

**Qualité de l'ensilage de maïs inoculé ou non
avec le *Fusarium graminearum* en fonction de
l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage
et la durée de conservation**

Rapport final

Projet de recherche # 110125

Réalisé par

André Amyot, agr., M.Sc.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

et

Luc Couture, agr., Ph.D.

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Partenaires

Université Laval

Centre de recherche en sciences animales de Deschambault

Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies

Novalait

Avril 2008



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

ISBN 978-2-922851-71-7
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2008
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2008
© IRDA

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	5
LISTE DES FIGURES.....	5
LISTE DES ANNEXES.....	7
RÉSUMÉ.....	9
REMERCIEMENTS.....	11
INTRODUCTION.....	13
MÉTHODOLOGIE.....	15
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	19
1. Généralités.....	19
2. Période de conservation en silos.....	20
2.1 Température de l'ensilage.....	20
2.2 Populations fongiques et mycotoxines.....	22
2.3 Produits de fermentation.....	32
2.4 Valeur nutritive.....	41
3. Test de stabilité aérobie.....	51
3.1 Échauffement.....	51
3.2 Caractéristiques de l'ensilage après 7 jours d'exposition à l'air.....	57
CONCLUSION.....	63
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	67
ANNEXES.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Composition chimique de départ du maïs ensilé.....	19
Tableau 2.	Composition microbiologique et toxicologique de départ du maïs ensilé	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Température de l'ensilage de maïs en silo boudin d'octobre 2005 à juin 2006.....	16
Figure 2.	Effet de l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage de maïs sur l'évolution de sa température pendant la période de conservation.....	21
Figure 3.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le nombre de <i>Fusarium</i> spp. dans l'ensilage de maïs.....	22
Figure 4.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en vomitoxine de l'ensilage de maïs.....	23
Figure 5.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en zéaralénone de l'ensilage de maïs.....	24
Figure 6.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le nombre de levures dans l'ensilage de maïs.....	25
Figure 7.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le nombre de moisissures dans l'ensilage de maïs.....	26
Figure 8.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le nombre de levures et de moisissures dans l'ensilage de maïs.....	27
Figure 9.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le développement du mycélium dans l'ensilage de maïs.....	28
Figure 10.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la perte de matière sèche dans l'ensilage de maïs pendant sa conservation en silo.....	29
Figure 11.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le pH de l'ensilage de maïs.....	32

Figure 12.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en acide lactique de l'ensilage de maïs.....	33
Figure 13.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en acide acétique de l'ensilage de maïs.....	34
Figure 14.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le rapport lactate : acétate de l'ensilage de maïs.....	35
Figure 15.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en sucres solubles de l'ensilage de maïs.....	36
Figure 16.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en azote ammoniacal de l'ensilage de maïs.....	37
Figure 17.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en protéines brutes de l'ensilage de maïs.....	41
Figure 18.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la solubilité des protéines de l'ensilage de maïs.....	42
Figure 19.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en fibres par détergent acide de l'ensilage de maïs.....	43
Figure 20.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en fibres par détergent neutre de l'ensilage de maïs.....	44
Figure 21.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la digestibilité des fibres par détergent neutre de l'ensilage de maïs.....	45
Figure 22.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en protéines insolubles dans la solution détergent acide de l'ensilage de maïs.....	46
Figure 23.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en protéines insolubles dans la solution détergent neutre de l'ensilage de maïs.....	47

Figure 24.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la teneur en cendres de l'ensilage de maïs.....	48
Figure 25.	Effet de l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage de maïs sur l'évolution de sa température dans le test de stabilité aérobie réalisé après 85 jours de conservation.....	52
Figure 26.	Effet de l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage de maïs sur l'évolution de sa température dans le test de stabilité aérobie réalisé après 245 jours de conservation.....	53
Figure 27.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur l'indice de stabilité aérobie de l'ensilage de maïs.....	54
Figure 28.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur l'indice d'instabilité aérobie de l'ensilage de maïs.....	55
Figure 29.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le développement du mycélium dans l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air	57
Figure 30.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur le pH de l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air.....	58
Figure 31.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur l'élévation de pH de l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air.....	59
Figure 32.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la perte de matière sèche dans l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air	60
Figure 33.	Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> sur la perte de matière sèche totale dans l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air	61

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1.	Détails des silos perforés et des silos non couverts.....	69
Annexe 2.	Effet de l'inoculation avec le <i>Fusarium graminearum</i> , selon l'étanchéité du silo et la durée de conservation, sur les paramètres qui ont présenté une interaction « Silo x <i>Fusarium</i> x Temps » significative.....	71

RÉSUMÉ

Du maïs fourrager a été ensilé en silos de laboratoire après avoir été inoculé ou non avec le *Fusarium graminearum* ($7,5 \times 10^3$ spores/g de poids frais). Trois densités d'ensilage (150, 225 et 300 kg MS/m³), trois degrés d'étanchéité des silos (silos étanches, silos perforés et silos non couverts), et deux durées de conservation (85 jours et 245 jours) ont été expérimentés. Un test de stabilité aérobie a été réalisé lors de l'ouverture des silos.

Le *F. graminearum* n'a pas survécu jusqu'à l'ouverture des silos et l'inoculation avec le *F. graminearum* n'a pas influencé la teneur en mycotoxines et n'a influencé que légèrement la fermentation, la stabilité aérobie et la valeur nutritive du maïs ensilage, tel que décrit dans les paragraphes qui suivent. De plus, la teneur en vomitoxine n'a pas été influencée par l'étanchéité du silo ni par la densité de l'ensilage mais a augmenté avec la durée de conservation (en moyenne 2,16 ppm après 245 jours vs 1,44 ppm après 85 jours) alors que la teneur en zéaralénone a été plus élevée en silo non couvert (0,30 ppm) qu'en silo étanche ou en silo perforé (0,06 ppm) mais n'a pas été influencée par la durée de conservation.

Au moment de l'ouverture des silos, le maïs conservé en silo étanche a présenté un nombre de levures et de moisissures relativement faible (5,40 log₁₀ ufc/g en moyenne), aucun développement visible de mycélium et une perte de matière sèche très faible (1,29% en moyenne), quelle que soit la densité de l'ensilage. Par contre, en silo perforé et en silo non couvert chacun de ces paramètres a été d'autant plus élevé que la densité était faible. En particulier, la perte de matière sèche a varié entre 0,80% (densité élevée) et 20,42% (faible densité) en silo perforé (8,57% en moyenne) et entre 16,75% (densité élevée) et 46,37% (faible densité) en silo non couvert (31,66% en moyenne). De plus, la perte de matière sèche n'a pas été influencée par la durée de conservation en silo étanche quelle que soit la densité, ni en silo perforé à densité élevée, alors qu'elle a augmenté de façon marquée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation en silo non couvert quelle que soit la densité, de même qu'en silo perforé à faible densité et à moyenne densité. Par suite de l'inoculation avec le *F. graminearum*, les populations de moisissures ont évolué de façon différente selon le type de silo et la perte de matière sèche a été 1% plus élevée à l'ouverture des silos.

La fermentation n'a pratiquement pas été influencée par la présence de perforations dans les murs du silo dans l'ensilage de densité élevée, alors qu'elle a été un peu limitée à moyenne densité et très limitée à faible densité, par suite de l'épuisement des sucres résultant de l'introduction d'air par ces perforations. Par contre, elle a été influencée négativement par le non scellage du silo quelle que soit la densité, mais de façon d'autant plus marquée que la densité était faible. La durée de conservation (245 jours vs 85 jours) a eu un effet différent selon l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage. En silo étanche, l'ensilage a été relativement stable dans le silo quelle que soit la densité et la durée de conservation. Par contre, en silo perforé l'ensilage de faible densité a subi une fermentation tardive (plus poussée après 245 jours qu'après 85 jours de conservation), alors que celui de moyenne densité n'a montré que quelques signes de détérioration pendant la même période. Finalement, en silo non couvert l'ensilage de densité élevée s'est détérioré modérément alors que celui de moyenne densité s'est fortement détérioré pendant cette période, mais pas celui de faible densité, puisqu'il était déjà très détérioré après 85 jours. Les seuls effets de l'inoculation avec le *F. graminearum* au niveau de la fermentation ont été une augmentation de 0,17% de la teneur en acide lactique (en moyenne 3,55% vs 3,38%) quelles que soient les conditions de conservation, de même qu'une diminution du pH de 0,3 à 0,5 dans les ensilages qui ont maintenu un pH peu acide (entre 4,8 et 6,6) quelle que soit la durée de conservation, c'est-à-dire celui de faible densité en silo perforé et celui de moyenne densité en silo non couvert.

La valeur nutritive de l'ensilage de maïs a été plus influencée par la densité, et s'est modifié plus avec la durée de conservation, en silo non couvert qu'en silo perforé et en silo perforé qu'en silo étanche. Les PB, les fibres ADF, les fibres NDF, les PB-ADF et les PB-NDF (sauf en silo perforé) ont présenté en silo étanche des niveaux comparables quelle que soit la densité, et en silo perforé des niveaux plus élevés à faible densité qu'à densité moyenne et à densité élevée. Par contre, en silo non couvert ils ont été plus élevés à faible densité qu'à moyenne densité, et à moyenne densité qu'à densité élevée. Dans ce type de silo, certains paramètres (PB, fibres ADF et PB-ADF) ont présenté, même dans l'ensilage de densité élevée, des niveaux qui semblent plus élevés que ceux observés dans les ensilages bien fermentés. Dans les ensilages qui se sont détériorés, la teneur en cendres a atteint des niveaux plus élevés, la solubilité des protéines a été plus basse et la digestibilité des fibres NDF a été plus élevée que dans les ensilages bien fermentés. De plus, la durée de conservation (245 jours vs 85 jours) a influencé plus la valeur nutritive en silo non couvert qu'en silo perforé, et en silo perforé qu'en silo étanche. Par exemple, en silo étanche les PB, les fibres ADF et les fibres NDF ont été relativement stables quelle que soit la densité. Par contre, en silo perforé ils ont augmenté avec la durée de conservation dans l'ensilage de faible densité mais pas dans celui de densité élevée, alors qu'en silo non couvert ce fut le cas quelle que soit la densité et l'effet a été d'autant plus marqué que la densité était faible. Finalement, la valeur nutritive n'a été influencée que légèrement par l'inoculation avec le *F. graminearum*. Les fibres ADF, les fibres NDF, les PB-ADF et les cendres ont augmenté à un rythme différent selon l'étanchéité des silos, dans le maïs inoculé et le maïs non inoculé : en silo étanche elles ont été plus faibles après 85 jours de conservation (PB-ADF et cendres) et/ou ont augmenté de façon plus prononcée entre le 85^{ème} et le 245^{ème} jour (fibres ADF, fibres NDF, PB-ADF et cendres) dans le maïs inoculé que dans le maïs non inoculé, alors que ce fut le contraire en silo non couvert.

Dans le test de stabilité aérobie, le maïs conservé en silo étanche a commencé à s'échauffer assez lentement quelle que soit la densité et la durée de conservation (69,53 h en moyenne) parce qu'il était d'excellente qualité (pH inférieur à 4, relativement peu de moisissures et aucun mycélium), alors que celui conservé en silo non couvert a commencé à s'échauffer très rapidement quelle que soit la densité et la durée de conservation (4,61 h en moyenne), puisqu'il était fortement envahi par les moisissures (en moyenne 9,78 log₁₀ ufc/g), mais un peu moins rapidement à densité élevée qu'à faible densité et à moyenne densité (7,50 h vs 2,58 h et 3,75 h, respectivement). Par contre, en silo perforé l'échauffement a commencé d'autant plus tard que la densité était élevée (3,67 h, 15,79 h et 44,92 h pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement). Seule la densité élevée a permis de retarder l'échauffement presque comme en silo étanche. Dans ce type de silo, l'avantage des ensilages de densité croissante semble lié à une population de moisissures (9,23, 8,21 et 5,52 log ufc/g, respectivement) et un développement du mycélium (0,96, 0,47 et 0,04, respectivement) d'autant plus faibles que la densité était élevée. L'inoculation avec le *F. graminearum* n'a pas retardé l'échauffement (indice de stabilité aérobie) mais a réduit, en silo non couvert, le taux d'augmentation de la température jusqu'au maximum (indice d'instabilité aérobie).

REMERCIEMENTS

Nous voulons remercier le Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies et Novalait qui ont fourni le financement nécessaire à la réalisation de ce projet.

Merci également au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) qui a mis à notre disposition ses infrastructures et équipements.

Un merci particulier à M. Michel Atkins, technicien agricole à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), qui a assuré le suivi technique de l'expérience et Mme Lucie Lévesque, technicienne de laboratoire au Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures (Agriculture et Agroalimentaire Canada), qui nous a assisté dans le volet « *Fusarium* » de l'expérience.

Merci finalement au personnel de laboratoire et ouvrier du CRSAD et de l'IRDA qui nous a assisté à une étape ou l'autre de la réalisation de ce projet de recherche.

INTRODUCTION

Au Québec, l'ensilage de maïs (plante entière) est conservé principalement en silo tour. Cependant, au cours des dernières années le silo couloir est apparu comme une alternative valable au silo tour à cause de son moindre coût de construction et de sa simplicité. Une bonne conservation en silo couloir exige toutefois une conduite attentive.

La densité de l'ensilage et l'étanchéité des silos sont des facteurs importants pour conserver la qualité du produit. C'est d'eux que dépend le degré d'anaérobiose obtenu une fois le silo complété. Quand le silo n'est pas scellé avec une feuille de polyéthylène et lorsqu'il est scellé de façon inadéquate, la fermentation ne se fait pas normalement et la qualité de l'ensilage est réduite. Dans un silo non scellé, l'ensilage de maïs est très détérioré en surface (25 cm de profondeur), moyennement détérioré à 50 cm de profondeur et de qualité acceptable à 75 cm de profondeur (Berger et Bolsen, 2006). Dans une étude réalisée au Québec, la densité de l'ensilage de maïs conservé en silo couloir a varié de 115 à 361 kg MS/m³ et a été de 234 kg MS/m³ en moyenne. Elle a augmenté avec la hauteur d'ensilage dans le silo et le pourcentage de grain dans l'ensilage. C'est généralement près des murs et en surface qu'on rencontrait les densités les plus faibles (D'Amours et Savoie, 2005).

