intestinales de <i>Prostephanus truncatus</i> .	109
5. Effet d'agglutination et de durcissement du chyme alimentaire dans l'intestin de <i>Prostephanus truncatus</i> .	111

## TABLEAUX

1. Caractéristiques générales des sept cultivars testés.	18
2. Caractéristiques physiques des grains des sept cultivars.	30
3. Indices de formes des grains et proportions des différents organes.	32
4. Caractéristiques biochimiques générales des grains de maïs.	34
5. Teneurs en sucres et en acides phénoliques des grains.	36
6. Matrice de corrélation des caractéristiques physiques des grains.	39
7. Matrice de corrélation des caractéristiques biochimiques générales.	40
8. Matrice de corrélation des caractéristiques biochimiques et physiques.	42,43
9. Performances mécaniques de <i>Prostephanus truncatus</i> .	46
10. Performances physiologiques <i>Prostephanus truncatus</i> .	48
11. Matrice de corrélation entre les performances mécaniques de l'insecte.	50

12. Matrice de corrélation entre les caractéristiques physiques des grains et les performances de <i>Prostephanus truncatus</i> .	53
13. Matrice de corrélation entre les caractéristiques biochimiques et les performances de <i>Prostephanus truncatus</i> .	55,56

**REMERCIEMENTS:**

**J'aimerais remercier les membres de mon comité de recherche, les docteurs B.J.R. Philogène, J.T. Arnason et J. Lambert pour leur confiance, leur intérêt leurs critiques et leur supervision. Dans le même esprit j'aimerais remercier tout le personnel des laboratoires dans lesquels j'ai pu travailler et tout particulièrement France Duval, pour sa patience, son amitié et sa disponibilité à toute épreuve, ainsi que Dr. Alok Sen pour sa compétence, ses critiques, ses suggestions et sa considération. De même je suis aussi reconnaissant à tous mes collègues étudiants avec qui j'ai entretenu des relations privilégiées, sources d'une ambiance unique de travail.**

**Je tiens aussi à remercier sincèrement tous ceux qui indirectement, mais efficacement ont su me soutenir et m'encourager:**

**- tout d'abord mon épouse, Jacqueline, et mes deux petites filles Gabrielle et Alexandra, sans lesquelles je ne serais rien,**

**- ma belle-famille pour leur soutien plus que moral,**

**- ma famille, qui même à distance a su me motiver,**

**et les familles Goalard et Verna qui ont encouragé mon immigration au Canada.**

**RESUME**

Afin de lutter contre les pertes sérieuses des récoltes de maïs dues aux récentes attaques du Grand Capucin, *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae), en Afrique sub-saharienne, nous avons analysé et tenté d'élucider des mécanismes de résistance des grains contre ce charançon.

Des grains de sept cultivars provenant du Centre International d'Amélioration du Blé et du Maïs (CIMMYT, Mexico) ont été analysés en fonction de leurs caractéristiques physiques (forme, dureté, type de grain, proportions anatomiques et hygrométrie) et de leurs caractéristiques biochimiques (teneurs en saccharides, lipides, protéines et acides phénoliques). Parallèlement les dommages (% de grains endommagés, perte de poids, poudre produite, pouvoir pénétrant) et la biologie (mortalité, poids des adultes, taux de ponte, préférence) du Grand Capucin ont été enregistrés sur des lots de grains intacts. Des analyses statistiques ont permis de relever des corrélations très significatives entre certaines caractéristiques des grains et des performances de l'insecte.

Parmi les corrélations les plus significatives on retrouve celles entre la dureté, d'une part, et la mortalité imaginaire ainsi que le taux de ponte, d'autre part ( $r = -0,793$  et  $r = -0,819$  respectivement,  $p < 0,1$ ). La qualité de l'endosperme (vitreux ou farineux) semble pouvoir jouer un rôle important dans la susceptibilité du substrat: une plus grande proportion d'albumen dur et corné est fortement et négativement corrélé

avec la quantité de poudre produite par les adultes - particulièrement importante pour le développement des stades juvénils - ( $r = -0,866$ ), avec la perte de poids des lots infestés ( $r = -0,724$ ), avec le pouvoir pénétrant de l'insecte ( $r = -0,839$ ) et enfin avec le taux de ponte ( $r = -0,708$ ). Bien entendu, une plus grande quantité d'albumen mou et farineux a présenté des corrélations inverses.

Contrairement à ce qui a été observé pour *Sitophilus zeamais* les lipides pourraient stimuler les activités et le développement de *Prostephanus truncatus*, tandis que la teneur estimée en protéines n'a présenté aucune corrélation significative. Parmi les trois acides phénoliques endogènes des grains de maïs, les acides férulique, sinapique et para-coumarique, le dernier a présenté des corrélations très significatives et négatives avec les dommages des lots et surtout avec le taux de ponte ( $r = -0,702$  et  $r = -0,852$ , respectivement).

Des études de régressions multiples nous ont permis d'établir des équations pour chaque performances mesurées du Grand Capucin en fonction des caractéristiques du grain les mieux corrélées. Un modèle éco-physiologique de la relation grain/charançon est alors proposé où principalement la qualité de l'albumen et la teneur en acides hydroxycinnamiques, en particulier l'acide p-coumarique, pourraient permettre de prédire la susceptibilité ou la résistance du grain aux attaques de *Prostephanus truncatus*.

Cette recherche a permis de révéler la nécessité de mieux comprendre, non seulement la structure, mais aussi la biochimie du grain et en particulier les rôles

**écologiques de métabolites secondaires, comme ces acides phénoliques et leurs conjugués, qui peuvent être déterminants pour prédire et améliorer la résistance des grains à de tels déprédateurs d'importance économique.**

**ABSTRACT**

To prevent serious post-harvest losses in corn by the Larger Grain Borer, *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae) in the sub-saharan Africa, kernel resistance mechanisms to this insect were analyzed.

Kernels of seven cultivars from the International Centre for Corn and Wheat Improvement (CIMMYT, Mexico) were analyzed for their physical characteristics (shape, hardness, type of kernel, anatomical proportions and moisture) and their biochemical properties (saccharides, lipids, proteins and phenolic acids content). Also, grain damage (% of attacked kernels, weight loss, powder production, penetration coefficient) and biology of the borer (consumption, mortality, oviposition, choice tests, adult weight) were recorded on intact kernels. Statistical analysis allowed identification of very significant correlations between some grain characteristics and insect performances on individual maize cultivars.

Among these, excellent correlations were observed between hardness and adult mortality and oviposition ( $r = -0.793$  and  $r = -0.819$  respectively,  $p < 0.1$ ). The quality of the endosperm (vitreous or floury) appeared to be determinant of levels of susceptibility : a larger proportion of hard and vitreous endosperm is highly and negatively correlated with a) the amount of powder produced by adults which is particularly important for development of earlier instars ( $r = -0.866$ ), b) with grain

weight loss ( $r = -0.724$ ), c) with adult penetrating power ( $r = -0.839$ ) and finally d) with oviposition rate ( $r = -0.708$ ).

Unlike what was noted with *Sitophilus zeamais* (Serratos, 1987), lipids appear to stimulate *Prostephanus truncatus* activities and development, and the estimated protein content did not present significant correlations. Among the three endogenous phenolic acids in corn kernels, ferulic, sinapic and p-coumaric, the latter presented very significant and negative correlations with damage and with oviposition rate ( $r = -0.702$  and  $r = -0.852$  respectively). Multiple regression analysis was performed on each insect performance parameter to derive an estimated of the parameter as a function of the most highly correlated grain characteristics. An eco-physiological model of the grain/borer relationship is proposed in terms of endosperm quality and hydroxycinnamic acids content, particularly p-coumaric acid, which will help to predict corn susceptibility or resistance to *Prostephanus truncatus*.

This research underlines the importance for a better understanding of both the morphology as well as the biochemistry of the corn kernel, and particularly ecological roles of secondary metabolites such as phenolic acids and their conjugates which are important factors in the prediction and improvement of grain resistance to such economically important pests.

## **INTRODUCTION:**

### **1/ Le maïs et les problèmes post-récoltes:**

Avec le riz et le blé, le maïs est une des trois denrées les plus cultivées dans le monde. Son utilisation a longtemps été exclusive à l'alimentation humaine. En effet, le grain de maïs, grâce à son amidon, reste un aliment énergétique directement consommable. Il est aussi riche en lipides, et peut être amélioré quant à la qualité de ses protéines. Le maïs entre donc dans la préparation de nombreux plats traditionnels, allant d'épis grillés jusqu'à la bière, en passant par toute une variété de soupes et de galettes. Ses qualités nutritionnelles sont rapidement utilisées dans l'alimentation d'animaux, comme les volailles, les porcs et les ruminants; que ce soit sous forme d'épis entiers ensilés, de grains plus ou moins broyés, de plante entière ensilée et coupée, mais toujours complétées par des aliments riches en protéines (tourteaux, luzerne, etc...) et sels minéraux. Mais le maïs est également une excellente matière première pour l'industrie, tant dans le domaine alimentaire (flocons, semoules, farines, huiles, amidon, distillation...) que dans des domaines non alimentaires (papiers, combustibles, colles, textiles, produits pharmaceutiques et de savonnerie...). Toutes ses utilisations ouvrent des perspectives intéressantes aussi

bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement.

Malgré son importance, la production de maïs partage, avec bien d'autres grains et graines (céréales, oléagineux, protéagineux), un triste constat économique: une partie, non négligeable, et trop souvent déterminante, est encore perdue à cause d'altérations survenues lors de l'entreposage. Et ceci, tout particulièrement dans les pays en voie de développement, où ce problème est d'autant plus grave, que leurs populations dépendent de cette denrée pour lutter contre la malnutrition et la famine.

Même si, depuis que l'agriculture sédentaire a suppléé une économie nomade de cueillette, et que chaque société, avec sa culture et son niveau technique propre, a su y accorder l'intérêt nécessaire et limiter les pertes post-récoltes, ces dernières demeurent trop importantes. Il est difficile d'évaluer ces pertes qui, selon que l'on parle en poids sec, humide, en unité ou en valeur organoleptique peuvent varier, selon les cultures, de quelques pourcents à 50 %! Il est clair que le problème se pose différemment selon les régions, les sociétés et les moyens techniques disponibles et que les solutions qu'on y apporte en sont d'autant plus diversifiées. Soulignons que la substitution, souvent trop rapide et sans transition de techniques dites modernes, peu adaptées aux conditions locales, à celles dites traditionnelles, a le plus souvent abouti à un fiasco et même a engendré plus de difficultés que de solutions.

Parmi les animaux nuisibles des stocks de grains, les insectes se situent au premier rang devant les rongeurs, les oiseaux et les acariens. (Sigaut, 1978). Même si les contaminations des grains par les insectes sont considérées comme fortuits (contrairement aux micro-organismes), il existe toujours un danger ravageur potentiel

qui évoluera selon les conditions d'entreposage vers une infestation massive.

Un exemple récent et qui nous concerne ici est le cas du Grand Capucin des grains de maïs, *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae), nouvellement introduit en Afrique, probablement lors d'une aide internationale ou pire encore, lors d'un échange scientifique. Ce charançon, originaire d'Amérique Centrale, était déjà reconnu comme un dévastateur typique des récoltes engrangées dans les petites exploitations, attaquant sur l'épis avant et après la récolte (Giles, 1975; Golob et Hodges, 1982). Ce changement de continent et de conditions post-récoltes, a révélé le potentiel dévastateur de cet insecte, pouvant faire perdre jusqu'à 40 % du poids des grains après six mois de stockage (Giles et Lecn, 1975). En Tanzanie, lieu d'introduction en Afrique, des pertes de poids allant jusqu'à 34 % ont été observées après 3 -6 mois (Hodges et al., 1983). Au Bénin, l'insecte a été détecté en 1986 et a été rendu responsable d'une augmentation des pertes (en matière sèche) de 7 à 15 % dans les stocks de maïs. Par comparaison, les charançons *Sitophilus zeamais* au Kenya, *Sitophilus oryzae* en Zambie et *Sitotroga cerealella* au Malawi, présentaient, après une saison entière de stockage, des dommages de 3-5 % (De Lima, 1979), 2-6 % (Adam, 1977) et 2-5 % (Golob, 1981) respectivement. Il est donc devenu urgent de reconsidérer le statut de cet insecte et d'étudier plus finement sa biologie, son écologie et les moyens de contrôle efficaces et surtout adaptés aux techniques culturales africaines.

Mais auparavant, il est tout aussi primordial de bien comprendre ce milieu original qu'est le grain de maïs en tant que milieu nutritif et de développement.

## 2/ Le grain de maïs:

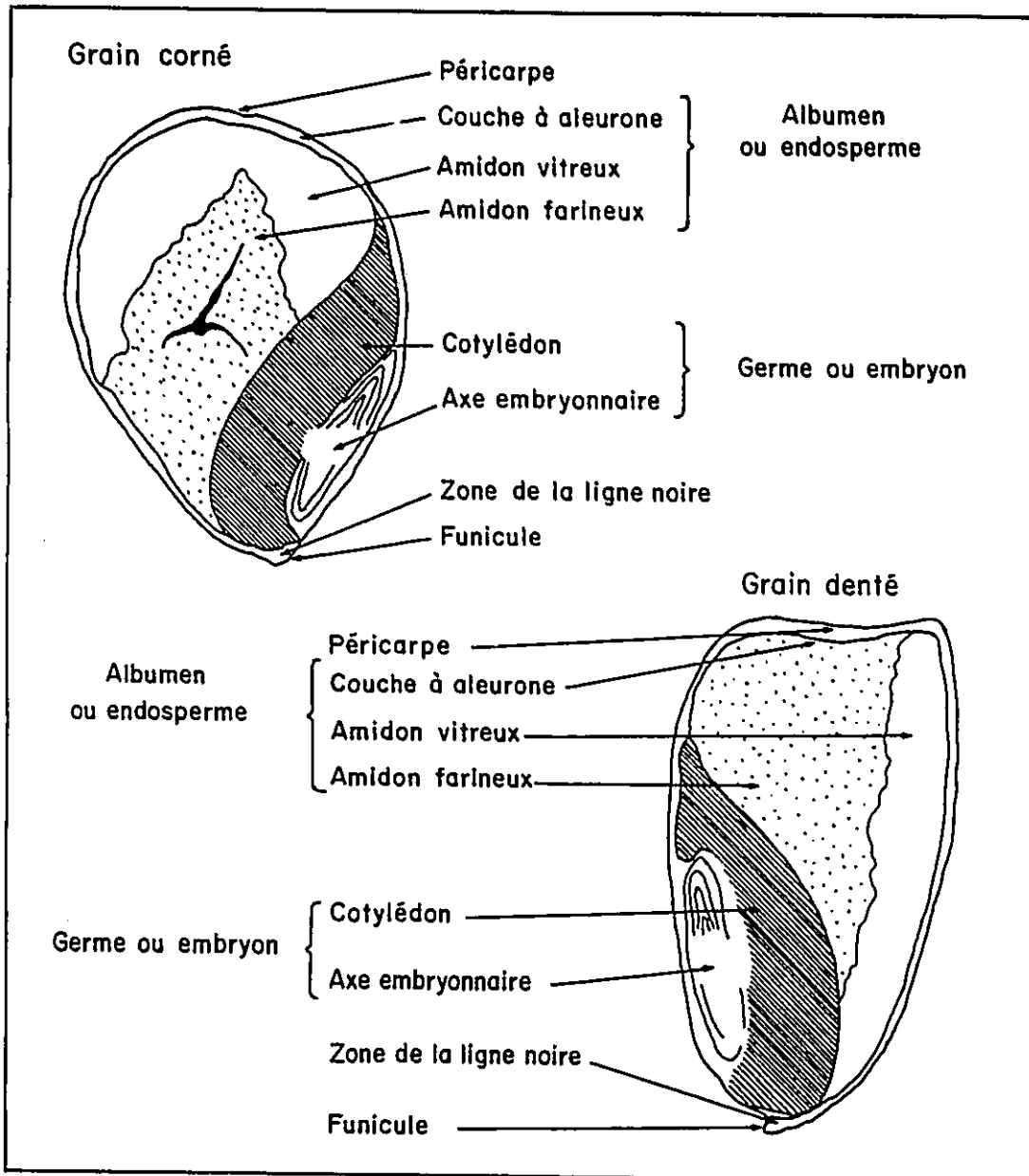
Même si la plupart des auteurs se sont mis d'accord sur le(s) lieu(x) d'origine de la plante de maïs (le Mexique et/ou le Guatemala), son origine et son évolution génétique sont encore plein de mystères et surtout de contradictions entre les différentes techniques d'approche du problème. Néanmoins, il semble raisonnable d'avancer que sa domestication s'est faite il y a environ 7 000 à 10 000 années en Amérique Centrale (Goodman, 1988).

Le fait que les fleurs mâles et femelles soient physiquement séparées distingue le maïs des autres céréales et a fait en sorte que sa génétique ait été largement, et relativement facilement, explorée. Un autre phénomène important est la double-fécondation, celle d'un noyau mâle avec celui du sac embryonnaire et d'un autre avec les deux noyaux polaires au centre, résultant en une cellule triploïde qui engendrera l'endosperme. Ce phénomène est responsable de la non correspondance génotypique éventuelle entre l'endosperme et le germe quand le parent mâle est hétérozygote.

Les résultats de cette fécondation sont des fruits secs indéhiscents, à graine unique, les caryopses ou grains, que l'on retrouve en épis, protégé par des feuilles modifiées, les spathes. Le développement de ce grain se déroule, en moyenne, en 40 jours et il faut entre 10 et 20 jours

**Figure 1:** Coupes longitudinales de deux caryopse, de type corné et denté.

**Figure 1:** Coupes longitudinales de deux caryopses de maïs.



supplémentaires pour la maturation et le séchage (Poethig, 1982). Les trois organes principaux du grain sont le germe, avec l'axe embryonnaire et le cotylédon, l'endosperme, le plus volumineux, et les couches externes (péricarpe et testa), en périphérie (figure 1).

Le péricarpe est en fait ce qui reste des parois de l'ovaire, véritable enveloppe du fruit, et garde donc le génotype de la mère. Il est essentiellement composé de plusieurs couches de parois lignifiées de cellules mortes représentant, de l'extérieur vers l'intérieur, l'épiderme (recouvert de cutine), le mésocarpe et l'endocarpe, plusieurs couches de cellules tubulaires écrasées. Plus intérieurement, on retrouve plusieurs couches de parois comprimées vestiges du mégasporange et la couche d'aleurones. Ces couches externes représentent environ 5 à 6 % du poids sec du grain (Watson, 1987) et jouent sûrement un rôle important dans la perméabilisation du grain (propriétés semi-perméables) et dans ses propriétés physiques (dureté, taux hydrique ...).

L'endosperme, triploïde donc, représente jusqu'à 85 % du poids sec du caryopse (Watson, 1987) et contient les 90 % de son amidon, emballé, intracellulairement, sous forme de granules dans une matrice protéique. Il existe deux qualités d'albumen amidonnier: le "farineux", central et opaque, et le "vitreux", périphérique et translucide. La différence repose essentiellement dans la matrice protéique plus ou moins continue et épaisse autour des granules d'amidon. Dans l'endosperme vitreux (ou corné), cette matrice est épaisse et restent intacte lors du séchage, ce qui provoque une compression des grains d'amidon, qui prennent une

forme polyédrique et un raccourcissement des cellules (Watson, 1987), ce qui entraîne une meilleure cohésion du tissu et une plus grande solidité. Au contraire, la matrice de l'endosperme farineux (ou mou), de faible épaisseur, se casse en séchant, devient discontinue autour des granules d'amidon qui restent plus volumineux et plus ronds; Robutti et al. (1974 a et b) ont observé des poches d'air autour de ces granules sphériques.

Le germe est composé d'un axe embryonnaire, protégé par plusieurs enveloppes, et d'un seul cotylédon, lui aussi protégé par des couches "externes". Ce dernier organe nourricier représente 10 à 12 % du poids sec du grain (Watson, 1987). C'est dans le germe que l'on retrouve les nutriments et les hormones nécessaires à la germination. Toutes les cellules sont donc potentiellement métaboliquement actives, après hydratation. C'est aussi dans le germe que l'on détecte les sphérosomes bourrés d'huile. La frontière entre l'endosperme et le cotylédon est caractérisée par une couche de cellules épithéliales sécrétrices (Wolf et al., 1952), capables, à la germination, de rejeter des hydrolases digérant l'amidon et les protéines de l'endosperme, et par une couche amorphe, produite par l'endosperme, cimentant les deux organes.

### 3/ *Prostephanus truncatus*, sa biologie et son contrôle:

Howard (1983) a décrit de façon détaillée l'adulte et la larve du Grand Capucin (figure 2). Plus généralement, il appartient à la famille des Bostrichidés et est peu différenciable du "petit" Capucin, *Rhyzopertha dominica*, une peste commune des grains engrangés. Dans une fiche technique de la Protection des Végétaux de la République Togolaise ainsi que dans un guide produit par l'Institut des Produits Tropicaux (TSPC) britannique, il est décrit comme un coléoptère de couleur foncée à reflets bruns, long de 3 à 5 mm avec un prothorax qui recouvre la tête comme un capuchon, d'où son nom commun. On peut le distinguer des espèces voisines grâce à la forme de son abdomen, rectangulaire et dont la partie postérieure semble être coupée raide. Dans ces documents on s'empresse aussi de souligner son pouvoir destructeur, en rappelant que les adultes sont capables de percer sans difficulté les spathes et les rafles de maïs, et que sa présence est détectée par de petits tas de farine jaune-claire autours et dans les épis attaqués. On signale également que lors d'une infestation aiguë aucune graine de la rafle n'est épargnée et que les épis peuvent être attaqués sur le champs, de sorte que l'insecte peut être transporté du champs au grenier.

Ce pouvoir perforateur (photo 1) peut être aussi dramatique quand l'insecte attaque des installations et outils en bois, reste de son passé xylophage. Shires (1977) signale que *Prostephanus truncatus* est capable d'endommager et de subsister outre dans le maïs, dans le manioc, des graines de cacao, de café, de haricot,

**Figure 2: Larve, pupe et adulte de *Prostephanus truncatus*:**

E: épipleuron

H: hypopleuron

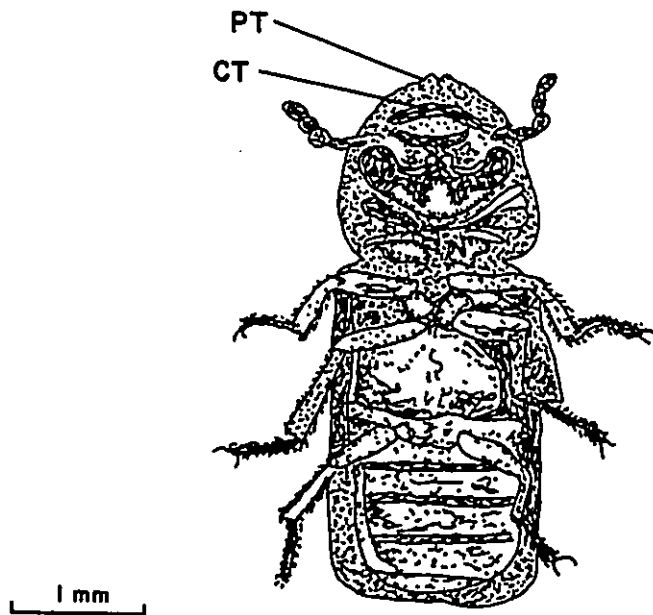
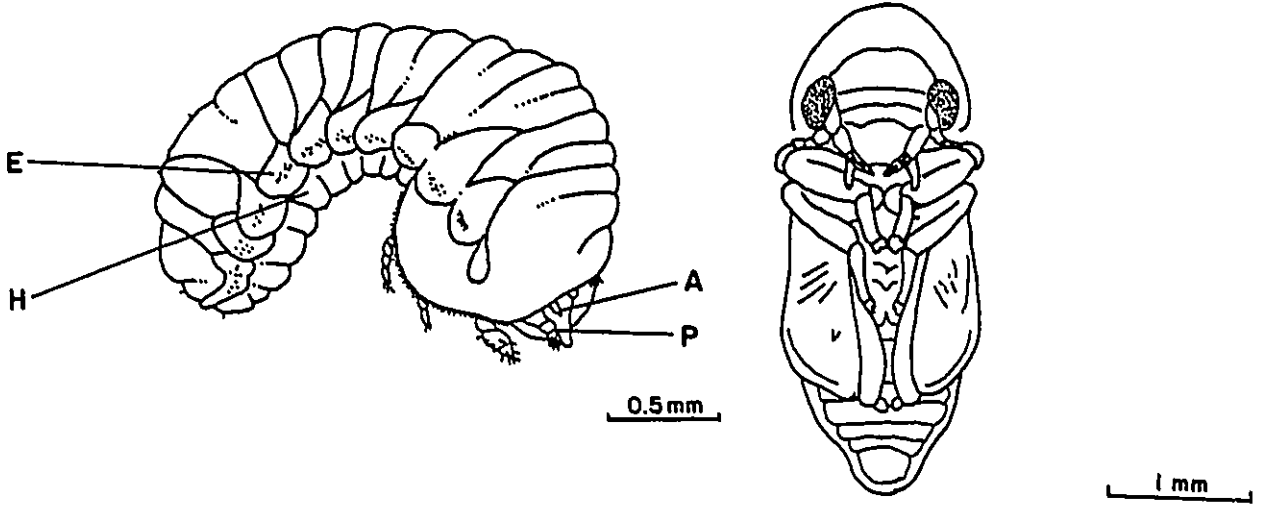
A: antenne

P: palpe

PT: tubercule prothoracique

CT: tubercule clypéal

(Howard, 1983)



d'arachides ainsi que des grains de riz et de blé, entre autres.

Jusqu'à maintenant on a retrouvé le Grand Capucin au Mexique, au Guatemala, au Texas, mais aussi en Tanzanie, au Togo, au Rwanda, au Burundi, au Bénin et dans l'est du Zaïre. On l'a aussi observé, sans implantation sérieuse, en France, en Irak, en Israël, en Thaïlande et dans d'autres pays (Verstraeten et Haubruge, 1986). Pour beaucoup d'auteurs, la progression du charançon pourrait se poursuivre partout où l'on cultive et entrepose le maïs, le manioc voir d'autres céréales.

En effet les conditions de développement de *Prostephanus truncatus* sont caractérisées par une large fourchette de température et d'humidité relative (Watters, 1984), lui permettant non seulement d'attaquer les épis tôt sur le champs (avec une hygrométrie de 40 à 50 %; Giles, 1975) et longtemps après la récolte, mais aussi d'infester de nombreuse régions. Les conditions optimales sont de 32 °C et 70-80 % H.R. (Shires, 1979 et 1980; Bell et Watters, 1982), dans lesquelles il se développe en 24-25 jours. Très rapidement, il est apparu que la stabilité des grains a des effets importants non seulement sur les dommages de ceux-ci, mais aussi sur la mortalité larvaire et le développement (Cowley et al., 1980; Watters, 1984).

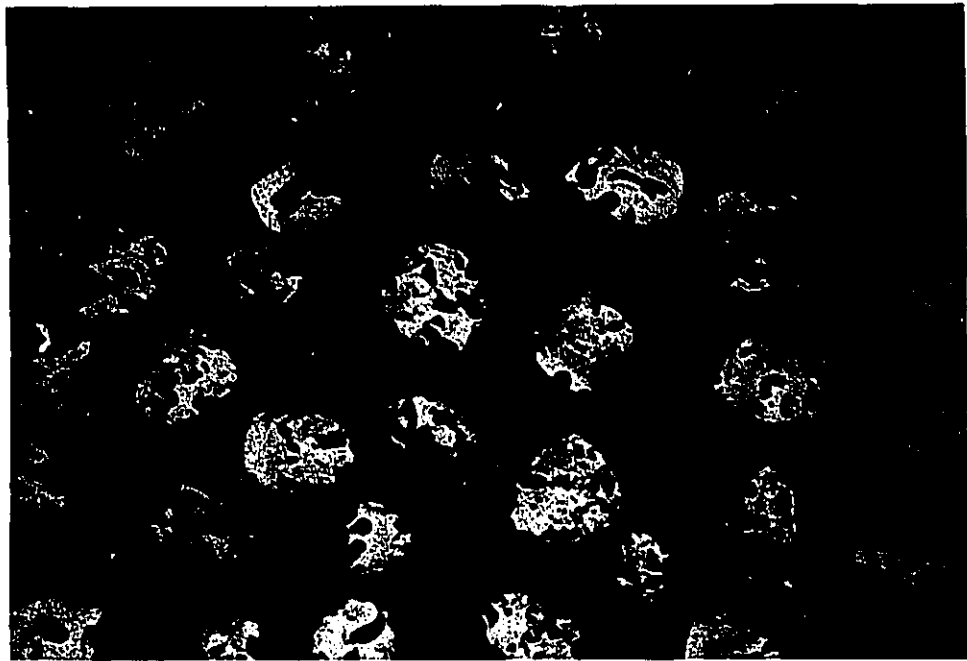
Les femelles fécondées, en plus de leur tunnel principal, creusent des ramifications fermées au fond desquelles elles pondent leurs oeufs par groupe de 6 à 10 (Hodges, 1982; Howard, 1983), maintenus en place, dans le grain, par une quantité de poudre finement mâchée. Ainsi Howard (1983) observait que la production de poudre jouait un rôle dans le développement des oeufs, comme il l'a

été déjà souligné pour *Rhizopertha dominica* (Potter, 1935) et *Dendrinus minutus* (Plank, 1942). Les périodes de pré-oviposition et d'oviposition peuvent varier respectivement de 5 à 10 jours et de 95 à 100 jours (Shires, 1980; Howard, 1983); par contre il y a une énorme différence entre le taux de fécondité si l'insecte est élevé sur des grains lâches ou sur des épis artificiels, allant de 50,5 oeufs (Shires, 1980) à 430 et parfois 600 oeufs (Bell et Watters, 1982). Ce qui pourrait être à l'origine d'un plus grand taux de population observé sur l'épi que sur les grains lâches. Sur du maïs moulu à 31°C et 80 % H.R., Shires (1980) a observé un taux de croissance de la population de 0,36/semaine, tandis que Bell et Watters (1982) sur du grain stabilisé ainsi que Hodges et Meik (1984) sur l'épi ont observé un taux de 0,7-0,8/semaine.

Il est important de noter que les adultes, comme les larves, sont très tolérants à une sécheresse relative (Shires, 1979; Young et al., 1962; Hodges et Meik, 1984) au laboratoire. Giles et Leon (1975), ainsi que Hodges et al. (1983) l'ont confirmé à leur tour sur le terrain où des grains de maïs ont été sévèrement infestés malgré une teneur en eau aussi basse que 9-10,6 %.

Les principaux dommages imputés aux activités de *Prostephanus truncatus* sont dûs aux forrages et aux tunnels, produisant une grande quantité de poudre où se mélangent l'amidon, des excréments de l'insecte, des cadavres et des exuvies et pouvant avoir un effet plus ou moins toxique sur la consommation humaine ou animale. Cette activité s'accompagne par une augmentation de la teneur en eau à

**Photo 1:** Dommages de *Prostephanus truncatus* sur des grains de maïs, montrant le spectaculaire potentiel destructeur de ce charançon.



l'intérieur des stocks (Demianyk et Sinha, 1987) provoquant une contamination facilitée par des bactéries et des fungi: cette augmentation de l'activité microbienne est détectée par celle de la teneur en acides gras.

Face à ces dégats importants, quelques études ont été réalisées sur les effets de quelques insecticides (Delgado et Hernandez Luna, 1951; Ramirez Genel, 1960; Giles et Leon, 1975; White, 1982; Golob et al., 1983 et 1985; Golob, 1984; Hodges et Meik, 1984; Makundi, 1986; Subramanyam et Cutkomp, 1987; Haubruge 1988, Haubruge et al., 1987 et 1989). De ces travaux, le pyrimiphos-méthyl et certains pyréthriinoïdes de synthèse, comme la perméthrine, la cyfluthrine et la deltaméthrine, semblent se détacher par la persistance de leurs efficacités et leurs effets significatifs à des concentrations relativement faibles. Des fumigants, comme la phostoxine (Giles, 1984) ou phosphine (Krall, 1984), ont aussi été étudiés donnant quelques résultats en laboratoire. Haubruge et al. (1989) ont étudié la toxicité d'huiles essentielles extraites de cinq différents *Citrus spp.*, sous des conditions normalisées (27°C et 70 % HR). Ces études ont clairement démontré, que les cinq huiles sont très toxiques à l'égard des trois ravageurs des denrées entreposées suivant: *Sitophilus zeamais*, *Prostephanus truncatus* et *Tribolium castaneum*. L'utilisation de pièges pourrait être très utile si on considère que l'infestation des stocks par le Grand Capucin est trop souvent détectée trop tard, à cause de sa rapidité de pénétration et de dispersion, et du fait que les adultes nouvellement arrivés préféreraient infester les grains en profondeur (Verstraeten et Haubruge, 1987). A ce propos, Dendy et al. (1989) ont étudié les effets de deux phéromones synthétiques, Trunc-call T1 et T2,

concluant qu'un mélange peut être utilisé efficacement sur les champs et ils ont montré que *Prostephanus truncatus* peut être retrouvé loin des greniers, dans les alentours.

Le contrôle physique a aussi attiré l'attention du côté de l'Amérique Centrale: Ramos et Ramirez (1979) ainsi que Adem et al. (1979) ont analysé les effets d'une radiation aux rayons . La lumière laser et les électrons accélérés ont aussi été considérés (Ramos et Garces, 1980; Ramos et al., 1984); Adem et al., 1981). Mais ces techniques demandent des appareils et une manipulation coûteux et leur application se limite à la désinfection des grains lâches.

Des observations sur le type d'insectes retrouvés sur des épis infestés par *Prostephanus truncatus*, récoltés en Tanzanie et au Nicaragua montraient que *Sitophilus spp.* étaient le deuxième genre en nombre, mais aucune corrélation significative, entre les deux genres, n'a pu être observée (Hodges, 1984). Par contre une forte corrélation positive fut soulignée avec le nombre de *Tribolium spp.*. Haubruge et Verstraeten (1987) ont eux aussi, mais cette fois au laboratoire, montré que le Grand Capucin est effectivement perturbé par *Tribolium castaneum*, mais aussi par *Sitophilus zeamais* et non par *Rhizopertha dominica* ou par *Oryzaephilus surinamensis*. Malheureusement il est très délicat d'extrapoler ces résultats aux conditions naturelles, pourtant il est possible de proposer, avec ces auteurs, que *Tribolium c.*, agresseur secondaire des grains, puisse se nourrir non seulement de la poussière produite par le Grand Capucin, excellent exploitant primaire, mais aussi de ses stades juvénils et que des substances répulsives, émises par les femelles de

*Sitophilus z.*, lors de la ponte, puissent empêcher la contamination du grain par d'autres insectes, perturbant l'installation de *Prostephanus t.*. Rees (1985) a entamé une étude sur la capacité d'un prédateur spécifique, *Teretriosoma nigrescens*, à contrôler une population du Grand Capucin.

Dans l'état actuel de nos connaissances sur cet insecte dévastateur, il semble que la mise au point de cultivars de maïs résistants aux attaques du Grand Capucin serait un objectif pressant et efficace vis-à-vis les problèmes socio-économiques qu'une stratégie de contrôle peut rencontrer, dans les différentes régions concernées. Peu d'études ont été réalisées à ce sujet (Silva et al., 1981; Bell et Watters, 1982; Ramirez Martinez et Silver, 1983; Howard, 1983 et 1984) où il en sort que les variétés à grains durs et siliceux semblent moins souffrir des attaques de *Prostephanus tr.* que les variétés à grains tendre et farineux. Howard souligne que le taux d'oviposition semble être le paramètre le plus sensible aux caractéristiques variétales, plus que pour *Sitophilus zeamais*.

#### 4/ Hypothèses et objectifs de cette recherche:

Puisque que les dégâts et les pertes, produits par *Prostephanus truncatus* sur le grain de maïs, sont dûs non seulement à la consommation en tant que substrat alimentaire, mais aussi en tant qu'environnement de développement des stades larvaires, il devient nécessaire de mettre au point une technique d'étude de ses paramètres biologiques dans les conditions optimales. L'hypothèse générale de notre

recherche est que la susceptibilité des grains de différents cultivars pourra être prédite à partir de la connaissance de facteurs physiques et/ou biochimiques de résistance, en espérant trouver un facteur fortement héréditaire, accessible à un programme d'amélioration de la plante de maïs.

Nos objectifs pourraient alors être décrits comme suit:

(1)-Etude des paramètres biologiques de *Prostephanus truncatus* sur des grains de maïs sains et dans les conditions optimales: mise au point d'une méthode d'élevage en laboratoire de l'insecte permettant une optimisation de ses performances.

(2)-Evaluation de la susceptibilité des grains de différentes variétés de maïs: mesures, d'une part, de paramètres d'altération des grains (nombre de grains attaqués, perte de poids des lots, production de poudre...) et d'autre part de paramètres de susceptibilité à l'insecte (mortalité, consommation, oviposition, préférence).

(3)-Recherche et analyse de facteurs de résistance: analyse des protections physique (dureté, hygrométrie, anatomie) et biochimique (valeur nutritives et métabolites secondaires). Chaque facteur sera étudié en fonction de sa concentration *in vivo* et de sa corrélation avec des paramètres de susceptibilité et d'altération. Un modèle écophysologique sera alors proposé.

**MATERIELS ET METHODES:****A/ CARACTERISTIQUES DES CULTIVARS DE MAÏS:**

Sept cultivars ont été choisis parmi une centaine de variétés expérimentales obtenues du Centre International d' Amélioration du Maïs et du Blé (CIMMYT, Mexico). Le critère de sélection était une variabilité dans leur degré de susceptibilité à l'infestation par *Sitophilus zeamais*. Le tableau 1 donne le nom, l'indice de Dobie obtenu pour *S. zeamais*, la couleur et le type des grains de ces sept cultivars (Photo 2).

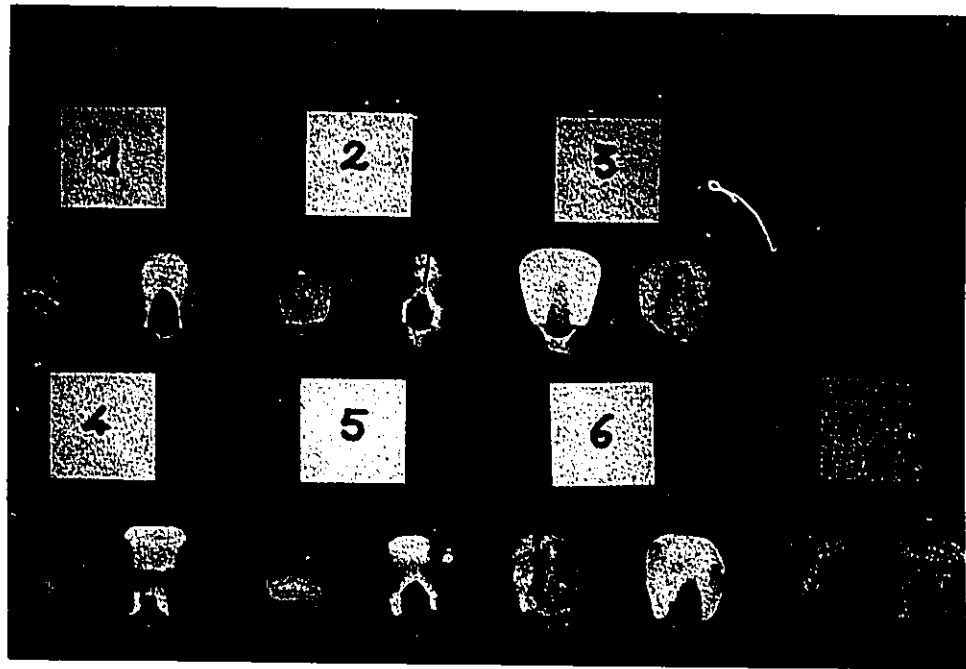
**1/ Caractéristiques anatomiques et physiques du maïs:****a/ Poids du grain:**

Environ 100g de grains intacts ont été pesés et le nombre de grains compté, cinq fois. Un poids moyen du grain a ainsi été obtenu en divisant le poids ( 100g) par le nombre de grains.

**b/ Volume du grain:**

Un contenant cylindrique de 45 cm<sup>3</sup> fut rempli le plus exactement possible avec des grains entiers. Ce volume fut alors divisé par le nombre de grains présents pour obtenir un volume moyen par grain. Cette opération fut répétée cinq fois pour

**Photo 2:** Les sept cultivars choisis:  
1: Ilonga 8032  
2: Muneng 8128  
3: Mexico 212 (Cacahuacintle)  
4: Poza Rica 8121  
5: Across 8035  
6: Across 7740 QPM  
7: Ratray-Arnold 8149



**Tableau 1: Caractéristiques générales des sept cultivars sélectionnés.**

Origine	Variété	Couleur du grain	Type de grain	Index de Dobie* pour <u>S</u> zeamais
Tanzanie	Ilonga 8032	Blanc	Corné	5.8
Mexique	Across 7740 QPM	Blanc	Corné	4.3
Indonésie	Muneng 8128	Jaune	Denté	14.1
Mexique	Poza Rica 8121	Blanc	Denté	10.5
Mexique	Across 8035	Jaune	Denté	4.6
Zimbabwe	Ratray-Arnold 8149	Blanc	Denté	3.7
Mexique	Mexico 212	Blanc	Farineux	13.0

\*:  $I = [\ln(N)/D].100$

N: F1 totale

D: développement moyen

chaque cultivar.

**c/ Densité du grain:**

Elle fut obtenue en divisant le poids moyen du grain par son volume moyen, obtenus précédemment.

**d/ Dureté du grain et plasticité des couches externes:**

Ces deux caractéristiques furent mesurées en utilisant une machine INSTRON d'Agriculture Canada, modèle 4201 (Canton, Mass. USA) équipée d'un indicateur de force et d'une capacité de charge allant de 0 à 1000 livres (lbs). Cette appareil est couplé à un ordinateur APPLE II Plus, compilant et analysant les données. Chaque échantillon consistait en un grain intact qui a été guillotiné transversalement, à une vitesse constante, par une lame de 1 mm d'épaisseur. La dureté fut alors mesurée comme la hauteur du pic de la force avant cassure.

Pour chaque cultivar, 25 grains ont été analysés.

**e/ Forme et proportions anatomiques:**

Un indice de forme ainsi que les proportions entre d'une part, les régions d'endosperme vitreux et d'endosperme farineux, et d'autre part, entre l'endosperme et le germe, ont été mesurées à l'aide d'une analyse digitale d'image, en collaboration avec Agriculture Canada (Pietrzak L. N., informations et communication personnelles), utilisant le système IBAS: Processeur Kontron SEM-IPS avec un écran de 512 x 512 pixels (Kontron Elextronik GmbH, Breslanestr 2,8057 Eching, West Germany). La capture de l'image a été faite avec une caméra video Chalnicon (Type Bosh 9B1) équipée d'une lentille macro 55 mm Nikon.

## 2/ Caractéristiques biochimiques des grains de maïs:

### a/ Teneur partielle et totale en eau:

Environ 100g de grains intacts ont été équilibrés pendant cinq semaines dans un incubateur à 30°C et 70% d'humidité relative. Cinq lots d'environ 20g ont été réalisés et pesés exactement, puis placés à l'étuve pendant 24 heures à 70°C. Après refroidissement dans un dessiccateur à chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>) anhydre, les grains ont été à nouveau pesés. L'humidité partielle, S1, est calculée comme le pourcentage de poids perdu après l'étuve.

Chaque lot a ensuite été broyé dans un moulin à café (Moulinex) jusqu'à l'obtention d'une farine fine. La quantité de farine obtenue a été pesée exactement à l'aide d'une balance analytique et mise à l'étuve (70 C) pendant 24 heures. La farine sèche et refroidie a été repesée et le pourcentage de poids perdu, S2, calculé. L'humidité totale fut calculée comme suit:

$$\text{Humidité Totale} = S1 + S2 - \frac{S1.S2}{100}$$

(modifié à partir des règles internationales pour les essais de semences, 1966).

### b/ Teneur en azote et teneur estimée en protéines:

La teneur en azote a été déterminée par la procédure Kjeldahl utilisant un «automated kjeltec (Decator) analyser» (Kjeltec Auto 1030 Analyser), disponible à Agriculture Canada. Le pourcentage en protéines a été estimé avec le facteur de conversion 6.25 (Classen et al, 1990).

**Figure 3: Procédure d'extraction des acides phénoliques du grain de maïs.**  
(modifié de Sosulski et al., 1982)

- 1 Peser 1g de farine
- 2 Ajouter 35ml de NaOH,2N. Agiter pendant 4h.
- 3 Ajuster le pH à 2.0 avec HCl,6N
- 4 Centrifuger à 2000 tpm pendant 30 mn.
- 5 Décanter le supernageant dans une ampoule à décanter.  
Extraire 2 fois avec de l'acétate d'éthyle (2x50ml).
- 6 Ré-extraire la fraction inférieure de 5 avec 50ml AcEt.  
Combiner toutes les fractions supérieures.
- 7 Ajouter de l'eau distillée au culot du 4, mélanger  
et centrifuger pendant 20 mn.
- 8 Décanter le supernageant et extraire 2 fois avec de AcEt.  
Ajouter la fraction supérieure à 6.
- 9 Ajouter de l'eau distillée au culot, mélanger et  
extraire avec 2x50ml d'AcEt.
- 10 Récupérer toutes les fractions supérieures (5,6,8,9)  
Ré-extraire avec 50ml d'AcEt.
- 11 Collecter la fraction supérieure. Ajouter du sulfate de  
sodium. Laisser pendant au moins 1 heure, dans le noir  
Filtrer dans un ballon. Evaporer sous vide à 30 C.

**c/ Teneur en lipides:**

Les lipides ont été extraits de 1g de grains broyés dans un moulin à café, dans 35 ml d'héxane. Après filtrage et rotoévaporation sous vide l'extrait a été pesé sur une balance analytique. La teneur en lipides est alors exprimée en pourcentage de poids frais.

**d/ Teneurs en sucres:**

Les sucres simples, mono- et disaccharides, libres, ont été extraits dans de l'eau (30 ml pour 1g de grains finement broyés) pendant 2 heures à 65°C. Après centrifugation à 2000 tpm et filtrage, les extraits ont été évaporés sous vide à 50°C.

Les analyses qualitative et quantitative ont été réalisées par chromatographie liquide à haute pression (HPLC), utilisant un modèle Varian 2080 équipé de pompes 2570 et d'une colone à phase normale Aminex HPX-87P, chauffée à 85 C, et d'une «Deashing Holder Guard Column», disponible à Agriculture Canada. Le débit était de 0.6 ml/mn d'eau. Chaque pic a été analysé par un intégrateur CDP 1 Computing, PYE, UNICAM.

Les standards utilisés étaient du glucose, du fructose, du sucrose et du maltose (BDH). La teneur en chacun des sucres est exprimée en mg/g.

**e/ Teneurs en acides phénoliques:**

Les acides hydroxycinnamiques, comme l'acide férulique et l'acide paracoumarique ont été extraits d'après une méthode simple, modifiée de celle de Sosulski et al (1982) et décrite dans la figure 3.

Les analyses qualitatives et quantitatives ont été réalisées par HPLC, utilisant

un modèle Beckman 165, équipé d'une colonne C18 Ultrasphère (4.6x250 mm, particules de 5µm) à phase inverse à travers laquelle passait une phase mobile tampon d'acide citrique et de citrate de sodium (80ml de 1.05g de citrate/500ml d'eau + 170 ml de 1.87g de citrate de sodium/500ml d'eau).

Les pics ont été détectés à 280 nm à un débit de 1 ml/mn. Les standards utilisés étaient de l'acide férulique (acide 4-hydroxy-3-méthoxycinnamique) et de l'acide para-coumarique (acide 4-hydroxycinnamique) obtenus de SIGMA. Les teneurs en ces acides phénoliques étaient proportionnelles aux hauteurs des pics obtenus et s'expriment en µg/g.

## B/ *PROSTEPHANUS TRUNCATUS*, SON POUVOIR DESTRUCTEUR ET SON DEVELOPPEMENT:

### 1/ Culture-mère:

Une culture-mère de *Prostephanus truncatus* a été démarrée avec des adultes provenant d'une souche togolaise. Les insectes ont été placés dans des bocaux de verre, d'un litre, contenant de la farine de maïs entier, de la levure de bière (20:1) et quelques grains de maïs entiers (Ritchie). Environ tous les trois mois, la culture était nettoyée et remplacée dans un milieu frais.

## 2/ Tests sans choix:

Pour chaque cultivar testé, environ 500g de grains intacts ont été placés, pendant 3 semaines, dans les conditions expérimentales de 30°C et 70% H.R. pour équilibrage. Après quoi nous avons rempli 5 bocaux de 500 ml avec environ 100g de grains. Dans chacun de ces lots on ajoutait 100 adultes non sexés et d'âge indéterminé. Afin de bien stabiliser les grains et faciliter la colonisation des lots, une dizaine de billes de verres de 1cm de diamètre ont été ajoutées au dessus des grains. Les cinq réplicats ainsi réalisés ont été placés à 30°C et 70% H.R. pendant deux semaines.

Les bocaux ont ensuite été vidés et secoués énergiquement dans des tamis superposés:

- tamis de 4 mm retenant les grains,
- tamis de 1 mm retenant les adultes,
- tamis de 180 um retenant oeufs et larves.

Cette série de tests a permis de mesurer les performances suivantes de l'insecte:

- le % de grains endommagés,
- un coefficient de colonisation égal au rapport entre les grains profondément endommagés et le total des grains endommagés (photo 3),
- la quantité de poudre produite,
- la perte de poids du lot,

**Figure 4: Arène pour la réalisation d'un test avec choix.**

**a: trou grillagé**

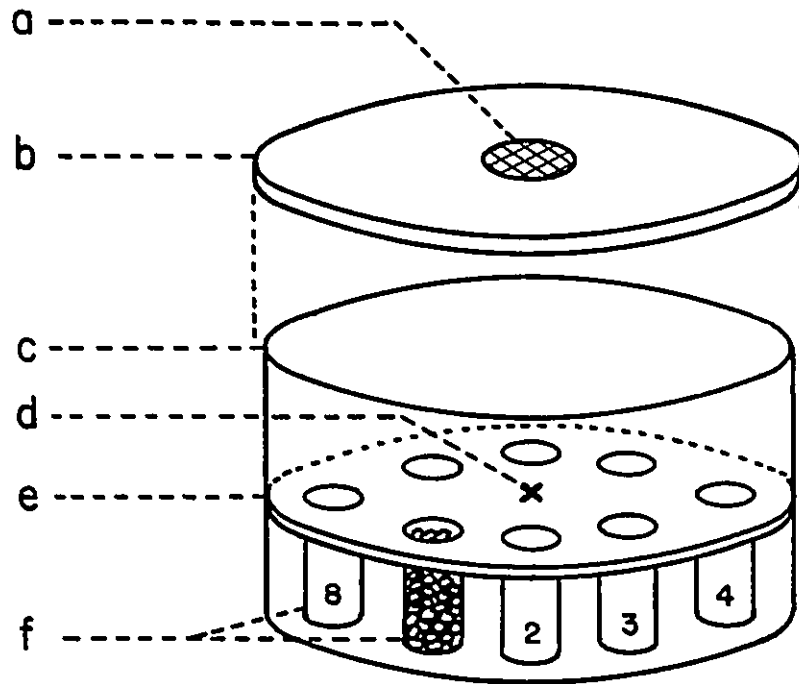
**b: couvercle**

**c: cuve en plastique**

**d: point où sont déposés les insectes**

**e: double plancher avec papier filtre**

**f: fioles remplies de grains intacts (sauf une)**



- la consommation journalière des adultes,
- la mortalité (% des adultes morts).

### **3/ Taux de ponte:**

Dans les tests sans choix, il a été impossible de récolter et de compter le nombre d'oeufs pondus par jour sans détruire le milieu et risquer de détruire oeufs et adultes. Nous avons alors réalisé un test d'oviposition comme suit: 50g de farine de chaque cultivar ont été divisés en cinq lots de 10g et placés dans des fioles de 3 ml. Des adultes ont été sexés selon la méthode de Shires et McCarthy (1976), et une femelle et un mâle ont été introduits dans chacune des fioles. Après une semaine, les fioles ont été vidées tous les deux jours dans un tamis de 180 um et les oeufs ont été récoltés et comptés sous une loupe binoculaire. Les adultes ont été à chaque fois replacés dans leur fiole et leur milieu.

### **4/Tests avec choix:**

Une série de tests avec choix, faite de cinq réplicats, a été réalisée comme suit: une arène a été constituée selon la figure 4. Les sept cultivars testés ont été introduits dans les petits bocaux au hasard, laissant un bocal vide. Cent insectes adultes ont ensuite été déposés au milieu de l'arène et laissés pendant dix jours. Après quoi le nombre d'adultes dans chaque bocal a été enregistré et transformé en

**Photo 3:** Types de dommages rencontrés:  
Rangée supérieure: grains superficiellement endommagés  
Rangée du milieu: grains non endommagés  
Rangée inférieure: grains profondément endommagés.



pourcentage. Le taux de préférence s'exprime donc avec ce % d'adultes présents par cultivar.

#### 5/ Analyses statistiques:

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées par le programme SAS (Ray, 1982), disponible à l'Université d'Ottawa. Pour chaque caractéristique des grains, et pour chaque performance de l'insecte, une analyse de variance (ANOVA) accompagnée d'un test de comparaisons multiples (utilisant la méthode H.S.D. de Tukey ou Kruskal-Wallis; Ray, 1982) ont été réalisés, afin de déceler des différences significatives ( $p=0.05$ ) entre les différents cultivars. Des analyses de corrélation (Pearson ou Spearman) ont aussi été réalisées afin de décerner d'éventuelles caractéristiques des grains expliquants les différences dans les performances de l'insecte parmi les cultivars testés. Des analyses de composantes principales ont été réalisées avec SAS, ainsi qu'une analyse des distances euclidiennes, basée sur l'équation de distances simples euclidiennes suivie d'une réalisation de dendrogrammes d'après la méthode de Nei (programmes écrits en Turbo Pascal, D. Pinero, communication personnelle) afin de classer nos cultivars selon leurs caractéristiques physico-chimiques d'une part et selon leur susceptibilité aux attaques de *Prostephanus truncatus* d'autre part. Enfin, des analyses de régressions multiples (progressives, retrogrades et "maximum R-square improvment",  $p = 0,5$ ; Ray, 1982) ont été réalisées entre les performances de l'insecte et les caractéristiques des grains de maïs.

**RESULTATS****A/ LES GRAINS DE MAÏS ET LEUR VARIABILITE:****1/ Différences physiques et anatomiques:**

Dans le tableau 2 nous retrouvons une tendance générale, à savoir que les grains cornés, ici Ilonga 8032 et Across 7740, sont normalement plus petits et plus denses que les grains dentés, comme Muneng 8128, Poza Rica 8121, Across 8035 et Ratray-Arnold 8149, et que les grains farineux, comme Mexico 212. La taille et la densité moyennes des grains de nos deux cultivars cornés sont respectivement de 0,3705 cm<sup>3</sup> et 0,865, celles de nos quatre cultivars dentés de 0,440 cm<sup>3</sup> et 0,7145 et celles de notre unique variété farineuse de 0,710 cm<sup>3</sup> et 0,710 (à partir du tableau 2). Nous savons que ces différents types de grains dépendent de la proportion et de la distribution d'endosperme vitreux présent. Il est clair que Mexico 212, entièrement farineux présente le grain le plus gros. Ce grain est complètement rempli d'endosperme mou et il n'est pas rare d'y retrouver de petites crevasses au sein de l'endosperme farineux, diminuant ainsi la densité.

**Tableau 2:** Caractéristiques physiques des grains des sept cultivars.

Cultivar	Dureté (N)	Déformation (mm)	Volume du grain (cm <sup>3</sup> )	poids du grain (g)	densité (g/cm <sup>3</sup> )
Ilonga 8032	430.42 a	0.433 ab	0.405 d	0.316 c	0.781 c
Across 7740 QPM	232.71 cd	0.286 d	0.336 f	0.286 e	0.852 a
Muneng 8128	418.52 a	0.476 a	0.560 b	0.304 d	0.543 f
Poza Rica 8121	318.70 b	0.346 cd	0.376 e	0.307 d	0.816 b
Across 8035	285.48 bc	0.329 d	0.429 c	0.286 e	0.683 e
Ratray-Arnold 8149	289.01 b	0.313 d	0.395 d	0.323 b	0.816 b
Mexico 212	201.28 d	0.398 c	0.710 a	0.504 a	0.710 d
Moyennes	310.87	0.369	0.459	0.332	0.743

Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p = 0.05$ ).

Par contre il ne semble pas y avoir de tendance similaire vis-à-vis la dureté (tableau 2): nous ne retrouvons pas de différence entre les types denté et corné, puisque les deux grains les plus durs de notre sélection sont Ilonga (corné) et Muneng (denté) avec des duretés respectives de 430,42 N et 418,52 N. Par contre il apparait bien qu'un grain entièrement farineux soit plus tendre; c'est le cas ici de Mexico 212 avec une dureté de 201 N. Deux composantes peuvent influencer la dureté d'un grain de maïs: la plasticité des couches externes (péricarpe, couche d'aleurones) (tableau 2) et les qualité et proportion de l'endosperme vitreux (tableau 3). La plasticité des couches externes est exprimée ici par la déformation du grain avant cassure. Nos grains les plus durs (Ilonga et Muneng) sont aussi les plus «plastiques» puisqu'ils se sont déformés respectivement de 0,433 mm et de 0,476 mm. Les variétés les moins «plastiques» ne sont pas les plus dures: c'est le cas des cultivars Ratray-Arnold (dureté de 289,01 N, déformation de 0,313 mm) et Across 7740 (dureté de 232,71 N, déformation de 0,286 mm). Mexico 212, le plus tendre, présente une déformation moyenne de 0,398 mm.

Dans les grains des différents cultivars, la proportion du germe varie peu significativement, les deux variétés présentant les plus gros germes étant Across 7740 QPM (34,78 %) et Mexico 212 (32,79 %) (tableau 3). Par contre les différences ont été très significatives quant au pourcentages d'endospermes vitreux et farineux ( $p > 0.0001$  pour les deux). Bien entendu, la variété la plus farineuse est Mexico 212 avec 58,77 % d'endosperme farineux contre seulement 7,84 % de couches externes. Les cultivars les plus cornés sont Muneng 8128 et Ilonga 8032 avec 47,44 % et

**Tableau 3:** Indices de formes des grains de maïs et proportions surfaciques des différents organes (endospermes vitreux et farineux, germe), dans une coupe longitudinale.

Cultivar	Surface totale (mm)	Indice forme *	% du germe	% endosperme farineux (F)	% endosperme corné (C)	F/C Bilan
Ilonga 8032	93.00 a	0.700 c	24.56 b	29.37 d	44.52 ab	0.708 c
Across 7740 QPM	86.34 b	0.792 b	34.78 a	41.92 b	22.91 e	2.490 b
Muneng 8128	79.33 cd	0.819 ab	22.86 b	29.60 d	47.44 a	0.680 c
Poza Rica 8121	76.23 d	0.787 b	26.97 b	31.68 cd	41.05 bc	0.880 bc
Ratray-Arnold 8149	82.24 bc	0.724 c	26.45 b	39.21 b	33.91 d	1.194 bc
Across 8035	65.17 e	0.857 a	25.86 b	37.30 bc	36.78 cd	1.063 bc
Mexico 212	83.34 bc	0.718 c	32.79 a	58.77 a	7.84 f	10.06 a
Moyennes	80.81	0.771	27.75	38.26	33.49	2.439

Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p=0.05$ ).

\* dimension minimum / dimension maximum sur une coupe longitudinale.

44,52 % d'endosperme corné contre 29,60 % et 29,37 % d'endosperme farineux respectivement. Ces deux derniers présentent donc les rapports endospermes farineux/corné (F/C) les plus faibles (0,680 et 0,708 respectivement) et Mexico 212 le plus fort (10,06). Notons que la surface totale d'une coupe longitudinale des grains n'exprime pas forcément la grosseur du grain puisque Mexico 212 présente les grains les plus volumineux (tableau 2) mais une surface totale moyenne. L'indice de forme du tableau 3 exprime en fait le rapport entre la dimension minimale et la dimension maximale mesurées sur une coupe longitudinale du grain.

## 2/ Différences biochimiques:

Dans le tableau 4, nous donnons les caractéristiques biochimiques générales des sept cultivars analysés. Aucune différence significative n'est rencontrée parmi les teneurs partielles moyennes en eau (S1), la variation n'étant que de 10,42 % à 11,01 %. Par contre, pour la teneur totale en eau, des différences significatives apparaissent, sans toutefois caractériser davantage les types denté et corné. Mexico 212, à grains farineux présente le plus haut taux moyen d'humidité avec 14,76 %, tandis que Ratray-Arnold 8149, à grains dentés, se trouve avoir la teneur totale moyenne en eau la plus basse, avec 13,96 %.

Tous nos cultivars présentent des teneurs estimées en protéines significativement différentes, avec des teneurs moyennes allant de 8,99 %, pour Mexico 212, à 12,14 %, pour Across 7740 QPM. Notons ici que la teneur estimée

Tableau 4: Caractéristiques biochimiques générales des grains de maïs.

Cultivar	Humidité partielle (%)	Humidité totale (%)	Teneur estimée en protéines (%)	Teneur en lipides (%)	Teneur totale en sucres (mg/g)	Teneur totale en phénoliques (mg/g)
Ilonga 8032	10.45 a	14.41 b	11.14 c	3.92 ab	2.36 g	2.095 a
Across 7740 QPM	11.01 a	14.35 bc	12.14 a	3.64 ab	7.53 c	1.353 d
Muneng 8128	10.55 a	14.28 c	11.78 b	3.31 ab	4.36 f	1.639 bcd
Poza Rica 8121	10.42 a	14.29 c	10.82 d	3.82 ab	5.05 e	1.931 ab
Across 8035	10.76 a	14.17 d	9.85 f	2.56 b	8.24 b	1.770 a
Ratray Arnold 8149	10.79 a	13.96 e	10.43 e	4.24 ab	10.24 a	2.034 a
Mexico 212	10.84 a	14.76 a	8.99 g	4.98 a	5.81 d	1.532 cd
Moyennes	10.69	14.32	10.74	3.78	6.23	1.765

Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p=0.05$ ).

en protéines semble caractériser les types de grains: les deux cultivars de type corné, présentant une grande proportion d'endosperme vitreux, ont une teneur moyenne de 11,64 %, tandis que les quatre cultivars dentés ont une teneur moyenne de 10,72 % et le cultivar farineux a une moyenne de 8,99 %.

Nous n'obtenons qu'une petite différence significative entre Mexico 212 et Across 8035 quant à la teneur en lipides avec des moyennes respectives de 4,98 % et 2,56 %.

Tous nos cultivars ont des teneurs en sucres significativement différentes. Le cultivar ayant la plus faible teneur en glucides de notre sélection est Ilonga 8032 avec seulement 2,36 mg/g de sucres libres, tandis que notre cultivar le plus doux, Ratray-Arnold contient 10,24 mg/g de sucres libres, la moyenne de tous les cultivars étant de 6,23 mg/g. Le sucre le plus important et qui présente la plus grande variation parmi nos cultivars est le sucrose variant de 0,62 mg/g chez Muneng 8128 à 6,54 mg/g chez Ratray-Arnold 8149 (tableau 5). Les teneurs en glucose et fructose varient moins, de 0,91 mg/g (Ilonga 8032) à 2,21 mg/g (Across 8035) et de 0,92 mg/g (Ilonga 8032) à 2,99 mg/g (Across 7740 QPM) respectivement (tableau 5).

L'analyse des acides phénoliques fournit une variation significative au sein de notre sélection dans laquelle on peut reconnaître trois cultivars fortement chargés (Ilonga 8032, Ratray-Arnold 8149 et Across 8035), avec une teneur moyenne de 1,966 mg/g, deux cultivars moyennement chargés (Muneng 8128 et Poza Rica 8121), avec une teneur moyenne de 1,785 mg/g et enfin deux cultivars faiblement chargés (Mexico 212 et Across 7740 QPM), avec une teneur moyenne de 1,443 mg/g. Parmi

Tableau 5: Teneurs en sucres et en acides hydroxycinnamiques des grains.

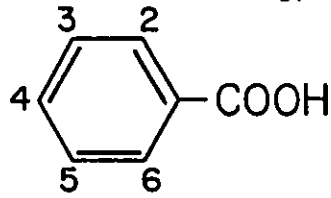
Cultivar	Teneur en glucose (mg/g)	Teneur en fructose (mg/g)	Teneur en sucrose (mg/g)	Teneur en p-coumarique (mg/g)	Teneur en t-féruilique (mg/g)	Teneur en c-féruilique (mg/g)	Total de ac féruilique (mg/g)
Ilonga 8032	0.91 e	0.92 e	0.53 g	0.156 a	1.391 a	0.549 bc	1.939 a
Across 7740 OPH	1.82 c	2.99 a	2.72 c	0.068 cd	0.817 b	0.468 c	1.285 c
Muneng 8128	2.06 b	1.68 c	0.62 f	0.133 ab	1.061 ab	0.445 c	1.506 bc
Poza Rica 8121	1.68 d	2.14 b	1.23 e	0.051 d	1.088 ab	0.792 a	1.880 a
Across 8035	2.21 a	1.19 d	4.84 b	0.091 c	0.994 b	0.684 ab	1.678 ab
Ratray Arnold 8149	2.03 b	1.67 c	6.54 a	0.123 b	1.356 a	0.556 bc	1.912 a
Mexico 212	2.17 a	0.98 e	2.66 d	0.042 d	0.901 b	0.589 bc	1.491 bc
Moyennes	1.84	1.65	2.73	0.095	1.087	0.583	1.671

Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p=0.05$ ).

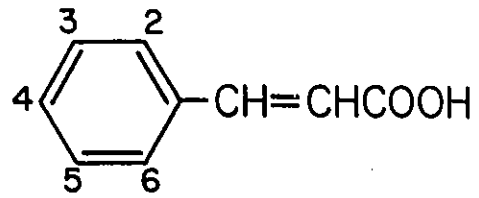
**Figure 5: Structures moléculaires des acides phénoliques rencontrés dans le grain de maïs et teneurs de ces acides dans les différents cultivars testés.**

BENZOIC ACID

37



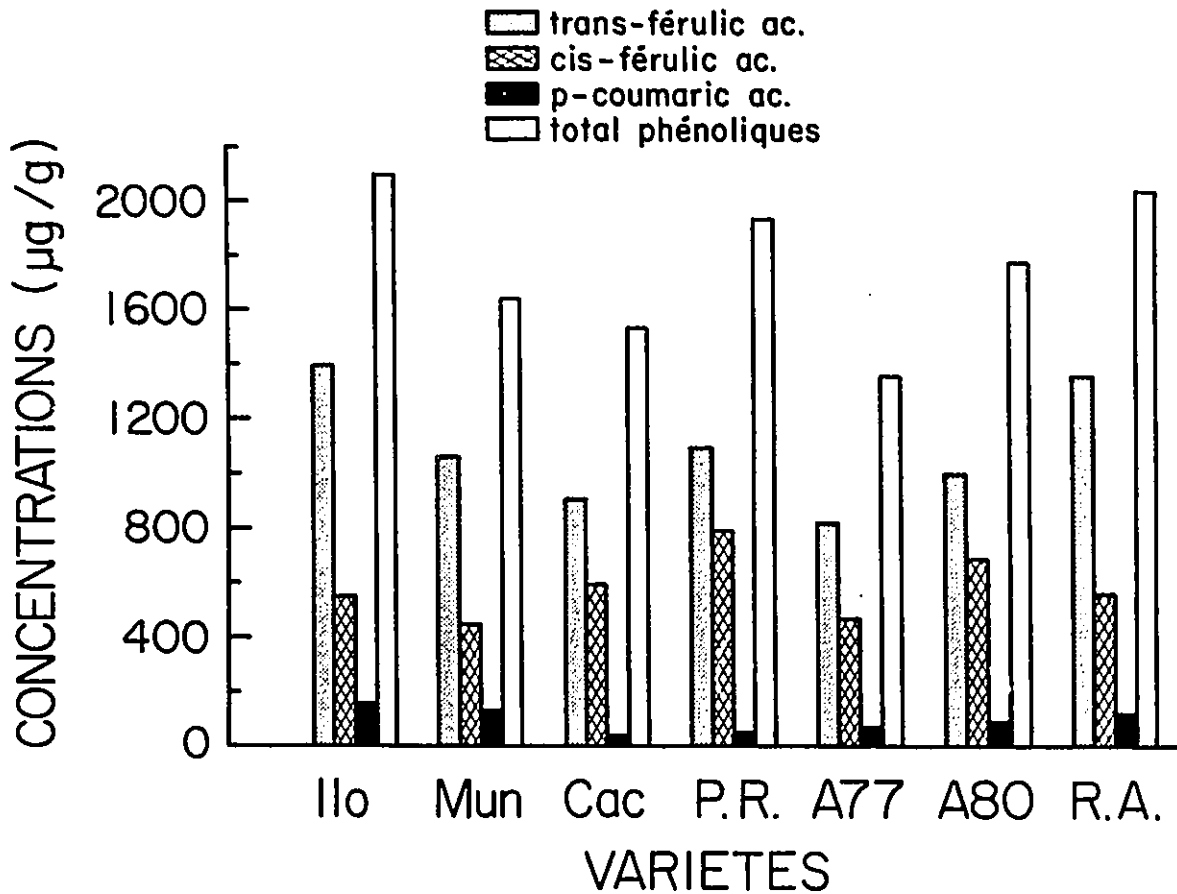
CINNAMIC ACID



Substitution

3,4-di-OH	Protocatechuic	Caffeic
3-OH	m-Hydroxybenzoic	m-Coumaric
4-OH	p-Hydroxybenzoic	p-Coumaric
3-OMe, 4-OH	Vanillic	Ferulic
3,5-di-OMe, 4-OH	Syringic	Sinapic

TENEURS EN ACIDES PHENOLIQUES



ces acides hydroxycinnamiques, l'acide para-coumarique présente les différences les plus significatives, même si c'est le moins important en concentration puisqu'il ne représente qu'environ 5,4 % de ces acides phénoliques (à partir du tableau 5).