L'ensilage de maïs est susceptible de présenter, par temps chaud, des problèmes de stabilité aérobie, surtout lorsque la densité est faible et la vitesse de désilage insuffisante. Par suite de la croissance des levures, le pH de l'ensilage remonte suffisamment pour permettre la croissance des moisissures (McDonald et al, 1991). L'échauffement qui en résulte peut entraîner d'importantes pertes de matière sèche. Selon les travaux de Ruppel et al (1995), après 6 mois de conservation en silo couloir la perte de matière sèche peut varier entre 12% pour une haute densité (320 kg MS/m³) et 20% pour une faible densité (160 kg MS/m³). Selon le modèle de simulation de Savoie et al (2006), la perte de matière sèche est très faible après six mois en silo étanche quelles que soient la profondeur et la densité (environ 3%). Par contre, en silo non couvert elle dépend de la densité et est beaucoup plus élevée en surface qu'en profondeur, soit 20% à 40 cm et 8% à 240 cm de profondeur à une densité de 320 kg MS/m³, comparativement à 45% à 40 cm et 15% à 240 cm de profondeur à une densité de 160 kg MS/m³.

De plus, il peut y avoir réduction de la qualité hygiénique de l'ensilage par la présence de mycotoxines. Spécifiquement, *Fusarium graminearum* est la principale moisissure productrice de toxines chez le maïs au Québec. Il produit plusieurs toxines, mais la vomitoxine (DON) et la zéaralénone (ZÉA) sont les plus fréquentes dans les récoltes contaminées. Les *Fusarium* contaminent le maïs pendant la saison de culture et ne devraient pas se développer et produire de toxine pendant que le maïs est dans le silo si les conditions sont complètement anaérobies. Cependant les conditions de confinement réalisées dans les silos tours conventionnels et les silos horizontaux ne correspondent pas à une anaérobiose complète (Gotlieb, 1997). Selon certains chercheurs, les *Fusarium* ne sont pas dans des conditions favorables à leur croissance dans les ensilages correctement réalisés et stabilisés, alors que dans les ensilages réalisés dans de mauvaises conditions ils sont supplantés par d'autres espèces fongiques (Niderkorn et al, 2007). Selon d'autres, les *Fusarium* peuvent survivre et produire de la zéaralénone pendant la période de conservation ou après l'ouverture du silo (Escula, 1979). C'est probablement ce qui fait conclure à Jelinek et al (1989) que la fermentation du maïs concentre la zéaralénone. Même si des recherches ont montré que les *Fusarium* sont incapables de croître dans l'ensilage (Scudamore et Livesey, 1998) et qu'on ne retrouve pas de *Fusarium* viable dans l'ensilage de maïs (Kuldau et Mansfield, 2006), tout indique qu'un tassage insuffisant de l'ensilage, une couverture qui n'est pas étanche et un faible taux de désilage favorisent la production de mycotoxines dans l'ensilage (Whitlow et Hagler, 2001).

Une très forte densité et une étanchéité parfaite constituent des facteurs essentiels pour limiter la détérioration à long terme et la réduction de la qualité hygiénique de l'ensilage en silo couloir. L'optimisation de l'utilisation du silo couloir passe par l'intégration de plusieurs éléments de réalisation de l'ensilage.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'effet de la conduite du silo sur la fermentation et la stabilité aérobie de l'ensilage de maïs. De façon plus spécifique, on étudie en silos de laboratoire l'effet de la densité de l'ensilage, l'étanchéité du silo et la durée de conservation sur la production de mycotoxines et sur la qualité de l'ensilage de maïs en fonction de l'intensité de la contamination par le *Fusarium graminearum*.

MÉTHODOLOGIE

On a réalisé une expérience en 3 répétitions comportant 2 niveaux de *F. graminearum*, 3 densités d'ensilage, 3 degrés d'étanchéité des silos et 2 durées de conservation (108 silos de laboratoire).

Récolte

Du maïs fourrager (G4066, 2400 UTM) a été récolté à 35-40% de matière sèche au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) les 11, 12 et 13 octobre 2005 (répétitions 1, 2 et 3, respectivement) avec une fourragère conventionnelle (New Holland, modèle 790) réglée à une longueur de hachage théorique de 9 mm.

Traitement « Fusarium »

Le maïs fourrager a été inoculé ou non avec le *F. graminearum* ($7,5 \times 10^3$ spores/g de poids frais). L'inoculum était constitué d'un mélange des souches # 459, 996, 1006 et 1007 de la mycothèque du Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures (Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec) et avait une concentration de $1,5 \times 10^6$ spores/ml. Il a été appliqué au maïs fourrager à la dose de 5 ml/kg de poids frais après lui avoir ajouté un surfactant (Tween 80) à la dose de 1 ml/3 L d'inoculum.

Le traitement « *Fusarium* » a été réalisé en pulvérisant l'inoculum sur le maïs fourrager placé dans un mélangeur, pendant que celui-ci était en opération. Le maïs ne recevant pas de *Fusarium* a reçu le même bouillon de culture stérile, dilué de la même façon.

Traitement « densité d'ensilage »

Trois densités d'ensilage ont été obtenues, 150, 225 et 300 kg MS/m³, en comprimant respectivement 10 kg, 15 kg et 20 kg de maïs fourrager à des densités de 385, 577 et 770 kg de matière fraîche/m³, dans des seaux de polyéthylène de 26 litres (44 cm de hauteur et 27,5 cm de diamètre intérieur moyen), à l'aide d'une presse hydraulique conçue à cette fin.

Traitement « étanchéité des silos »

Trois degrés d'étanchéité de silo ont été comparés. Des seaux ont été scellés avec un couvercle muni d'un joint de caoutchouc (silos étanches). D'autres seaux, rendus non étanches avant de réaliser la mise en silos, en pratiquant 12 trous de 2 mm de diamètre répartis également sur leur paroi cylindrique, ont été scellés avec un couvercle de la même façon (silos perforés). Finalement, des seaux ont été recouverts d'un couvercle présentant 12 trous de 3,81 cm de diamètre et 25 trous de 1,27 cm de diamètre, ce afin de maintenir la densité de l'ensilage tout en simulant un silo non scellé (silos non couverts) (annexe 1).

Traitement « durée de conservation »

Une fois le remplissage terminé, le contenu de chaque silo a été pesé et les silos ont été entreposés dans une pièce dont la température a été ajustée de façon reproduire celle enregistrée d'octobre à juin à 60 cm de profondeur dans un silo boudin de maïs fourrager (figure 1). Après 85 jours (les 4, 5 et 6 janvier 2006) ou 245 jours (les 13, 14 et 15 juin 2006) de conservation, on a ouvert les silos et pesé leur contenu.

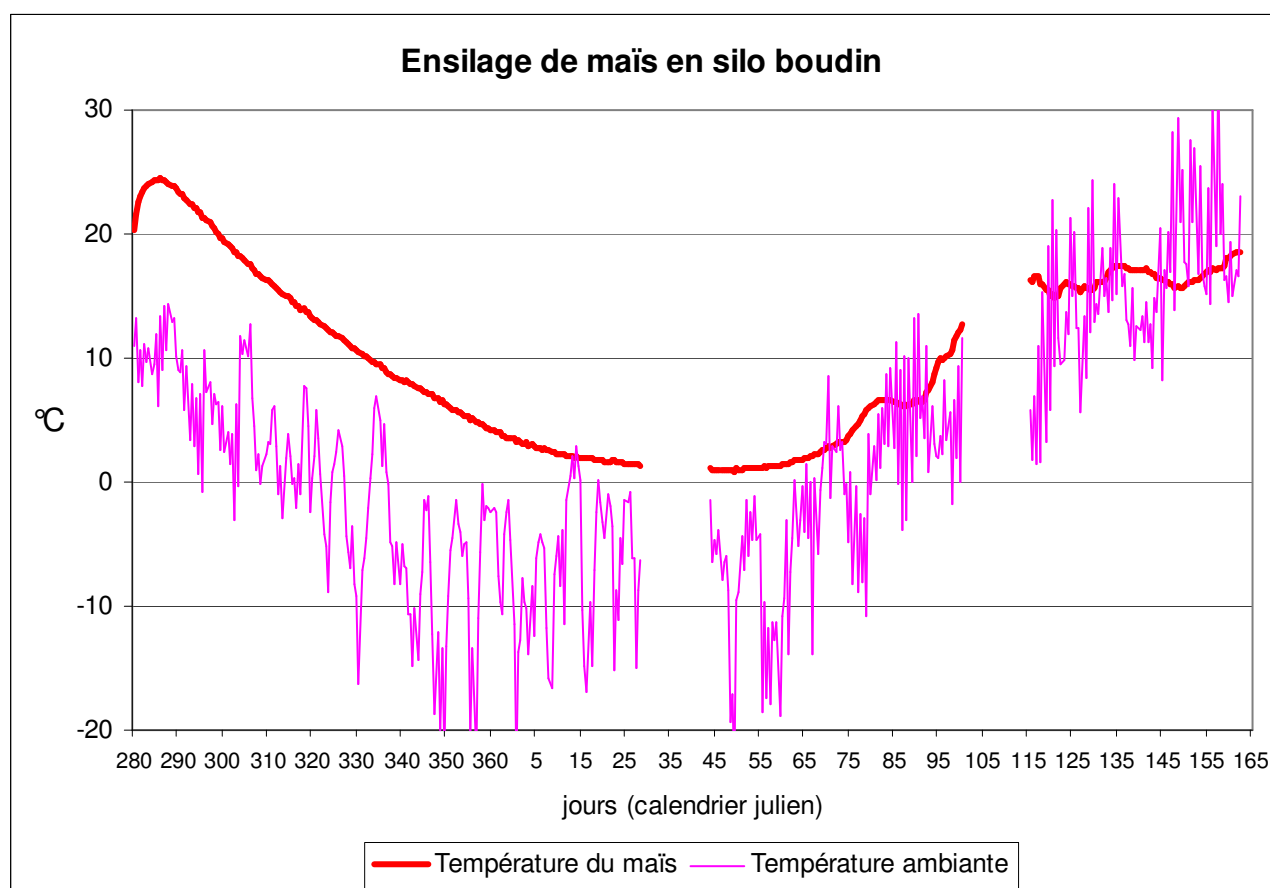


Figure 1. Température de l'ensilage de maïs en silo boudin d'octobre 2005 à juin 2006

Test de stabilité aérobie

Un test de stabilité aérobie a été réalisé avec 3,40 kg de maïs, en plaçant environ 1,70 kg dans 2 bacs de polystyrène de 7,5 litres (24 cm de longueur x 18 cm de largeur x 17,5 cm de profondeur) maintenus ouverts, mais recouverts d'une étamine (6 mailles/cm) de façon à permettre la circulation de l'air tout en limitant le séchage de la surface. Les bacs ont été placés dans une pièce dont la température ambiante a été maintenue à 20°C, pour des durées de 7 jours (série A) et 14 jours (série B). Des témoins inertes ont été préparés en traitant l'ensilage avec un mélange constitué de 311 g d'acide formique 85%, 345 g d'acide propionique 99% et 344 g d'eau distillée, à la dose de 25 ml/kg de poids frais. Le contenu de chaque bac a été pesé. Des fils thermocouples ont été insérés dans les 54 bacs de la série B et les 12 témoins inertes, et leur température a été suivie en continu (lecture aux 10 minutes et moyennes aux heures). Après 7 jours d'exposition à l'air, le contenu de chaque bac de la série A a été pesé et la croissance des moisissures évaluée visuellement (échelle de 0 à 5). De plus, les températures enregistrées dans les bacs de la série B ont servi à déterminer l'indice de stabilité aérobie, c'est-à-dire le temps d'exposition à l'air nécessaire pour une augmentation de 2°C (Moran et al, 1996), au-dessus de la température des témoins inertes (Driehuis et al, 2001), et l'indice d'instabilité aérobie, c'est-à-dire le rapport « température maximale : nombre de jours pour l'atteindre » (Ruppel et al, 1995).

Échantillonnage

Des échantillons de maïs correspondant à chaque silo ont été prélevés : 1° lors du remplissage des silos, après avoir réalisé le traitement « *Fusarium* », 2° lors de l'ouverture des silos, après 85 jours ou 245 jours de conservation, et 3° après 7 jours d'exposition à l'air, dans le test de stabilité aérobie.

Les échantillons prélevés au moment de la mise en silos, à l'exception de ceux destinés à la détermination de la MS, ont été regroupés de façon à obtenir 18 échantillons composites (2 traitements « *Fusarium* » x 3 densités d'ensilage x 3 répétitions) ou seulement 6 échantillons (2 traitements « *Fusarium* » x 3 densités d'ensilage) selon l'analyse à effectuer. Six échantillons ont été utilisés pour caractériser la matière végétale ensilée en terme d'aptitude à la fermentation (sucres solubles et pouvoir tampon) et de valeur nutritive (matière sèche, protéines brutes, solubilité des protéines, fibres par détergent acide, fibres par détergent neutre, digestibilité des fibres par détergent neutre, protéines insolubles dans la solution détergent acide, protéines insolubles dans la solution détergent neutre et cendres), de même qu'au point de vue toxicologique (vomitoxine et zéaralénone). Par contre, sa caractérisation microbiologique (dénombrement des levures, des moisissures, des *Fusarium* spp. et de *F. graminearum*) a été faite à partir de 18 échantillons composites. Les mêmes analyses de valeur nutritive, analyses microbiologiques et analyses de mycotoxines de même que l'analyse des principaux paramètres de la fermentation (pH, acides gras volatils, acide lactique, sucres solubles et azote ammoniacal) ont été effectuées sur les échantillons prélevés lors de l'ouverture des silos. La teneur en matière sèche et le pH ont été déterminés sur les échantillons prélevés à la fin du test de stabilité aérobie.

Les échantillons destinés à l'analyse des paramètres de la valeur nutritive et des mycotoxines ont été séchés au four à 60°C pendant 72 heures (ASAE, 2000) avant d'être broyés à 1 mm. Ceux destinés à l'analyse des paramètres de la fermentation ont été congelés (-20°C) avant d'être broyés avec de la glace sèche à l'aide d'un robot culinaire. Finalement, les échantillons utilisés pour les dénombrements microbiologiques ont été conservés au réfrigérateur (3°C) et analysés dans les meilleurs délais.

Analyses chimiques

La teneur en MS du maïs utilisé pour fins d'analyse des paramètres de la fermentation a été déterminée en séchant 10 g d'échantillon humide à l'étuve à 100°C (CPAQ, 1982). Le pH a été déterminé sur 10-15 g de produit placé dans 20-30 ml d'eau distillée pendant 20 minutes, en insérant l'électrode dans le mélange (pH-mètre Fisher Scientific Acumet 925). Le pouvoir tampon a été déterminé sur 20 g d'ensilage placé dans 200 ml d'eau distillée : on abaisse le pH jusqu'à 4,0 avec du HCl, puis on le monte de 4,0 à 6,0 par titrage avec du NaOH 0,2 N. Le pouvoir tampon est exprimé en mEq de NaOH/kg MS.