### 3/ Corrélations entre les caractéristiques des grains et classification des cultivars:

Le tableau 6 révèle les relations significatives ( $p < 0.1$ ) pouvant exister entre les différentes caractéristiques physiques. Il semble bien qu'un grain petit a tendance à être plus dense ( $r = -0.621$ ), et par conséquent un grain dense et petit serait peu plastique ( $r = -0.731$ ). Pourtant aucune corrélation significative n'a pu être détectée entre la dureté et les volume, poids et densité. Par contre, le poids des grains est significativement et positivement corrélé avec la quantité d'endosperme farineux ( $r = 0.831$ ), tandis qu'il l'est négativement avec la proportion d'endosperme corné ( $r = -0.755$ ). Ces deux proportions semblent influencer la dureté du grain, l'un négativement (endosperme farineux  $r = -0.856$ ) l'autre positivement (endosperme corné  $r = 0.890$ ), avec une signification plus importante avec l'endosperme vitreux ( $p < 0.007$ ). Il faut noter qu'un grain dur présente aussi généralement des couches externes plastiques puisque la dureté semble être positivement corrélée avec la déformation ( $r = +0.683$ ). Parmi les caractéristiques biochimiques générales (tableau 7), deux corrélations significatives ont été détectées entre l'humidité partielle et d'une part la teneur totale en sucres ( $r = +0,690$ ) et d'autre part la teneur totale en

**Tableau 6: Matrice de corrélation des caractéristiques physiques des grains des cultivars testés.**

	Volume (cm <sup>3</sup> )	Poids (g)	Germe (%)	Endosperme farineux (%)	Endosperme vitreux (%)	F/C	Indice de forme	dureté (N)	Energie (J)	Déforma- tion (mm)
Volume	1.000 0.000									
Poids	<u>0.844</u> 0.017	1.000 0.000								
Germe (%)	-0.621 0.137	-0.110 0.815	1.000 0.000							
Endosperme farineux	0.596 0.158	<u>0.831</u> 0.021	<u>0.762</u> 0.046	1.000 0.000						
Endosperme vitreux	-0.467 0.291	<u>-0.755</u> 0.050	<u>-0.878</u> 0.009	<u>-0.978</u> 0.000	1.000 0.000					
F/C	<u>0.773</u> 0.041	<u>0.950</u> 0.001	0.650 0.114	<u>0.928</u> 0.002	<u>-0.902</u> 0.006	1.000 0.000				
Indice de forme	-0.191 0.682	-0.527 0.224	-0.158 0.736	-0.285 0.535	-0.158 0.736	-0.375 0.407	1.000 0.000			
Dureté (N)	-0.172 0.712	-0.474 0.282	<u>-0.852</u> 0.015	<u>-0.856</u> 0.014	<u>0.890</u> 0.007	-0.666 0.102	-0.006 0.990	1.000 0.000		
Energie (J)	0.076 0.871	-0.252 0.585	<u>-0.793</u> 0.033	-0.708 0.075	<u>0.761</u> 0.047	-0.460 0.300	-0.093 0.843	<u>0.965</u> 0.000	1.000 0.000	
Déformation (mm)	0.586 0.167	0.242 0.601	-0.552 0.199	-0.251 0.587	0.349 0.443	0.055 0.906	-0.160 0.732	0.683 0.091	<u>0.846</u> 0.017	1.000 0.000

N: Newton; J: Joules.

valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives ( $p < 0.05$ )

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significatives ( $0.1 < p < 0.05$ )

**Tableau 7: Matrice de corrélation des caractéristiques biochimiques générales des grains des cultivars testés.**

	Humidité partielle	Humidité totale	Teneur estimée en protéines	Teneur totale en lipides	Teneur totale en sucres	Teneur totale en phénoliques
Humidité partielle	1.000 0.000					
Humidité totale	0.071 0.879	1.000 0.000				
Teneur estimée en protéines	-0.118 0.800	-0.306 0.504	1.000 0.000			
Teneur totale en lipides	0.125 0.789	0.515 0.237	-0.360 0.428	1.000 0.000		
Teneur totale en sucres	0.690 0.086	-0.548 0.203	-0.235 0.611	-0.079 0.866	1.000 0.000	
Teneur totale en phénoliques	-0.682 0.092	-0.458 0.301	-0.136 0.771	0.003 0.996	-0.136 0.772	1.000 0.000

valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives ( $p < 0.05$ )

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significatives ( $0.1 < p < 0.05$ )

acides phénoliques ( $r = -0.682$ ), plus particulièrement avec l'acide férulique ( $r = -0.682$ ). Le poids et le volume d'un grain de maïs pourraient être influencés par son humidité ( $r = +0.752$  et  $r = +0.669$  respectivement), (tableau 8). De plus, les teneurs en protéines et en lipides détermineraient aussi le poids du grain ( $r = -0.711$  et  $r = +0.791$  respectivement). Par contre c'est seulement la quantité d'eau disponible qui semblerait influencer la dureté ( $r = -0.798$ ) et la plasticité des couches externes ( $r = -0.602$ ). De même, ces deux caractéristiques physiques pourraient être déterminées par la teneur en sucres ( $r = -0.736$ ,  $r = -0.774$ ) et plus particulièrement par le sucrose ( $r = -0.643$ ,  $r = -0.676$ ). La qualité de l'endosperme pourrait jouer un rôle significatif dans le pouvoir de retenir l'eau dans le grain: en effet l'humidité partielle est positivement corrélée avec la quantité d'endosperme farineux ( $r = 0.694$ ) tandis qu'elle l'est négativement avec la quantité d'endosperme vitreux ( $r = -0.744$ ). Cette tendance à être moins humide lorsque le grain est plus vitreux pourrait se confirmer dans la corrélation significative entre l'humidité totale du grain et le rapport F/C ( $r = 0.700$ ). L'acide para-coumarique jouerait un rôle déterminant dans la dureté du grain ( $r = +0.776$ ); de plus sa concentration est significativement corrélée avec le rapport F/C ( $R = -0.674$ ).

L'analyse de composantes principales et l'étude des distances euclidiennes entre les moyennes de ces caractéristiques des différents cultivars (sauf les proportions des deux types d'endospermes) révèlent trois groupes sensiblement distincts (figure 6):

**Tableau 8a: Matrice de corrélation des caractéristiques biochimiques et physiques des grains de maïs:**

	Volume	Poids	Germe (%)	Endosperme farineux (%)	Endosperme vitreux (%)	P/C	Indice de forme	dureté (H)	Energie (J)	Déformation (mm.)
humidité partielle	0.060	0.211	<u>0.764</u>	0.694	-0.744	0.449	0.079	<u>-0.798</u>	<u>-0.791</u>	-0.602
	0.898	0.649	0.046	0.084	0.055	0.313	0.866	0.032	0.034	0.153
Humidité totale	<u>0.569</u>	<u>0.752</u>	0.489	0.579	-0.596	<u>0.794</u>	-0.321	-0.260	-0.052	0.379
	0.100	0.050	0.265	0.173	0.158	0.033	0.483	0.573	0.912	0.403
Teneur estimée en Protéines	-0.557	-0.711	-0.115	-0.642	0.511	-0.637	0.216	0.478	0.392	0.047
	0.194	0.074	0.806	0.120	0.241	0.124	0.642	0.278	0.384	0.920
Teneur en lipides	0.469	<u>0.791</u>	0.437	0.613	-0.607	0.700	<u>-0.852</u>	-0.343	-0.178	0.086
	0.288	0.030	0.327	0.143	0.148	0.080	0.015	0.452	0.703	0.854
Teneur en sucres	-0.231	-0.096	0.295	0.346	-0.329	0.017	0.216	-0.631	-0.736	-0.774
	0.619	0.838	0.521	0.447	0.471	0.971	0.641	0.129	0.060	0.041
Teneur en phénoliques	-0.322	-0.234	-0.686	-0.532	0.597	-0.489	-0.369	0.554	0.477	0.141
	0.481	0.613	0.083	0.219	0.157	0.265	0.415	0.197	0.314	0.762

N: Newton; J: joules.

valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives (p<0.05)

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significative (0.1<p<0.05)

**Tableau 8b: Matrice de corrélation des caractéristiques biochimiques et physiques des grains de maïs:**

	Volume	Poids	Germe (%)	Endosperme farineux (%)	Endosperme vitreux (%)	P/C	Indice de forme	dureté (M)	Energie (J)	Déformation (mm.)
Teneur en sucrose	-0.174	-0.011	0.154	0.344	-0.291	0.036	0.047	-0.537	-0.643	-0.676
	0.709	0.932	0.741	0.450	0.527	0.938	0.921	0.214	0.120	0.095
Teneur en glucose	0.407	0.248	0.219	0.501	-0.409	0.350	0.500	-0.583	-0.525	-0.249
	0.365	0.592	0.637	0.252	0.362	0.441	0.253	0.170	0.227	0.590
Teneur en fructose	-0.544	-0.464	0.451	-0.119	-0.040	-0.265	0.328	-0.262	-0.350	-0.554
	0.207	0.294	0.310	0.800	0.933	0.566	0.473	0.570	0.442	0.197
Teneur en t-férulique	-0.196	-0.186	-0.753	-0.520	0.606	-0.462	-0.444	0.645	0.574	0.301
	0.674	0.690	0.051	0.231	0.150	0.297	0.318	0.117	0.178	0.511
Teneur en c-férulique	-0.152	0.066	-0.073	0.015	0.015	0.007	0.087	-0.211	-0.284	-0.315
	0.745	0.888	0.877	0.974	0.975	0.987	0.852	0.650	0.537	0.491
Teneur en p-coumarique	-0.296	-0.541	-0.723	-0.676	0.717	-0.674	-0.049	0.776	0.682	0.363
	0.520	0.209	0.066	0.096	0.069	0.097	0.917	0.040	0.092	0.423

J: Joules; K: Newton.

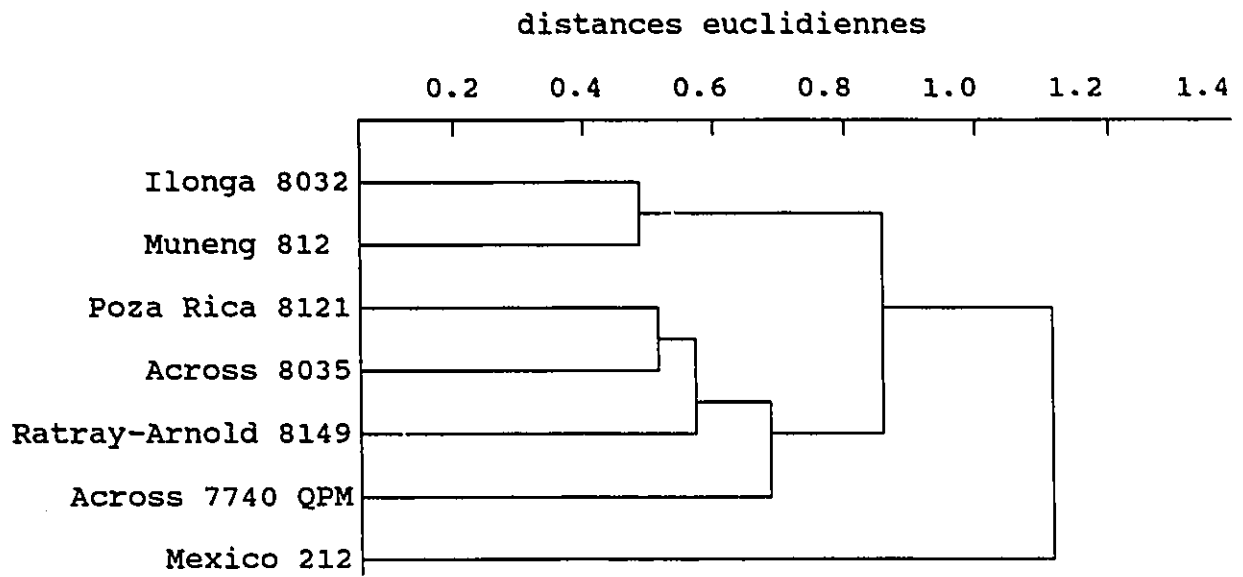
valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives (p<0.05)

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significatives (0.1<p<0.05)

**Figure 6: Dendrogramme des sept cultivars analysés à partir des distances euclidiennes entre les moyennes des caractéristiques physico-chimiques des grains.**



- 1- Ilonga 8032 et Muneng 8128,
- 2- Poza Rica 8121, Across 8035, Ratray-Arnold 8149 et Across 7740 QPM,
- 3- Mexico 212.

B/ PERFORMANCES DE *PROSTEPHANUS TRUNCATUS* SUR LES  
DIFFERENTS CULTIVARS:

1/ Transformations mécaniques des grains de maïs:

Les adultes et les larves du Grand Capucin sont particulièrement destructeurs et transforment rapidement un lot de grains de maïs entiers en un amas de poudre et de morceaux de péricarpe (photo 3). Le tableau 9 présente les moyennes des performances mécaniques mesurées après deux semaines d'infestation. Le pourcentage de grains endommagés varie significativement de 36,4 % pour le cultivar Ratray-Arnold à 54,48 % pour Mexico 212. Parmi ces grains endommagés par l'adulte, la proportion de grains profondément attaqués varie elle aussi significativement de 62 % chez Poza Rica 8121 à 95 % chez Mexico 212. Cette proportion révèle un pouvoir de pénétration de l'adulte plus ou moins facilité par les caractéristiques du grain. La quantité de poudre produite, et par conséquent la perte de poids des lots infestés varient sensiblement d'un cultivar à un autre dans des fourchettes respectives de 3,14 - 8,38 g et de 5,02 - 8,62 %. Les valeurs les plus

**Tableau 9:** Performances mécaniques moyennes de *Prostephanus truncatus* sur cinq lots de 100g de grains de maïs intacts, pendant deux semaines d'infestation.

Cultivar	Grains endommagés (%)	Coefficient de pénétration	Poudre produite (g)	Perte de poids (%)
Mexico 212	54.48 a	0.95 *	8.38 a	8.62 a
Poza Rica 8121	53.88 a	0.62 d	3.98 bc	5.62 bc
Muneng 8128	46.16 ab	0.717 abc	3.74 bc	7.19 ab
Ilonga 8032	43.70 bc	0.711 bc	3.60 bc	5.02 c
Across 7740 QPM	42.42 bc	0.766 a	4.78 b	7.92 a
Across 8035	40.42 bc	0.683 c	3.14 c	6.99 abc
Ratray-Arnold 8149	36.40 c	0.750 ab	3.26 c	5.47 bc
Moyennes 6.69	43.35	0.742		4.41

Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p=0.05$ ) (\*: estimation).

élevées ont toujours été mesurées dans les lots de Mexico 212.

## 2/ Physiologie et développement de l'insecte:

Quant aux performances physiologiques de *Prostephanus truncatus* aucune différence significative n'a pu être détectée sauf pour le taux de ponte qui varie de 0,352 à 1,688 oeufs/femelle/jour (tableau 10). Là encore, le taux le plus élevé a été enregistré avec le cultivar Mexico 212, tandis que le taux le plus bas a été mesuré chez Muneng 8128. Même si les différences ne sont pas significatives, c'est dans le dernier cultivar que les adultes ont le moins consommé, avec une consommation journalière par individu de 1,64 mg, et que l'on a retrouvé le moins d'adultes lors des tests avec choix: 7,26 %; tandis que les moyennes des sept cultivars sont respectivement de 2,28 mg/adulte/jour et de 9,10 %.

## 3/ Etudes de corrélations et de comparaisons:

Le tableau 11 donne les coefficients de corrélation de Pearson entre les différentes performances mesurées de *Prostephanus truncatus* sur les sept cultivars testés. Il est clair que le pouvoir pénétrant de l'adulte déterminerait directement la production de poudre ( $r = +0.837$ ) et conséquemment la perte de poids des lots infestés ( $r = +0.666$ ). Cette production de poudre par les adultes s'accompagnerait évidemment d'une consommation des grains ( $r = +0.682$ ). La mortalité et le poids

**Tableau 10:** Performances physiologiques de *Prostephanus truncatus* sur des grains de maïs intacts ou de la farine de grains entiers, après deux semaines d'infestation.

Cultivar	Consommation journalière (mg/adulte/jour) (*)	Mortalité (%) (*)	Taux de ponte (oeufs/O/jour)	Adultes par cultivar (%) (choix) (*)
Mexico 212	3.23	13.33	1.688 a	14.36
Poza Rica 8121	2.61	16.66	1.196 ab	10.56
Ilonga 8032	2.50	10.00	0.596 bc	8.76
Ratray-Arnold 8149	2.41	20.33	1.027 b	10.08
Across 7740 QPM	1.87	21.66	1.144 ab	7.45
Across 8035	1.67	18.33	0.616 bc	5.25
Muneng 8128	1.64	11.66	0.352 c	7.26
Moyennes	2.28	16.0	0.946	9.10

Les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p=0.05$ ). (\*: aucune différence significative).

des adultes, pendant ces deux semaines d'infestation, ne sont significativement corrélés à aucune autre performance de ceux-ci. Par contre, le taux de ponte des femelles l'est fortement avec la quantité de poudre produite ( $r = +0.784$ ) et avec la consommation ( $r = +0.769$ ). De même, il semble que, lors des tests avec choix, les adultes auraient préféré les cultivars où les dommages sont plus élevés ( $r = +0.630$ ), la poudre est produite en plus grande quantité ( $r = +0.772$ ), la consommation plus aisée ( $r = +0.950$ ) et enfin la ponte stimulée ( $r = +0.810$ ).

L'ordination des sept cultivars testés par les distances euclidiennes des moyennes de ces performances (figure 7) révèle encore trois groupes distincts, mais légèrement différents:

1- Across 7740 QPM, Muneng 8128, Across 8035, pouvant être classés comme résistants,

2- Ilonga 8032, Ratray-Arnold 8149, Poza Rica 8121, pouvant être classés comme intermédiaires, et

3- Mexico 212, classé comme susceptible.

Tableau 11: Matrice de corrélations entre les performances mécaniques de *Prostephanus truncatus* sur les différents cultivars testés:

choix	% grains endommagés	poudre produite	perte de poids	coefficient pénétration	consommation journalière	mortalité adultes	poids adultes	taux de ponte	% adultes test avec
% grains endommagés	1.000 0.000								
poudre produite	0.660 0.107	1.000 0.000							
perte de poids	0.318 0.487	0.714 0.072	1.000 0.000						
coefficient pénétration	0.176 0.706	<u>0.837</u> 0.019	0.666 0.102	1.000 0.000					
consommation journalière	0.584 0.169	0.682 0.092	-0.011 0.981	0.495 0.258	1.000 0.000				
mortalité adulte	-0.439 0.324	-0.183 0.694	0.121 0.795	-0.091 0.847	-0.261 0.573	1.000 0.000			
poids des adultes	0.470 0.288	0.021 0.964	0.088 0.852	-0.145 0.757	-0.132 0.778	-0.591 0.163	1.000 0.000		
taux de ponte	0.509 0.243	<u>0.784</u> 0.037	0.405 0.367	0.579 0.173	<u>0.769</u> 0.043	0.294 0.523	-0.330 0.469	1.000 0.000	
% adultes test avec choix	0.630 0.130	<u>0.772</u> 0.042	0.162 0.729	0.605 0.150	<u>0.950</u> 0.001	-0.218 0.638	0.043 0.928	<u>0.810</u> 0.027	1.000 0.000

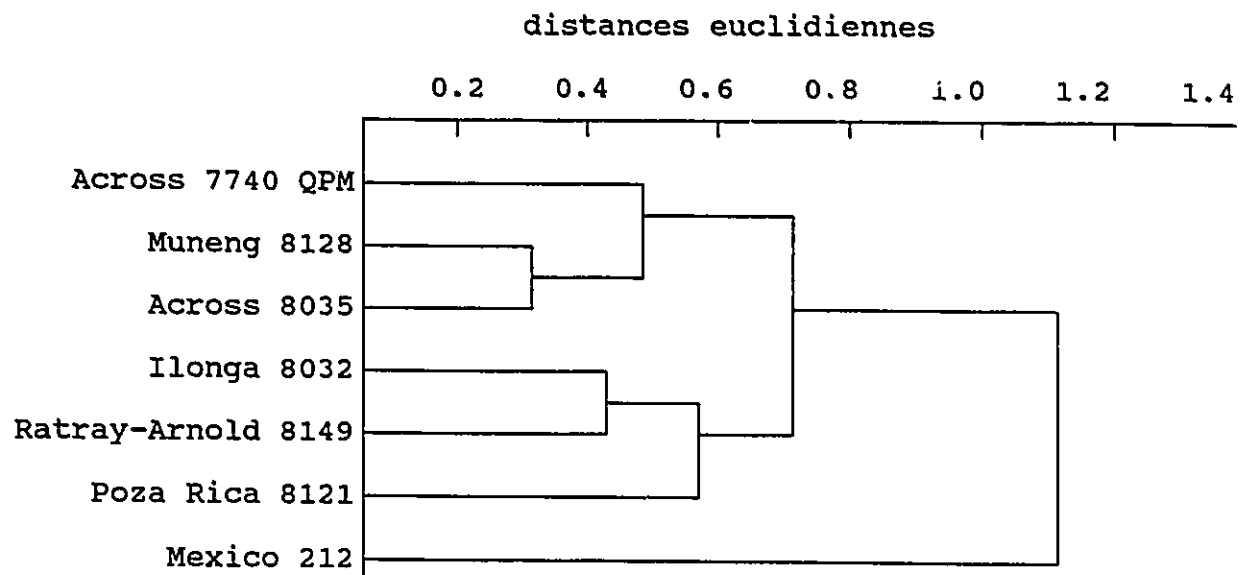
valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives ( $p < 0.05$ )

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significatives ( $0.1 < p < 0.05$ )

**Figure 7: Dendrogramme des sept cultivars testés, à partir des distances euclidiennes entre les moyennes des performances de l'insecte.**



4/ Corrélations entre les caractéristiques des grains et les performances de *Prostephanus truncatus*:

Les tableaux 12 et 13 indiquent les corrélations retrouvées entre d'une part les caractéristiques physico-chimiques des grains testés et d'autre part les performances de l'insecte mesurées sur ces différents cultivars. Le pourcentage de grains endommagés par les adultes n'est corrélé significativement avec aucune caractéristique physique du grain. Seules les teneurs en eau et en acide p-coumarique pourraient influencer, l'une positivement ( $r = 0,751$ ), l'autre négativement ( $r = -0.702$ ), le nombre de grains attaqués. Par contre la production de poudre par les adultes de *Prostephanus truncatus* semble être influencée significativement par le poids ( $r = 0.919$ ) et le volume ( $r = 0.751$ ) des grains, par leurs quantités d'endosperme farineux ( $r = 0.875$ ) et corné ( $r = -0.866$ ) ainsi que par leurs teneurs en eau ( $r = 0.869$ ), en lipides ( $r = 0.716$ ) et en acide p-coumarique ( $r = -0.714$ ). La perte de poids des lots de maïs infestés est positivement corrélée avec l'humidité partielle des grains ( $r = 0,673$ ) et l'est négativement avec leur teneur en acides phénoliques ( $r = -0,934$ ) et plus particulièrement avec l'acide trans-féulique ( $r = -0,879$ ). Le rapport F/C est positivement corrélé avec la quantité de poudre produite ( $r = 0.704$ ). Le pouvoir de pénétration des adultes dans les grains pourrait être influencé par le volume ( $r = 0,709$ ) et le poids ( $r = 0,833$ ) de ceux-ci ainsi que par leur teneur en lipides ( $r = 0,691$ ). Là encore la qualité de l'endosperme pourrait être déterminant puisque le rapport F/C est très significativement et positivement corrélé

**Tableau 12: matrice de corrélation entre les caractéristiques physiques des grains et les performances de *Prostephanus truncatus*:**

	Volume	Poids	Germe (%)	Endosperme farineux (%)	Endosperme vitreux (%)	P/C	Indice de forme	dureté (N)	Energie (J)	Déformation (mm.)
% grains endommagés	0.540 0.211	0.580 0.172	0.233 0.615	0.301 0.513	-0.297 0.518	0.547 0.204	-0.111 0.813	-0.142 0.761	0.036 0.939	0.353 0.437
poudre produite	0.751 0.052	<u>0.919</u> 0.004	0.680 0.092	<u>0.875</u> 0.010	<u>-0.866</u> 0.012	<u>0.978</u> 0.000	-0.373 0.410	-0.607 0.148	-0.388 0.390	0.113 0.809
perte de poids	0.589 0.164	0.499 0.255	0.650 0.114	0.721 0.067	-0.724 0.066	0.704 0.077	0.279 0.545	-0.628 0.131	-0.474 0.232	-0.033 0.943
coefficient pénétration	0.709 0.075	<u>0.833</u> 0.020	0.592 0.161	<u>0.874</u> 0.010	<u>-0.839</u> 0.018	<u>0.882</u> 0.009	-0.479 0.277	-0.542 0.203	-0.357 0.432	0.089 0.850
consommation journalière	0.436 0.328	<u>0.802</u> 0.030	0.332 0.467	0.561 0.190	-0.537 0.214	0.682 0.091	<u>-0.779</u> 0.039	-0.329 0.472	-0.192 0.681	0.069 0.982
mortalité adulte	-0.542 0.209	-0.324 0.479	0.481 0.274	0.198 0.670	-0.280 0.543	-0.128 0.785	0.332 0.500	-0.641 0.121	<u>-0.793</u> 0.033	<u>-0.949</u> 0.001
poids des adultes	0.471 0.286	0.053 0.910	-0.492 0.262	-0.314 0.492	0.398 0.376	-0.074 0.875	0.248 0.591	0.514 0.238	0.653 0.112	<u>0.765</u> 0.045
taux de ponte	0.299 0.515	0.708 0.075	<u>0.793</u> 0.033	<u>0.818</u> 0.025	<u>-0.856</u> 0.014	<u>0.780</u> 0.039	-0.420 0.348	<u>-0.819</u> 0.024	-0.715 0.071	-0.414 0.356
% adultes test avec choix	0.569 0.183	<u>0.862</u> 0.013	0.387 0.391	0.639 0.122	-0.606 0.150	<u>0.757</u> 0.049	-0.711 0.074	-0.391 0.386	-0.213 0.647	0.112 0.911

N: Newton; J: Joules.

valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives ( $p < 0.05$ )

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significatives ( $0.1 < p < 0.05$ )

avec le coefficient de pénétration ( $r = +0,882$ ). De même, le poids des grains, leur teneur en lipides ainsi que la qualité de l'endosperme pourraient déterminer la consommation journalière des adultes ( $r = +0,802$ ,  $r = +0,890$  et  $r = +0,682$  respectivement). La dureté et la plasticité des couches externes du grain semblent pouvoir influencer négativement et significativement la mortalité des adultes présents dans les lots infestés ( $r = -0,793$  et  $r = -0,943$  respectivement). Notons aussi que cette mortalité est significativement corrélée avec la teneur en sucres ( $r = 0,867$ ) et plus particulièrement avec le sucrose ( $r = 0,713$ ). Seule la densité des grains est significativement corrélée avec le poids des adultes ( $r = -0,758$ ). Le taux de ponte de femelles de *Prostephanus truncatus* sur les sept cultivars testés est positivement corrélé avec le poids des grains ( $r = 0,708$ ), la quantité d'endosperme farineux ( $r = 0,818$ ) et la teneur en lipides ( $r = 0,749$ ). Par contre, ce même taux est négativement corrélé avec la dureté du grain ( $r = -0,819$ ) et sa teneur en acide para-coumarique ( $r = -0,852$ ). Le rapport F/C influencerait aussi le taux de ponte des femelles ( $r = 0,780$ ). Enfin, le taux d'adultes retrouvés dans un cultivar lors des tests avec choix est positivement corrélé avec le poids de ses grains ( $r = 0,862$ ), la proportion entre les deux types d'endospermes ( $r = 0,757$ ) et la teneur en lipides ( $r = 0,945$ ). L'indice de forme des grains est significativement corrélé avec la consommation journalière des adultes ( $r = -0,779$ ) et avec le pourcentage d'adultes retrouvés par cultivar lors des tests avec choix ( $r = -0,711$ ).

**Tableau 13a: Matrice de corrélation entre les caractéristiques biochimiques des grains de maïs et les performances de *Prostephanus truncatus*:**

	% grains endommagés	pourde produite	perte de poids	coefficient de pénétration	consommation journalière	mortalité adultes	poids adultes	taux de ponte	% adultes test avec choix
humidité partielle	-0.318	0.379	0.673	0.611	-0.092	0.661	-0.548	0.432	0.009
	0.487	0.402	0.098	0.145	0.844	0.106	0.203	0.333	0.985
Humidité totale	0.751	0.869	0.578	0.616	0.569	-0.504	0.139	0.506	0.575
	0.052	0.011	0.174	0.140	0.183	0.249	0.766	0.247	0.177
Teneur estimée en Protéines	-0.274	-0.498	-0.200	-0.433	-0.599	0.079	0.203	-0.500	-0.535
	0.552	0.255	0.668	0.331	0.155	0.866	0.662	0.254	0.216
Teneur en lipides	0.423	0.716	0.120	0.691	0.890	-0.178	-0.075	0.749	0.945
	0.344	0.070	0.798	0.085	0.007	0.703	0.873	0.053	0.001
Teneur en sucres	-0.548	-0.119	0.154	0.130	-0.183	0.867	-0.511	0.247	-0.110
	0.203	0.799	0.742	0.781	0.695	0.012	0.241	0.594	0.814
Teneur en phénoliques	-0.231	-0.548	-0.934	-0.491	0.197	-0.255	-0.070	-0.312	0.013
	0.618	0.203	0.002	0.263	0.672	0.581	0.882	0.500	0.978

valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives ( $p < 0.05$ )

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significatives ( $0.1 < p < 0.05$ )

Tableau 13b: Matrice de corrélation entre les caractéristiques biochimiques des grains de maïs et les performances de *Prostephanus truncatus*:

	§ grains endommagés	pourde produite	perte de poids	coefficient de pénétration	consommation journalière	mortalité adultes	poids adultes	taux de ponte	§ adultes test avec choix
Teneur en sucrose	-0.612 0.144	-0.141 0.763	0.004 0.994	0.166 0.722	-0.061 0.896	0.713 0.072	-0.596 0.158	0.196 0.674	-0.058 0.902
Teneur en glucose	-0.007 0.989	0.260 0.573	0.635 0.126	0.315 0.491	-0.176 0.705	0.433 0.332	0.139 0.767	0.235 0.612	0.026 0.956
Teneur en fructose	-0.086 0.854	-0.154 0.742	0.152 0.746	-0.236 0.611	-0.360 0.428	0.662 0.105	-0.093 0.844	0.141 0.763	-0.235 0.612
Teneur en t-féruilique	-0.322 0.481	-0.524 0.227	-0.879 0.009	-0.348 0.445	0.148 0.751	-0.360 0.427	0.031 0.948	-0.408 0.363	0.012 0.980
Teneur en c-féruilique	0.346 0.447	-0.037 0.938	-0.310 0.500	-0.394 0.382	0.373 0.410	0.130 0.782	-0.200 0.670	0.313 0.494	0.209 0.553
Teneur en p-conmarique	-0.702 0.079	-0.714 0.072	-0.564 0.117	-0.322 0.481	-0.507 0.246	-0.276 0.549	0.095 0.839	-0.852 0.015	-0.563 0.189

valeurs supérieures: coefficients de corrélation (Pearson)

valeurs inférieures: p

Les valeurs en caractères gras et soulignées sont significatives ( $p < 0.05$ )

Les valeurs en caractères gras seulement représentent une tendance significative ( $0.1 < p < 0.05$ )

Observations sur le degré de signification,  $p$ :

La valeur de  $p = 0,05$ , niveau conventionnel de signification, assure que pas plus de 5 % des corrélations significatives ne le sont par hasard; en d'autres termes, pour chaque corrélation significative, il y a 5 % de chance pour qu'elle le soit par hasard. Dans des matrices présentant beaucoup de corrélations, telles que dans les tableaux 8, 12 et 13, avec 120, 90 et 108 corrélations respectivement, le nombre de corrélations significatives pouvant être dues au hasard peut, lui aussi, être significatif. Baisser le niveau  $p$  à 0,01 devrait limiter ce problème, tout en risquant de masquer de corrélations véritablement significatives avec  $0,01 < p < 0,05$ .

Devant le nombre relativement faible de cultivars testés, sept, réduire le degré de signification au delà de 0,05 pourrait être trop sévère au détriment d'une discussion qui s'efforcera de rechercher, de découvrir et/ou de confirmer des significations biologiques pouvant aider à construire un modèle éco-physiologique prédictif quant à la susceptibilité ou la résistance de tel ou tel cultivar.

#### 5/ Régressions multiples:

Nous avons réalisé des analyses de régressions multiples afin de proposer des modèles faisant intervenir, pour chaque performances de l'insecte, des caractéristiques des grains les plus indépendants possible.

Voici les équations obtenues où l'ordre des paramètres correspond à leur entrée dans le modèle:

$$(1) \text{ Dommage} = 27,3 - 21,5(\text{Couv.}) - 1,8(\text{Sucr.})$$

$$p = 0,019; F = 12,69 \quad p = 0.02 \quad p = 0.03$$

$$(2) \text{ Poudre} = 3.13 + 0,52(\text{F/C}) \quad p = 0,0001; F = 108,07$$

$$(3) \text{ Poids} = 7.02 - 13,2(\text{t-Fer}) \quad p = 0,009; F = 17.04$$

$$(4) \text{ Coeff.} = 0,679 + 0,02(\text{F/C}) \quad p = 0,009; F = 17.46$$

$$(5) \text{ Cons.} = -0,3 + 0,7(\text{Lipides}) \quad p = 0,007; F = 19,16$$

$$(6) \text{ Mort.} = 38,6 - 61.2(\text{Déform.}) \quad p = 0,001; F = 45.52$$

$$(7) \text{ Ovip.} = -1.66 - 1.37(\text{Couv.}) + 0,30(\text{Lipides})$$

$$p = 0,004; F = 29.41 \quad p = 0.008 \quad p = 0.020$$

$$(8) \text{ Choix} = -16,8 + 2,4(\text{Lipides}) - 5,2(\text{Couv.}) + 39,3(\text{Grpoids}) - 0,8(\text{F/C})$$

$$p = 0.0001; F = 8401,29 \quad p = 0.0002 \quad p = 0.0005 \quad p = 0.0005 \quad p = 0.0006$$

$$(9) \text{ Ovip.} = 0.08 + 0.19(\text{Poudre}) \quad p = 0.03; F = 7.95$$

$$(10) \text{ H}_2\text{Op} = 11.22 + 0.05(\text{Suctot}) - 0.0005(\text{Totphe})$$

$$p = 0.02; F = 9.69 \quad p = 0.04 \quad p = 0.04$$

$$(11) \text{ H}_2\text{O} = 14.17 + 0.06(\text{F/C}) \quad p = 0.03; F = 8.56$$

Où: **Dommage** est le % de grains endommagés,

**Poudre** est la quantité de poudre produite,

**Poids** est la perte de poids des lots infestés,

**Coeff.** est le coefficient de pénétration,

**Cons.** est la consommation journalière d'un adulte,

**Mort.** est mortalité des adultes,

**Ovip.** est le taux de ponte d'une femelle,

**Choix** est le % d'adultes retrouvés dans un cultivar lors des tests avec choix,  
et **Coum.** est la teneur en acide para-coumarique,  
**Sucr.** est la teneur en sucrose,  
**F/C** est le rapports des proportions entre les endospermes farineux et corné,  
**H<sub>2</sub>O** est l'humidité totale du grain,  
**H<sub>2</sub>Op** est la teneur partielle en eau,  
**Lipides** est la teneur totale en lipides,  
**t-Fer** est la teneur en acide trans-férulique,  
**Germ.** est la proportion du germe,  
**Grpoids** est le poids moyen du grain,  
**Déform.** est la déformation des couches externes du grain,  
**Suctot.** est la teneur totale en sucres,  
**Dureté** est la dureté du grain.  
**Totphe** est la teneur totale en acides phénoliques

NOTE: les premiers p et F correspondent au modèle complet, les autres probabilités correspondent aux paramètres individuels au dessus.

**DISCUSSION**

Cette recherche démontre clairement des variations significatives dans les caractères physico-chimiques parmi les sept cultivars analysés. De ces différences, il a été possible d'étudier une variation du comportement des adultes de *Prostephanus truncatus*, dans des lots de grains intacts, aussi bien dans son potentiel destructeur qu'en fonction de son potentiel reproducteur. Il apparaît que certaines caractéristiques physiques responsables de la dureté des grains, ainsi que certains métabolites secondaires sont très significativement corrélés avec certaines performances de l'insecte, nous permettant de prédire la susceptibilité du substrat à l'infestation du Grand Capucin du maïs. Un modèle éco-physiologique de la résistance du grain de maïs aux attaques de ce charançon est alors proposé et discuté ici.