Les sucres solubles, les acides organiques et l'azote ammoniacal (N-ammoniacal) ont été dosés après une extraction avec de l'acide sulfurique 0,2 N (Smith et al, 1964). Les sucres solubles et les acides organiques ont été séparés et quantifiés à l'aide d'un système de chromatographie liquide à haute performance (HPLC) Waters 600E (Waters corporation, Massachusetts, USA), équipé d'une colonne de séparation de marque AMINEX HPX-87H (7,8 mm DI x 30 cm) (Bio-Rad laboratories, California, USA). La phase mobile était constituée d'acide sulfurique 0,025 N avec un débit de 0,4 ml/min à une température de 40°C. La détection des acides organiques et des sucres solubles a été faite avec un détecteur à indice réfraction (Waters 410) selon la méthode du CRSAD (communication personnelle). Le dosage de l'azote ammoniacal a été

réalisé par colorimétrie (CPAQ, 1982) avec un spectrophotomètre de marque Milton Roy (modèle 1201).

Les protéines brutes (PB), la solubilité des protéines, les fibres par détergent acide (fibres ADF), les fibres par détergent neutre (fibres NDF), la digestibilité des fibres par détergent neutre après 48 heures d'incubation, les protéines insolubles dans la solution détergent acide (PB-ADF), les protéines insolubles dans la solution détergent neutre (PB-NDF) et les cendres ont été dosées par infrarouge selon les méthodes de National Forage Testing Association (1993) modifiées par Agridirect (Longueuil). La méthode « don-1c-03-00.1 » de Romer Labs Inc. (2000) a été utilisée pour séparer et doser la vomitoxine à l'aide d'un système de chromatographie liquide à haute performance (HPLC) alors que pour la zéaralénone l'analyse a été faite selon la méthode « zon-1c-01-00.3 » de Romer Labs Inc. (2000a) en utilisant les paramètres du système HPLC proposés par Trilog Analytical Laboratory (1999).

Analyses microbiologiques

Le dénombrement des levures et le dénombrement des moisissures ont été effectués selon la méthode de Santé Canada (2004) modifiée. On a utilisé comme milieu de culture une gélose d'extrait de malt additionnée de rose de Bengal (0,005%), de streptomycine (100 mg/L) et de néomycine (50 mg/L), et on a réalisé une incubation pendant 5 jours. Le dénombrement a été réalisé en 3 répétitions, avec un seuil de détection de 100 ufc/g. Ce seuil a été atteint lorsque aucune colonie n'a été dénombrée, pour un volume inoculé de 0,1 ml et un facteur de dilution de 10. On a alors considéré qu'il y avait 10 ufc/g. Le développement végétatif des moisissures a été évalué visuellement selon une échelle de 0 à 5 (0 = aucun mycélium détectable, 5 = mycélium très dense). La numération des spores du *Fusarium graminearum* dans l'inoculum original a été effectuée au microscope à l'aide d'un hématimètre de Neubauer, selon la méthode de Tuite (1969). L'isolement et le dénombrement des *Fusarium* spp. dans le fourrage frais et dans l'ensilage ont été réalisés par étalement de suspensions diluées sur le milieu Peptone-PCNB Agar (Papavizas, 1967) préparé et conditionné par les Laboratoires Quélab, Montréal. L'identification et le dénombrement du *F. graminearum* ont été faits par repiquage des *Fusarium* spp. ainsi isolés, sur le milieu FG Agar des Laboratoires Quélab, Montréal.

Analyses statistiques

L'expérience a été réalisée selon un dispositif en blocs aléatoires complets, c'est-à-dire que chaque silo s'est vu attribuer au hasard une combinaison des 4 traitements. De plus, chaque bloc comportait les 36 combinaisons possibles de ces facteurs (2 niveaux de *Fusarium graminearum* x 3 densités d'ensilage x 3 degrés d'étanchéité des silos x 2 durées de conservation). Les blocs ont été établis dans l'ordre du jour de récolte, c'est-à-dire que les 36 premiers silos remplis ont constitué le premier bloc et ainsi de suite. Les différents paramètres étudiés ont été analysés avec la procédure PROC MIXED de SAS/STAT (Version 8.1, SAS Inst. Inc., Cary, NC) selon un modèle statistique comportant 35 degrés de liberté pour les traitements et les interactions, 2 pour les répétitions et 70 pour l'erreur. Un modèle avec variances inégales a été préféré au modèle avec variances égales lorsque cela s'est avéré avantageux (option REPEATED). Le choix de la matrice de variance a été fait à l'aide du « Akaike's Information Criterion » (AIC). Le modèle avec le plus petit AIC (en tenant compte du signe) a été considéré le plus adéquat. La méthode des moindres carrés a été utilisée pour comparer les moyennes ajustées au modèle. Compte tenu des comparaisons multiples effectuées entre les degrés d'étanchéité des silos et les densités d'ensilage, l'ajustement de Tukey-Kramer a été appliqué pour corriger les probabilités. Les résultats des dénombrements microbiens ont été transformés ($\log_{10}$) et rapportés sur une base logarithmique.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Généralités

Le maïs récolté pour réaliser cette expérience a présenté une teneur en MS de 37,5%. Ses teneurs en protéines brutes (7,1%) et en protéines insolubles dans la solution détergent acide (0,35%) ont été un peu plus faibles que celles rapportées par le Conseil National de Recherche (NRC, 2001) pour un ensilage « normal » alors que ses teneurs en fibres par détergent acide (26,1%) et en fibres par détergent neutre (44,0%) ont été légèrement plus faibles. De plus, 33,5% des protéines étaient solubles et 50,7% des fibres par détergent neutre étaient digérées après 48 h. On a observé un pouvoir tampon de 107 mEq NaOH/kg MS, ce qui indique qu'on est en présence d'un produit peu tamponné et qui exige une faible production d'acide lactique pour abaisser son pH. Malgré une teneur en sucres solubles relativement faible (6,5%), la fermentation du maïs ne sera pas limitée par le manque de sucres, puisque le rapport « sucres solubles / pouvoir tampon » est relativement élevé (613 g/Eq) (tableau 1).

Tableau 1. Composition chimique de départ du maïs ensilé

Critère	Analyse	Valeur de référence (ensilage normal) (NRC, 2001)
Matière sèche, % ¹	37,53 (1,41) ³	35,1
Protéines brutes, % MS ²	7,12 (0,12)	8,8
Solubilité des protéines, % ²	33,48 (3,12)	---
Fibres par détergent acide, % MS ²	26,05 (1,37)	28,1
Fibres par détergent neutre, % MS ²	43,98 (1,84)	45,0
Digestibilité des fibres par détergent neutre (48 h), % ²	50,73 (0,47)	---
Protéines insolubles dans la solution détergent acide, % MS ²	0,35 (0,05)	0,8
Protéines insolubles dans la solution détergent neutre, % MS ²	< 1,5 (0,00)	1,3
Cendres, % MS ²	3,43 (0,48)	---
Sucres solubles, % MS ²	6,52 (0,39)	---
Pouvoir tampon, mEq NaOH/kg MS ²	107 (11)	---
Sucres solubles / pouvoir tampon, g/Eq ²	613 (75)	---

¹ Moyenne de 18 échantillons composites.

² Moyenne de 6 échantillons composites.

³ Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.

Les analyses microbiologiques montrent que les populations de levures ($8,95 \log_{10}$ ufc/g) et de moisissures ($6,90 \log_{10}$ ufc/g) étaient très élevées dans la masse ensilée. Il en était de même des populations de *Fusarium* totaux ($5,20 \log_{10}$ ufc/g), qui étaient dominées par le *F. subglutinans* ($4,56 \log_{10}$ ufc/g). Par contre, les populations de *F. graminearum* ont été relativement faibles (en moyenne $1,85 \log_{10}$ ufc/g) et très variables, parfois nulles et parfois importantes (maximum de $4,69 \log_{10}$ ufc/g), et n'ont pas été influencées par l'inoculation à la dose de $7,5 \times 10^3$ spores/g de poids frais. Quant aux mycotoxines, on n'a détecté aucune vomitoxine alors qu'il y a eu très peu de zéaralénone (tableau 2).

Tableau 2. Composition microbiologique et toxicologique de départ du maïs ensilé

Critère	Analyse	
Levures, $\log_{10}$ ufc/g de poids frais ¹	8,95	(0,23) ³
Moisissures, $\log_{10}$ ufc/g de poids frais ¹	6,90	(0,45)
<i>F. graminearum</i> , $\log_{10}$ ufc/g de poids frais ¹	1,85	(2,14)
<i>F. subglutinans</i> , $\log_{10}$ ufc/g de poids frais ¹	4,56	(0,40)
Autres <i>Fusarium</i> ⁴ , $\log_{10}$ ufc/g de poids frais ¹	5,06	(0,30)
<i>Fusarium</i> totaux, $\log_{10}$ ufc/g de poids frais ¹	5,20	(0,32)
Vomitoxine, ppm ²	0	(0)
Zéaralénone, ppm ²	0,06	(0,16)

¹ Moyenne de 18 échantillons composites.

² Moyenne de 6 échantillons composites.

³ Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types.

⁴ *Fusarium* autres que *F. graminearum* et *F. subglutinans*.

2. Période de conservation en silos

2.1 Température de l'ensilage

En silo étanche, la température de l'ensilage a été comparable à celle de l'air ambiant pendant toute la période de conservation quelle que soit la densité de l'ensilage. En silo perforé, la température a été comparable à celle de l'air ambiant à densité moyenne et à densité élevée alors qu'à faible densité elle a été légèrement plus élevée que celle-ci entre le 160^{ième} et le 200^{ième} jour de conservation. En silo non couvert, la température de l'ensilage a été fortement influencée par la densité de l'ensilage au début de la période de conservation (60 premiers jours) et à la fin de celle-ci (80 derniers jours). Pendant ces périodes, la température de l'ensilage a été d'autant plus élevée que la densité était faible (figure 2). Cependant, la température de l'ensilage n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (résultat non illustré).

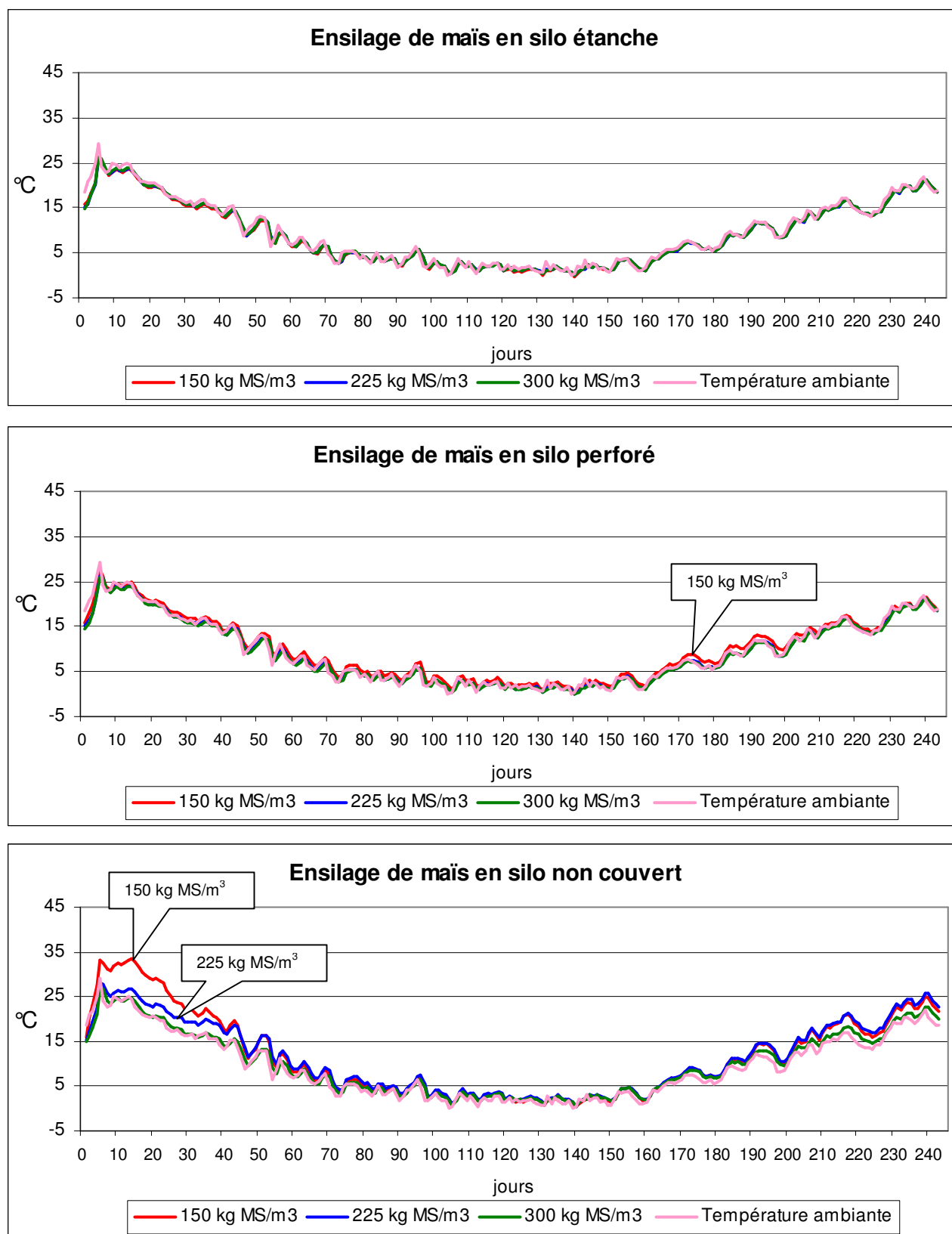
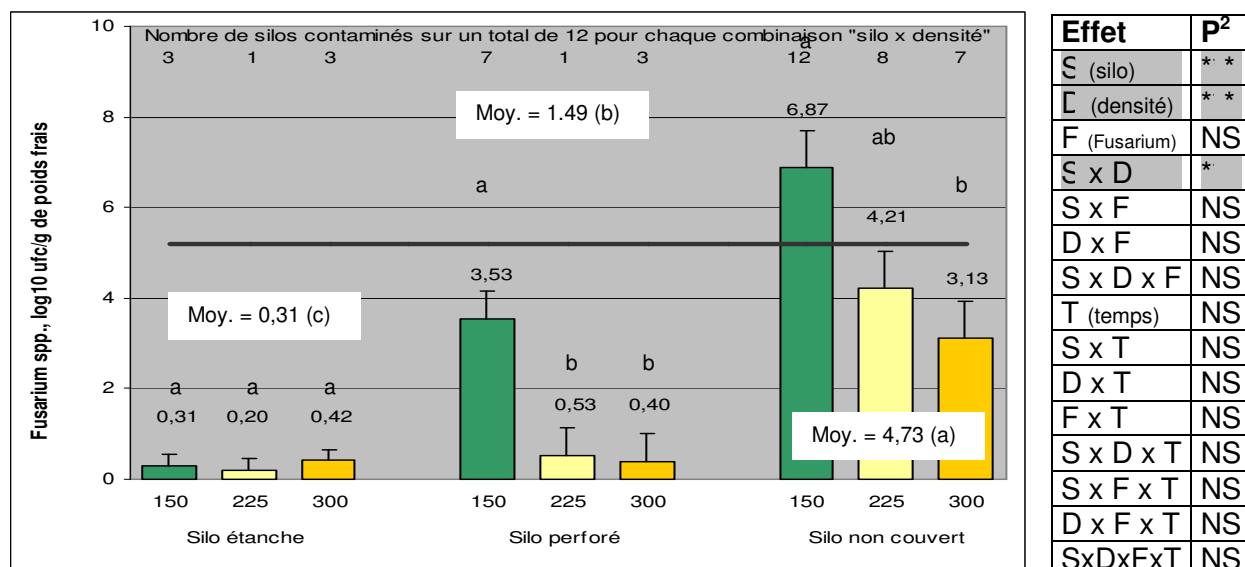