Un lot de grains de maïs engrangé est un véritable écosystème dans lequel on retrouve au moins deux types d'organismes vivants: le grain lui-même, organe en vie ralentie capable d'interagir avec les conditions externes, les microorganismes du champ et de stockage obligatoires, et éventuellement les arthropodes. Par l'existence même du germe, le grain est dans un équilibre physiologique qu'il est important de surveiller et de protéger lors des manipulations et conditions de stockage. Un grain mort, par exemple par sur-échauffement, ne sera pas protégé contre d'éventuelles attaques de parasites et sera plus propice à s'auto-altérer biochimiquement (Multon,

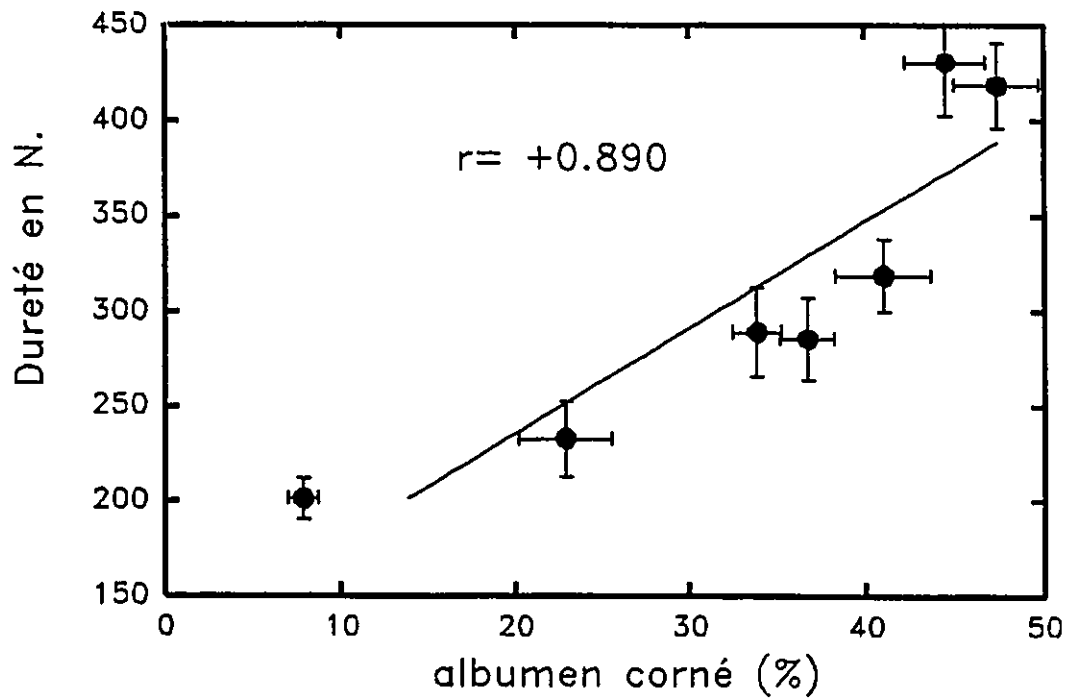
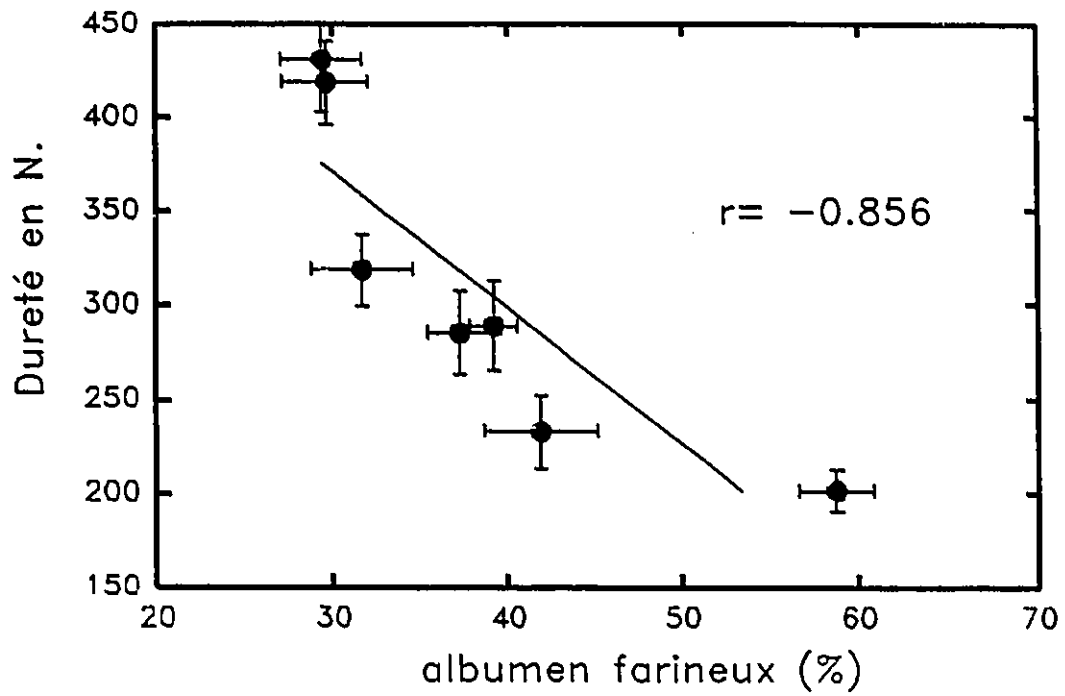
1982). C'est pour cela qu'une étude de susceptibilité de grains ou graines à toute altération possible demande une analyse approfondie et complète non seulement des caractéristiques physico-chimiques de l'organe étudié mais aussi de ses interactions possibles avec son environnement immédiat. Ajoutons ici que dans le cas de grains stockés, l'écosystème se caractérise par un microbiote relativement isolé et contrôlé, même s'il dépend du type d'infrastructure de stockage utilisé.

### 1/ Propriétés bio-physico-chimiques des grains:

Milieu nutritif et de développement pour *Prostephanus truncatus*, les grains de maïs peuvent être déterminants pour le succès ou l'échec d'une colonisation d'un lot engrangé selon leurs caractéristiques physiques et anatomiques ainsi que leurs propriétés biochimiques. De ce point de vue, *Zea mays* est particulièrement intéressant car présente une variabilité génétique importante. Il est maintenant possible de trouver des variétés de maïs présentant toute une gamme de caractéristiques agronomiques, physiques et biochimiques différentes.

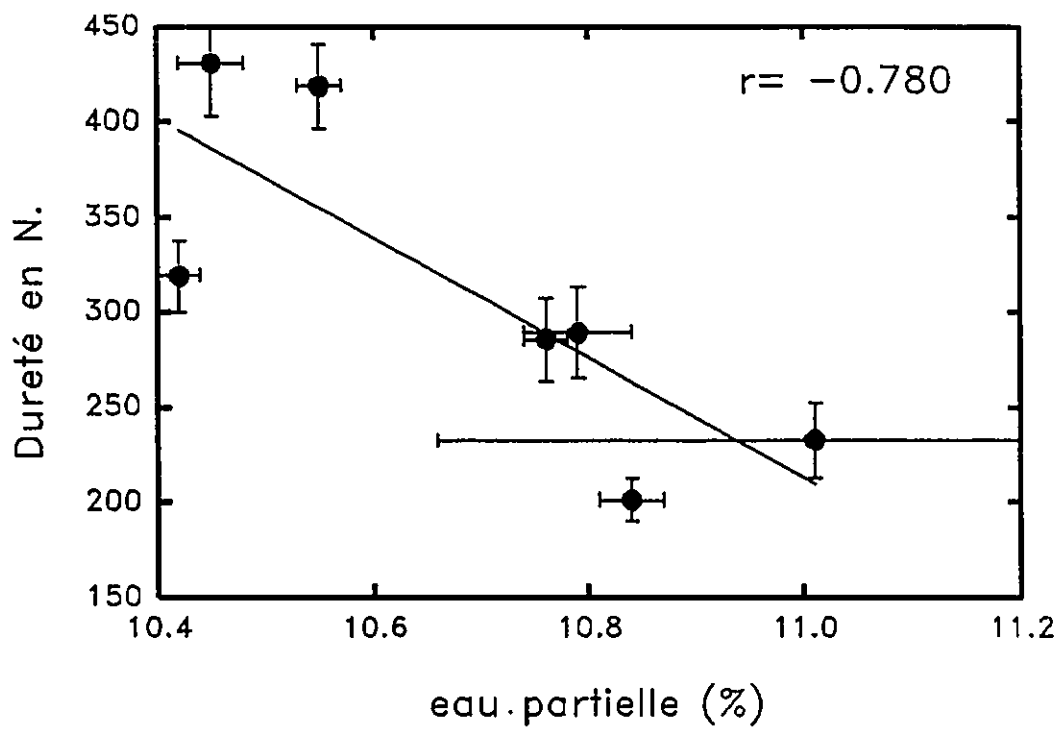
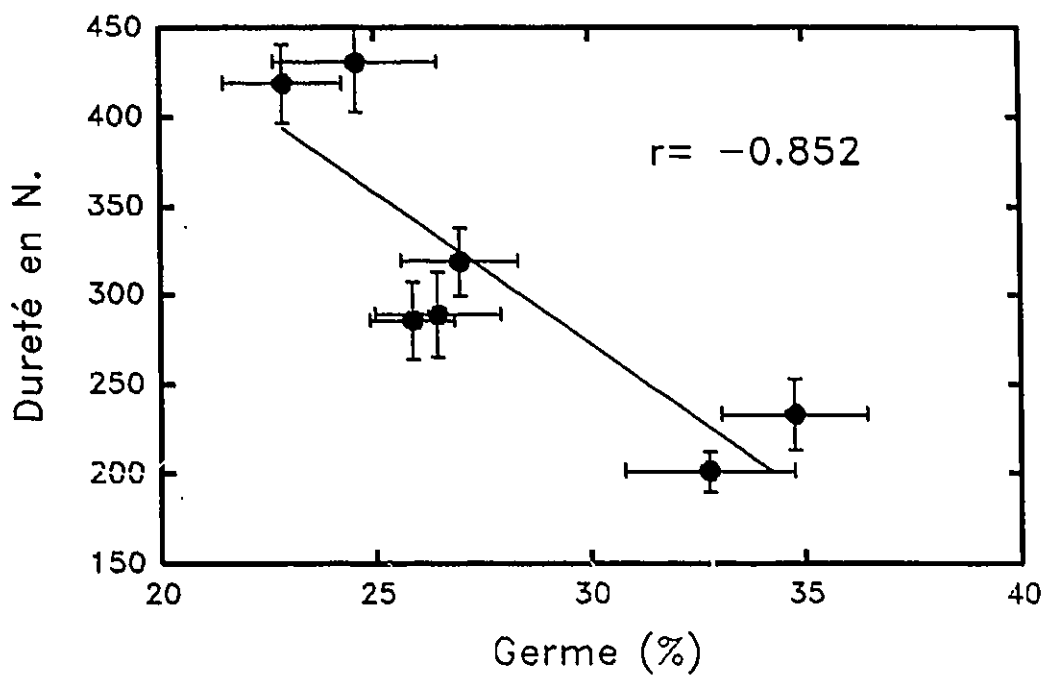
Notre sélection de sept variétés a justement essayé de couvrir, autant qu'il se pouvait, les trois principaux types de grains: farineux, denté et corné. L'analyse des caractéristiques physiques a aussi révélé des variations significatives de volume, de poids et de dureté des grains. De même, les cultivars testés présentent une bonne variation dans la proportion d'endosperme vitreux. Ce type d'albumen est entièrement constitué de granules d'amidon durs, cimentés entre eux, en une masse

**Figure 8: Effets de la qualité de l'albumen sur la dureté des grains de maïs.**  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



cassante plus ou moins translucide, par une matrice protéique d'épaisseur régulière (Christianson et al., 1969). On comprend alors comment le taux d'endosperme corné peut influencer la dureté du grain, ce qui explique la bonne corrélation obtenue entre la dureté et le pourcentage d'albumen vitreux (figure 8). Inversement l'albumen mou, à grains d'amidon volumineux et facilement séparables (Robutti et al., 1974 a et b), rend le grain plus tendre comme le suggère la corrélation négative entre la proportion d'endosperme farineux et la dureté (figure 8). Notons que la dureté est aussi négativement corrélée avec la proportion du germe (figure 9), qui pourrait être une région de fragilité. Le rapport entre les quantités relatives des deux types d'endosperme, F/C, déterminerait le volume et le poids du grain, et par conséquent le poids spécifique d'un lot de tels grains, paramètre particulièrement important dans l'élaboration de techniques de stockage en silo. Des données de Kirleis (cité par Watson, 1987) ont montré que la dureté, d'après le test de Stenvert, était fortement corrélée avec le rapport F/C, ainsi qu'avec la taille et la densité des grains. En effet, l'albumen corné, puisqu'il se contracte uniformément au séchage (Christianson et al., 1969), prend moins de volume. Par contre, dans l'amidon «libre», lors du séchage, il se forme des crevasses et des poches vides (Duvick, 1961). Watson et al. (1955) ainsi que Wolf et al. (1969) ont observé, chez des variétés dites cornées et dentées, une couche sub-aleuronique dans laquelle les granules d'amidon sont très petits et entourés d'une très épaisse matrice. On peut présumer que la présence d'albumen vitreux augmenterait la cohésion des différentes parties du caryopse, augmentant sa dureté intrinsèque, diminuant la disponibilité de son amidon et ainsi diminuerait ou

**Figure 9: Effets de la proportion du germe et de la teneur en eau partielle sur la dureté du grain de maïs.**  
**Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.**



limiterait le transfert d'énergie entre le grain et d'autres formes vivantes présentes, comme par exemple un insecte.

Sous cet angle écologique, on peut considérer les grains de maïs comme des formes de préservation naturellement protégées contre les agressions extérieures non seulement par les barrières physiques (enveloppes et cohésion du grain), mais aussi par certaines propriétés physiologiques plus ou moins connues (productions de substances inhibitrices, répulsives ou antiappétantes). Il est donc aussi nécessaire d'analyser les caractéristiques biochimiques des différents grains. Parmi ces dernières il est important d'étudier d'une part les substances susceptibles d'attirer l'insecte et/ou de stimuler sa croissance, et d'autre part celles susceptibles de le décourager et/ou d'inhiber son développement.

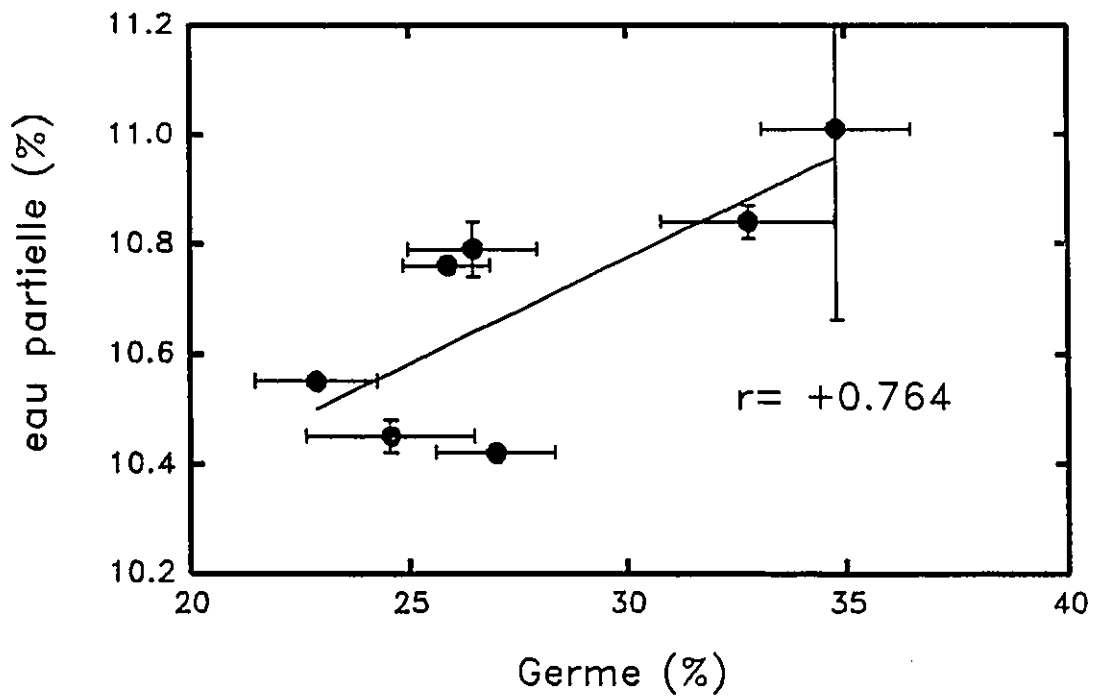
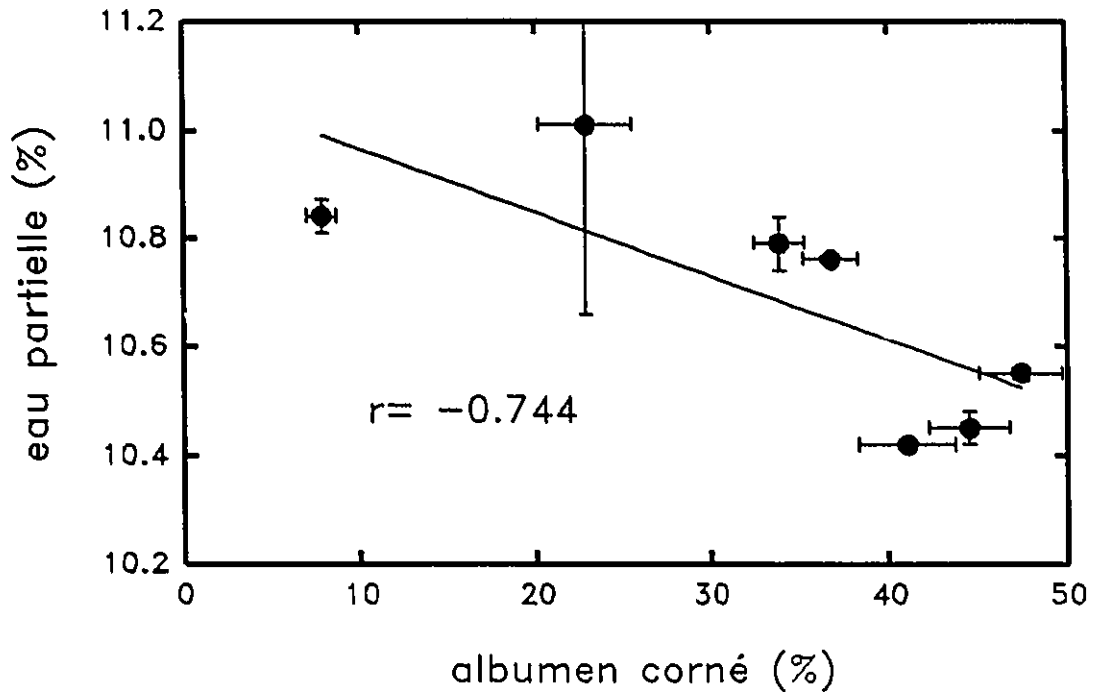
Dans cette étude, nous avons ainsi analysé les éléments nutritifs tels que les protéines, les lipides et les sucres, mais aussi des produits reconnus pour leur activité biologique contre certains insectes: les acides phénoliques. Mais avant il est important d'analyser un élément trop longtemps négligé: l'hygroscopie des grains, paramètre primordial si on considère que, d'une manière générale, une hygrométrie élevée favorise beaucoup le développement des insectes.

Dans un grain à maturité, il n'y plus d'eau en circulation, et on parle plutôt d'eau absorbée. Nous avons essayé de faire la distinction entre la quantité d'eau thermodynamiquement disponible à travers le grain entier et la quantité d'eau "résiduelle", n'étant libérée qu'après destruction du grain en farine. En effet, le

teneur totale en eau semble être un paramètre qualitativement insuffisant, ne pouvant pas rendre compte des propriétés fonctionnelles de l'eau, en particulier de sa "disponibilité" physiologique pouvant intervenir dans les mécanismes d'altération. Dans notre sélection, seule la quantité d'eau intrinsèque au grain varie significativement entre les différents cultivars, traduisant une différence dans l'affinité existant entre l'eau et les grains intacts. Cette affinité est due principalement à des phénomènes macroscopiques (capillarité, osmose) et à des mécanismes moléculaires complexes (liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et les extrémités polaires des macromolécules comme des glucides et des protéines) (Multon, 1982).

La qualité de l'albumen pourrait influencer cette disponibilité de l'eau: la proportion d'endosperme vitreux est significativement et inversement proportionnelle à la teneur en eau partielle (figure 10), tandis qu'elle ne présente aucune corrélation significative avec la teneur totale en eau. Cette observation pourrait suggérer que les molécules d'eau seraient sensiblement moins disponibles, emprisonnées dans une structure plus polaire et plus cohérente. Cette eau "plus fortement liée" ne peut influencer aucun phénomène d'altération biologique (par des micro-organismes ou des insectes). Inversement un albumen farineux semble moins retenir l'eau qui s'évaporerait plus facilement au four. Cette eau "moins liée" pourrait être effectivement plus disponible pour d'autres organismes vivants, et donc influencer leur croissance et développement. L'humidité partielle est aussi très significativement corrélée avec la proportion du germe (figure 10), suggérant une moins bonne affinité avec l'eau.

**Figure 10:** Corrélations entre la teneur en eau partielle et les proportions d'endosperme corné et du germe, du grain de maïs.



Les biochimistes céréaliers, distinguent quatre "types" de disponibilité de l'eau (Multon, 1982):

- type I: eau en couche monomoléculaire fortement liée à des groupements polaires (liaisons hydrogènes),
- type II: eau en couches polymoléculaires, faisant intervenir des forces de Van der Waals, aussi qualifiée de pseudoliquide non-dissolvante, fortement absorbée,
- type III: eau liquide sous tension osmotique, dissolvante et faiblement absorbée,
- type IV: eau d'imprégnation, libre.

Dans les grains mûrs et en équilibre (humidité < 27 %), l'eau de type IV a disparu. Les eaux de type I et II (responsables d'une humidité < 13 %), parce qu'elles sont fortement absorbées et par conséquent inertes, ne sont pas solvantes et font partie intégrante de la phase solide du grain. Par contre, l'eau de type III intervient chez des grains avec une humidité entre 13 et 27 %, et est la seule qui a un rôle biologique car elle est solvante et on y retrouve des sucres, des acides aminés, des sels et une activité enzymatique. Cette eau, faiblement absorbée et qu'il faudra chercher à éliminer lors du séchage, devra migrer et diffuser à travers les différentes structures du grain.

En étudiant les facteurs physiologiques affectant la vitesse de séchage du maïs, Crane et al. (1959) signalaient que des grains de différentes lignées présentaient des propriétés différentes de diffusion de l'eau. Chu (1966) concluait que cette variabilité était bien décrite par l'effet du rapport surface/volume. D'autres auteurs ont décrit les propriétés des différents tissus quant à la diffusion de l'eau.

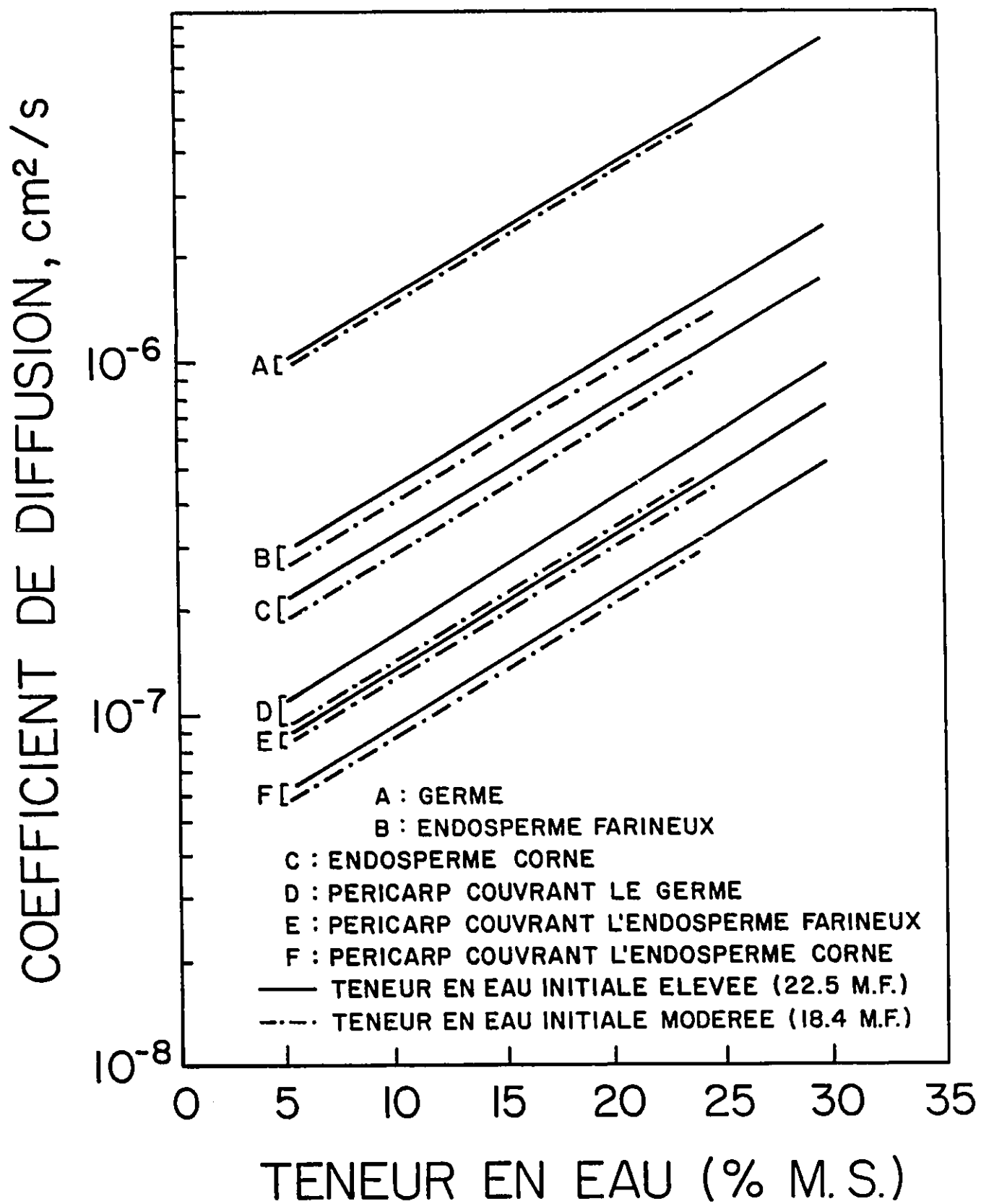
Nass et Crane (1970) ont proposé que la quantité d'humidité retenue ou relâchée par l'endosperme dépendait du nombre et du type de composés hydrophyles comme les sucres, les protéines et les hydrates de carbone. Ainsi, ces groupements polaires pourraient être responsables de la teneur en eau d'équilibre et du coefficient de diffusion des différents types de grains. Syarief et al (1984) ont mesuré les coefficients de diffusion des différentes structures du grain de maïs. Il apparaît que l'endosperme vitreux a un coefficient plus faible que l'endosperme farineux, et que le péricarpe couvrant l'endosperme corné a lui aussi un coefficient plus faible que celui couvrant l'albumen mou (figure 11). Chung et Pfoest (1967) ont tracé les isothermes de désorption des quatre composantes du maïs: le germe, l'amidon, le gluten et les couches externes (hull) (figure 12). Ils ont ainsi montré que le gluten, principal composé de la matrice protéique de l'endosperme vitreux, était moins hydrophyle que l'amidon et pourrait jouer un rôle de barrière résistante au transfert de l'humidité, emprisonnant les molécules d'eau des granules d'amidon. Le germe présente la courbe la plus basse traduisant une très faible affinité avec les molécules d'eau. Ceci pourrait expliquer la bonne corrélation entre la proportion du germe et l'humidité partielle (figure 10) plus facilement libérée.

Purdy et Crane (1967) ont trouvé que la vitesse de séchage des grains était significativement corrélée avec la perméabilité et l'épaisseur du péricarpe: un péricarpe fin et perméable est associé avec un séchage rapide. Il semblerait qu'il existé dans le grain de maïs un gradient de résistance au transfert d'humidité allant

**Figure 11: Coefficients de diffusion de chaque composant du grain de maïs:**

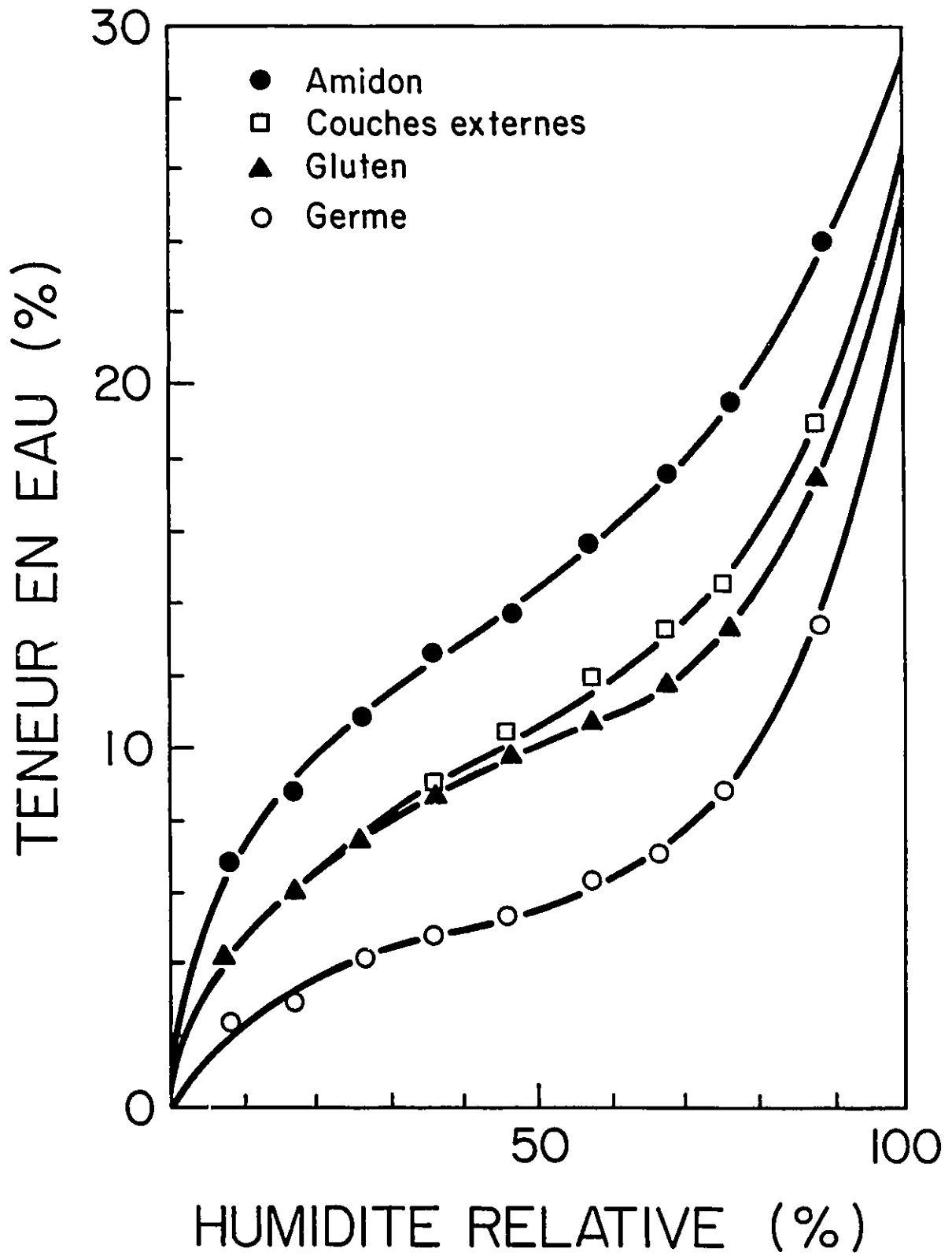
— : Teneur en eau initiale élevée (22,5 % M.F.)  
-.- : Teneur en eau initiale modérée (18,4 % M.F.)

Source: Syarief et al. (1984).



**Figure 12:** Isothermes de désorption des composants du grains de maïs à 25°C.

Source: Chung et Pfof (1967).



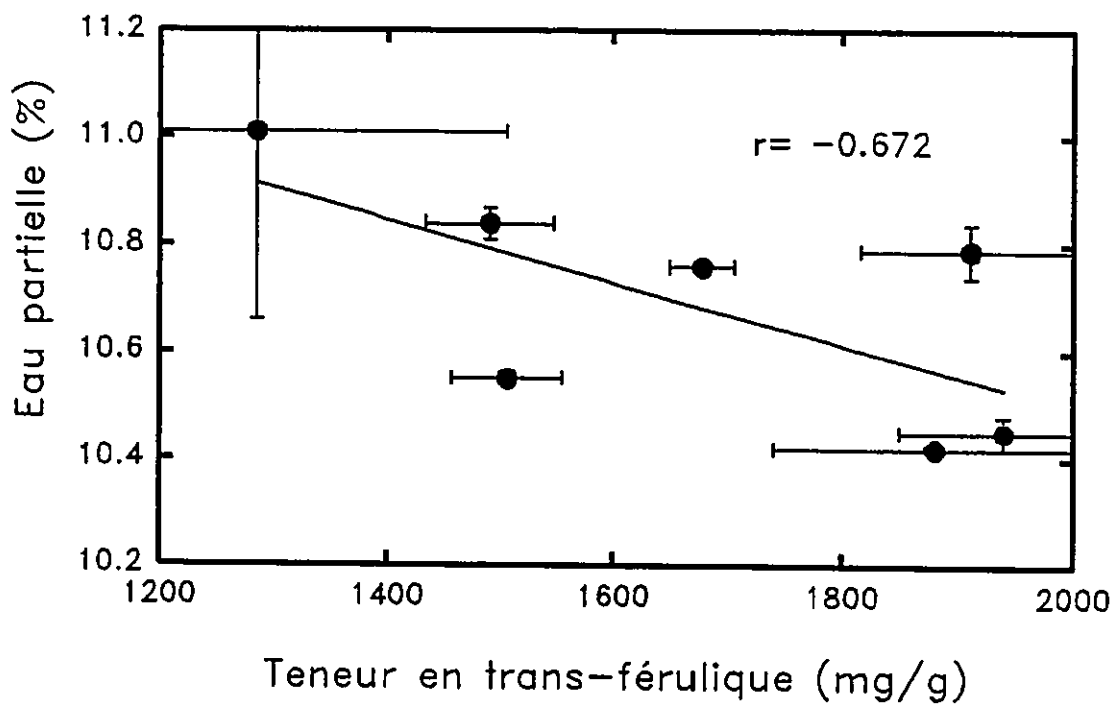
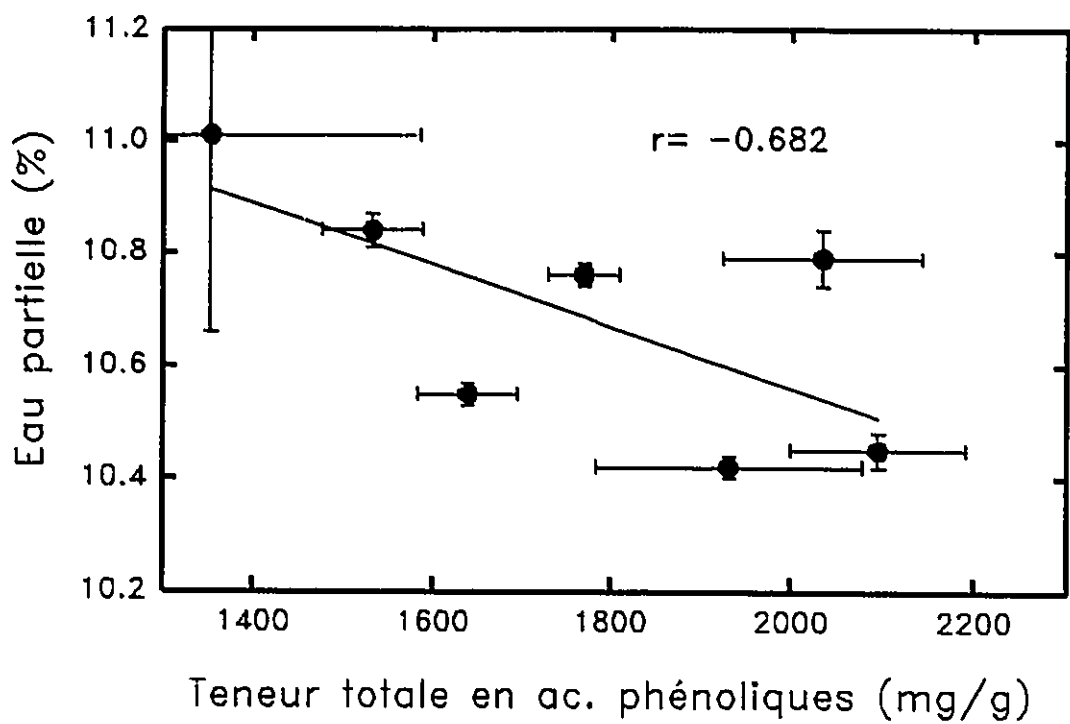
du germe jusqu'au péricarpe. Il est évident que la structure avec le plus faible coefficient de diffusion est celle qui contrôlera la vitesse de séchage du grain. Ainsi tout ce qui peut intervenir dans la perméabilité du péricarpe jouera un rôle important sur la quantité d'eau de type III retenue dans le grain. Toutefois, le fait que la vitesse de séchage des grains est inversement proportionnelle au carré du rapport surface/volume, suggère que la résistance à la diffusion est aussi plus profonde (Van Rest, 1949, cité par Chu, 1966).

Le fait que l'humidité partielle, libérée au travers du grain intact, présente une tendance négative avec la teneur totale en acides hydroxycinnamiques (figure 13) et plus particulièrement avec l'acide férulique, suggérerait que ces derniers pourraient jouer un rôle imperméabilisant au niveau des parois cellulaires, présentant eux-aussi un gradient similaire à celui de la diffusibilité.

En résumé, il semblerait que la disponibilité, thermodynamique et biologique, de l'eau puisse dépendre des proportions qu'on retrouve entre les différents constituants du grain de maïs. Ceci nous permet d'émettre l'hypothèse qu'une plus grande proportion d'endosperme vitreux, qu'un péricarpe plus épais et plus perméable, ainsi qu'une plus haute teneur en acides phénoliques limiteraient la disponibilité de molécules d'eau de type III, pouvant intervenir dans des processus biologiques.

Cette notion de disponibilité d'éléments nutritifs ou essentiels peut aussi être étudiée relativement à l'amidon présent dans le grain. En effet, au sein de cet écosystème particulier constitué d'un lot de grains de maïs, cette réserve amylacée

**Figure 13:** Corrélations entre la teneur en eau partielle et les acides phénoliques endogènes du grain de maïs.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



(stock d'énergie) sera transformée en énergie ATPasique, au niveau de la biomasse des insectes, en chaleur ou encore en travail (déplacement des insectes). L'accessibilité et la disponibilité de cette énergie peuvent être cruciales pour le bon développement d'une population d'insectes. Le grain post-récolte peut être considéré, d'un point de vue thermodynamique, comme un système adiabatique, où il existe un certain recyclage des réserves glucidiques et lipidiques en biomasse vivante qui tend à les consommer (germe, microorganismes, insectes). Les seules possibilités d'échange de masse avec l'extérieur se limitent à la phase gazeuse ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ...) (Multon, 1982). L'énergie chimique stockée ne peut qu'être échangée au niveau de la biomasse, ou dégradée en chaleur et travail. La disponibilité et l'accessibilité de cette réserve d'énergie peut accroître sensiblement cette dégradation en chaleur ou en forçant davantage les insectes à "travailler" et transformer le substrat de façon à être plus directement consommable. La proportion d'albumen corné pourrait ainsi influencer la quantité d'amidon directement assimilable. En effet, les granules d'amidon de l'endosperme corné sont solidement emprisonnés dans cette matrice protéique particulièrement dure et pourrait exiger une plus grande dépense d'énergie pour les "libérer" et donc les consommer. Les propriétés physiques des granules d'amidon (morphologie, cristallinité, gélatinisation ...) ont été largement étudiées (Boyer et Shannon, 1987). Mais il semble bien aussi que la digestibilité de l'amidon soit aussi génotypiquement sensible, et que la qualité de l'albumen puisse avoir une influence (Shannon et Garwood, 1984).

Dans notre sélection de variétés de maïs, la proportion du germe ne varie pas significativement et la teneur totale en lipides varie peu. Néanmoins, la proportion du germe est négativement corrélée avec la proportion d'endosperme vitreux, suggérant que les grains de type corné ont un germe plus petit et présentent par conséquent une teneur plus faible en lipides. Cette dernière teneur influence positivement le poids du grain, ce qui a pour conséquence la constatation suivante: plus le grain est corné, plus il est petit et léger.

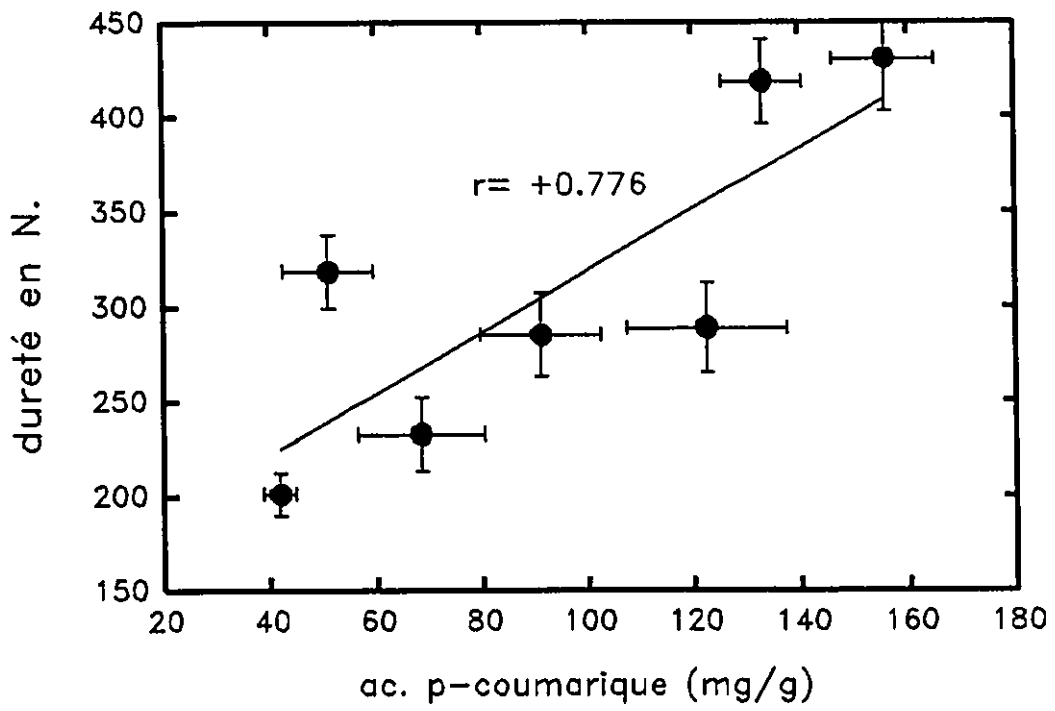
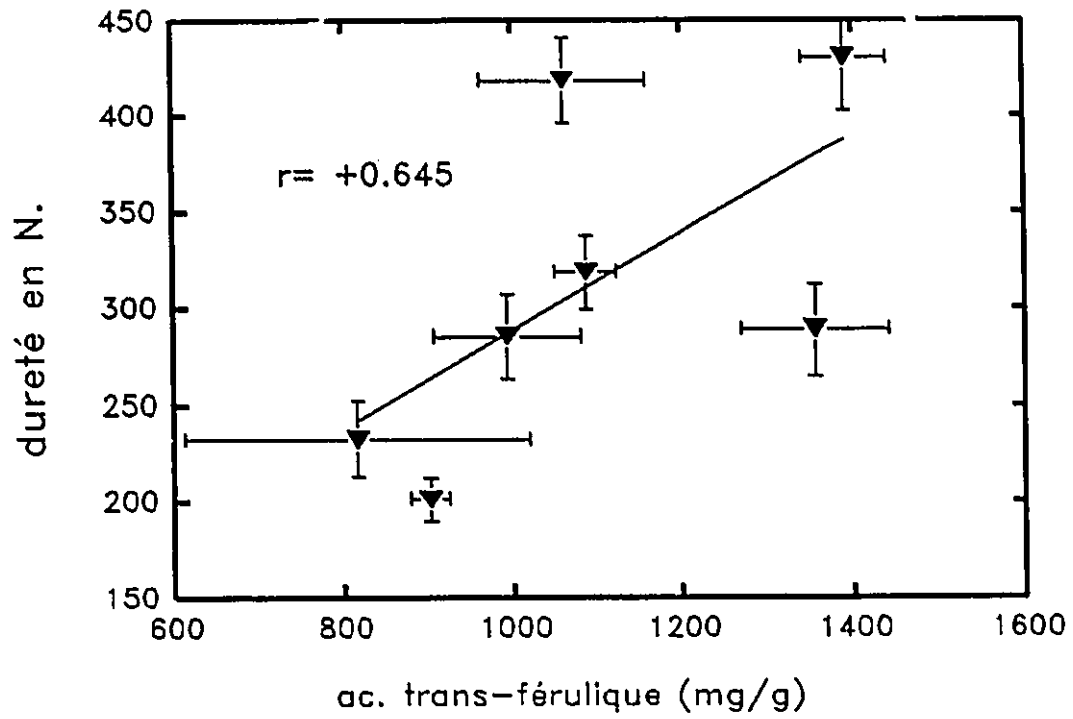
Evidemment, la teneur totale en protéines a tendance à être négativement corrélée avec l'albumen farineux, la majorité des protéines se retrouvant dans l'endosperme vitreux, plus particulièrement dans des corps protéiques et dans la matrice qui les englobe (Wilson, 1987).

Pendant la maturation des grains de maïs, la teneur en sucres (mono et di saccharides) augmente rapidement pendant les quinze premiers jours après la pollinisation, pour ensuite diminuer graduellement jusqu'à maturité, sauf dans le germe où elle continue d'augmenter (Watson, 1987). Les trois principaux saccharides libres sont, en ordre d'importance, le sucrose, le D-fructose et le D-glucose (Boyer et Shannon, 1987). En effet, dans notre sélection de cultivars, nous retrouvons, en moyenne, plus de sucrose que de monosaccharides; et nous n'avons pu détecter que du glucose et fructose (tableau 5). Toutefois, il est apparu très tôt une grande variation dans les teneurs de ces différents sucres au sein du plasma germinatif

(Boyer et Shannon, 1983), ce qui expliquerait les différences très significatives parmi les sept cultivars analysés. Pendant la maturation, les sucres libres sont intégrés dans les polysaccharides de stockage, comme l'amidon, ou encore dans des hydrates de carbone complexes de structure, comme les substances pectiques, les hemicelluloses ou la cellulose, composantes des parois cellulaires (Fincher et Stone, 1986). De ce fait, les sucres participent directement à la dureté des parois et donc à la dureté des couches externes qui sont caractérisées par des parois plus épaisses et plus lignifiées que dans les structures internes. Dans notre étude de corrélations, la teneur totale en sucres libres présente une tendance significative et négative avec la dureté du grain et plus particulièrement avec la résistance des couches externes (déformation). Les différences dans les teneurs en sucres pourraient traduire une différence biochimique à intégrer les molécules de monosaccharides aux fibres insolubles des parois. Ainsi, plus il y aurait de saccharides libres, moins il y en aurait dans les parois cellulaires qui seraient alors plus fragiles (moins déformables). Le sucrose serait la forme stockée dans les vacuoles des cellules en vue de participer éventuellement dans les biosynthèses d'amidon ou de fibres cellulosiques (Echeverria et al., 1987). Cela pourrait expliquer la tendance significative et négative entre la concentration de sucrose, en particulier, et la déformation des couches externes.

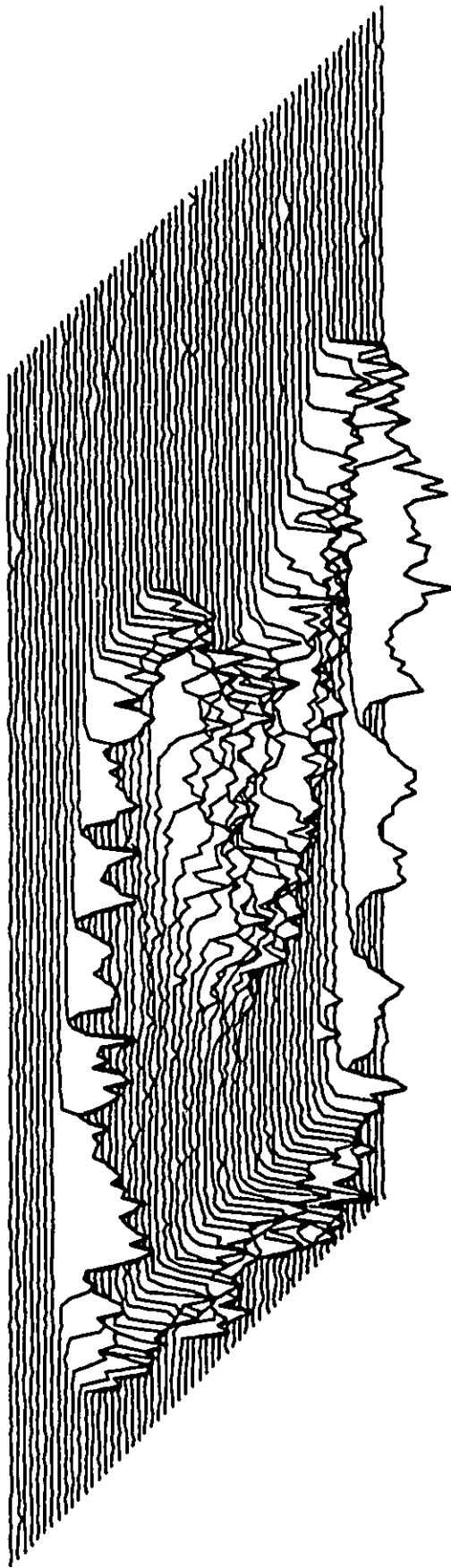
Même si les acides phénoliques sont souvent considérés comme des métabolites secondaires, leur importance physiologique (biosynthèse de la lignine, par exemple) et écologique (propriétés fongicides) n'est plus à démontrer (Harborne,

**Figure 14: Corrélations entre les acides hydroxy-cinnamiques endogènes et la dureté des grains de maïs.**  
**Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.**



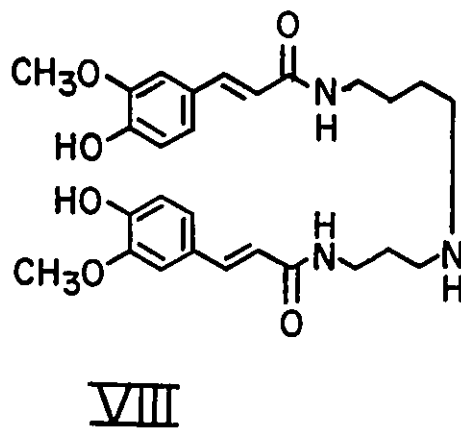
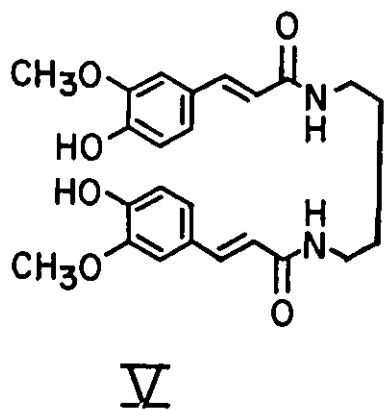
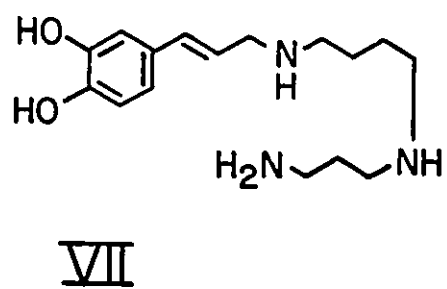
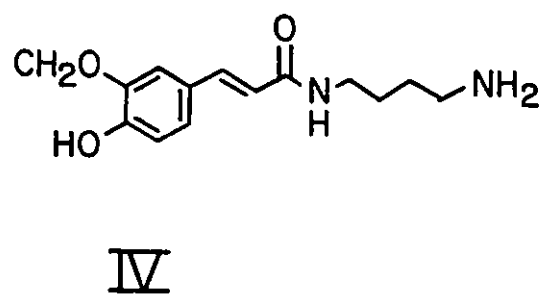
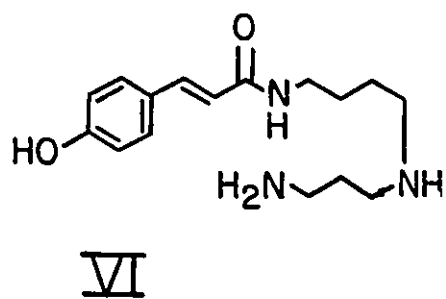
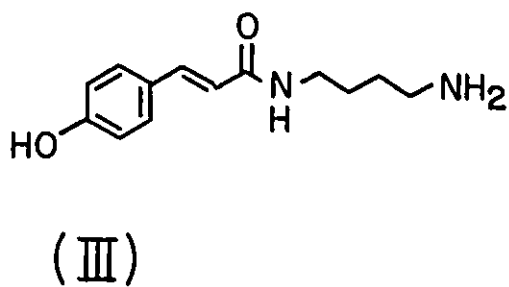
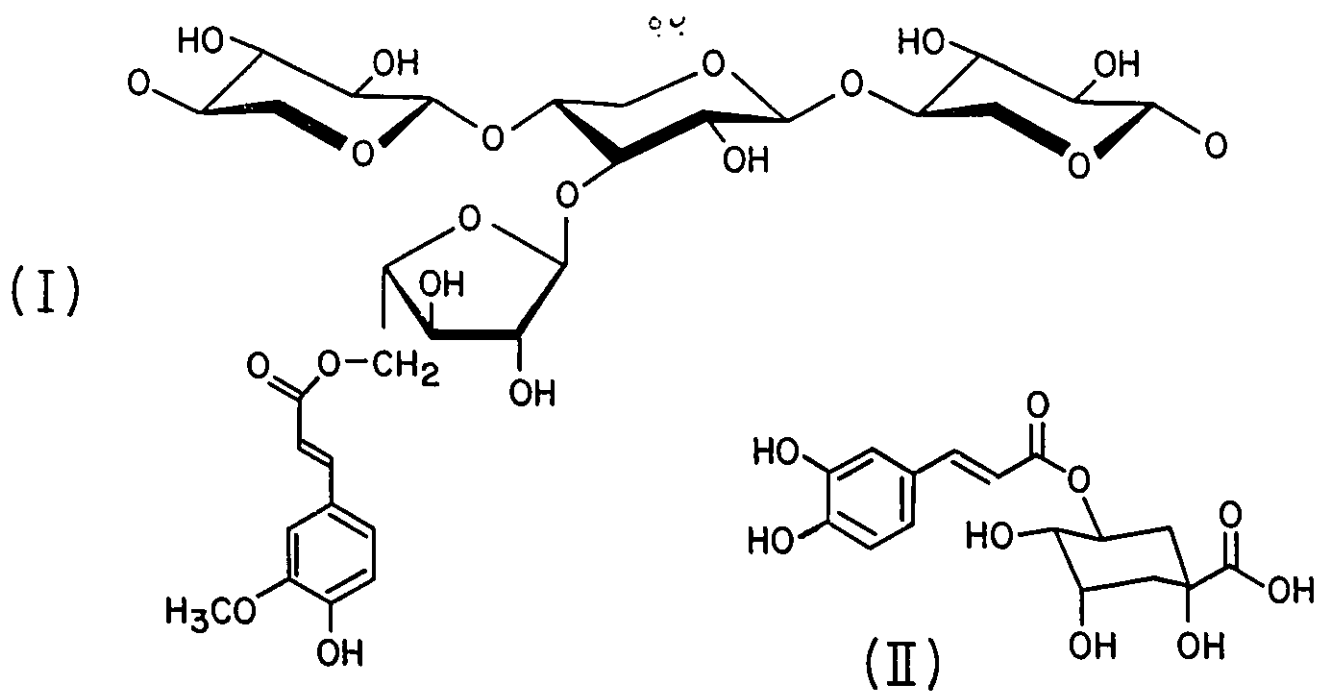
1980). Dans les grains de maïs, leur teneur reste relativement importante, pouvant dépasser 2 mg/g (tableau 4). Serratos (1987), en étudiant la résistance des grains de maïs aux attaques du charançon du maïs, *Sitophilus zeamais*, a clairement montré l'importance de ces acides phénoliques, plus particulièrement de l'acide trans-férulique, aussi bien au niveau de la dureté des grains analysés qu'au niveau d'un éventuel effet phago-répresseur sur l'insecte en question (tout au moins lorsqu'il est incorporé dans une diète méridique). Cette recherche a démontré clairement que la présence de tels acides étaient un facteur important de résistance et que l'acide E-férulique est un très bon indicateur de cette résistance au charançon du maïs (Classen *et al.*, 1990). Dans cette étude, parmi les sept variétés analysées, on ne retrouve pas cette tendance significative ( $p = 0.117$ ) entre la dureté et la teneur en acide E-férulique, mais cette fois c'est l'acide para-coumarique qui a présenté la meilleure corrélation (figure 14). Ces acides phénoliques sont connus pour se concentrer dans les parois des couches externes (péricarpe, couche d'aleurone, enveloppe du cotylédon), ou encore dans celles de l'endosperme. Des techniques de localisation de ces phénoliques par micro-fluorescence (Sen, non publié) le montrent de façon évidente (figure 15). Cette concentration des acides hydroxycinnamiques en périphérie du grain ou du germe appuie cette hypothèse d'un rôle protecteur. En plus d'être les précurseurs de la biosynthèse de la lignine et à cause de leur structures moléculaires, ces composés possèdent la propriété de se lier, par estérification à des groupements hydroxyl des macromolécules comme les fibres polysaccharidiques des parois cellulaires. Par exemple il est commun de retrouver des

**Figure 15:** Intensité de l'absorption des molécules d'acide férulique endogènes, excitées à 365 nm., dans une coupe longitudinale d'un grain du cultivar Muneng 8128.  
(Sen A.)



**Figure 16:** Structures moléculaires de quelques acides hydroxy-cinnamiques conjugués:

- I: portion d'une chaîne de (1-4)- $\beta$ -xylan avec une substitution par un 5-O-trans-féruloyl-L-arabinofuranosyl.
- II: l'acide chlorogénique
- III: p-coumaroyl-putrescine
- IV: féruloyl-putrescine
- V: diféruloyl-putrescine
- VI: p-coumaroyl-spermidine
- VII: cafféoyl-spermidine
- VIII: diféruloyl-spermidine

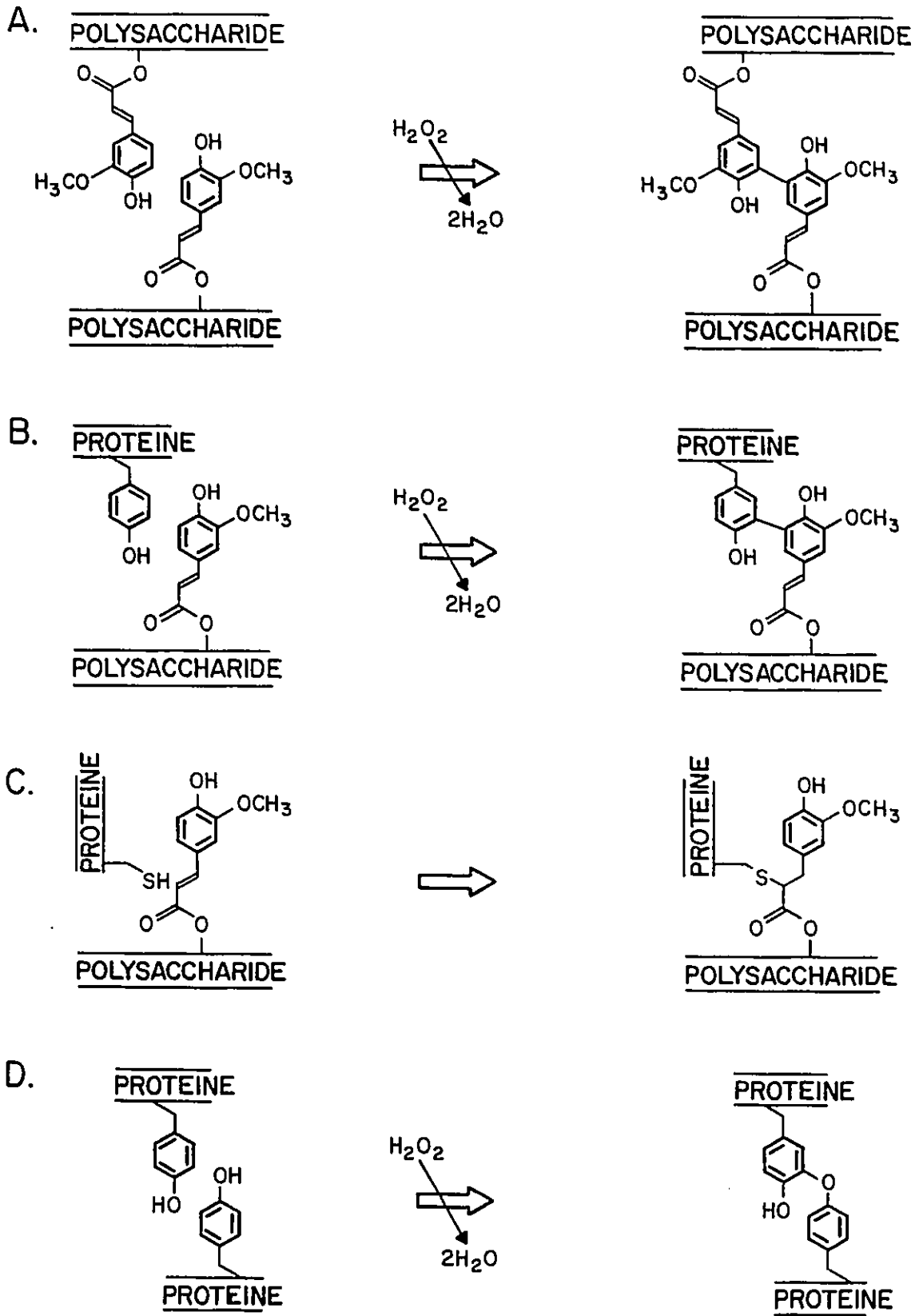


molécules d'acide férulique liées à des arabinoxylanes (figure 16, I) (Shibuya, 1984). Ces composés phénoliques sont aussi capables d'intervenir dans des liaisons inter polymers, par dimérisation et couplage oxydatifs ou par réduction du groupement propionyl (figure 17) (Fincher et Stone, 1986). Hartley *et al* (1988) ont montré la possibilité de photodimérisation des acides férulique et coumarique, en acide truxillique ou PAXX (O-[5-o(trans-p-coumaroyl)-X-L-arabinofuranosyl]-(1,3)-o-B-D-xylopiranosyl-(1,4)-D-xylopiranose), capables de se lier par estérification à des hétéroxylans des parois de grains de céréales et pouvant avoir des effets importants sur les propriétés mécaniques des parois cellulaires et sur la digestibilité par les ruminants. Yamamoto et Towers (1984) ont proposé que ces acides pouvaient jouer un rôle de protection contre les UV-A et augmenter la résistance des jeunes pousses es pathogènes. Mais il est possible de retrouver ces acides hydroxycinnamiques attachés à des protéines stockées dans des vacuoles (van Sumere *et al.*, 1973); ils ont été aussi détectés dans l'embryon des grains de céréales (van Sumere *et al.*, 1972) bien qu'ils soient plus concentrés dans la couche d'aleurone et dans les cellules épithéliales du cotylédon (Fulcher *et al.*, 1972). Harborne (1977) fait remarquer que ces acides phénoliques n'existent que très rarement sous la forme libre et qu'ils sont rapidement conjugués avec des glycosides lorsqu'administrés à des cellules vivantes, pour ensuite être intégrés dans des formes plus complexes inactivées. Cette observation appuie l'hypothèse d'un effet phytotoxique significatif. C'est probablement sous des formes conjuguées activées enzymatiquement et lors d'une modification que ces acides phénoliques expriment certains effets biostatiques

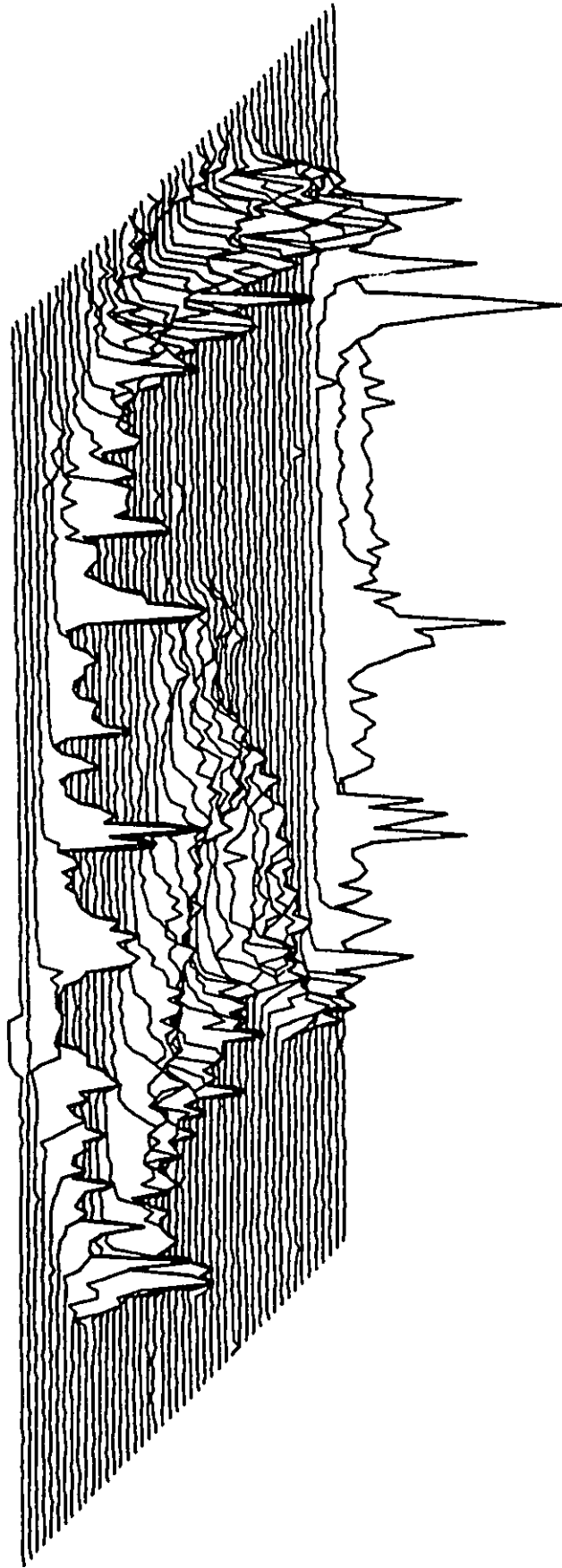
**Figure 17:** Mécanismes possibles de formation de ponts phénoliques entre les polymères des parois cellulaires.

- A: dimérisation oxydative de l'acide férulique
- B: couplage oxydatif entre les groupes tyrosyl et féruloyl
- C: réduction de la portion propenyl de l'acide férulique par un groupement cystéinyl-sulphydryl
- D: dimérisation oxydative de la tyrosine entre deux chaînes protéiques.

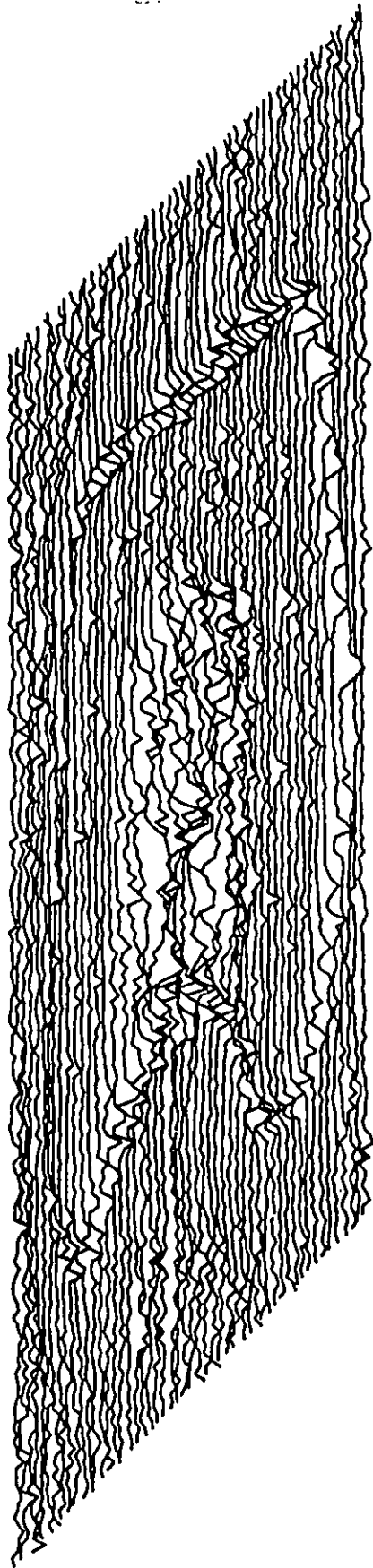
Source: Fincher et Stone, (1980).



**Figure 18:** Intensité de l'absorption des flavanoïdes, colorés à l'acide borinique, excités à 365 nm., dans une coupe longitudinale d'un grain du cultivar Muneng 8128.  
(Sen A.)



**Figure 19:** Intensité de l'absorption des phénoliques conjugués à des amines, colorés avec le colorant Ehrlich, dans une coupe longitudinale d'un grain du cultivar Muneng 8128.  
(Sen A.)

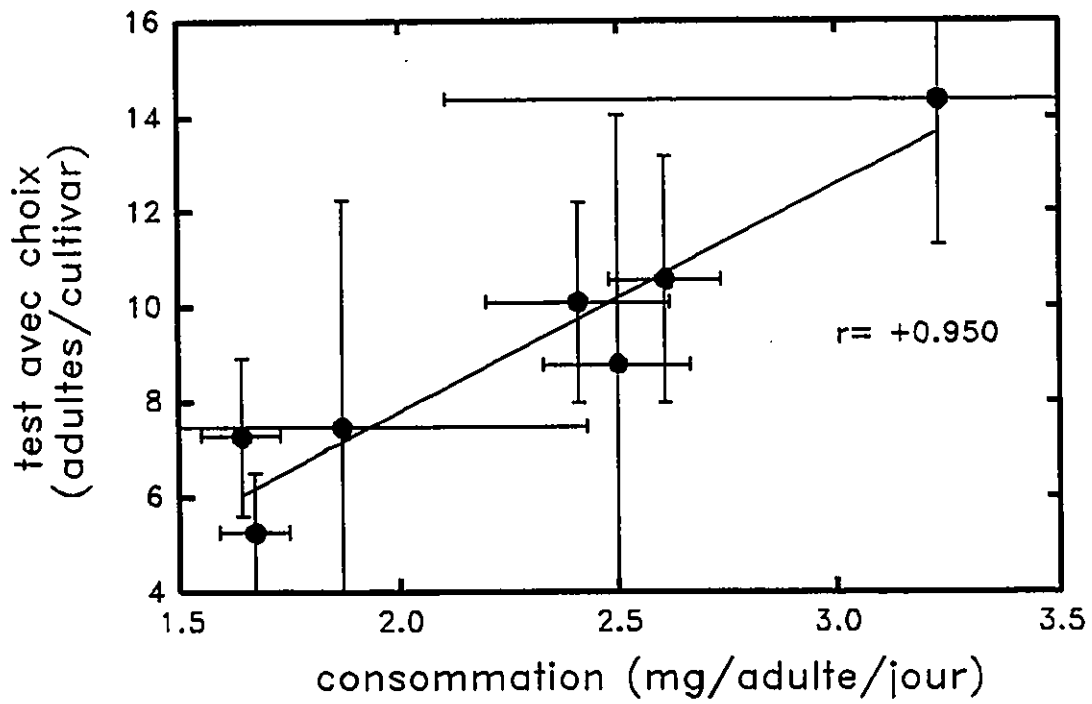
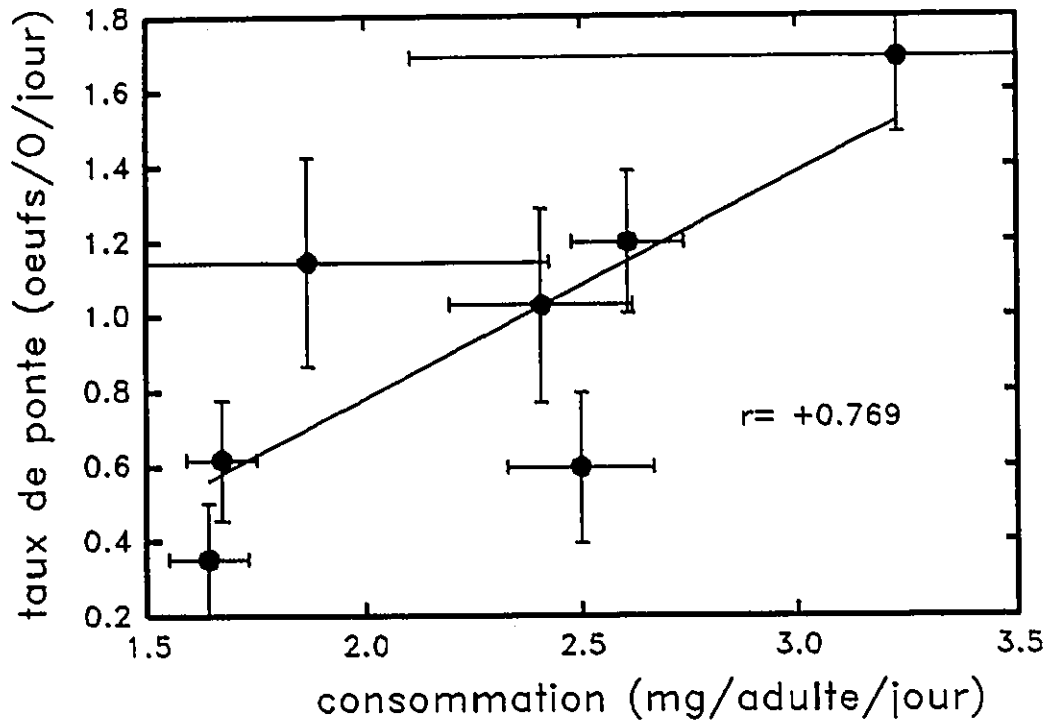


ou biocides (Collins, 1986). Enfin, ces acides hydroxycinnamiques participent directement à la biosynthèse de composés plus complexes comme les flavanoïdes, que l'on retrouve aussi le plus souvent à la périphérie des grains (figure 18), plus particulièrement dans la couche aleuronique (Collins, 1986), ou comme les aminophénoliques, comme DOPA, l'acide chlorogénique ou encore les hydroxycinnamoyl-putrescines et -spermidines (figure 19), que l'on retrouve aussi bien en périphérie (couches aleuronique et subaleuronique) que dans le germe (figure 19) (Collins, 1986). Tous ces conjugués des acides phénoliques ne présentent pas de fonctions ou de propriétés universelles en tant que groupes biochimiques. En fait, chaque molécule peut présenter des effets très spécifiques, soit au sein de la physiologie du caryopse (coloration des couches externes, germination...), soit au sein de processus d'altération (dureté et cohésion du grain, répulsion et/ou inhibition de pathogènes, effets biocides très spécifiques.