Figure 2. Effet de l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage de maïs sur l'évolution de sa température pendant la période de conservation

2.2 Populations fongiques et mycotoxines

Fusarium

Le *F. graminearum* n'a pas survécu en ensilage. En fait, on en a détecté dans un seul silo (6,90 log₁₀ ufc/g) au moment de l'ouverture des silos. De plus, le *F. subglutinans* a été détecté dans 12 silos et y était très abondant (5,94 log₁₀ ufc/g). Par contre, on a détecté la présence de *Fusarium* spp. dans 45 des 108 silos. En fait, la population totale de *Fusarium*, qui était de 5,20 log₁₀ ufc/g en moyenne à la mise en silos, a été de 2,18 log₁₀ ufc/g en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, le silo non couvert (4,73 log₁₀ ufc/g en moyenne) a présenté un nombre de *Fusarium* spp. plus élevé que le silo perforé (1,49 log₁₀ ufc/g en moyenne), lui-même plus élevé que le silo étanche (0,31 log₁₀ ufc/g en moyenne). De plus, le nombre de *Fusarium* spp. a été très faible quelle que soit la densité en silo étanche (0,31, 0,20 et 0,42 log₁₀ ufc/g, pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement), a été plus élevé dans l'ensilage de faible densité que dans ceux de densité moyenne et de densité élevée en silo perforé (3,53 vs 0,53 et 0,40 log₁₀ ufc/g, respectivement) et plus élevé dans l'ensilage de faible densité que dans celui de densité élevée en silo non couvert (6,87 vs 3,13 log₁₀ ufc/g). De plus, c'est seulement dans l'ensilage de faible densité en silo non couvert qu'il a atteint un niveau plus élevé qu'au départ. Finalement, la population des *Fusarium* spp. n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum*, ni par la durée de conservation en silo (figure 3).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	0,20	0,40	0,39	0,33	5,14	1,07	0,48	2,23	7,14	4,23	3,33	4,90	2,49
245 j	0,41	0,00	0,46	0,29	1,92	0,00	0,32	0,75	6,60	4,18	2,92	4,57	1,87
Témoin	0,20	0,00	0,15	0,12	4,09	0,00	0,32	1,47	6,96	4,15	3,22	4,78	2,12
Inoculé	0,41	0,40	0,69	0,50	2,98	1,07	0,48	1,51	6,78	4,27	3,03	4,69	2,23

Figure 3. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le nombre de *Fusarium* spp. dans l'ensilage de maïs¹

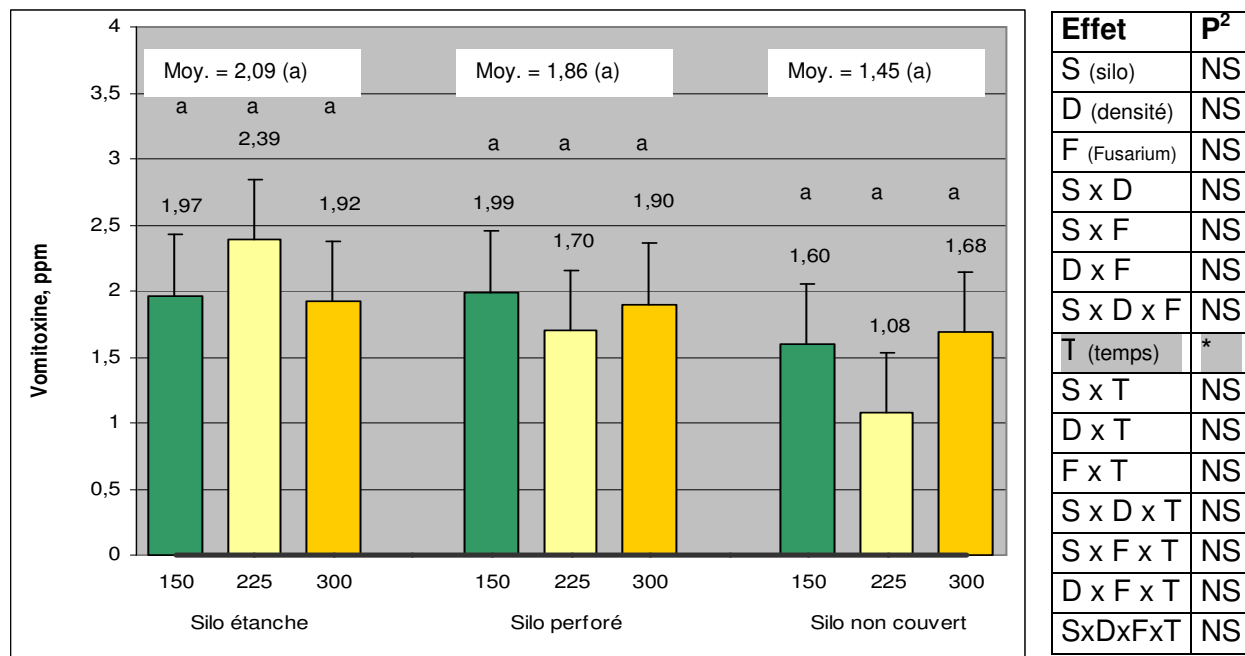
¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 18 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Vomitoxine

La teneur en vomitoxine est passée de 0 ppm lors de la mise en silos à 1,80 ppm en moyenne au moment de l'ouverture des silos. La teneur finale n'a pas été influencée de façon significative par l'étanchéité du silo (2,09 ppm en silo étanche, 1,86 ppm en silo perforé et 1,45 ppm en silo non couvert) ni par la densité de l'ensilage, malgré les écarts observés. Cependant, elle a augmenté avec la durée de conservation, passant de 1,44 ppm après 85 jours à 2,16 ppm après 245 jours. Elle n'a par contre pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum*, puisqu'elle a été de 1,75 ppm dans le maïs non inoculé et 1,85 ppm dans l'inoculé (figure 4).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	1,58	1,73	1,63	1,65	2,17	1,48	1,60	1,75	0,47	0,48	1,85	0,93	1,44
245 j	2,35	3,05	2,20	2,53	1,82	1,92	2,20	1,98	2,73	1,67	1,52	1,97	2,16
P													*
Témoin	2,00	2,45	1,98	2,14	1,83	1,65	2,08	1,86	0,42	1,48	1,87	1,25	1,75
Inoculé	1,93	2,33	1,85	2,04	2,15	1,75	1,72	1,87	2,78	0,67	1,50	1,65	1,85

Figure 4. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en vomitoxine de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Zéaralénone

La teneur en zéaralénone est passée de 0,06 ppm à la mise en silos à 0,14 ppm en moyenne à l'ouverture des silos. La teneur finale a été plus élevée en silo non couvert (0,30 ppm en moyenne) qu'en silo étanche (0,06 ppm en moyenne) et en silo perforé (0,06 ppm en moyenne). En fait, c'est seulement dans l'ensilage en silo non couvert qu'elle a augmenté durant la conservation. Cependant, elle n'a pas été influencée de façon significative par la densité de l'ensilage, l'inoculation avec le *F. graminearum*, ni la durée de conservation (figure 5).

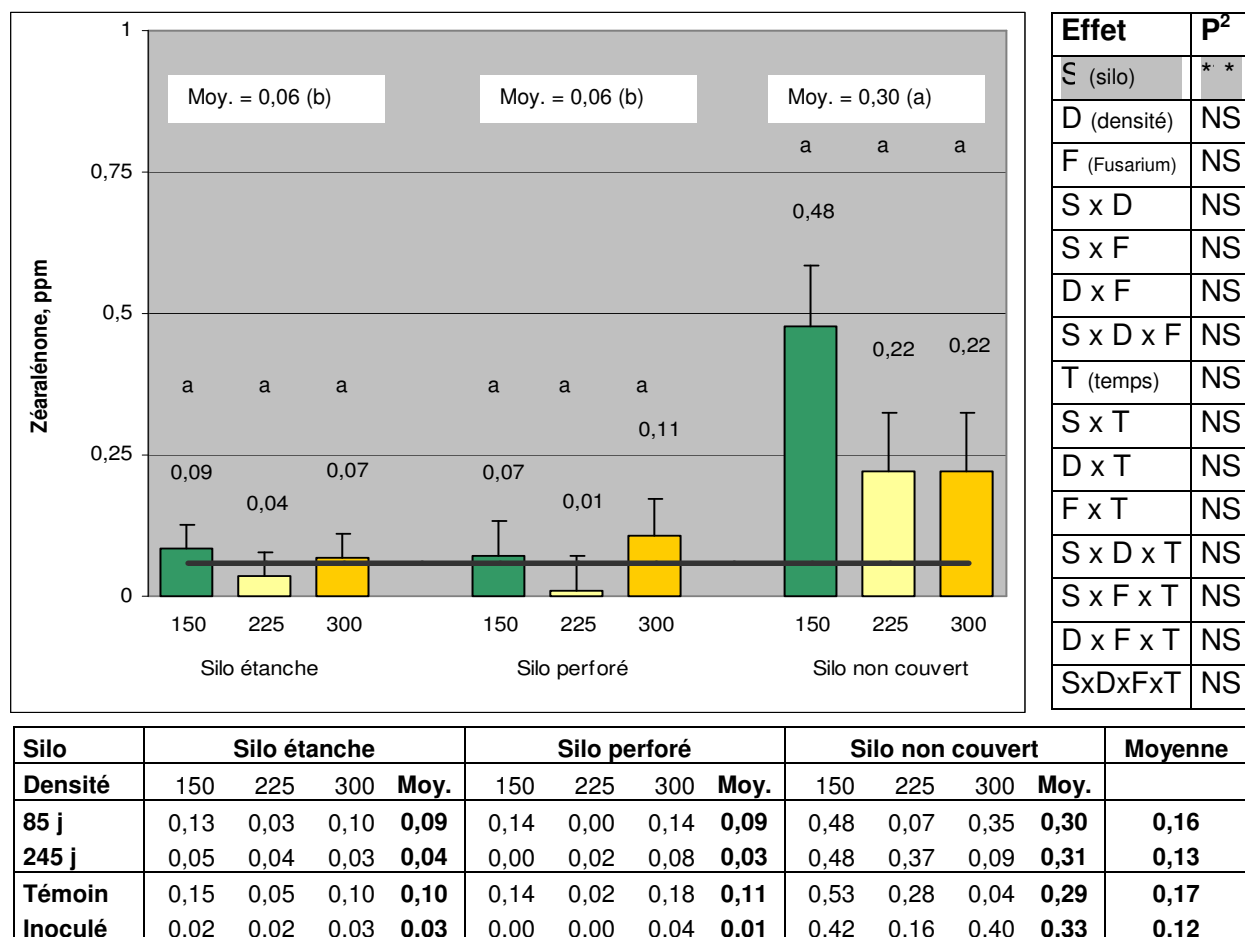


Figure 5. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en zéaralénone de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05). Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Levures

Le nombre de levures a diminué dans le temps, passant de 8,95 log₁₀ ufc/g à la mise en silos à 7,12 log₁₀ ufc/g en moyenne à l'ouverture des silos. Il a alors été plus élevé en silo perforé (7,99 log₁₀ ufc/g en moyenne) et en silo non couvert (8,52 log₁₀ ufc/g en moyenne) qu'en silo étanche (4,85 log₁₀ ufc/g en moyenne). Il a diminué avec l'augmentation de la densité de façon différente selon l'étanchéité du silo. En silo perforé (5,71 vs 9,33 et 8,93 log₁₀ ufc/g, respectivement) et en silo non couvert (7,72 vs 9,23 et 8,61 log₁₀ ufc/g, respectivement), le nombre de levures a été moins élevé à densité élevée qu'à faible densité et à moyenne densité, pour lesquels il a été relativement élevé et comparable à celui observé lors de la mise en silo. Par contre, en silo étanche, l'effet a été moins prononcé, mais le nombre de levures a été moins élevé à moyenne densité (5,10 log₁₀ ufc/g) et à densité élevée (4,13 log₁₀ ufc/g) qu'à faible densité (5,33 log₁₀ ufc/g). Le nombre de levures a aussi diminué avec la durée de conservation, c'est-à-dire qu'il a été plus faible après 245 jours qu'après 85 jours, en silo étanche (4,02 vs 5,69 log₁₀ ufc/g) et en silo perforé (7,33 vs 8,65 log₁₀ ufc/g), mais pas en silo non couvert (8,55 vs 8,49 log₁₀ ufc/g). Il en fut de même à densité moyenne (6,89 vs 8,20 log₁₀ ufc/g) et à densité élevée (5,06 vs 6,64 log₁₀ ufc/g), mais pas à faible densité (7,89 vs 8,04 log₁₀ ufc/g) (effet densité x temps non illustré). Par contre, le nombre de levures n'a pas été influencé par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 6).