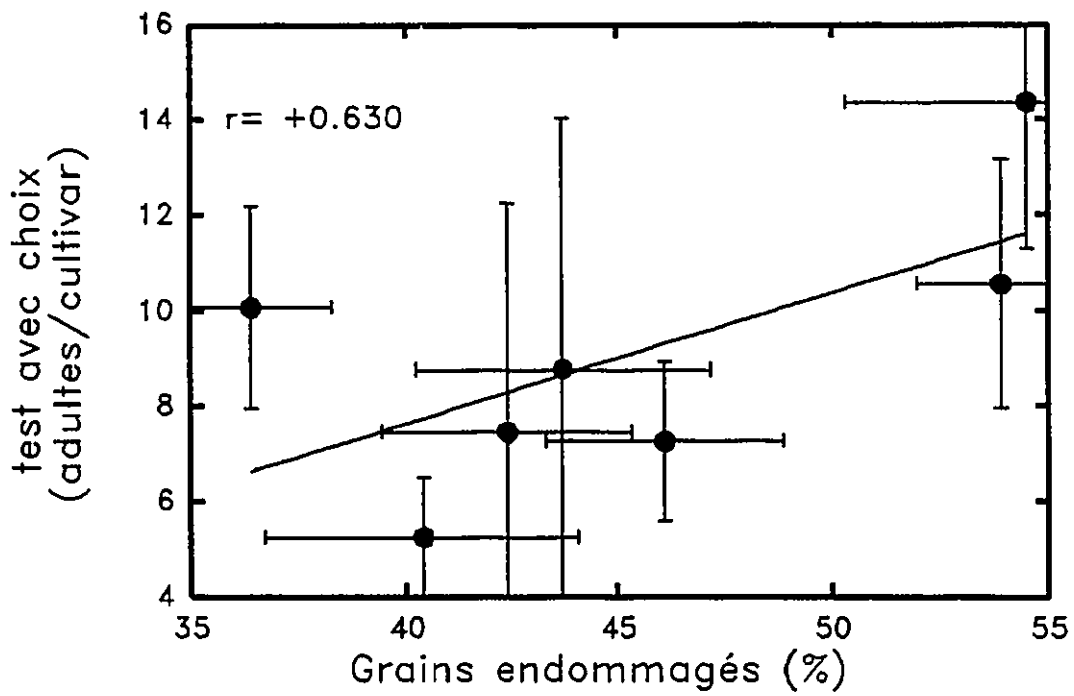
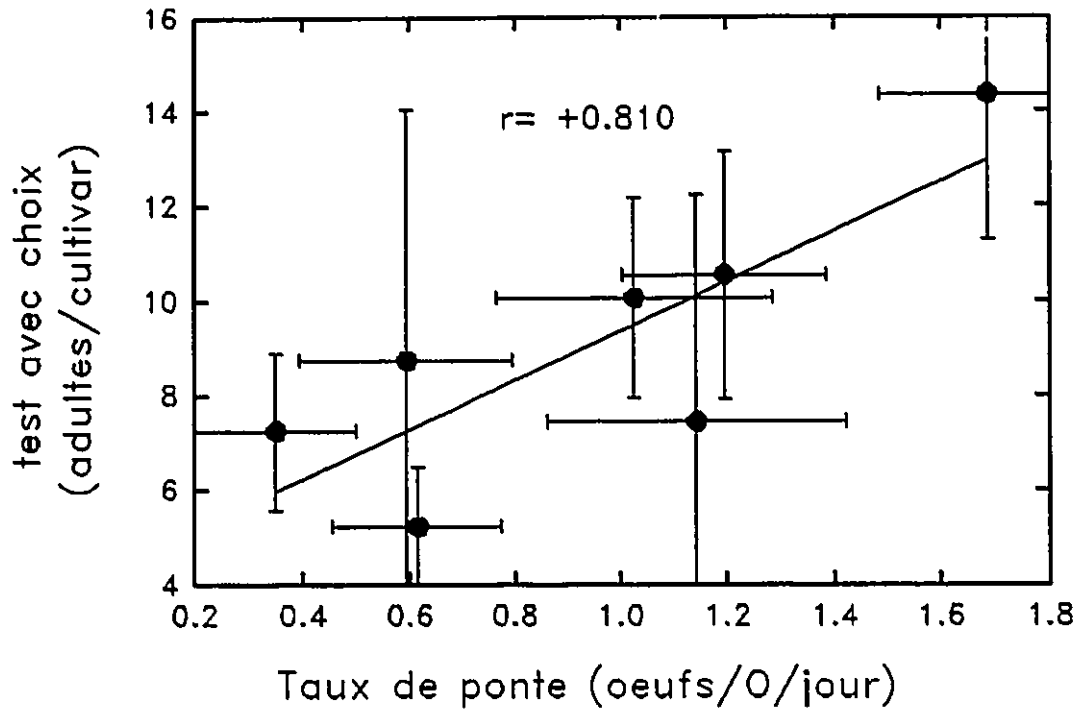
## 2/ *Prostephanus truncatus* et ses potentiels destructeur et reproducteur:

L'activité importante des adultes du Grand Capucin du maïs est de transformer un lot de grains intacts en un substrat plus accessible pour les stades larvaires. En effet, bien plus qu'avec *Sitophilus zeamais*, l'infestation des grains de maïs par *Prostephanus truncatus* est caractérisée par une production importante et

**Figure 20:** Corrélations entre la consommation journalière des adultes et le taux de ponte des femelles ainsi que la préférence, lors des tests avec choix. Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



**Figure 21:** Corrélations entre le choix des adultes de *Prostephanus truncatus* et le taux de ponte des femelles ainsi que le pourcentage de grains endommagés.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards



rapide de poudre. Cette différence est principalement due au fait que les adultes de ce dernier continuent de se nourrir et de se déplacer dans et à travers les grains, tandis que ceux du Charançon du Maïs émergent hors des grains après quelques jours de la métamorphose et restent à l'extérieur, entre les grains; les dommages qui leur sont attribués se limitent à des petits trous de prise de nourriture et d'oviposition. Par contre dans les deux genres les stades larvaires lors de leur développement, sont particulièrement destructeurs, à l'intérieur des grains.

Toutefois, une autre caractéristique les distingue dramatiquement: les femelles du genre *Sitophilus* ne déposent qu'un oeuf par grain, tandis qu'il est commun d'en retrouver plusieurs, jusqu'à une dizaine (Howard, 1983; observations personnelles), dans le même caryopse. De plus la larve du Charançon du Maïs reste dans le même grain jusqu'à émergence, tandis que celles du Grand Capucin seraient capable de coloniser des grains avoisinant si ces derniers sont suffisamment rapprochés et/ou l'espace entre- eux est rempli de poudre produite par les adultes.

Il est facile d'observer ce potentiel transformateur spectaculaire de *Prostephanus truncatus* en laissant un lot de grains stabilisés et infesté dans un incubateur pendant au moins cinq semaines: le substrat est alors transformé en un bloc plus ou moins solide, véritable conglomérat de poudre et de morceaux de péricarpes où adultes et larves prospèrent dans un réseau complexe de tunnels. Il est alors facile de comprendre pourquoi le Grand Capucin est considéré comme étant le plus destructeur.

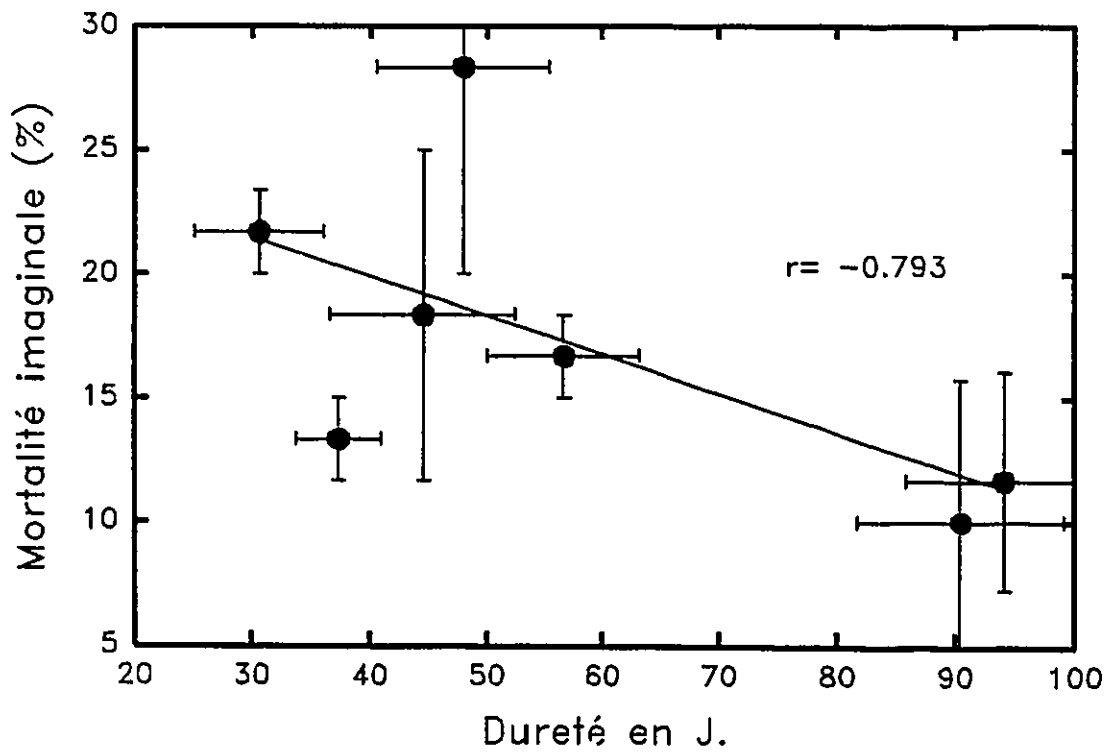
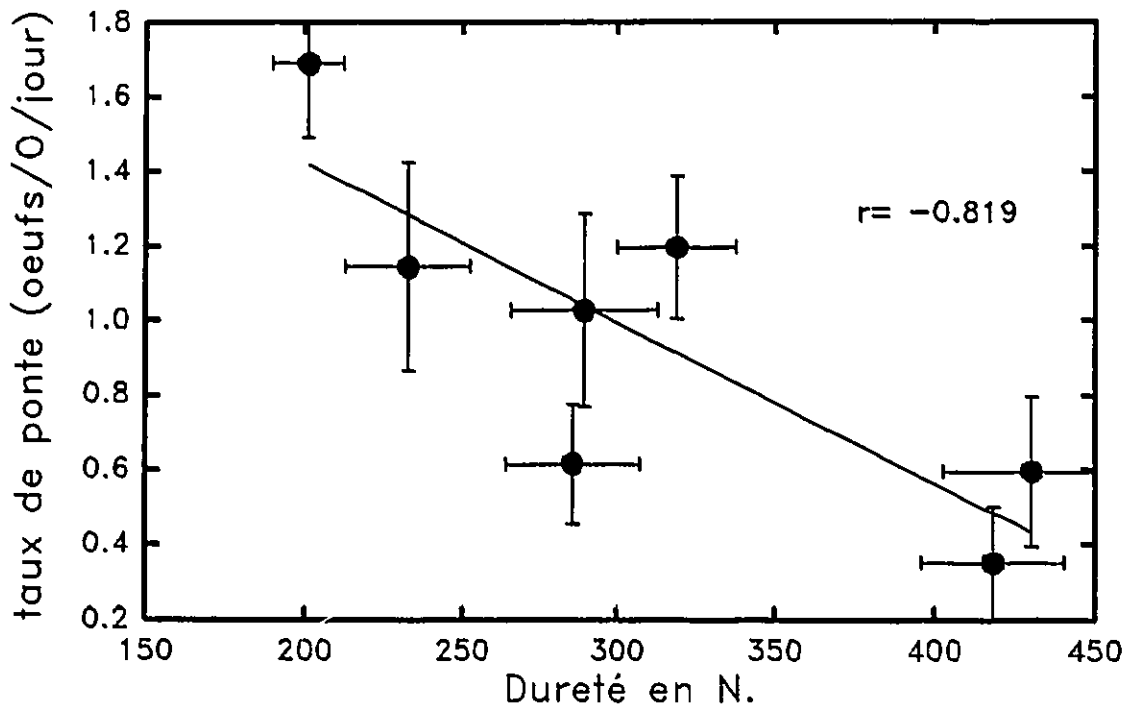
Cette capacité, plus ou moins facilitée, de transformer les grains en poudre

entraîne inévitablement un pourcentage plus élevé de grains endommagés et une perte de poids des stocks infestés plus importante (Giles et Leon, 1975; Hodges et al., 1983). Dans notre étude ceci est exprimé par la tendance significative entre la production de poudre et la perte de poids des lots infestés (tableau 11). Cette production de poudre est plus ou moins déterminée par la capacité à pénétrer le grain, pour avoir accès à l'endosperme, principale source de farine.

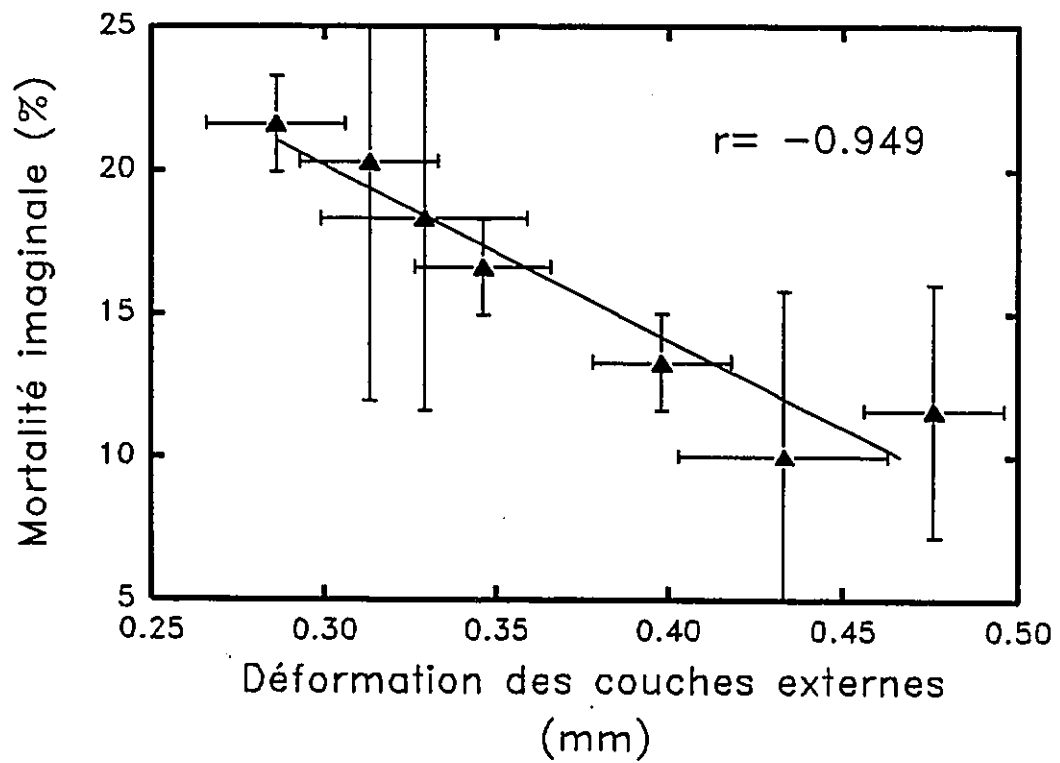
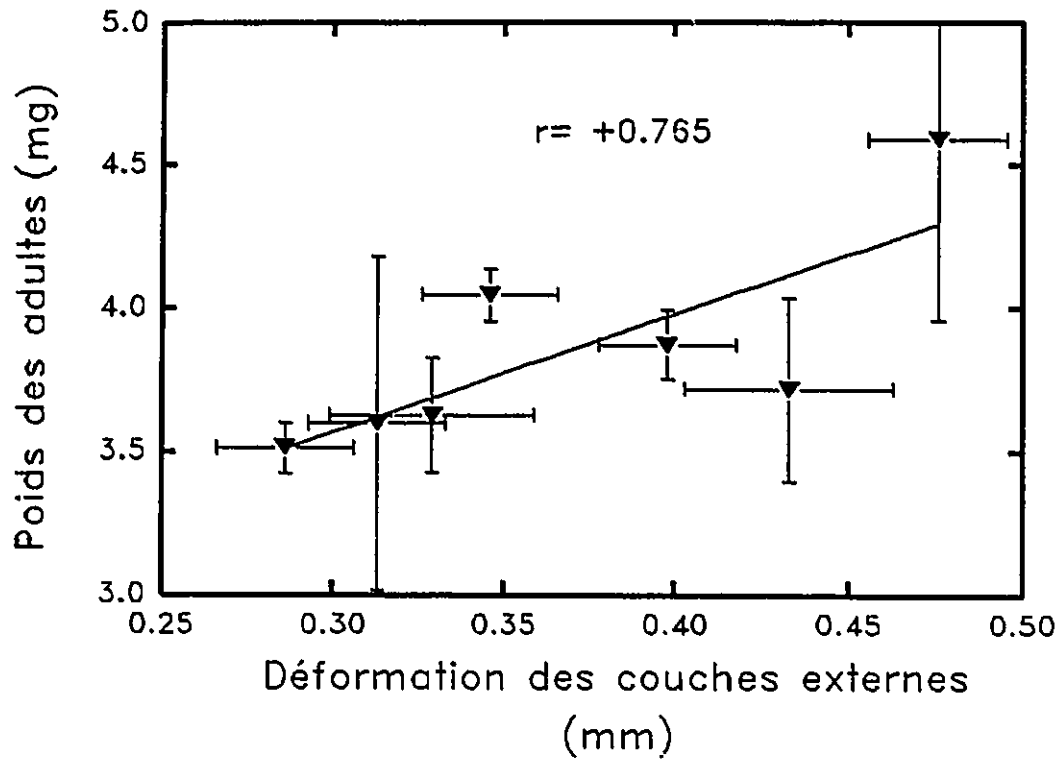
Cette observation est clairement mise en valeur par la corrélation très significative entre cette production de poudre (principalement de la farine) et le coefficient de pénétration, qui n'est autre que la proportion de grains endommagés qui ont été effectivement colonisés. L'importance de l'extraction de cette farine et de sa qualité, pour le développement de *Prostephanus truncatus*, est soulignée par le fait qu'elles semblent stimuler la consommation par les adultes ainsi que le taux de ponte des femelles (tableau 11). Howard (1983) a pu démontrer que pratiquement seules les femelles qui avaient gagné du poids ont pondu.

Il apparait donc que l'oviposition soit très sensible à l'efficacité de consommation et d'assimilation. De plus lors des tests avec choix, les adultes semblent avoir préféré les cultivars susceptibles de libérer le plus de farine (où la production a été la plus importante, lors des tests sans choix). Ce choix correspond aussi aux cultivars dans lesquels la consommation et le taux de ponte des femelles semblent avoir été les plus stimulés (figures 20 et 21). Bien entendu, le taux de ponte a été le plus élevé dans les cultivars où la consommation a été la plus importante (figure 20).

**Figure 22:** Corrélations entre la dureté des grains de maïs et le taux de ponte ainsi que la mortalité des adultes.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards



**Figure 23:** Corrélations entre la déformation des couches externes des grains de maïs et le poids des adultes ainsi que leur mortalité après deux semaines d'infestation.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards



Toutes ces mesures de paramètres de dommages et de performances de *Prostephanus truncatus* ont été réalisées sur des grains lâches, mais stabilisés par le poids de billes de verre. La plupart des auteurs déclarent que le Grand Capucin du maïs est bien plus destructeur sur les épis que sur des grains lâches ce qui a conduit à classer cet insecte comme déprédateur attaquant principalement les épis. Notre recherche ainsi que celles de Howard (1984) et de Cowley et al. (1980) montrent que les adultes et les larves se développent très bien dans des grains lâches stabilisés, faisant des dommages tout à fait équivalents à ceux mesurés sur des épis.

### 3/ Effets des différentes caractéristiques des grains de maïs sur

#### *Prostephanus truncatus*:

Est-ce que les différences variétales peuvent engendrer des différences de susceptibilité aux attaques de *Prostephanus truncatus* ?

Comme Silva et al. (1981), Bell et Watters (1982), Ramirez Martinez et Silver (1983), Howard (1983, 1984) a testé plusieurs variétés représentant les quatre grands types de grains: farineux, denté, corné et popcorn. Il concluait alors que même si aucune variété n'était protégée contre le Grand Capucin, l'introduction de grains plus durs, du type corné, devrait réduire les pertes, car il semble que les différences variétales influencent plusieurs aspects du développement et du potentiel reproducteur. Notre recherche confirme ces hypothèses et appuie l'observation

suivante: *Prostephanus truncatus* semble plus sensible au type de grain que *Sitophilus zeamais*.

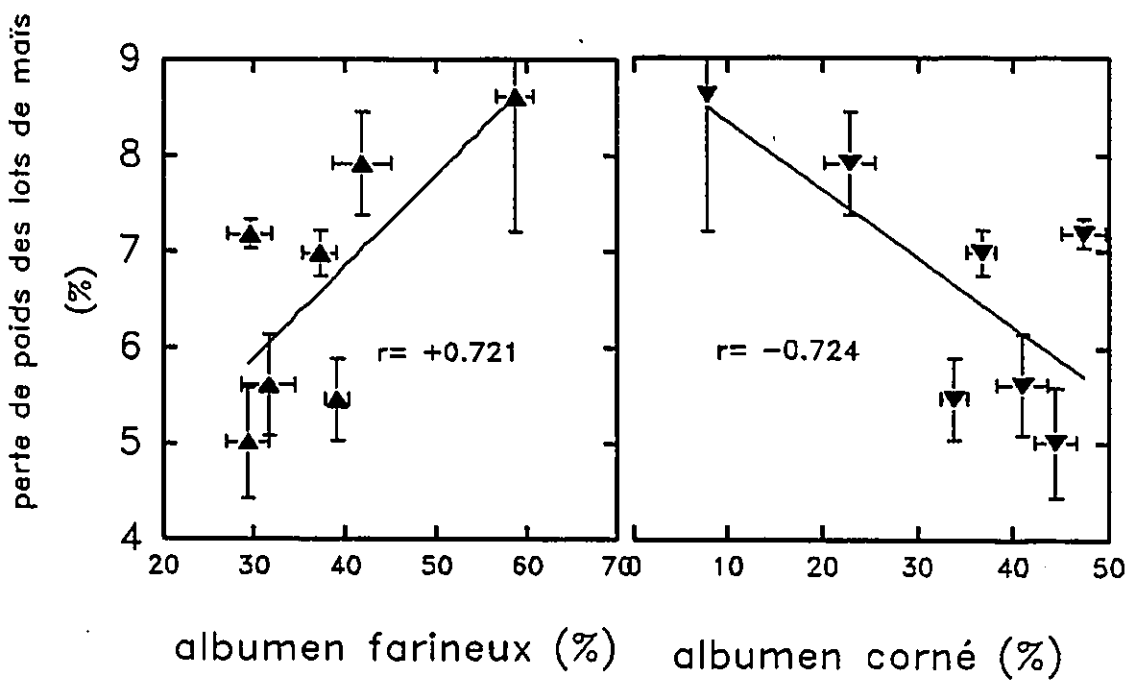
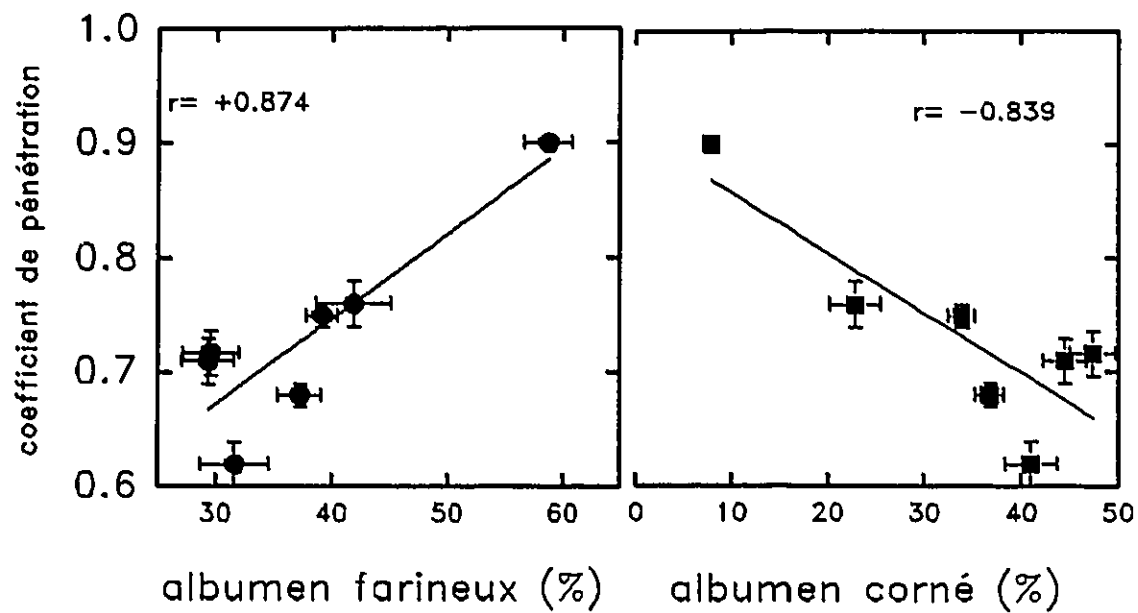
Comment les différences physico-anatomiques peuvent-elles influencer l'activité du Grand Capucin ?

La réponse est loin d'être évidente car ces caractéristiques physiques ne sont pas dissociables de la biochimie intrinsèque du grain. Toutefois, étant donné le milieu solide qui doit être colonisé, la forme et la dureté des grains peuvent influencer considérablement le potentiel colonisateur et destructeur du Grand Capucin. La cohésion du grain dépend des différentes proportions entre les composants du caryopse: germe, albumen farineux, albumen corné et couches externes (péricarpe et couche d'aleurones). Ainsi, ces caractéristiques du grain pourrait influencer sa qualité en tant que "niche" et en tant que milieu nutritif, et donc son aptitude à être attaqué et à soutenir une population du charançon.

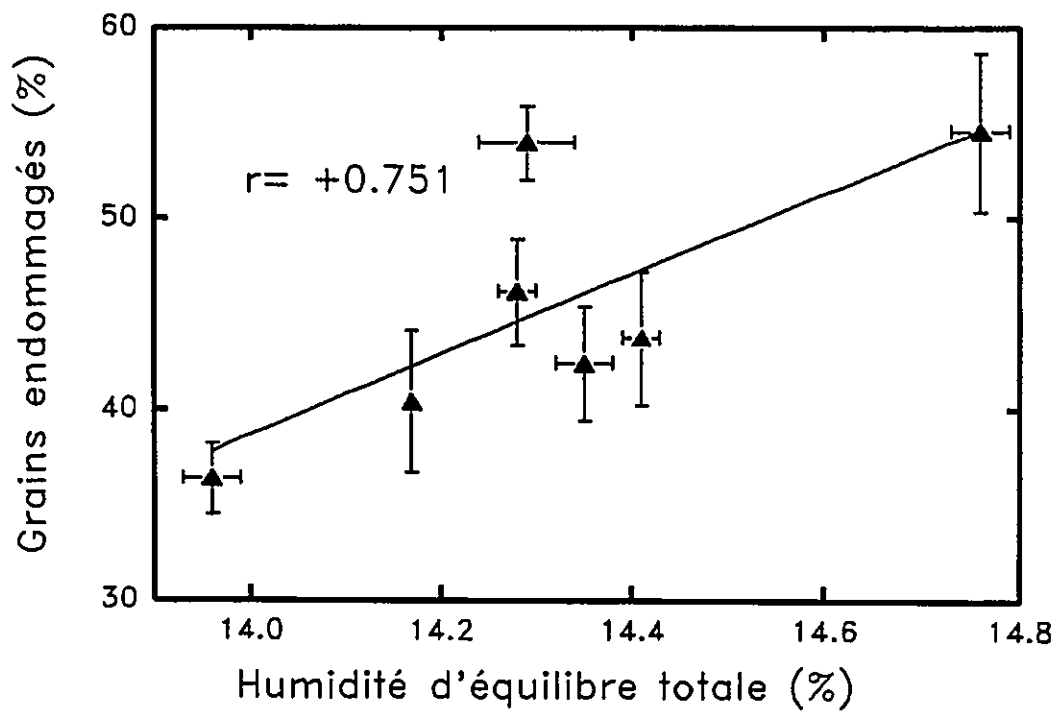
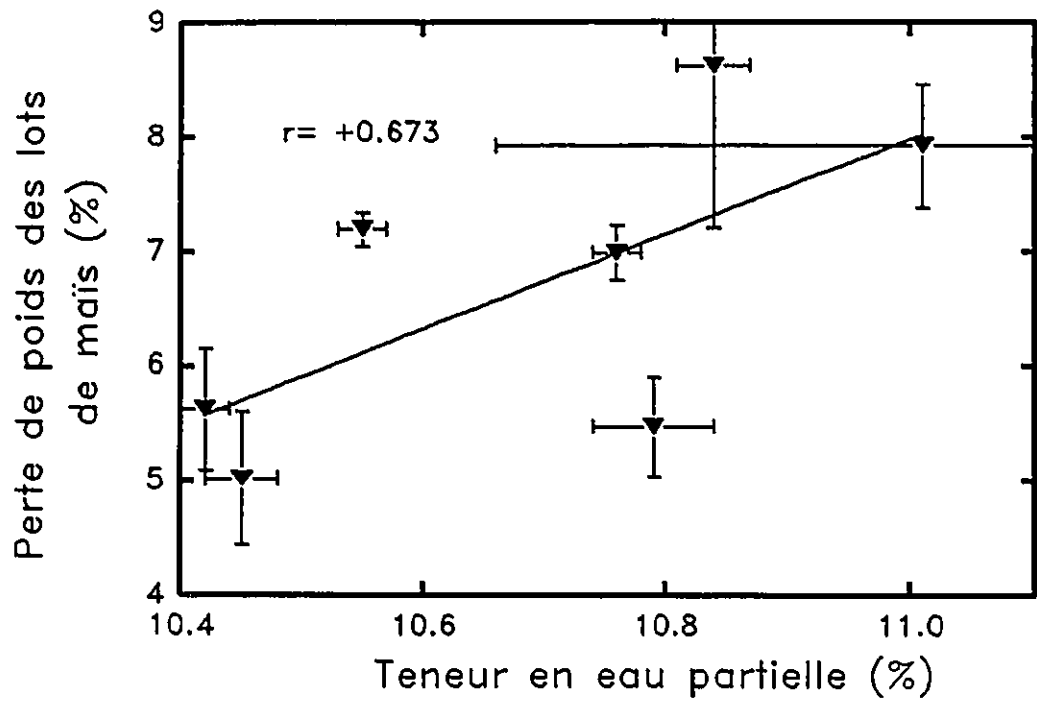
En tant que première barrière physico-biochimique que rencontrera un adulte, les couches externes, principalement le péricarpe et la couche d'aleurone, représentent une frontière stratégique dans la relation plante/insecte en question. Sa dureté (ou sa plasticité) ainsi que sa qualité (présence de molécules à signification écologique), peuvent jouer un rôle déterminant dans les mécanismes de résistance contre des pathogènes.

Dans notre recherche, la dureté des grains semble influencer très significativement les performances de *Prostephanus truncatus*. En particulier, la mortalité des adultes, leur poids et le potentiel de ponte des femelles semblent être

**Figure 24:** Corrélations antagonistes des deux types d'endospermes présent dans les grains de maïs avec le coefficient de pénétration (% de grains totalement colonisés) et la perte de poids des lots infestés pendant deux semaines. Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards



**Figure 25:** Régressions linéaires entre la teneur en eau partielle des grains et la perte de poids des lots infesté pendant deux semaines d'une part, et entre l'humidité totale des grains et le pourcentage de grains endommagés après deux semaines d'infestation. Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards



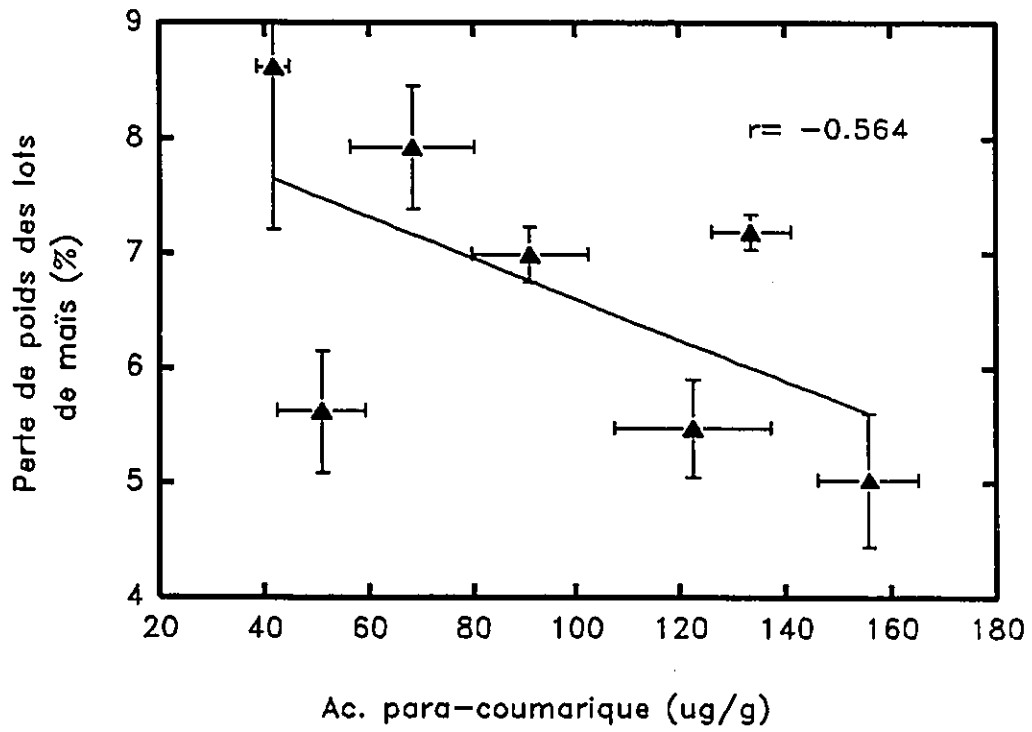
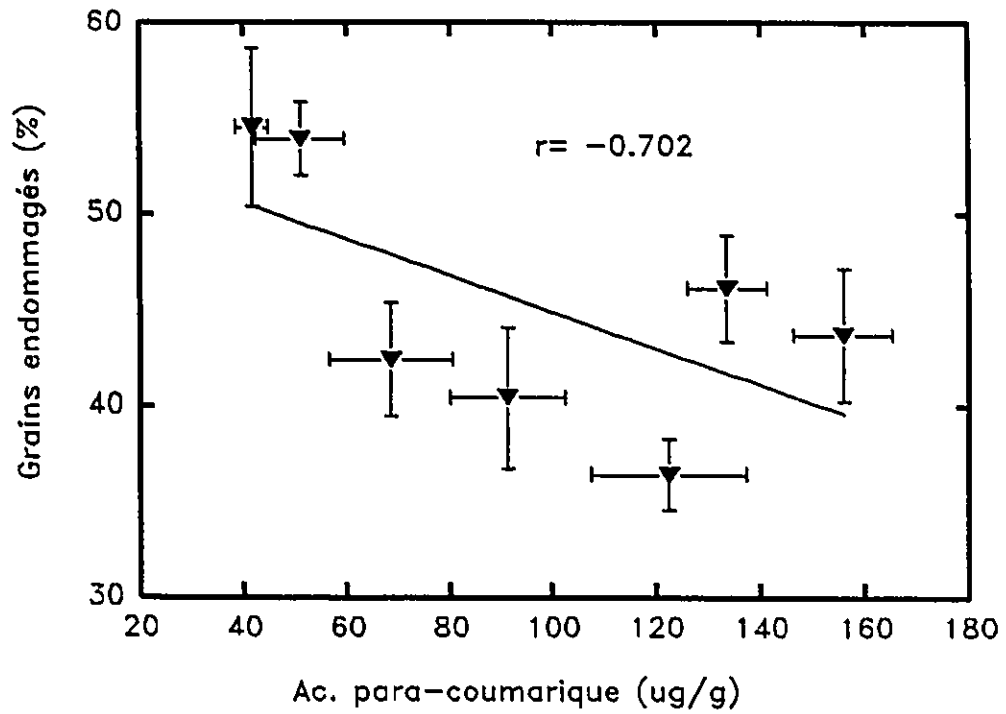
affectés (figures 22 et 23). Nous pouvons proposer une explication au niveau du bilan énergétique de l'insecte: si le substrat est plus difficile d'accès ou moins directement consommable, une plus grande partie de l'énergie métabolique de l'insecte sera dissipée dans un travail mécanique plus intense au détriment du métabolisme primaire nécessaire au développement et à la reproduction. Ainsi dans un lot de grains plus durs et au sein d'un écosystème post-récolte relativement isolé, une population d'adultes du Grand Capucin transformera beaucoup plus d'énergie en travail et chaleur. Sa biomasse en sera plus réduite et sa survie limitée (figure 22) tandis que l'énergie nécessaire aux femelles pour fabriquer et pondre leurs oeufs sera moins disponible.

Nous avons vu que la dureté du grain était reliée à celle des couches externes, mais aussi à la qualité de l'endosperme et au taux hydrique. En effet, un albumen farineux ou vitreux semble faciliter ou limiter le pouvoir pénétrant des adultes (figure 24) et en conséquence la production de poudre (tableau 12) et la perte de poids des lots (figure 24). Comme nous l'avons déjà discuté l'amidon est bien moins disponible et accessible dans un albumen vitreux que dans l'endosperme farineux. La production de farine est donc mécaniquement plus difficile.

Le taux hydrique, détermine aussi la dureté d'un grain et donc est responsable d'un plus grand nombre de grains endommagés (car plus facilement endommageables) d'une plus grande production de poudre et d'une plus grande perte de poids des lots infestés (figure 25).

Comme nous l'avons vu, les acides phénoliques, comme l'acide para-

**Figure 26:** Corrélations entre la teneur en acide para-coumarique des grains de maïs et le pourcentage de grains endommagés et la perte de poids des lots après deux semaines d'infestation.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards

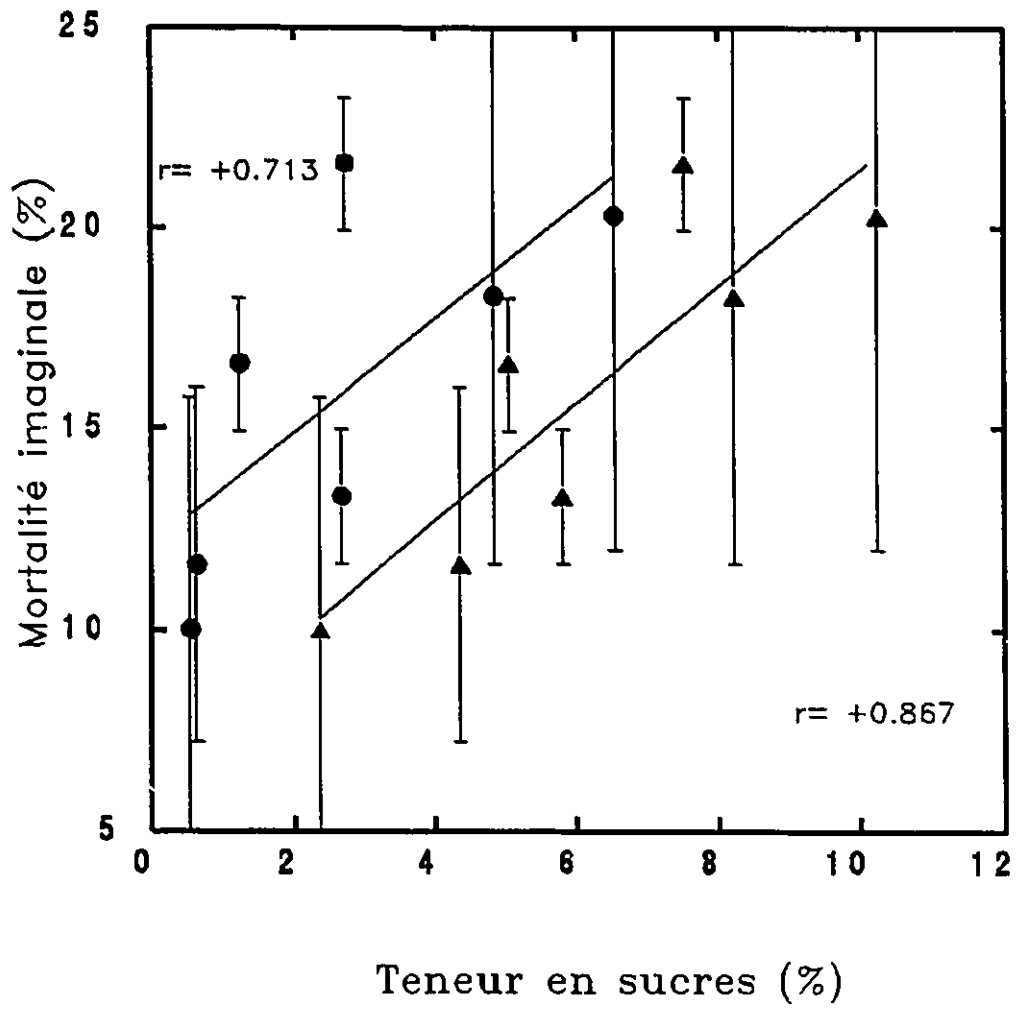


**Figure 27:** Corrélations entre la mortalité des adultes et en sucres des grains de maïs infestés.

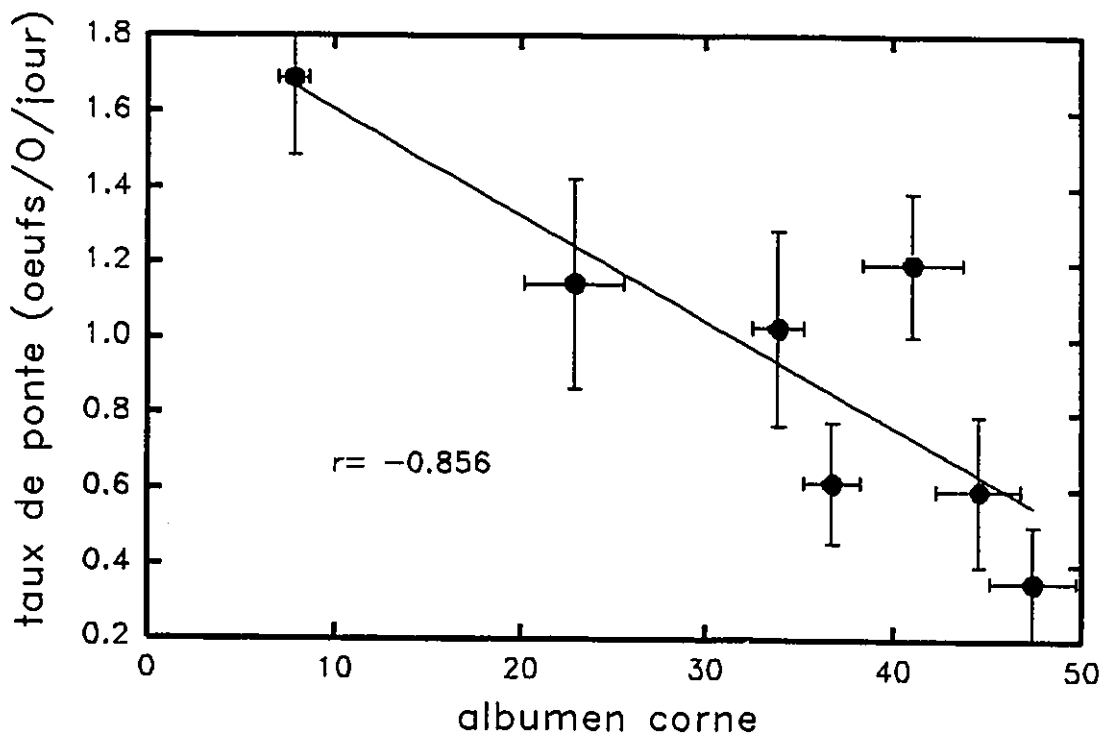
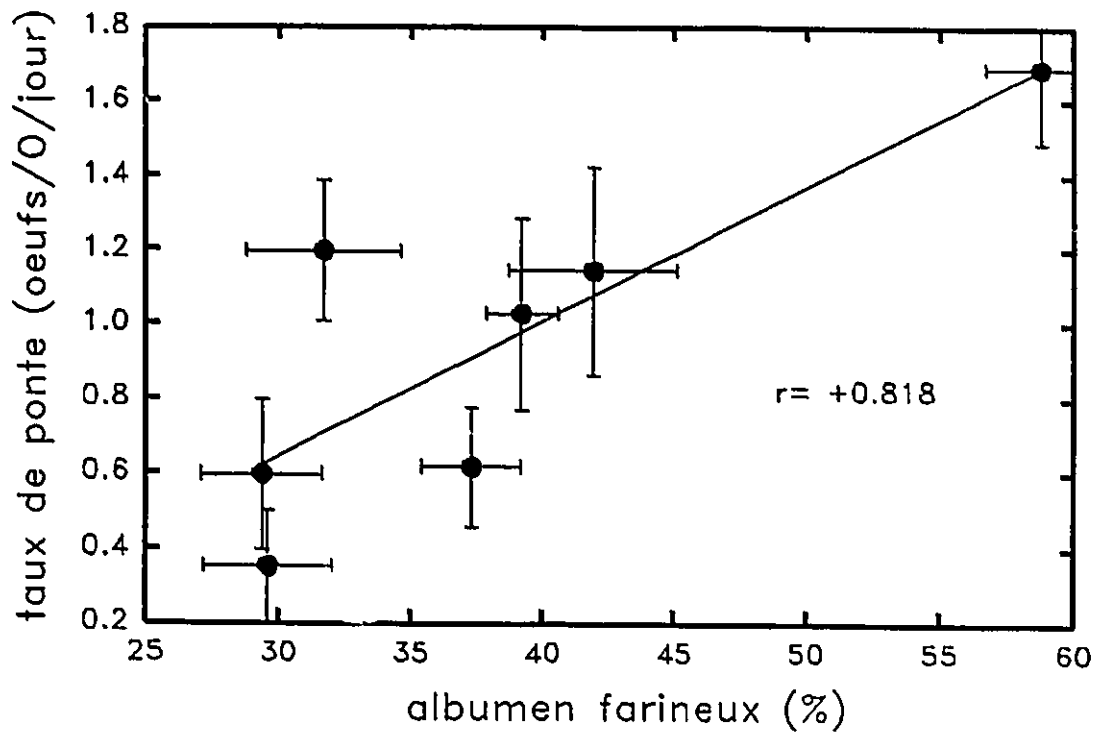
Teneur totale en sucres

Teneur en sucrose

les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



**Figure 28:** Corrélations entre la qualité de l'endosperme des grains de maïs et le taux de ponte des femelles du Grand Capucin.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.

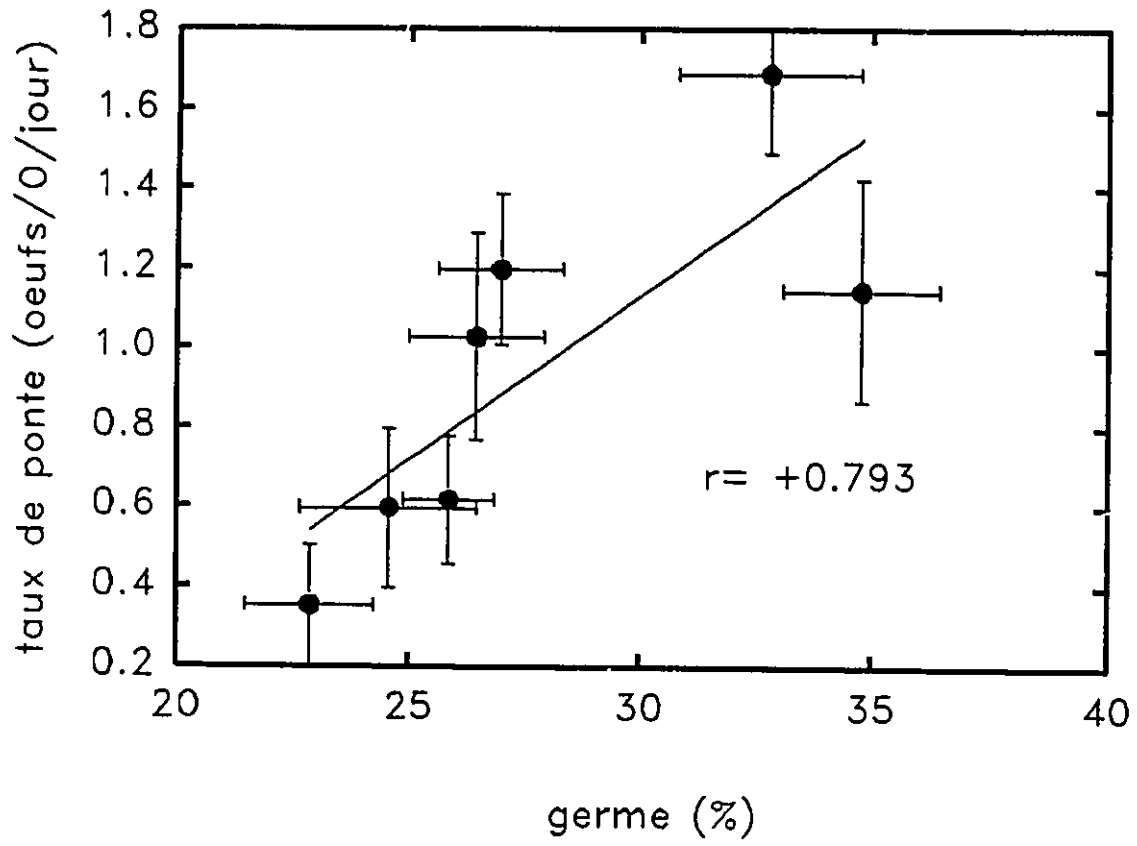


coumarique, sont aussi fortement responsables de la dureté des grains et de celle des couches externes en particulier. La figure 26 montre clairement les tendances entre l'acide p-coumarique et le nombre de grains endommagés, d'une part, et la perte de poids des lots, d'autre part. Le fait que la proportion de grains attaqués semble plus sensible à la présence de cet acide suggèrerait un effet décourageant pour l'insecte: soit au niveau de l'énergie à fournir pour coloniser le grain, soit à un niveau plus physiologique (comme un effet phagorépresseur, par exemple).

Parmi les caractéristiques nutritionnelles des grains pouvant déterminer leur susceptibilité aux attaques de *Prostephanus truncatus*, la quantité d'eau physiologiquement disponible peut être particulièrement cruciale, même si une bonne partie de l'eau nécessaire à l'insecte peut provenir de son propre métabolisme. Dans notre culture, en farine, les adultes et les larves semblaient parfaitement capable de prospérer dans des conditions relativement sèches, puisque les bocaux étaient gardés dans nos laboratoires avec une humidité relative variant de 10 à 50 %. Le Grand Capucin est bien connu pour sa capacité à s'adapter à des hygrométries très différentes étant capable d'attaquer les grains tôt sur l'épis, avec un taux hydrique de 40 à 50 % (Giles, 1975), et tard en stockage, avec une teneur en eau de 9 à 11 % (Hodges et al., 1983).

Une corrélation positive et très significative entre la mortalité et la teneur en sucres, plus particulièrement en sucrose, a été observée (figure 27). Schoonhoven (1982) a montré le rôle phago-stimulant du sucrose sur de nombreux insectes. Estay (1986) s'était aussi étonné de la corrélation positive entre le taux de sucre et la

**Figure 29:** Corrélation entre la proportion du germe dans les grains de maïs et le taux de ponte.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.

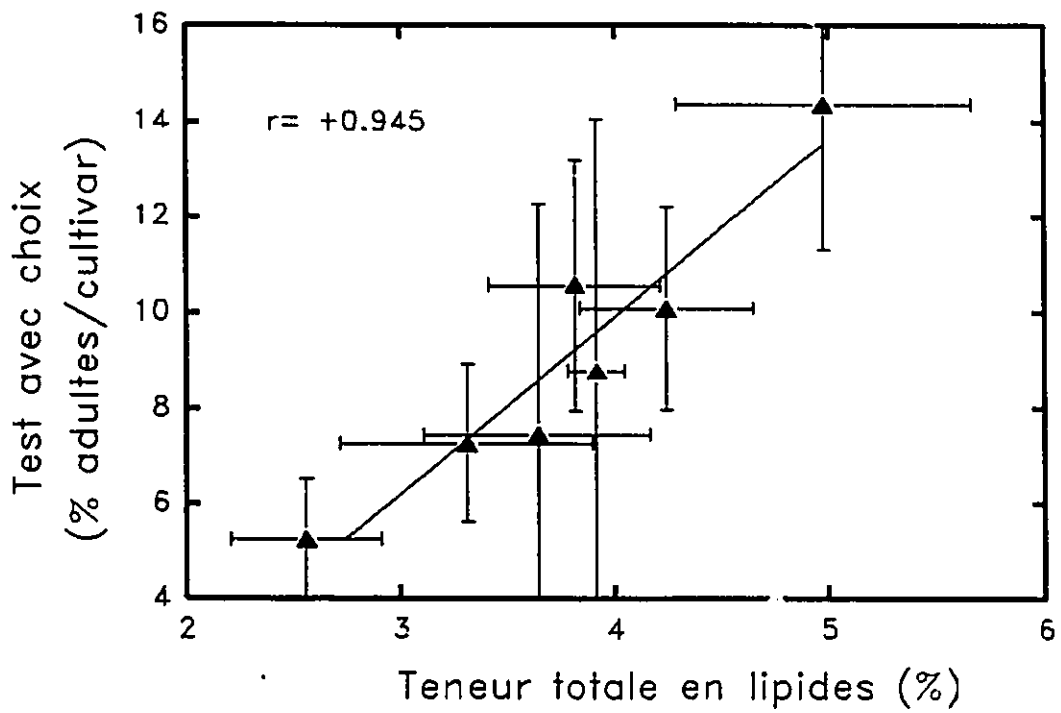
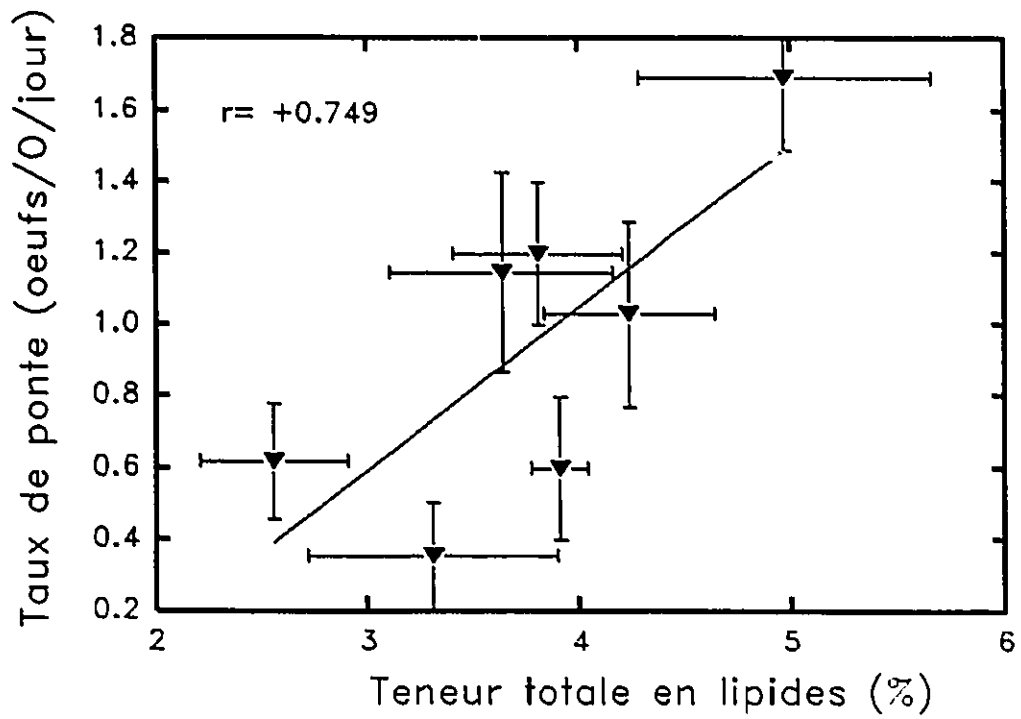


résistance de cultivars de tomates à *Scrobipalpus absoluta*. Il était alors proposé que la détection de sucre par colorimétrie pouvait être corrélée avec la concentration d'une autre substance allélochimique, comme l'acide chlorogénique. Dans notre cas, les saccharides ont été détectés et quantifiés par HPLC, ce qui pose le problème de façon différente. Cette corrélation avec la mortalité imaginale reste incomprise.

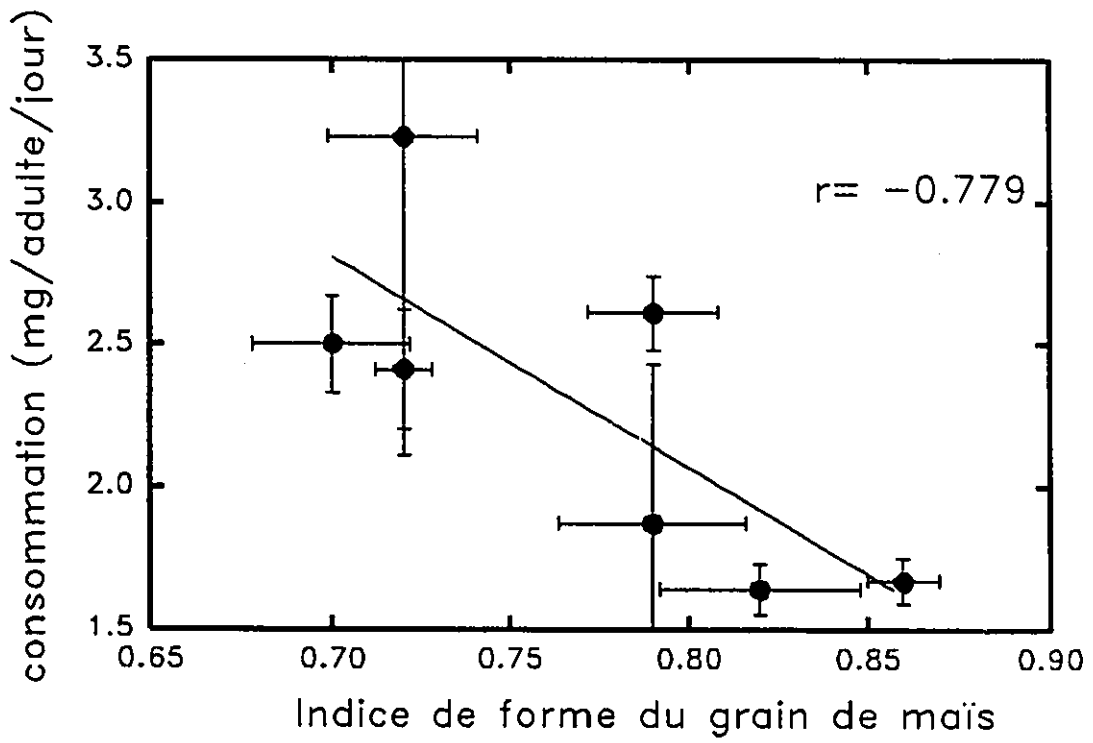
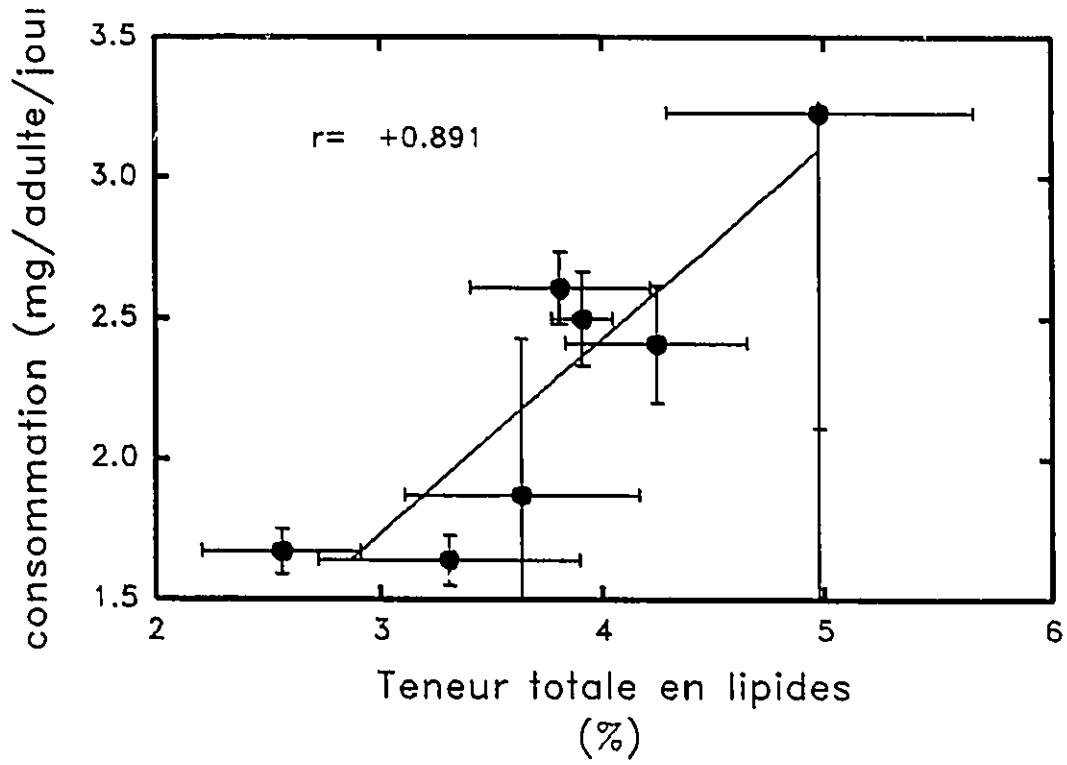
L'importance de la qualité de l'albumen a été discutée en fonction de la dureté des grains, mais celle-ci peut aussi l'être en tant que principale source énergétique pour les larves et les adultes. Il semblerait que la consommation par les adultes soit stimulée, ou du moins facilitée, par une plus grande proportion d'albumen farineux, puisqu'il existe une tendance significative avec le rapport F/C (tableau 12). Si la prise alimentaire est facilitée, la physiologie interne de l'adulte est susceptible d'être stimulée comme par exemple la production d'oeufs par les femelles (figure 28). Inversement, un endosperme plutôt corné freinerait la consommation et limiterait le taux de ponte (figure 28).

Dans la même logique, la teneur en lipides et donc la proportion du germe (principal "contenant" à lipides) pourrait favoriser le métabolisme de l'insecte. La proportion du germe peut influencer doublement le succès d'une infestation du Grand Capucin du maïs. En effet, non seulement elle réduit l'énergie mécanique nécessaire pour pénétrer le grain (représentant une région particulièrement tendre), mais elle est source d'énergie chimique rapidement assimilable pour l'insecte. En effet le volume relatif du germe semble avoir, de façon plus ou moins directe

**Figure 30:** Corrélations entre la teneur totale en lipides des cultivars et le taux de ponte des femelles ainsi que le pourcentage d'adultes retrouvés dans chaque cultivar lors du tests avec choix.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



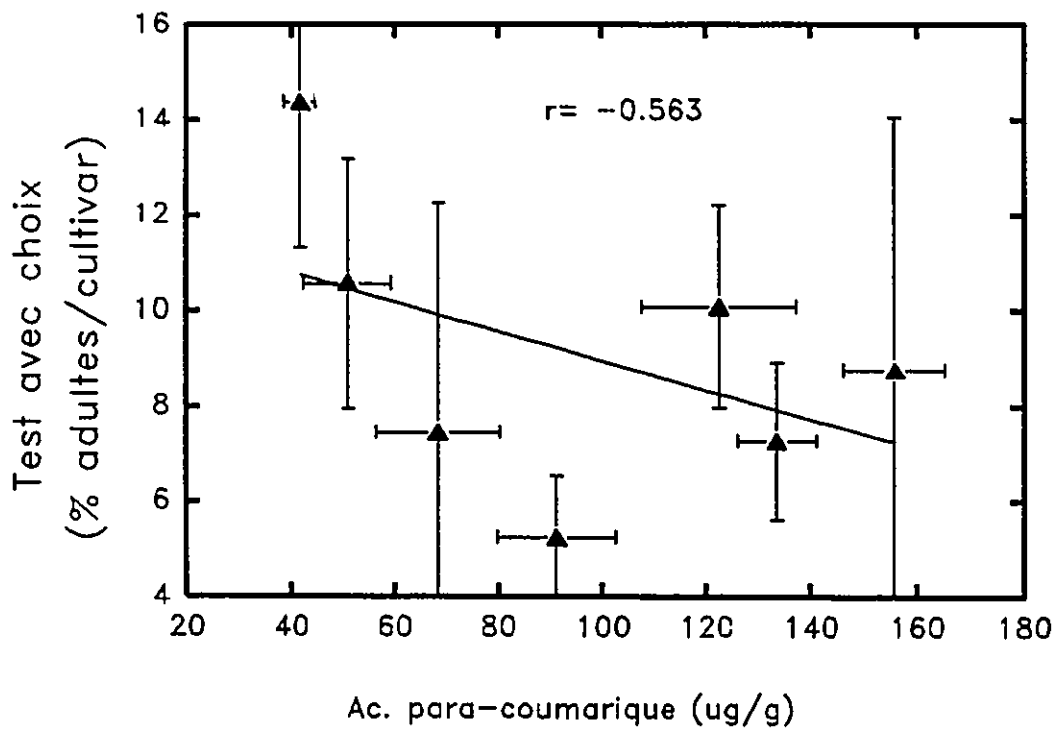
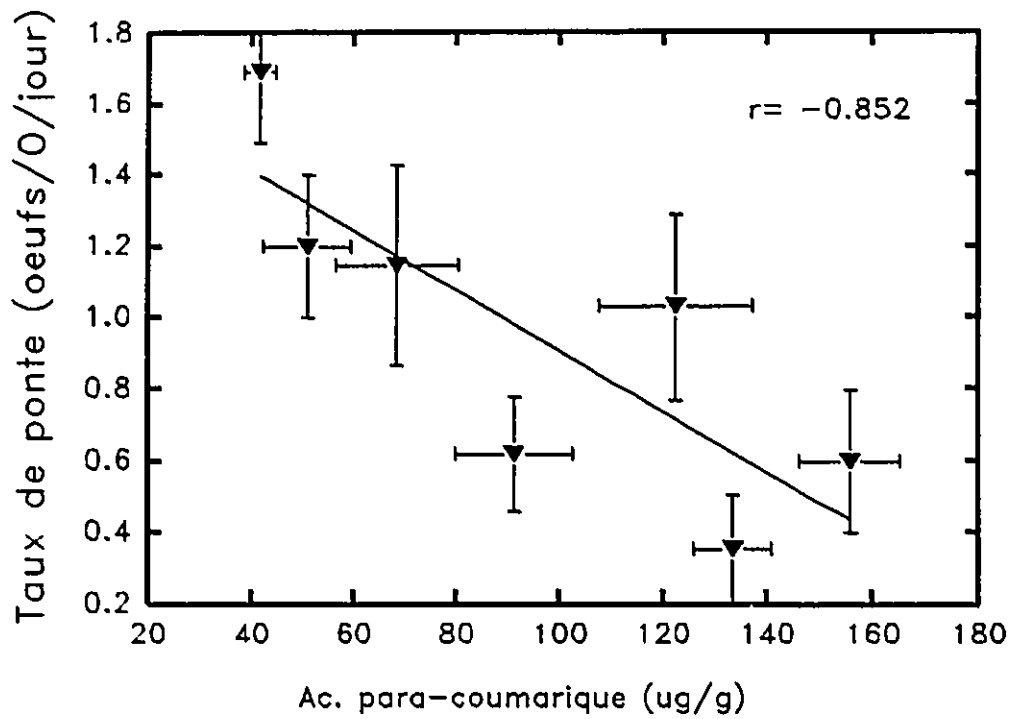
**Figure 31:** Corrélations entre la consommation journalière des adultes et la teneur totale en lipides ainsi que l'indice de forme (dimension minimale / dimension maximale dans une coupe longitudinale) des grains de maïs. Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



influencé le taux de ponte (figure 29). Ceci est appuyé par les très bonnes corrélations et tendance entre la teneur totale en lipides, d'une part, le taux de ponte, le choix (figure 30) et la consommation (figure 31), d'autre part, suggérant que *Prostephanus truncatus* préférerait des variétés plus oléagineuses. Une étude de la bioénergétique du Grand Capucin, nourri sur du maïs (Demianyk et Sinha, 1988), semble montrer une préférence des larves à forer à travers le germe, maximisant ainsi leur entrée d'énergie. Pourtant d'après nos observations, ainsi que celles d'autres auteurs, aucune prédilection pour cet organe n'a été décelée pour *Prostephanus truncatus* (Howard, 1983). Ces observations vont dans le sens inverse de celles faites avec *Sitophilus spp.* qui semblait être stimulé par la teneur en protéines et inhibé par celle en lipides (Eden 1952; Singh et McCain 1963; Dobie 1977; Gomez *et al.* 1982, 1983). Dans un milieu nutritif caractérisé par une hygrométrie faible, les lipides ne sont pas de bons substrats car leur métabolisme ne fournit que très peu d'eau, contrairement aux glucides, comme l'amidon.

Aucune corrélation significative n'a été mesurée entre l'activité du Grand Capucin et la teneur en protéines. Mais ceci ne veut pas forcément dire qu'il n'y a aucun effet. Au contraire nous proposons plutôt au moins deux effets antagonistes. Les protéines gardent pour *Prostephanus truncatus* leur valeur nutritive et restent indispensables comme pour tout insecte. Comme nous l'avons discuté plus haut, ce qui est responsable de la dureté de l'endosperme vitreux c'est la matrice protéique. Ainsi, en même temps que les protéines sont essentielles au développement, elles participent à la dureté des grains et donc découragent l'activité de l'insecte. Ces

**Figure 32:** Corrélations entre la teneur en acide para-coumarique des grains de maïs et le taux de ponte et le choix du Grand Capucin.  
Les barres verticales et horizontales représentent les erreurs standards.



deux effets antagonistes pourraient neutraliser les corrélations directes avec le comportement de l'insecte. Signalons qu'avec *Sitophilus zeamais* une corrélation négative a été trouvée (Serratos, 1987), et il se pourrait que la concentration d'azote, dans les grains analysés, soit en fait supérieure à la concentration optimum au delà de laquelle, on observe un effet inhibiteur. Dans notre étude, il serait vraisemblable que la fourchette de teneur en azote corresponde au plateau d'optimum de croissance pour le Grand Capucin.