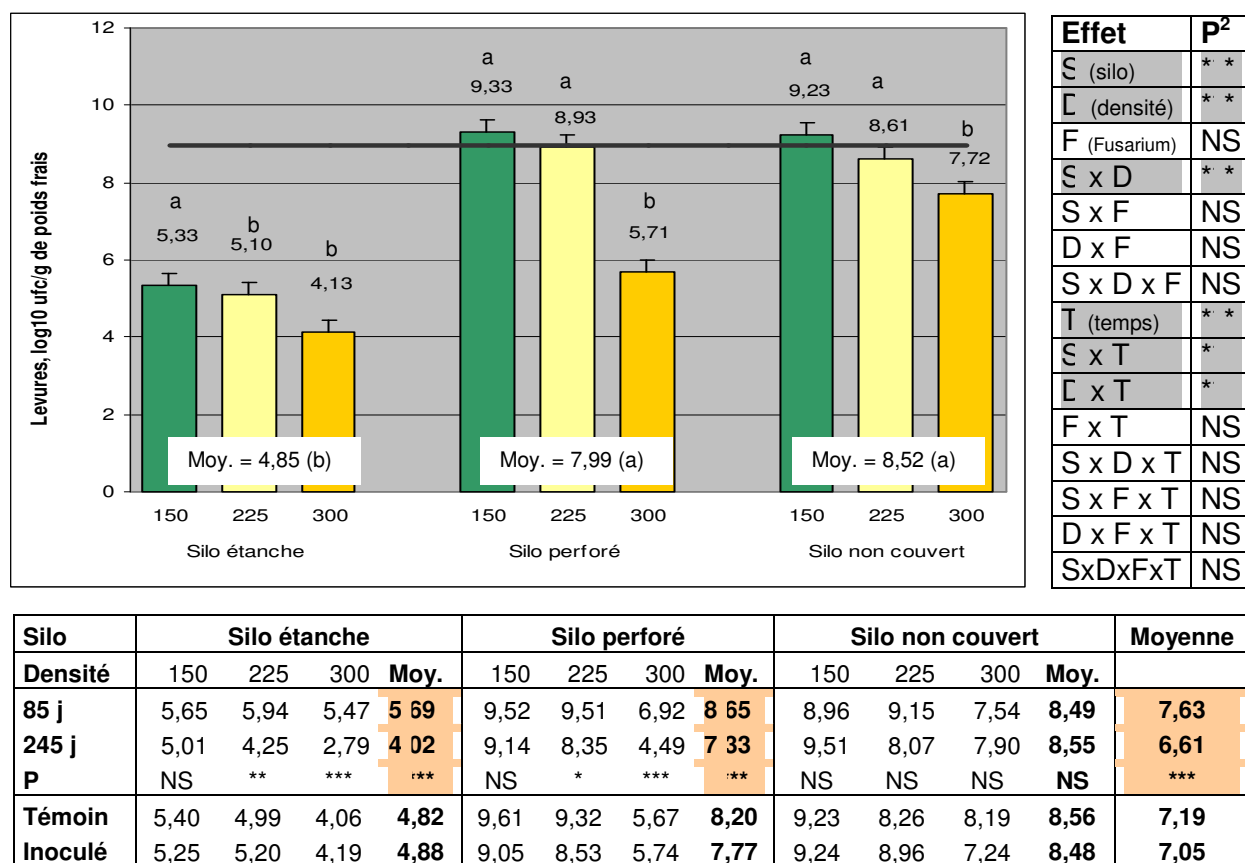


Figure 6. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le nombre de levures dans l'ensilage de maïs¹

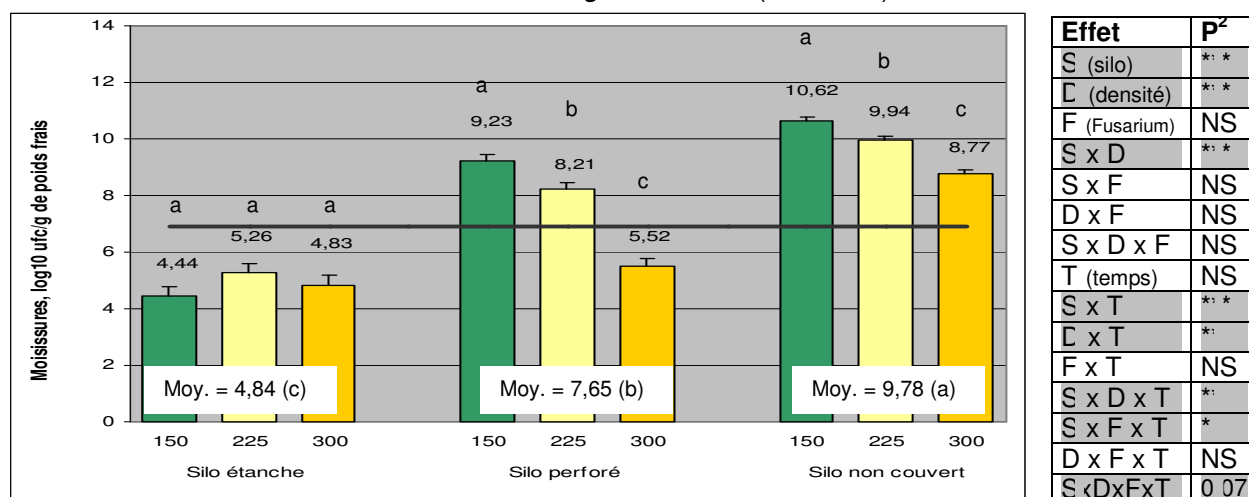
¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05).

Le trait horizontal indique la moyenne de 18 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Moisissures

Le nombre de moisissures a augmenté dans le temps, passant de 6,90 log₁₀ ufc/g à la mise en silos à 7,42 log₁₀ ufc/g en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, le silo non couvert (9,78 log₁₀ ufc/g en moyenne) a présenté un nombre de moisissures plus élevé que le silo perforé (7,65 log₁₀ ufc/g en moyenne), lui-même plus élevé que le silo étanche (4,84 log₁₀ ufc/g en moyenne). De plus, le nombre de moisissures a diminué avec l'augmentation de la densité, c'est-à-dire lorsque la densité a passé de 150 à 225 et à 300 kg MS/m³, en silo perforé (9,23, 8,21 et 5,52 log₁₀ ufc/g, respectivement) et en silo non couvert (10,62, 9,94 et 8,77 log₁₀ ufc/g, respectivement) alors que ce ne fut pas le cas en silo étanche (4,44, 5,26 et 4,83 log₁₀ ufc/g, respectivement). Ainsi, le nombre de moisissures a été plus élevé au moment de l'ouverture des silos que lors de leur remplissage, dans le maïs conservé en silo non couvert, quelle que soit la densité, de même que dans celui conservé en silo perforé, à faible densité et moyenne densité. De plus, que le maïs soit inoculé ou non avec le *F. graminearum*, le nombre de moisissures a diminué avec la durée de conservation en silo étanche (en moyenne 3,99 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 5,70 log₁₀ ufc/g après 85 jours) (quoique de façon non significative à moyenne densité) et augmenté en silo non couvert (en moyenne 10,23 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 9,33 log₁₀ ufc/g après 85 jours) (quoique de façon non significative à faible densité). Par contre, en silo perforé il a diminué à densité élevée (en moyenne 4,87 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 6,17 log₁₀ ufc/g après 85 jours) et augmenté à faible densité (en moyenne 10,02 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 8,45 log₁₀ ufc/g après 85 jours) (figure 7). Finalement, les variations de population de moisissures avec la durée de conservation observées en silo étanche (diminution) et en silo non couvert (augmentation) semblent avoir été plus prononcées dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans le non inoculé. Par contre, en silo perforé l'augmentation s'est manifestée seulement dans le maïs non inoculé avec le *F. graminearum* (annexe 2).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	5,35	5,72	5,03	5,70	8,45	7,89	6,17	7,50	10,28	9,42	8,28	9,33	7,51
245 j	3,54	4,80	3,62	3,99	10,02	8,52	4,87	7,80	10,96	10,46	9,25	10,23	7,34
P	**	NS	**	***	**	NS	**	NS	NS	*	*	**	NS
Témoin	4,58	5,29	4,69	4,85	9,52	8,82	5,59	7,98	10,67	9,62	8,77	9,69	7,50
Inoculé	4,31	5,24	4,97	4,84	8,95	7,59	5,46	7,34	10,57	10,26	8,77	9,87	7,35

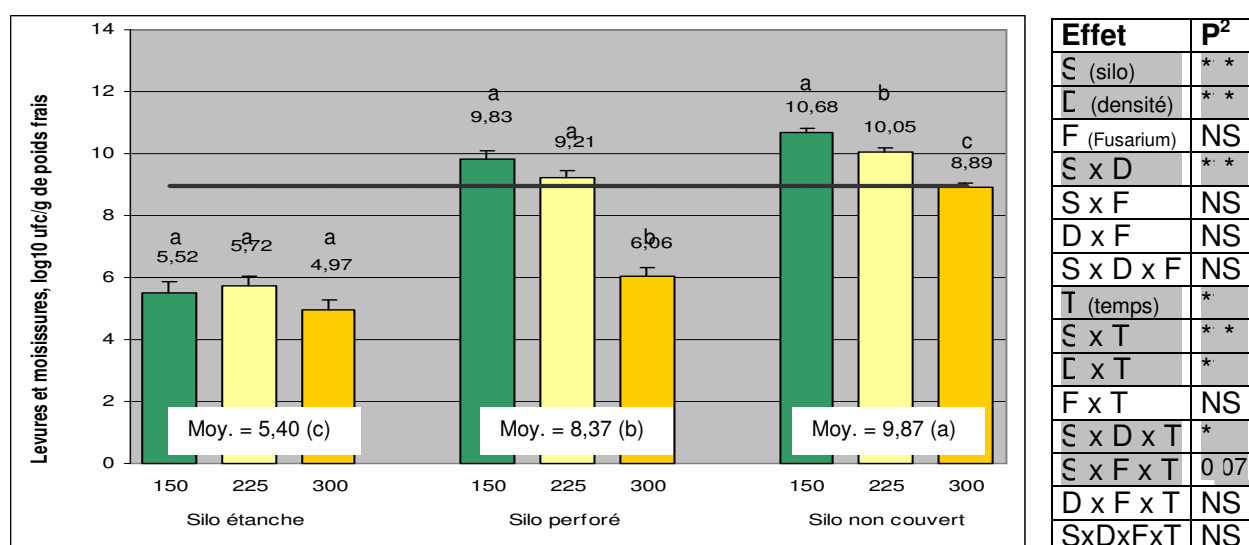
Figure 7. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le nombre de moisissures dans l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05).
Le trait horizontal indique la moyenne de 18 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Levures et moisissures

Le nombre de levures et de moisissures a été de 8,96 log₁₀ ufc/g à la mise en silos et 7,88 log₁₀ ufc/g en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, il a été plus élevé en silo non couvert (9,87 log₁₀ ufc/g en moyenne) qu'en silo perforé (8,37 log₁₀ ufc/g en moyenne) et en silo perforé qu'en silo étanche (5,40 log₁₀ ufc/g en moyenne). De plus, il a été influencé par la densité de façon différente selon l'étanchéité du silo. En effet, en silo étanche il a été comparable quelle que soit la densité alors qu'en silo non couvert il a diminué avec l'augmentation de la densité (10,68, 10,05 et 8,89 log₁₀ ufc/g, respectivement pour les densités faible, moyenne et élevée). En silo perforé il a été plus faible à densité élevée qu'à faible densité et à moyenne densité (6,06 vs 9,83 et 9,21 log₁₀ ufc/g, respectivement). Il a aussi diminué avec la durée de conservation à densité élevée, en silo étanche (3,75 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 6,19 log₁₀ ufc/g après 85 jours) et en silo perforé (5,07 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 7,05 log₁₀ ufc/g après 85 jours), alors qu'il a augmenté en silo non couvert quelle que soit la densité (en moyenne 10,28 log₁₀ ufc/g après 245 jours vs 9,47 log₁₀ ufc/g après 85 jours (figure 8). Finalement, les variations de population de levures et de moisissures avec la durée de conservation (diminution en silo étanche et en silo perforé et augmentation en silo non couvert) semblent avoir été plus prononcées dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans le non inoculé (annexe 2).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	5,95	6,32	3,19	6 15	9,57	9,52	7,05	8 72	10,32	9,63	8,44	9,47	8,11
245 j	5,09	5,12	3,75	4 65	10,09	8,90	5,07	8 02	11,04	10,46	9,33	10,28	7,65
P	NS	NS	**	**	NS	NS	**	*	*	**	**	***	**
Témoin	5,54	5,64	4,87	5,35	10,13	9,79	6,09	8,67	10,69	9,69	8,92	9,77	7,93
Inoculé	5,51	5,80	5,06	5,46	9,53	8,63	6,04	8,07	10,67	10,40	8,86	9,98	7,83

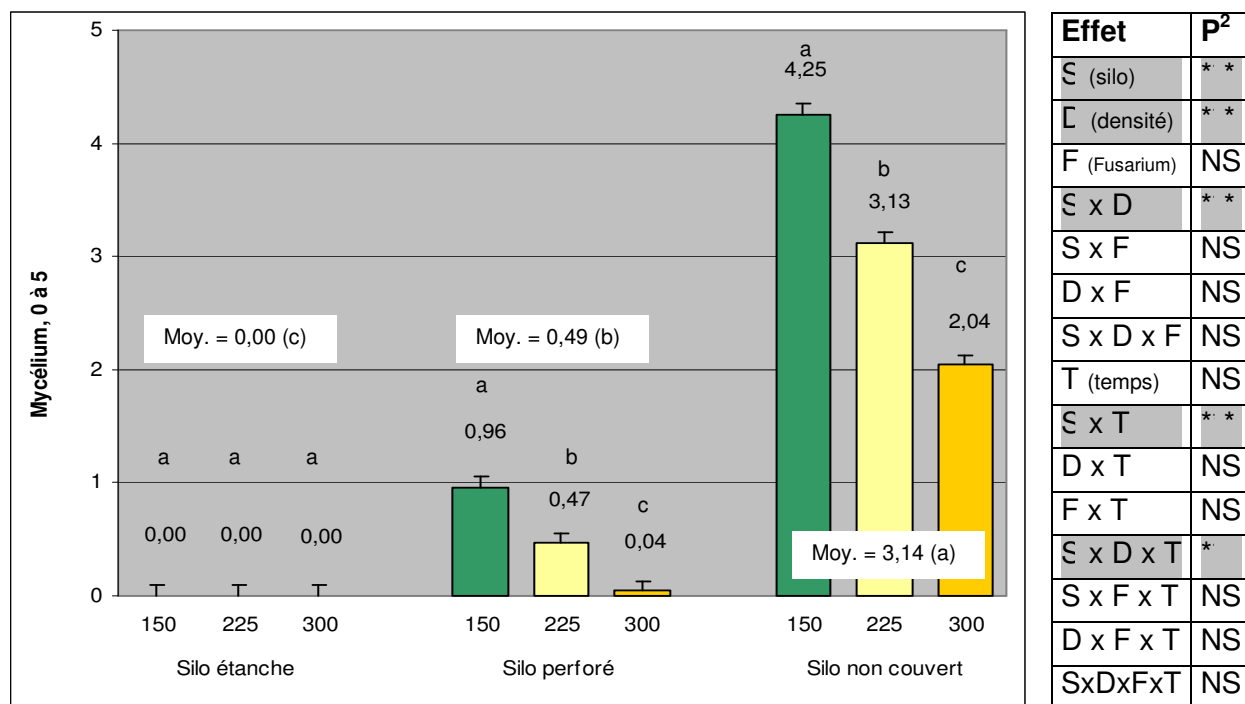
Figure 8. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le nombre de levures et de moisissures dans l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05). Le trait horizontal indique la moyenne de 18 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Mycélium