Enfin, les acides phénoliques, en plus de contribuer à la dureté du grain, sont des composés qui présentent toute une gamme d'effets écologiques. Les principaux phénoliques présents dans le grain, nous l'avons vu, sont les acides hydroxycinnamiques comme l'acide férulique et l'acide para-coumarique. Harborne (1980) rappelle que les composés phénoliques se retrouvent très rarement sous la forme libre, mais plutôt, presque toujours, sous des formes conjuguées, probablement à cause de leur phytotoxicité significative. Dans les feuilles, la glycosidation permet de séquestrer ces composés, en les intégrant ensuite dans des structures où ils ne peuvent interférer avec le métabolisme vital de la plante (Harborne, 1980). Dans le grain de maïs on les retrouverait principalement dans les parois cellulaires du péricarpe, des couches aleuroniques et sub-aleuroniques ainsi que dans l'endosperme. A notre connaissance, personne n'a pu clarifier des rôles endogènes, de ces composés phénoliques, dans le métabolisme et la croissance d'une plante. Swain (1977) soulignait que les interactions physiologiques observées seraient plutôt incidentes au large rôle d'agents protecteurs qui leur sont attribués. Au sein d'un

organe de préservation en vie ralentie, où la croissance est arrêtée, la présence de tels composés semble n'avoir qu'une signification écologique. Beaucoup d'auteurs ont étudié cette importance écologique des phénoliques dans les plantes qui va de la pigmentation jusqu'à la production d'agents allélopathiques, anti-appétants, antifongiques et aux phytoalexines (Harborne, 1976, 1977; Swain 1977). Au sein de la résistance ou de la susceptibilité d'un grain de maïs aux attaques de *Prostephanus truncatus*, les composés phénoliques pourraient jouer un ou des rôle(s) déterminant(s). En effet, le fait que le taux de ponte soit très significativement corrélée avec la teneur en acide para-coumarique (figure 32), supporte l'hypothèse d'un effet plus direct que la participation à la dureté du caryopse. Et ceci probablement sous des formes conjuguées différentes comme des glycosides ou des amines que l'on retrouve aussi bien dans les parois des couches externes que dans l'embryon et le cotylédon (figures 15, 18 et 19). Des tests de toxicité aiguë ont été réalisés dans nos laboratoires, sur des larves du deuxième et troisième stades, avec les acides t-férulique et p-coumarique purs incorporés dans des diètes méridiques à 1 mg/g: aucun effet biocide n'a pu être enregistré, après 24 heures. Toutefois, l'observation des l'épithélia intestinaux de *Sitophilus zeamais*, *Sitophilus granarius* et *Prostephanus truncatus* montre de façon spectaculaire un effet corrosif prononcé (Sen, communication personnelle; photo 4). De plus, il a été aussi observé un phénomène d'agglutination et de durcissement du chyme alimentaire dans l'intestin des insectes ainsi nourris (Sen, communication personnelle; photo 5). Par contre, lorsque des larves ont été nourries avec des diètes dans lesquelles 1 mg/g d'extraits

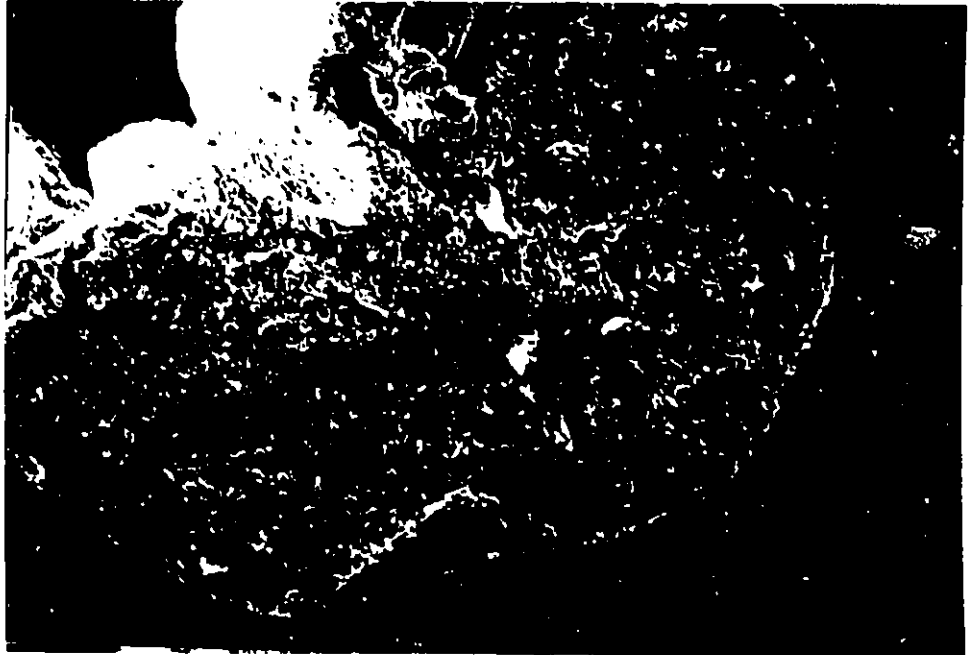
**Photo 4:** Effet corrosif de l'acide férulique sur les parois intestinales de *Prostephanus truncatus*, nourrit, pendant 24 heures, avec une diète méridique contenant 1mg/g de cet acide phénolique. (Sen A.)



d'hydroxycinnamoyl-putrescines (un mélange de p-coumaroyl-putrescine et féruloyl-putrescine), un effet biocide sévère fut alors enregistré (Sen, communication personnelle).

Toutes ces observations suggèrent que les composés phénoliques peuvent jouer des rôles déterminants, à plusieurs niveaux de la physiologie de l'insecte, dans les mécanismes de résistance du grain de maïs contre la colonisation par le Grand Capucin. En contribuant à la dureté ils créent des conditions qui forcent l'insecte à dépenser plus d'énergie et rendent le stock amylicé moins disponible. Sous la forme de glycosides intégrés aux fibres celluloses des parois cellulaires, ils peuvent être libérés lors de l'attaque et provoquer cette agglutination du chyme alimentaire diminuant considérablement la digestibilité et freinant la croissance et le potentiel reproducteur des adultes. Enfin certaines formes plus complexes peuvent engendrer des effets phago-répresseurs ou toxiques.

**Photo 5:** Effet d'agglutination et de durcissement du chyme alimentaire dans l'intestin de *Prostephanus truncatus*, nourrit, pendant 24 heures, avec une diète méridique contenant 1mg/g d'acide férulique. (Sen A.)



4/ proposition d'un modèle écophysologique pour la résistance des grains de maïs aux attaques de *Prostephanus truncatus*:

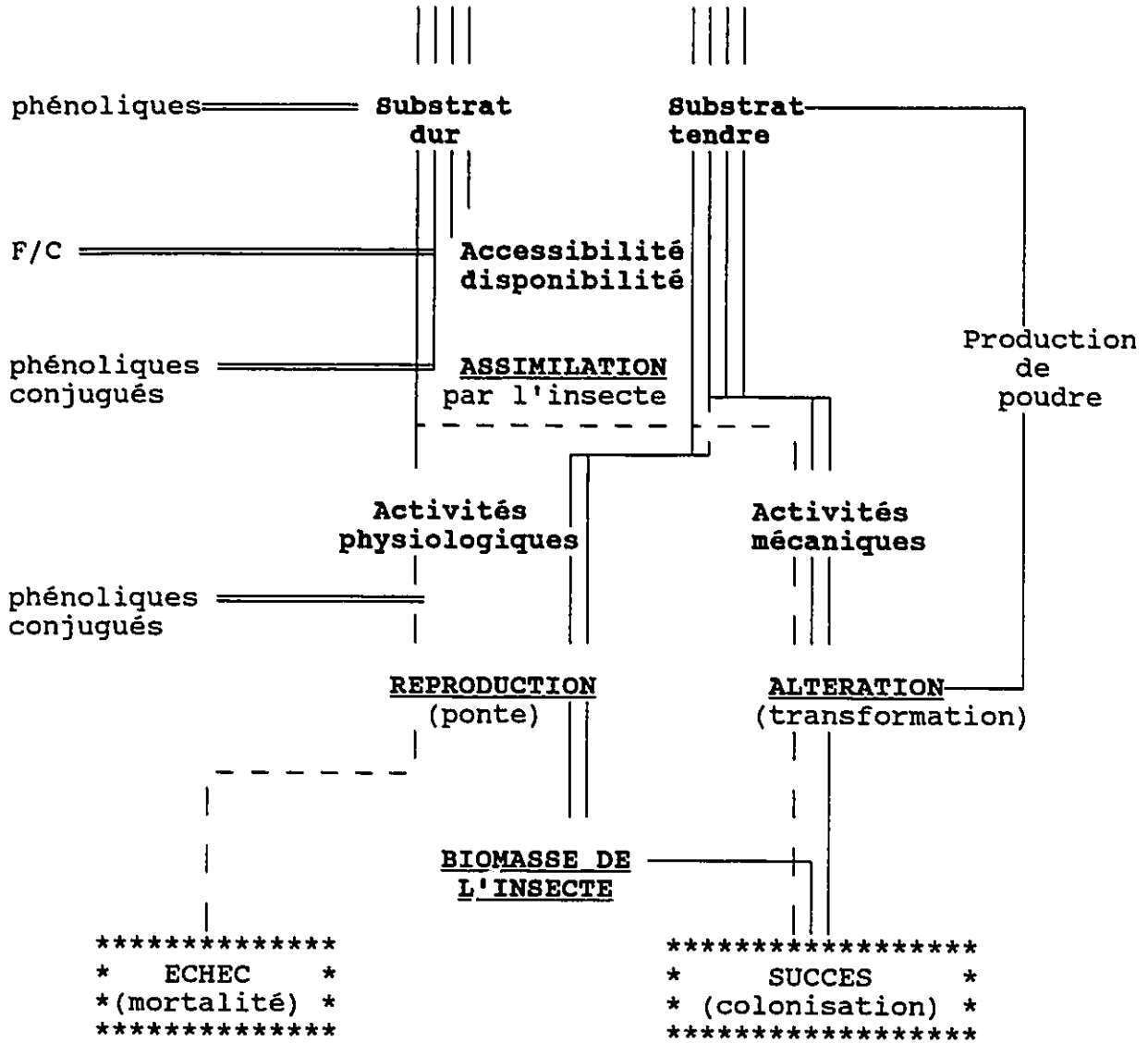
Les analyses de régressions multiples proposent, pour chaque performance de l'insecte, mesurée, un modèle mathématique où l'on retrouve les caractéristiques physicochimiques les plus significativement corrélées. Par exemple, on voit que le pourcentage de grains endommagés semble être limité par la teneur en acide p-coumarique (équa. 1). Le pouvoir pénétrant des adultes dans des grains intacts est également directement influencé par la qualité de l'albumen, responsable de la cohésion du grain (équa. 4). La production de poudre par les adultes serait principalement influencée par la proportion d'albumen vitreux (équation 2), et d'après ce que l'on vient de discuter, plus haut, celle-limiterait directement l'accessibilité et la disponibilité de la source amidonnière et participerait indirectement à la dureté du grain. En effet, tandis que les proportions relatives des deux types d'albumen influencent la cohésion des granules d'amidon les rendant plus difficile à libérer, l'acide p-coumarique participe à la plastification des parois cellulaires des couches externes du grain, les rendant plus dures et moins pénétrables. De plus, ces dommages par l'adulte du Grand Capucin peuvent être sensiblement inhibés par des substances phénoliques phago-répressives et/ou toxiques.

Globalement donc, la perte de poids des lots de maïs infestés par *Prostephanus truncatus* serait limitée par la présence des acides phénoliques et de leurs conjugués, par la qualité de l'endosperme, par la proportion du germe et enfin

**Figure 33:** modèle des échanges d'énergie au sein de la relation grains de maïs/*Prostephanus truncatus*. Importance et signification écologique des acides phénoliques.

Amidon, lipides,  
protéines, eau.

ENERGIE POTENTIELLE  
DU SUBSTRAT



par la disponibilité d'eau du substrat (équa. 3). Il est évident que l'efficacité de ces activités mécaniques de l'insecte, responsables des altérations des grains, détermine plus ou moins directement sa physiologie. Par conséquent, la survie des adultes dépendrait de l'accessibilité du substrat, dureté des couches protectrices (équa. 6), et de l'efficacité d'assimilation du milieu en biomasse animale (figure 33). A ce sujet il semblerait que *P. truncatus* ait une efficacité d'assimilation moindre que la plupart des insectes des denrées stockées, même si elle est supérieure à celles des autres insectes herbivores (Demianyk et Sinha, 1988).

La consommation par les adultes et les stades juvéniles sera facilitée par ce pouvoir transformateur de l'insecte et par toute substance susceptible de lui donner l'énergie nécessaire (comme les lipides et l'albumen farineux) ainsi que par toute structure pouvant fragiliser le grain (germe et endosperme farineux). Demianyk et Sinha (1988) ont observé que des larves dégagées de la partie cornée de l'endosperme montraient un délai de 6 à 10 jours dans leur développement comparé avec des larves qui se sont nourries dans l'albumen mou et farineux, appuyant notre hypothèse que la qualité de l'albumen puisse influencer considérablement la physiologie de l'insecte. Chez l'adulte, cette énergie assimilée sera dépensée à nouveau dans la production de poudre nécessaire au développement des larves (travail mécanique) et/ou dans la reproduction (fécondation et production d'oeufs). Le taux de ponte sera logiquement stimulé par une bonne source d'énergie (comme les lipides, l'albumen farineux) (équat. 7 et 9) mais inhibé par tout ce qui détournera cette énergie de la production d'oeufs, comme la dureté ou un rapport F/C faible qui

**Figure 34:** modèle des facteurs de résistance ou de susceptibilité des grains de maïs aux attaques du Grand Capucin, *Prostephanus truncatus*.

phénoliques conjugués  
(ac. truxillique...)  
F/C faible  
hygrométrie faible

Défense physique

germe  
F/C élevé  
Vulnérabilité hygrométrie  
élevée

Sucres ?  
phénoliques conjugués  
(coumaroylputrescine)  
répulsifs ?

Défense biochimique

Eau partielle  
Valeur lipides  
Amidon libre  
nutritive

Protéines

---

RESISTANCE

SUSCEPTIBILITE

obligent l'adulte à dépenser plus pour son travail mécanique. Cette performance d'oviposition sera aussi inhibée par toute substance (équat. 7) pouvant interférer avec l'assimilation du substrat (anti-appétants) et/ou pouvant avoir des effets physiologiques plus directs (toxines, inhibiteurs). Les conjugués des acides hydroxycinnamiques semblent être des candidats pertinents dans ces rôles écologiques déterminants.

Il est donc possible de considérer la présence de ces acides hydroxycinnamiques comme un bon indicateur quantitatif de la résistance contre de tels charançons (figure 34). Serratos (1987) l'a clairement démontré avec l'acide t-férulique envers le Charançon du maïs. Dans le cas de *Prostephanus truncatus*, c'est l'acide para-coumarique qui pourrait jouer ce rôle, mais cela demanderait d'étendre cette analyse sur un plus grand nombre de cultivars. L'importance de tels indicateurs est primordiale pour pouvoir sélectionner rapidement, au sein du plasma germinatif, des cultivars résistants ou des populations indigènes comme sources génétiques de résistance. En effet si la corrélation entre la résistance aux attaques du Grand Capucin et la teneur en acide p-coumarique se confirme à travers le plasma germinatif, il serait bien plus rapide d'évaluer la susceptibilité de variétés données en mesurant leur teneur en cet acide phénolique. Les méthodes par chromatographie liquide à haute pression (HPLC) et mieux encore celle par spectrofluorescence sont simples et rapides.

Quand on sait l'urgence d'une intervention saine et durable dans les pays en développement qui subissent ce fléau, il nous semble que l'amélioration de cette

résistance de certains cultivars contre *Prostephanus truncatus* serait un des moyens d'autant plus rapide et efficace qu'elle fera partie d'une stratégie de lutte intégrée.

**BIBLIOGRAPHIE**

- Adam J. M., 1977. The evaluation of losses in maize stored on a selection of small farms in Zambia, with particular reference to methodology. *Trop. Stored Prod. Inf.* 33, 19-24.
- Adem E., Uribe R.M. and Watters F.L., 1979. Responses of *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae) and *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) to gamma radiation from Co. *Can. Ent.* 111, 1111-1114.
- Adem E. and Bourges H., 1981. Cambios en la concentracion de algunos componentes del grano de maize infestado por *Prostephanus truncatus*, Horn., *Sitophilus zeamais*, Mots., and *Sitotroga cerealella*, Olivier. *Archs. lat. Am. Nutr.* 31, 270-286.
- Bell R.J. and Watters F.L., 1982. Environmental factors influencing the development and rate of increase of *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae) on stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 18, 131-142.
- Boyer C.D. et Shannon J.C.. 1987. Carbohydrates of the kernel. in *Corn: chemistry and Technology*. Watson S.A. and Ramstad P.E. Ed. Am. Ass. Cereal Chemists, USA. 253-272.
- Boyer C.D. et Shannon J.C.. 1983. The use of endosperm genes for sweet corn improvment. in *Plant Breeding Reviews*, Vol. 1. J. Janick, ed. Avi Publishing Co. Westport, CT. 139-161.

- Classen D., Arnason J.T., Serratos J.A., Lambert J.D.H., Nozzolillo C. and Philogène B.J.R.. 1990. Correlation of phenolic acid content of maize to resistance to *Sitophilus zeamais*, the Maize Weevil in CIMMYT's collections. *J. Chem. Ecol.* 2
- Christianson D.D., Nielsen H.C., Khoo U., Wolf M.J. and Wall J.S.. 1969. Isolation and chemical composition of protein bodies and matrix protein in corn endosperm *Cereal Chem* 46: 372-381.
- Chu S.T. 1966. A theoretical and experimental study of the effect of size and shape of kernels on the drying rate of shelled corn. Ph.D. Thesis, University of Minnesota.
- Chung D.S. et Pfoest H.B. 1967. Absorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. *Trans. ASAE*, 10(4): 549-557.
- Collins F.W.. 1986. Oat phenolics: structure, occurrence and function. in *Oats: chemistry and technology*. Webster F.H. ed. Am. Ass. Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota. 227-295.
- Cowley R.J., Howard D.C. and Smith R.H., 1980. The effect of grain stability on damage caused by *Prostephanus truncatus* (Horn.) and on three other pests of stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 16, 75-78.
- Crane P.L., S.R. Miles and J.E. Newman. 1959. Factors associated with varietal differences in rate of field drying in corn. *Agron. J.* 51: 318-320.
- Delgado N.M. and Hernandez Luna R., 1951. Control del gorgojo de la semilla del maiz (*Prostephanus truncatus* (Horn.)). *Ins. Nacional Inves. Agric. Fol. Misc.*

4, 26-29.

De Lima C.P.F., 1979. Appropriate technics for use in the assessment of country loss in stored produce in the tropics. *Trop. Stored Prod. Ins.* 38, 21-26.

Demianyk C.J. and Sinha R.N., 1987. Effect of infestation by the Larger Grain Borer *Prostephanus truncatus* (Horn.) and the Lesser Grain Borer *Rhizopertha dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae) on stored corn. *Environ. Entomology* 16(3), 618-624.

Demianyk C.J. and Sinha R.N., 1988. Bioenergetics of the Larger Grain Borer, *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae), feeding on corn. *Ann. of the Entomol. Soc. of Am.* 81(3), 449-459.

Dendy J., Dobie P., Saidi J.A., Smith J.L. and Uronu B., 1989. Trapping the larger grain borer *Prostephanus truncatus* in maize fields using synthetic pheromones. *Entomol. exp. appl.* 50, 241-244.

Dobie P. 1977. The contribution of the tropical stored products centre to the study of insect resistance in stored maize. *Trop. Stored Prod. Inf.* 34: 7-22.

Duvich D.N. 1961. Orotein granules in maize endosperm cells. *Cereal Chem.* 38: 374-385.

Echeverria E., Boyer C. and Shannon J.. 1987. Regulatory aspects of starch biosynthesis in developing maize kernels. In *Recent Advances in Frontier Areas of Plant Biochemistry*. R. Singh ed. Indian Soc. Plant Physiol. Biochem.

Eden W.G.. 1952. Effects of kernel characteristics and components of husk cover on rice weevil damage to corn. *J. Econ. Entomol.* 45: 1084-1085.

- Estay P.I., 1986. Investigations of the susceptibility of tomato cultivars to *Scrobipalpula absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). MSc. thesis, University of Ottawa.
- Fincher G.B. and Stone B.A., 1986. Cell walls and their components in cereal grain technology. in *Advances in Cereal Science and Technology Vol VIII*. 207-295
- Fulcher R.G., O'Brien T.P. and Lee J.W., 1972. Studies on the aleurone layer. I. Conventional and fluorescence microscopy of the cell wall with emphasis on phenol-carbohydrate complexes in wheat. *Aust. J. Biol. Sci.* 25: 23-34.
- Giles P.H., 1975. Annual report 1974 on the activities of SEPRAL and the Grain Storage Extension Group. Rep. Seccion de Productos Almacenados (SEPRAL) Ministerio de Agricultura y Ganaderia, Nicaragua.
- Giles P.H., 1984. Summary of information of *Prostephanus truncatus* in Nicaragua obtain during a four year assignment at SEPRAL, La Caler Managua, 1972-1976. Proc. GASGA Workshop on the Larger Grain Borer *Prostephanus truncatus*. 24-25 february, 1983, TPI, Slough. Publ. GTZ, Eschborn, 133-135.
- Giles P.H. and Leon O.J., 1975. Infestation rproblems in farm-stored maize in Nicaragua. Proc. 1st Int. Wkg Conf. Stored Prod. Ent., Savannah, Georgia, U.S.A. 1974, 68-76.
- Golob P., 1981. A practical assessmrent of food losses sustained during storage by small-holder farmers in the Shire Valley Agricultural development project area of Malawi 1978/1979. Report G. 154, Trop. Prod. Inst., London.
- Golob P., 1984a. Preliminary field and laboratory trial to control *Prostephanus*

- truncatus* infestation of maize. Proc. GASGA Workshop on the Larger Grain Borer *Prostephanus truncatus*, 24-25 february 1983, TPI, Slough. Publ. GTZ, Eschborn, 62-70.
- Golob P., 1984b. *Prostephanus truncatus* (Horn), The Larger Grain Borer In East Africa: the development of a control strategy. Proc. 3rd Int. Wkg Conf. Stored Prod. Ent. Manhattan, Kansas, U.S.A., 1983, 711-721.
- Golob P. and Hodges R.J., 1982. Study of an outbreak of *Prostephanus truncatus* in Tanzania. Report G. 164 Trop. Prod. Inst. London.
- Golob P., Dunstan W.R., Evans N., Meik J., Rees D. and Magazini I., 1983. Preliminary field trials to control *Prostephanus truncatus* (Horn.) in Tanzania. Trop. Stored Prod. Inf. 45, 15-17.
- Golob P., Chanjaroen P., Ali M.A. and Cox J., 1985. Susceptibility of *Prostephanus truncatus* to insecticides. J. Stored Prod. Res. 21, 141-150.
- Gomez L.A., Rodrigez J.G., Poneleit C.G. and Blake D.F.. 1982. Preference and utilization of maize endosperm variants by the rice weevil. J. Econ. Ent. 75: 363-367.
- Gomez L.A., Rodrigez J.G., Poneleit C.G., Blake D.F., and Smith C.R.. 1983. Influence of nutritional characteristics of selected corn genotypes on food utilization by the rice weevil, *Sitophilus oryzae*. J. Econ. Ent. 76: 728-732.
- Goodman Major M.. 1988. The history and evolution of maize. CRC. Critical Reviews in Plant Science, vol.7 (3), 197-220.
- Harborne J.B.. 1976. Functions of flavanoids in plants In Chemistry and Biochemistry

- of Plant Pigments, Godwin T.W. ed., Academic Press, London, Vol I, 736-779.
- Harborne J.B.. 1977. Variation in and functional significance of phenolic conjugation in plants. *Recent Adv. Phytochem.* 12: 457-474.
- Harborne J.B.. 1980. Plant phenolics. in *Secondary Plant Products*. Bell E.A. and Charlwood B.V. eds. *Encyclopedia of Plant Physiology* Vol 8. 329-402.
- Hartley R.D., Whatley F.R. and Harris P.J.. 1988. 4,4'-dihydroxytruxillic acid as a component of cell walls of *Lolium multiflorum*. *Phytochemistry*, 27: 349-351.
- Haubruge E., 1988. Biologie et contrôle du Grand Capucin du grain *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Ann. Soc. R. Zool. de Belgique*, 118, 101-102.
- Haubruge E. et Verstraeten Ch.. 1987. Interactions entre *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). et quatre espèces de coléoptères des denrées, ravageuses de maïs. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent*, 52(2a), 241-246.
- Haubruge E, Schiffers B., Verstraeten Ch. et Fraselle J.. 1987. Susceptibilité de *Prostephanus truncatus* à l'égard de deux pyréthrinoïdes. *Conf. Int. sur les Ravageurs en Agriculture, Paris 1,2,3 décembre, 1987, tome 1; Annales de l'A.N.P.P.*, 497-505.
- Haubruge E., Lognay G., Marlier M., Danhier P., Gilson J-C. et Gaspar Ch.. 1989. Etude de la toxicité de cinq huiles essentielles extraites de *Citrus sp.* à l'égard de *Sitophilus zeamais* Motsch (Col., Curculionidae), *Prostephanus truncatus*

- (Horn) (Col., Bostrichidae) et *Tribolium castaneum* Herbst (col., Tenebrionidae). Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent, 54(3b), 1083-1093.
- Hodges R.J., 1982. A review of the biology and control of the greater grain borer *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Trop. Stored Prod. Inf. 43, 3-9.
- Hodges R.J., 1984. Field ecology and monitoring of *Prostephanus truncatus*. Proc. GASGA Workshop on the Larger Grain Borer *Prostephanus truncatus* 24-25 february, 1983, TPI, Slough. Publ. GTZ, Eschborn, 32-48.
- Hodges R.J., Dunstan W.R., Magazini I. and Golob P., 1983. An outbreak of *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae) in East Africa Prot. Ecol. 5, 183-194.
- Hodges R.J. and Meik J., 1984. Infestation of maize cobs by *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae) - Aspect of biology and control. J. Stored Prod. Res. 20, 205-213.
- Howard D.C., 1983. The population biology of the greater grain borer *Prostephanus truncatus* (Horn.). Ph.D. thesis. University of Reading.
- Howard D.C., 1984. The ability of *Prostephanus truncatus* to breed on different maize variety. Proc. GASGA Workshop on the Larger Grain Borer *Prostephanus truncatus* 24-25 february, 1983, TPI, Slough. Publ. GTZ, Eschborn, 17-31.
- Krall S., 1984. A new threat to farm-level maize storage in West Africa *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Trop. Stored Prod. Inf. 50, 26-31.
- Makundi R.H., 1986. The toxicity of deltamethrin and cyfluthrin to the Larger Grain

- Borer *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Int. Pest Control 28(3), 79-81.
- Multon J.L.. 1982. Les mécanismes d'altération des grains et graines dans l'écosystème post-récolte, les pertes qui en résultent et les stratégies de défense des stocks. Dans: Conservation et Stockage des Grains et Graines et Produits Dérivés. Tome 1, Technique & Documentation Lavoisier, Paris. 1-58.
- Nass H.G. et Crane P.L.. 1970. Effect of endosperm mutants on drying rate in corn (*Zea mays* L.). Crop Science 10: 141-144.
- Plank H.K., 1942. Entomological investigation: control investigation of the bamboo powder post beetle. Puerto Rico (Mayaguez). Agric. Exp. Stn Rep. 40, 78-85.
- Poethig Scott R.. 1982. Maize - The plant and its parts. Maize for Biological Research. W.P. Sheridan Ed., A special Publication of The Plant Molecular Biology Association, 9-18.
- Potter C., 1935. The biology and distribution of *Rhizopertha dominica* (Fab.). Trans. R. Ent. Soc. Lond. 83, 449-482.
- Purdy J.L. et Crane P.L. 1967. Influence of pericarpe on differential drying rate in "mature" corn (*Zea mays* L.). Crop Science 7: 379-381.
- Ramirez Genel M., 1960. Protectores del grano. Toxicidad comparativa de cuatro materiales. Agric. Tec. Mex. 10, 36-38.
- Ramirez Martinez M. and Silver B.J., 1983. Deterioration and damage produce in corn grains in mexico by *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Biodeterioration, vol.5 (edited by Oxley T.A. and Barry S.), 582-591. John

Wiley, N.Y.

- Ramos Elorduy de Conconi J. and Garces M.C., 1980. Accion de un estimulo luminoso sobre el desarrollo de *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Folia Ent. Mex. 45, 38.
- Ramos Elorduy de Conconi J., Garces M.C., Barajas C., Ramirez Martinez M. and Beltrones J.S., 1984. Comparative effects on life cycle and reproductive degree of *Oryzaephilus surinamensis* and *Prostephanus truncatus* provoked by the action of a laser light. Proc. 3rd Int. Wkg Conf. Stored Prod. Ent. Manhattan, Kansas, U.S.A., 1983, 548-571.
- Ramos Elorduy de Conconi J. and Ramirez Martinez M., 1979. Efecto de la razon de dosis de los rayos gamma sobre la oviposicion y emergencia de *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Ann. Inst. Biol. Univ. Nac. Aut. Mex. 50, 363-373.
- Ray A. A. [Ed.], 1982. SAS user's guide: statistics. SAS Institute, Gary, N.C.
- Rees D.P., 1985. Life history of *Teretriusoma nigrescens* (Lewis) (Coleoptera: Bostrichidae). J. Stored. Prod. Res. 21(3), 115-118.
- Robutti J.L., Hosenay R.C. and Deyoe C.W.. 1974a. Modified *opaque 2* corn endosperms. I. Protein distribution and amino acid composition. Cereal Chem. 51: 163-162.
- Robutti J.L., Hosenay R.C. and Wasson C.E.. 1974b. Modified *opaque 2* corn endosperms. II. Structure viewed with a scanning electron microscope. Cereal Chem. 51: 173-180.

- Serratos A.J.H., 1987. Resistance of indigenous races of maize to infestation by maize weevil *Sitophilus zeamais* Motsch. MSc. Thesis. University of Ottawa.
- Shannon J.C. and Garwood D.L.. 1984. Genetics and physiology of starch development. in *Starch: Chemistry and Technology*. R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E F. Parshall, Eds. Academic Press, Orlando Fl. 25-80.
- Shibuya N.. 1984. Phenolics acids and their carbohydrate esters in rice endosperm cell walls. *Phytochemistry* 23: 2233-2237.
- Shires S.W., 1979. Influence of temperature and humidity on survival, development period and adult sex ratio in *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). *J. Stored Prod. Res.* 15, 5-10.
- Shires S.W., 1980. Life history of *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae) at optimum conditions of temperature and humidity. *J. Stored Prod. Res.* 16, 147-150.
- Shires S.W. et S. McCarthy. 1976. A character for sexing live adults of *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research*, 12: 273-275.
- Shoonhoven L.M.. 1982. Biological aspects of antifeedants. *Ent. Exp. Appl.* 31: 57-69.
- Sigaut F.. 1978. Les réserves de grains à long terme. *Techniques de conservation et fonctions sociales dans l'histoire*. Maison des Sciences de l'Homme. Université de Lille III, 3-13.
- Silva B.I., Ramirez Martinez M. and MacGregor Loaeza, 1981. Resistencia de 10

- variedades de maiz al ataque de *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). Folia Ent. Mex. 48, 49.
- Singh D.N. et F.S. McCain. 1963. Relationship of some nutritional properties of corn kernel to weevil infestation. Crop Science, 3: 259-261.
- Sosulski F., Krygier K. and Hogge L. 1982. Free, esterified and bound phenolic acids. 3. Composition of phenolics acids in cereal and potato flours. J. Agr. and Fd. Chem. 30: 337-340.
- Subramanyam Bh., Cutkomp L.K. and Darveaux B.A., 1985. A new character for identifying larval instars of *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). J. Stored Prod. Res. 21, 101-104.
- Subramanyam Bh. and Cutkomp L.K., 1987. Influence of post treatment temperature on toxicity of pyrethroids to five species of stored-product insects. J. Econ. Entomol. 80(1), 9-13.
- Swain T.. 1977. Secondary compounds as protective agents. Annu. Rev. Plant Physiol. 28: 479-501.
- Syarief A.M., R.J. Gustafson and R.V. Morey. 1984. Moisture diffusion coefficients for yellow-dent corn components. Paper No. 84-3551, ASAE, St. Joseph, MI. 49085.
- Van Sumere C.F., Cotteine J., De Greef J. and Kint J.. 1972. Biochemical studies in relation to the possible germination regulatory role of natural occurring coumarin and phenolics. Rec. Adv. Phytochem. 4: 165-221.
- Van Sumere C.F., De Pooter H., Ali H. and Degrauw-Van Bussel M.. 1973. N-

- feruloylglycyl-L-phenylalanine: a sequence in barley proteins. *Phytochemistry* 12; 407-411.
- Verstraeten Ch. et Haubruge E., 1986. *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera), nouveau ravageur inquiétant des produits entreposés en Afrique subsaharienne. IVe Congrès sur La Protection Humaine et des Cultures en Milieu Tropical, Marseille, juillet 1986. 67-71.
- Verstraeten Ch. et Haubruge E., 1987. Les processus de migration de *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae) dans un stock de maïs égréné. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent*, 52 (2a), 235-239.
- Watson S.A.. 1987. Structure and Composition. in *Corn: chemistry and Technology*. Watson S.A. and Ramstad P.E. Ed. Am. Ass. Cereal Chemists, USA. 54-82.
- Watson S.A., Sanders E.H., Wakely R.D. and Williams C.B.. 1955. Peripheral cells of the endosperms of grain sorghum and corn and their influence on starch purification. *Cereal Chem.* 32: 165-182.
- Watters F.L., 1984. Biology and control of *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Proc. GASGA Workshop on the Larger Grain Borer Prostephanus truncatus 24-25 february, 1983, TPI, Slough. Publ. GTZ, Eschborn*, 49-61.
- White N.D.G., 1982. Effectiveness of malathion and pirimiphos methyl applied to plywood and concrete to control *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Proc. Ent. Soc. Ont.* 113, 65-69.
- Wilson C.M. 1987. Proteins of the kernel. in *Corn: chemistry and Technology*.

- Watson S.A. and Ramstad P.E. Ed. Am. Ass. Cereal Chemists, USA. 273-310.
- Wolf M.J., Buzan C.L., Mac Master M.M. and Rist C.E.. 1952a. Structure of the mature corn kernel. I. Gross anatomy and structural relationships. *Cereal Chem.* 29: 321-333.
- Wolf M.J., Buzan C.L., Mac Master M.M. and Rist C.E.. 1952b. Structure of the mature corn kernel. II. Microscopic structure of pericarp, seed coat, and hilar layer of dent corn. *Cereal Chem.* 29: 334-348.
- Wolf M.J., Buzan C.L., Mac Master M.M. and Rist C.E.. 1952c. Structure of the mature corn kernel. III. Microscopic structure of the endosperm of dent corn *Cereal Chem.* 29: 349-361.
- Wolf M.J., Khoo U. and Seckinger H.L.. 1969. Distribution and subcellular structure of endosperm protein in varieties of ordinary and high-lysine maize. *Cereal Chem.* 46: 253-263.
- Yamamoto E. and Towers G.H.N.. 1985. Cell wall bound ferulic acid in barley seedlings during development and its photoisomerisation. *J. Plant Physiol.* 117: 441-449.
- Young W.R., Candia D., Barnes Z.D. and Smith D.L., 1962. Almacenamiento de maiz en el tropico bajo grados diferentes de humedad. *Agric. Tec. Mex.* 12, 13-16.