Au moment de l'ouverture des silos, on n'a observé aucun développement visible de mycélium dans le maïs de silo étanche. En silo perforé (0,49 en moyenne), il a été significatif à faible densité (0,96) et a diminué à mesure que la densité augmentait, avec des valeurs de 0,47 à densité moyenne et 0,04 à densité élevée. En silo non couvert (3,14 en moyenne), il a été très important à faible densité (4,25) et a diminué aussi à mesure que la densité augmentait, avec des valeurs de 3,13 à densité moyenne et 2,04 à densité élevée. De plus, il a été moins important après 245 jours qu'après 85 jours de conservation en silo perforé dans l'ensilage de faible densité (0,67 vs 1,25) et dans celui de moyenne densité (0,25 vs 0,69), alors qu'il a été plus important après 245 jours qu'après 85 jours en silo non couvert dans l'ensilage de faible densité (4,67 vs 3,83). Par contre, il n'a pas été influencé par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 9).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	0,69	0,08	0,67	3,83	3,17	2,08	2,03	1,23
245 j	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,25	0,00	0,31	4,67	3,08	2,00	2,25	1,18
P	NS	NS	NS	NS	**	**	NS	***	***	NS	NS	*	NS
Témoin	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,45	0,03	0,49	4,00	3,17	2,00	3,06	1,18
Inoculé	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	0,48	0,05	0,48	4,50	3,08	2,08	3,22	1,24

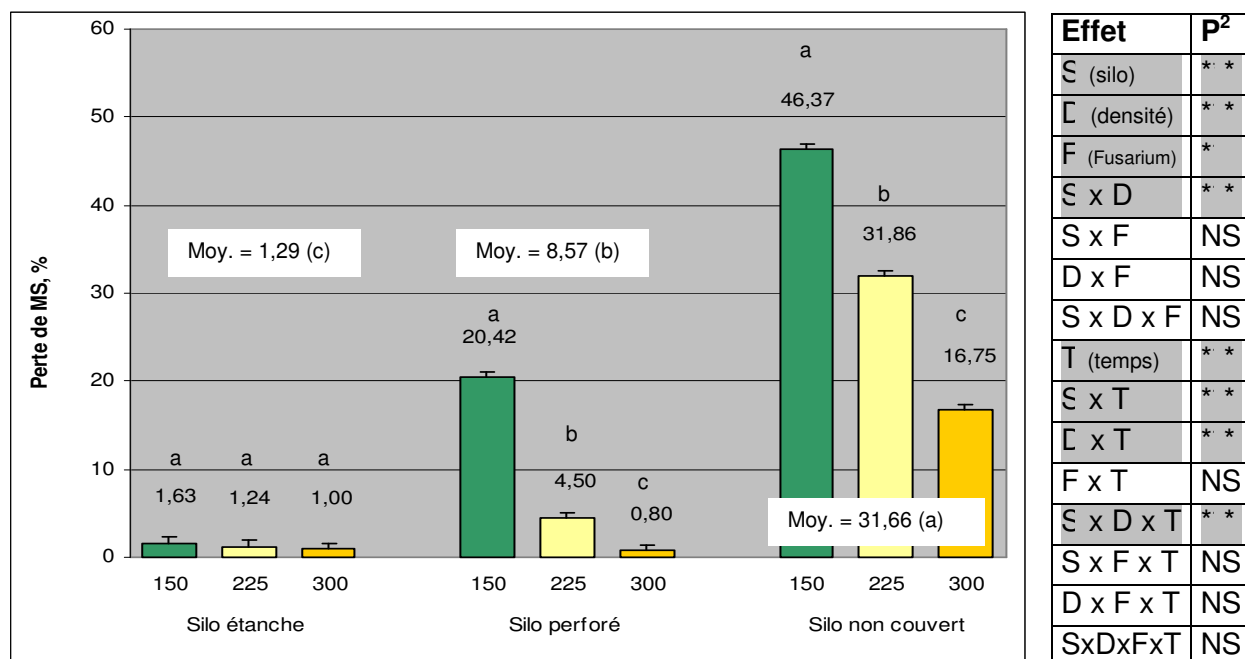
Figure 9. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le développement du mycélium dans l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Perte de matière sèche

Pendant la conservation en silos, la perte de matière sèche a été très faible (1,29% en moyenne) et comparable quelle que soit la densité dans le maïs de silo étanche. En silo perforé (8,57% en moyenne), elle a été très importante à faible densité (20,42%) et a diminué à mesure que la densité augmentait, avec des valeurs de 4,50% à densité moyenne et 0,80% à densité élevée. En silo non couvert (31,66% en moyenne), elle a été encore plus importante à faible densité (46,37%) et a diminué aussi à mesure que la densité augmentait, avec des valeurs de 31,86% à densité moyenne et 16,75% à densité élevée. De plus, la perte de matière sèche n'a pas varié de façon significative avec la durée de conservation en silo étanche quelle que soit la densité, ni en silo perforé dans l'ensilage de densité élevée, alors qu'elle a augmenté de façon marquée en silo non couvert quelle que soit la densité (41,19% vs 22,13%), de même qu'en silo perforé dans l'ensilage de faible densité (28,25% vs 12,60%) et dans celui de moyenne densité (6,88% vs 2,11%). Finalement, la perte de matière sèche a été plus élevée dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* (14,34%) que dans le non inoculé (13,34%) (figure 10).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	1,74	1,10	0,89	1,24	12,60	2,11	0,19	1,97	35,02	20,66	10,71	22,13	9,44
245 j	1,52	1,39	1,10	1,34	23,25	6,88	1,42	12,18	57,73	43,07	22,78	41,19	18,24
P	NS	NS	NS	NS	***	**	NS	***	***	***	***	***	***
Témoin	1,58	0,50	0,74	0,94	20,32	3,25	0,50	8,02	46,10	31,75	15,35	31,07	13,34
Inoculé	1,68	1,98	1,25	1,63	20,53	5,74	1,11	9,13	46,65	31,97	18,14	32,25	14,34
P													**

Figure 10. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la perte de matière sèche dans l'ensilage de maïs pendant sa conservation en silo¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Synthèse

Le *F. graminearum* n'a pas survécu en ensilage et la population de *Fusarium* spp. a été plus faible à la fin de la période de conservation qu'au début ($5,20 \log_{10}$ ufc/g), sauf dans l'ensilage de faible densité en silo non couvert ($6,87 \log_{10}$ ufc/g). On n'a pas détecté de vomitoxine dans le maïs au moment de la mise en silos, alors qu'au moment de leur ouverture sa teneur a été comparable quelle que soit l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage (1,80 ppm en moyenne), mais plus élevée après 245 jours de conservation (2,16 ppm) que lors de la mise en silo (0 ppm) et qu'après 85 jours (1,44 ppm). Quant à la zéaralénone, il y en avait peu dans le maïs au moment de la mise en silos (0,06 ppm). Sa teneur a augmentée seulement en silo non couvert (0,30 ppm en moyenne).

Nos observations quant à la non-survie du *F. graminearum* en ensilage vont dans le même sens que celles faites par Kulda et Mansfield (2006) dans l'ensilage de maïs et par Amyot et Couture (2008) dans l'ensilage de maïs épi humide. Cependant, dans la présente expérience la teneur en vomitoxine a augmenté pendant le séjour du maïs en silo, quelle que soit l'étanchéité du silo, tout comme dans l'expérience réalisée avec le maïs épi humide, alors qu'une enquête réalisée par Mansfield et al (2005) sur des fermes commerciales a révélé une diminution de la vomitoxine dans l'ensilage de maïs après 6 mois de conservation. Quant à la zéaralénone, elle a augmenté seulement dans les silos non couverts dans la présente expérience alors qu'elle était restée inférieure au seuil de détection dans l'expérience réalisée avec le maïs épi humide, probablement parce que les silos avaient été gardés étanches pendant les 45 premiers jours.

Au moment de l'ouverture des silos, le maïs de silo étanche a présenté un nombre de levures et de moisissures relativement faible ($5,40 \log_{10}$ ufc/g en moyenne), aucun développement visible de mycélium et une perte de matière sèche très faible (1,29% en moyenne), quelle que soit la densité de l'ensilage. Par contre, en silo perforé et en silo non couvert chacun de ces paramètres a été d'autant plus élevé que la densité était faible. Ainsi, les silos perforés ont présenté en moyenne un nombre de levures et de moisissures ($8,37 \log_{10}$ ufc/g), un développement du mycélium (0,49) et une perte de matière sèche (8,57%) plus élevés que les silos étanches. De même, les silos non couverts ont présenté en moyenne un nombre de levures et de moisissures ($9,87 \log_{10}$ ufc/g), un développement du mycélium (3,14) et une perte de matière sèche (31,66%) plus élevés que les silos perforés. De plus, la perte de matière sèche n'a pas varié de façon significative avec la durée de conservation lorsque le nombre de moisissures a été significativement ou numériquement moins élevé à l'ouverture que lors du remplissage des silos, c'est-à-dire en silo étanche quelle que soit la densité de l'ensilage, de même qu'en silo perforé dans l'ensilage de densité élevée. Par contre, elle a augmenté de façon marquée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation lorsque le nombre de moisissures a été significativement ou numériquement plus élevé à l'ouverture que lors du remplissage des silos, c'est-à-dire en silo non couvert quelle que soit la densité, de même qu'en silo perforé dans les ensilages de faible et de moyenne densités. Finalement, les populations de moisissures ont évolué de façon différente selon le type de silo dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* et le non inoculé, et la perte de matière sèche a été 1% plus élevée, au moment de l'ouverture des silos, dans le maïs inoculé que dans le non inoculé.

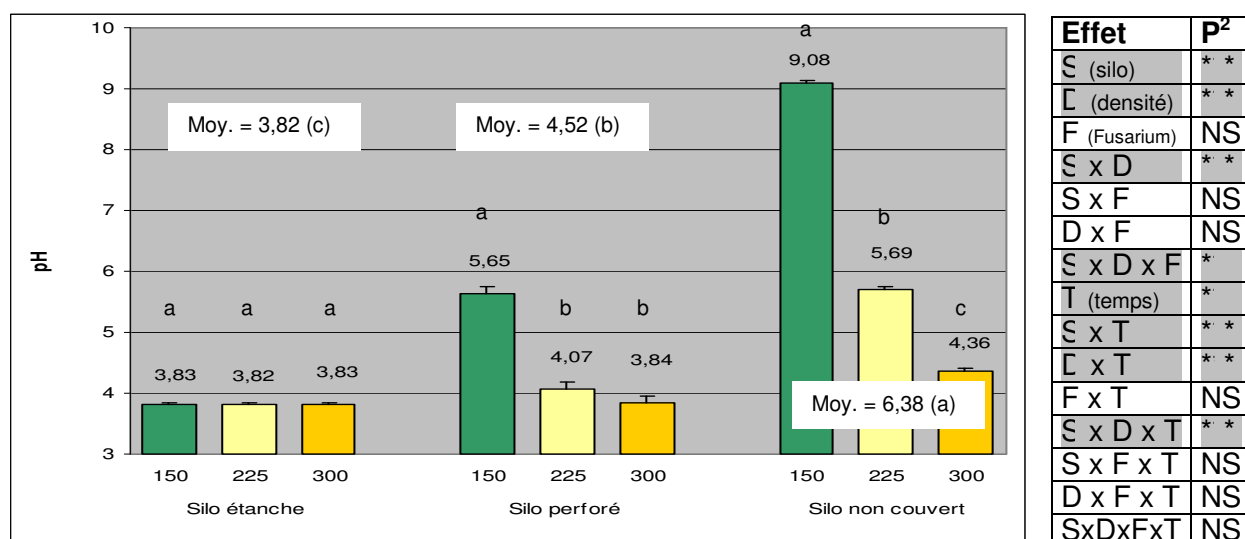
Il semble donc que si la perte de matière sèche a été très faible en silo étanche quelle que soit la densité, de même qu'en silo perforé dans l'ensilage de densité élevée, c'est parce que les conditions qui prévalaient dans ces silos ont permis de réduire les populations originales de levures, d'empêcher les populations de moisissures d'augmenter, et d'inhiber complètement ou presque le développement du mycélium. En fait, le développement du mycélium semble un bon indicateur de la perte de matière sèche pendant la conservation, lorsqu'on compare des ensilages de densité variable et des silos d'étanchéité différente.

La perte de matière sèche mesurée en silo étanche (1,29% en moyenne) est semblable à celle (0 à 3%) rapportée par Savoie et al (2006). Elle n'a pas été influencée de façon significative par la densité de l'ensilage ni par la durée de conservation, du moins entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation, comme rapporté par ces chercheurs. De plus, la perte de matière sèche mesurée en silo non couvert, à savoir 17% à densité élevée et 46% à faible densité (moyenne des résultats obtenus après 85 jours et 245 jours), est comparable à celle prévue par le modèle de simulation de Savoie et al (2006) pour une hauteur d'ensilage de 40 cm et un entreposage de 6 mois (20% à 320 kg MS/m³ et 45% à 160 kg MS/m³).

2.3 Produits de fermentation

pH

En silo étanche, le pH a été relativement bas (3,82 en moyenne) et comparable quelle que soit la densité alors qu'en silo perforé et en silo non couvert il a fortement été influencé par la densité. En fait, en silo perforé le pH a été plus élevé à faible densité (5,65) qu'à densité moyenne (4,07) et à densité élevée (3,84). Par contre, en silo non couvert il a augmenté de façon marquée à mesure que la densité diminuait, passant de 4,36 (densité élevée) à 5,69 (densité moyenne) et 9,08 (densité faible). Par ailleurs, le pH a été peu influencé par la durée de conservation en silo étanche (en moyenne 3,84 vs 3,81), alors qu'en silo perforé il a diminué avec la durée de conservation dans l'ensilage de faible densité, passant de 6,52 après 85 jours à 4,77 après 245 jours. C'est un signe que cet ensilage a subi une fermentation tardive. En silo non couvert, le pH a au contraire augmenté avec la durée de conservation quelle que soit la densité, mais l'augmentation a été plus prononcée dans l'ensilage de moyenne densité (de 4,82 à 6,57) que dans ceux de faible densité (de 8,73 à 9,43) et de densité élevée (de 4,17 à 4,55). C'est un signe que cet ensilage a subi une détérioration tardive. Le pH a également été plus bas dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans celui non inoculé, dans les ensilages qui ont maintenu un pH peu acide (entre 4,8 et 6,6) quelle que soit la durée de conservation, soit celui de faible densité en silo perforé (5,50 vs 5,80) et celui de moyenne densité silo non couvert (5,45 vs 5,94) (figure 11).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	3,81	3,82	3,81	3,81	5,52	3,98	3,82	4,77	4,73	5,82	4,17	4,91	4,83
245 j	3,84	3,82	3,84	3,84	4,77	4,16	3,85	4,26	4,43	5,57	4,55	4,85	4,98
P	*	NS	*	**	***	NS	NS	**	***	***	**	***	**
Témoin	3,84	3,81	3,82	3,82	5,80	4,03	3,84	4,55	9,04	5,94	4,36	6,44	4,94
Inoculé	3,81	3,83	3,83	3,82	5,50	4,11	3,83	4,48	9,13	5,45	4,37	6,32	4,87
P	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	NS

Figure 11. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le pH de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Acide lactique

En silo étanche, la teneur en acide lactique a été relativement élevée (5,20% en moyenne) et assez semblable quelle que soit la densité, quoique significativement plus élevée dans l'ensilage de densité moyenne (5,47%) que dans ceux de densité faible (5,02%) et de densité élevée (5,11%). Par contre, en silo perforé la teneur en acide lactique a été relativement élevée dans l'ensilage de densité élevée (5,18%), et comparable à celle observée en silo étanche, mais n'a atteint que 4,10% à moyenne densité et 1,62% à faible densité. En silo non couvert, la teneur en acide lactique n'a jamais été comparable à celle observée en silo étanche. Elle a aussi diminué avec la densité, passant de 3,23% à densité élevée, à 1,49% à densité moyenne et 0% à faible densité. Par ailleurs, la teneur en acide lactique a été comparable quelle que soit la durée de conservation en silo étanche, alors qu'en silo perforé elle a augmenté avec la durée de conservation dans l'ensilage de faible densité, passant de 0,81% après 85 jours à 2,44% après 245 jours. C'est un signe que cet ensilage a subi une fermentation tardive. La teneur en acide lactique a par contre diminué pendant la même période dans l'ensilage de moyenne densité, passant de 4,39% à 3,82%. C'est un signe que cet ensilage a commencé à se détériorer. En silo non couvert, elle a diminué seulement dans l'ensilage de moyenne densité, passant de 2,00% à 0,99%. C'est un signe que cet ensilage a subi une détérioration tardive prononcée. Finalement, elle a été plus élevée dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans le non inoculé (3,55% vs 3,38%) (figure 12).

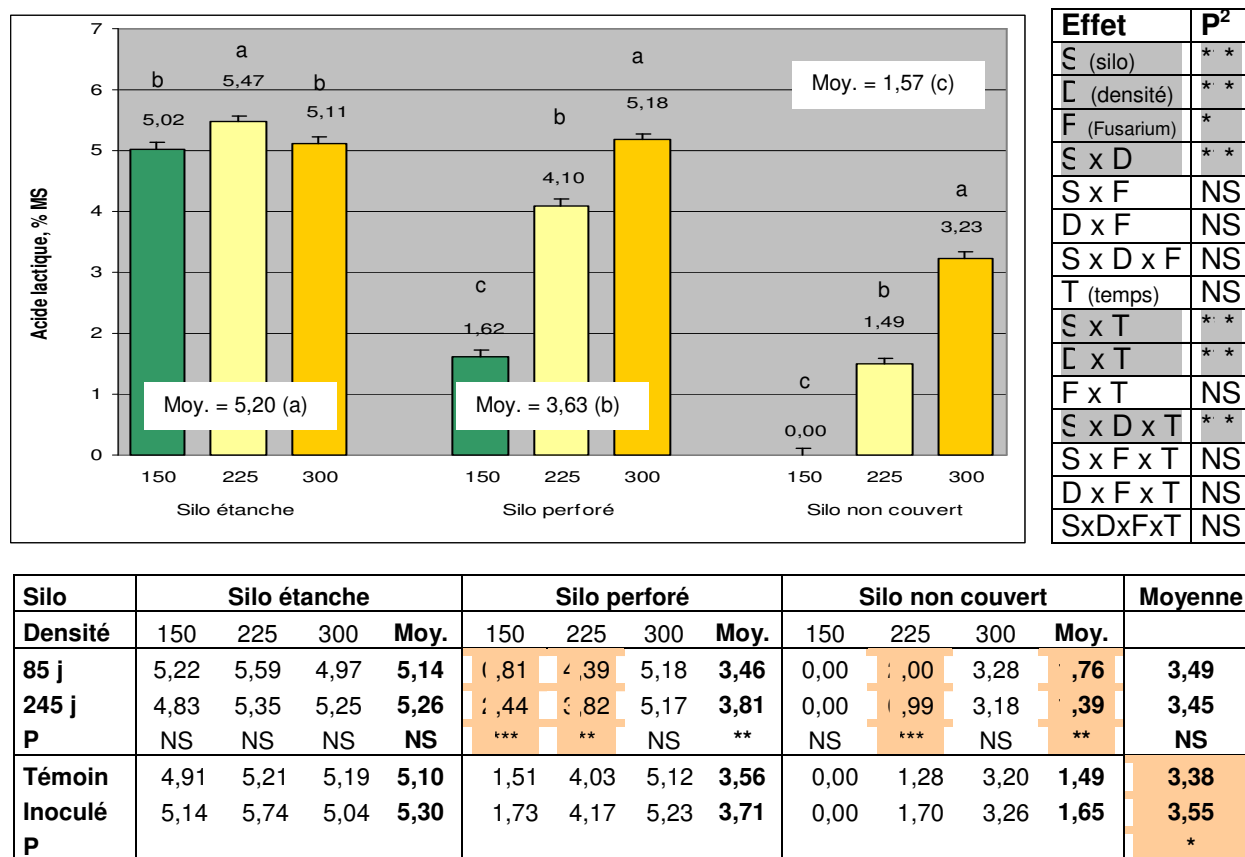


Figure 12. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en acide lactique de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Acide acétique

En silo étanche, la teneur en acide acétique a été relativement élevée quelle que soit la densité mais plus élevée dans les ensilages de densité moyenne (1,14%) et de densité élevée (1,11%) que dans celui de faible densité (0,99%). En silo perforé, elle a été comparable à celle observée en silo étanche dans l'ensilage de forte densité (1,05%) mais a été significativement plus faible dans ceux de moyenne densité (0,86%) et de faible densité (0,71%). En silo non couvert, elle n'a jamais été comparable à celle observée en silo étanche et a été moins élevée à faible densité (0,17%) qu'à densité moyenne (0,89%) et à densité élevée (0,80%). Par ailleurs, la teneur en acide acétique a augmenté avec la durée de conservation 1° en silo étanche dans l'ensilage de densité élevée, passant 1,04% après 85 jours à 1,19% après 245 jours, 2° en silo perforé dans l'ensilage de faible densité, passant de 0,24% à 1,18% et 3° en silo non couvert dans l'ensilage de moyenne densité, passant de 0,81% à 0,96%. L'augmentation importante observée à faible densité en silo perforé (+0,94%) semble due à la fermentation tardive de cet ensilage. Cependant, la teneur en acide acétique n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 13).

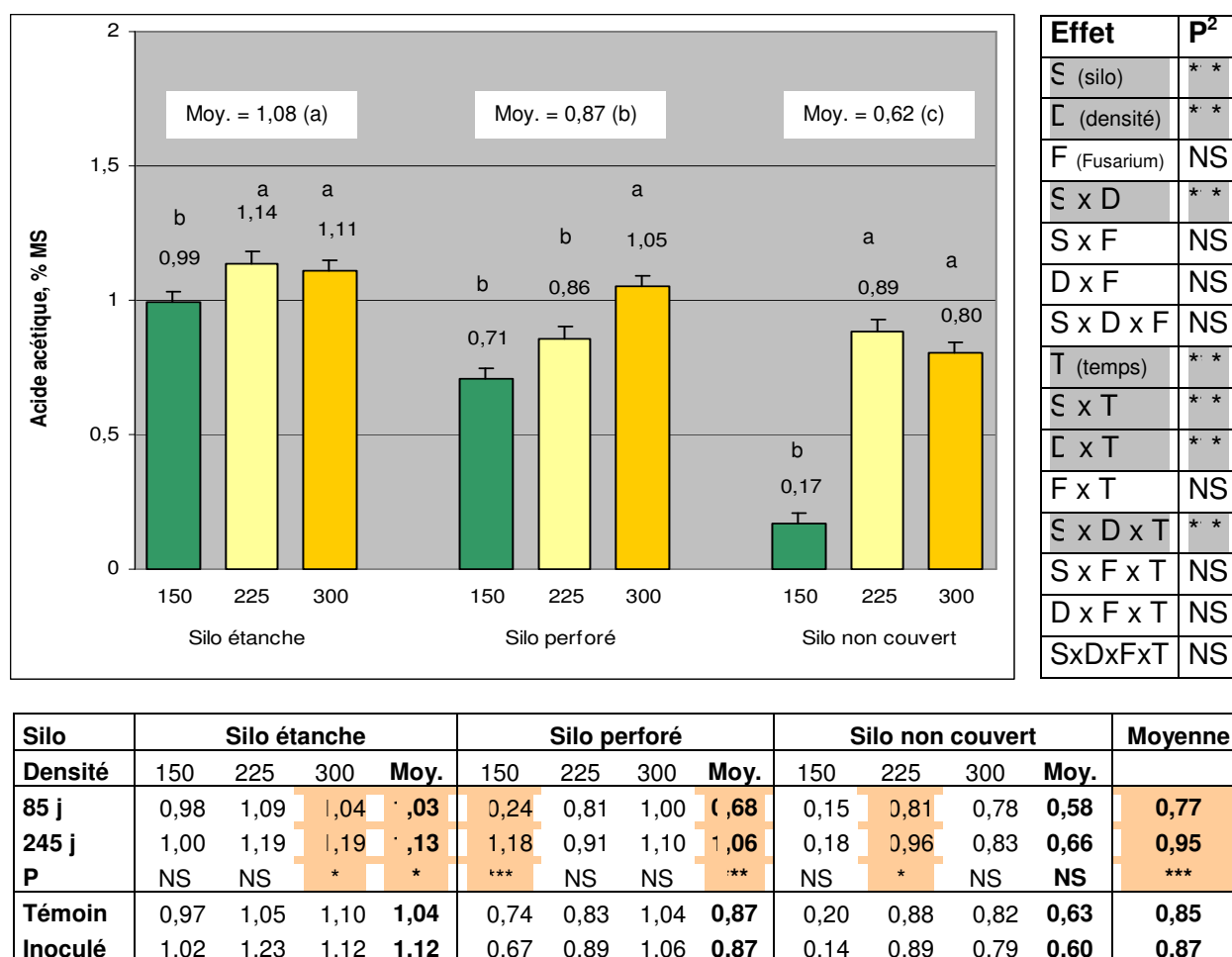


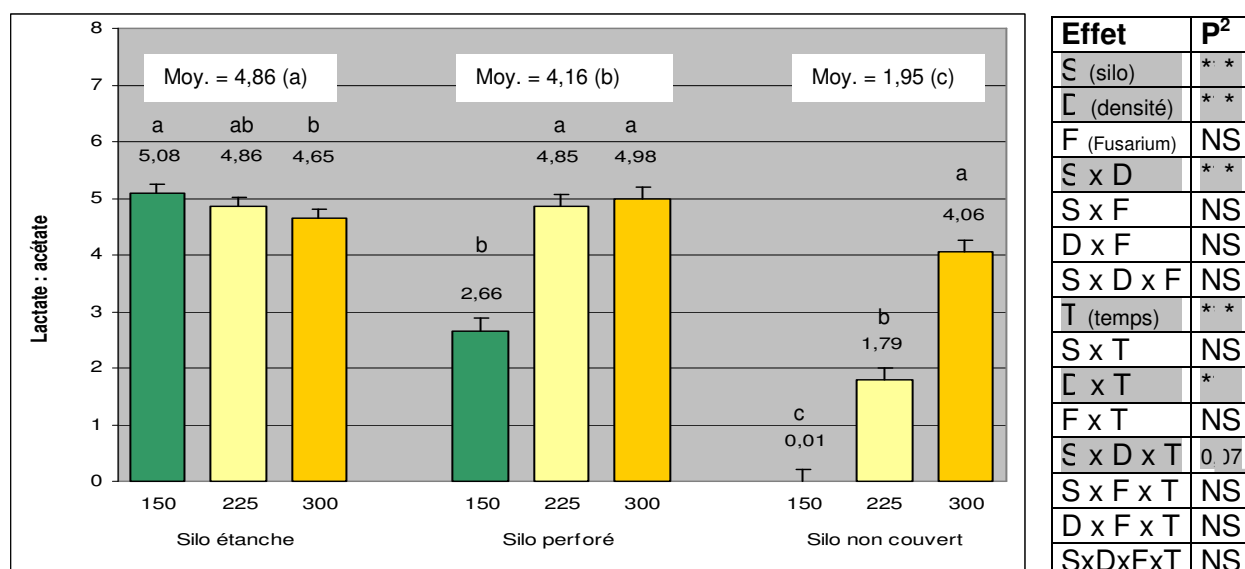
Figure 13. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en acide acétique de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Rapport lactate : acétate

En silo étanche, le rapport lactate : acétate a été relativement élevé quelle que soit la densité mais moins élevé dans l'ensilage de densité élevée (4,65) que dans celui de faible densité (5,08). En silo perforé, il a été moins élevé à faible densité (2,66) qu'à densité moyenne (4,85) et à densité élevée (4,98) alors qu'en silo non couvert il a été pratiquement nul à faible densité et moins élevé à moyenne densité (1,79) qu'à densité élevée (4,06). Ainsi, il a atteint un niveau comparable à celui observé en silo étanche dans l'ensilage conservé en silo perforé et compressé à une moyenne densité et une densité élevée alors que ce ne fut pas le cas dans l'ensilage conservé en silo non couvert, même à la densité élevée. De plus, le rapport lactate : acétate a diminué dans le temps, de façon plus ou moins prononcée selon l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage. En silo étanche, la diminution a été relativement faible quelle que soit la densité (de -0,33 à -0,60). En silo perforé, elle a été plus importante dans les ensilages de faible densité (-1,09) et de moyenne densité (-1,28) que dans celui de densité élevée (-0,42). Cela indique que la fermentation tardive qui a pris place à faible densité a été très hétérolactique et qu'on a assisté à un début de détérioration de l'ensilage de moyenne densité. En silo non couvert, le rapport lactate : acétate a diminué de façon plus importante dans l'ensilage de moyenne densité (-1,48), qui a subi une détérioration tardive prononcée, que dans celui de densité élevée (-0,39). Cependant, le rapport lactate : acétate n'a pas été influencé par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 14).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	5,32	5,16	4,81	5,10	3,20	4,49	5,19	4,63	-0,04	2,53	4,25	2,25	3,99
245 j	1,84	1,56	4,48	2,63	2,11	2,21	4,77	2,70	0,06	1,05	3,86	1,66	3,33
P	*	**	NS	**	**	**	NS	**	NS	***	NS	**	***
Témoin	0,97	1,05	1,10	1,04	0,74	0,83	1,04	0,87	0,20	0,88	0,82	0,63	0,85
Inoculé	1,02	1,23	1,12	1,12	0,67	0,89	1,06	0,87	0,14	0,89	0,79	0,60	0,87

Figure 14. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le rapport lactate : acétate de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Sucres solubles

En silo étanche, la teneur en sucres solubles a été relativement élevée et comparable quelle que soit la densité (en moyenne 1,33%). En silo perforé, elle a diminué avec la densité, passant de 1,29% dans l'ensilage de forte densité à 0,57% dans celui de moyenne densité et 0,09% dans celui de faible densité. Il en fut de même en silo non couvert, avec des valeurs de 0,85% à densité élevée, 0,46% à moyenne densité et à peine 0,10% à faible densité. Ainsi, la teneur en sucres solubles s'est maintenue à un niveau comparable à celui observé en silo étanche dans l'ensilage conservé en silo perforé et compressé à une densité élevée alors que ce ne fut pas le cas dans l'ensilage conservé en silo non couvert. Par ailleurs, la teneur en sucres solubles a diminué quelle que soit l'étanchéité du silo entre le 85^{ème} jour et le 245^{ème} jour de conservation, mais de façon plus importante en silo étanche (1,04% vs 1,62%) qu'en silo perforé (0,50% vs 0,80%) et en silo non couvert (0,28% vs 0,66%). En fait, cela semble dû au fait qu'elle a diminué quelle que soit la densité en silo étanche alors qu'en silo perforé et en silo non couvert elle a diminué seulement dans les ensilages de densité moyenne et de densité élevée, puisqu'elle était déjà nulle ou presque après 85 jours de conservation dans l'ensilage de faible densité. Cependant, la teneur en sucres solubles n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 15).

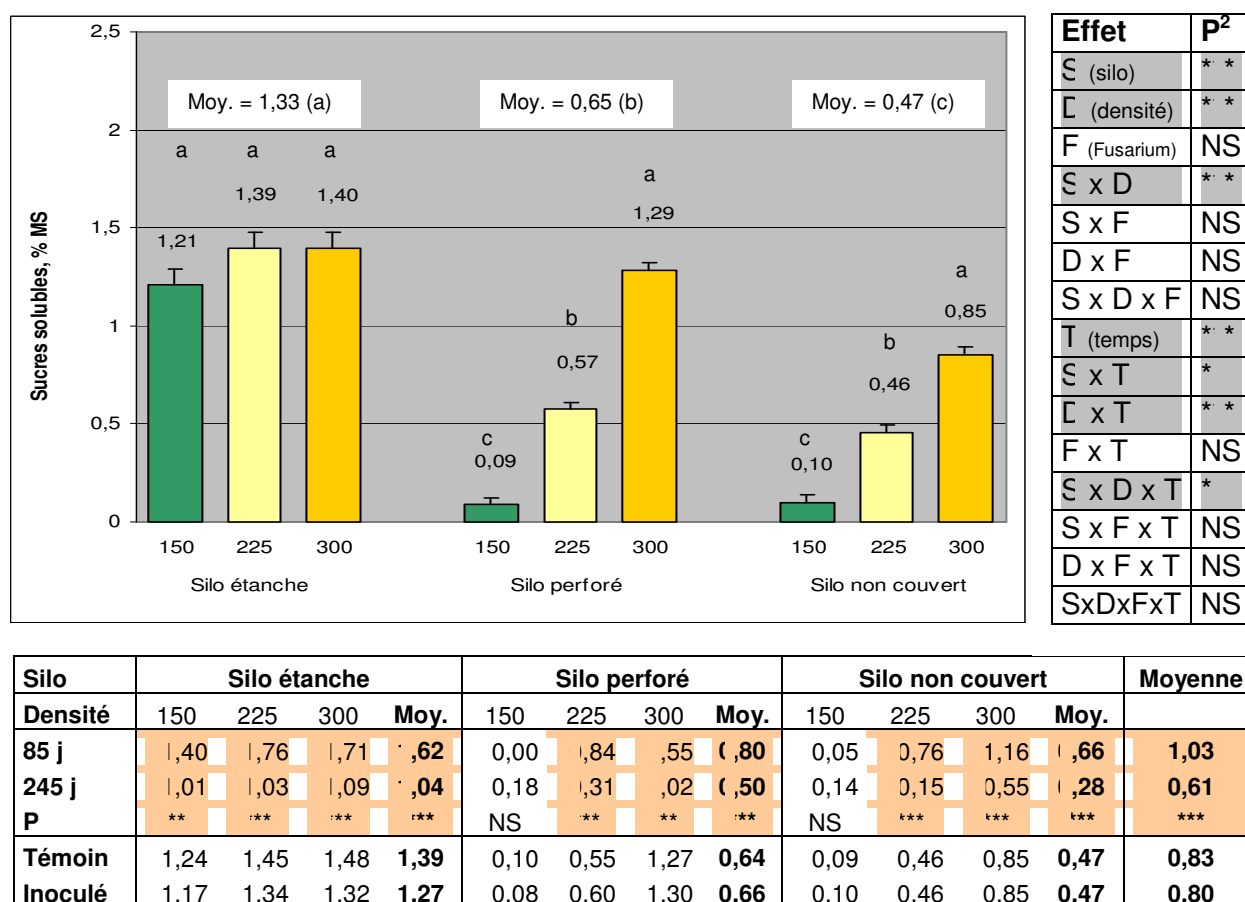


Figure 15. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en sucres solubles de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Azote ammoniacal

En silo étanche, la teneur en azote ammoniacal a été relativement faible et semblable quelle que soit la densité (0,56% éq. PB en moyenne). En silo perforé, elle a été plus élevée dans l'ensilage de faible densité (0,76% éq. PB) que dans ceux de densité moyenne (0,58% éq. PB) et de densité élevée (0,55% éq. PB). En silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (1,39% éq. PB) et à moyenne densité (1,16% éq. PB) qu'à densité élevée (0,73% éq. PB). Par ailleurs, la teneur en azote ammoniacal a été plus élevée après 245 jours qu'après 85 jours de conservation quelle que soit l'étanchéité du silo et la densité, mais l'augmentation a été très faible en silo étanche (+0,14% éq. PB), modérée en silo perforé (+0,38% éq. PB) et importante en silo non couvert (+1,06% éq. PB). En silo étanche, il n'y a eu qu'une légère augmentation quelle que soit la densité (+0,10 à +0,16% éq. PB). Par contre, en silo perforé l'augmentation a été plus importante à faible densité (+0,62% éq. PB) qu'à densité moyenne et à densité élevée (+0,31 et +0,19% éq. PB, respectivement), et en silo non couvert elle a été plus importante à faible densité et à moyenne densité (+1,55 et +1,23% éq. PB, respectivement) qu'à densité élevée (+0,42% éq. PB). En fait, après 85 jours de conservation la teneur en azote ammoniacal était relativement faible (environ 0,50 éq. PB) et comparable quelle que soit l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage, et c'est seulement par la suite que les différences entre les traitements se sont manifestées. Finalement, la teneur en azote ammoniacal n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 16).

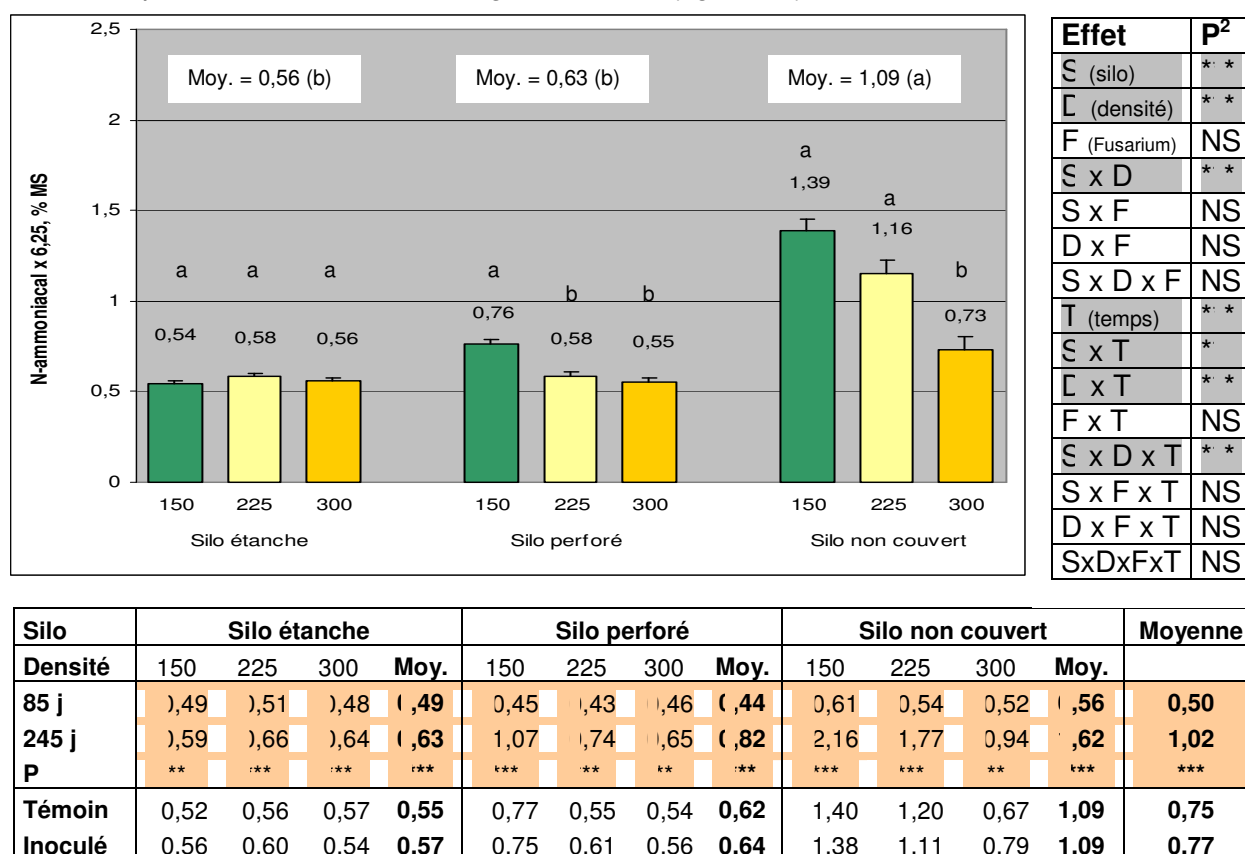


Figure 16. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en azote ammoniacal de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Synthèse

Effet de l'étanchéité du silo et de la densité de l'ensilage

n silo étanche, la teneur en acide lactique a été relativement élevée et assez semblable quelle que soit la densité (5,20% en moyenne), quoique significativement plus élevée à moyenne densité (5,47%) qu'à densité faible (5,02%) et à densité élevée (5,11%). La teneur en acide acétique a été relativement faible (1,08% en moyenne), mais plus élevée à densité moyenne (1,14%) et densité élevée (1,11%) qu'à faible densité (0,99%). Le rapport lactate : acétate a été relativement élevé (4,86 en moyenne), mais plus élevé à densité élevée (5,08) qu'à faible densité (4,65). La teneur en sucres solubles a été supérieure à 1% et comparable quelle que soit la densité (1,33% en moyenne), alors que la teneur en azote ammoniacal a été relativement faible (0,56% éq. PB en moyenne) et le pH inférieur à 4 (3,82 en moyenne) quelle que soit la densité. La plus faible production d'acide lactique et d'acide acétique dans l'ensilage de faible densité semble due à la combustion de plus de sucres par la respiration dans ces conditions. Toutefois, il est difficile d'expliquer pourquoi il y a eu un peu moins d'acide lactique de produit dans l'ensilage de densité élevée que dans celui de moyenne densité.

En silo perforé, on a observé en moyenne des teneurs en acide lactique (3,63% vs 5,20%), en acide acétique (0,87% vs 1,08%) et en sucres solubles (0,65% vs 1,33%), de même qu'un rapport lactate : acétate (4,16 vs 4,86) inférieurs à ceux observés en silo étanche et un pH supérieur (4,52 vs 3,82). Par contre, le rapport lactate : acétate (5,05 vs 4,86) et la teneur en azote ammoniacal (0,63% vs 0,56% éq. PB) ont été comparables à ceux du silo étanche. De plus, la fermentation a été influencée de façon importante par la densité de l'ensilage. Dans l'ensilage de densité élevée, les teneurs en acide lactique, en acide acétique, en sucres solubles et en azote ammoniacal, de même que le rapport lactate : acétate et le pH ont été comparables à ceux observés en silo étanche. Dans l'ensilage de moyenne densité, on a assisté à une diminution significative des teneurs en acide lactique (4,10% vs 5,18%), en acide acétique (0,86% vs 1,05%) et en sucres solubles (0,57% vs 1,29%) par rapport à la densité élevée, mais le rapport lactate : acétate (4,85 vs 4,98), la teneur en azote ammoniacal (0,58% vs 0,55% éq. PB) et le pH (4,07 vs 3,84) n'ont pas été significativement différents de ceux observés à densité élevée. Dans l'ensilage de faible densité, les sucres solubles ont été épuisés (0,09% vs 0,57%) et on a observé une diminution marquée de la teneur en acide lactique (1,62% vs 4,10%) et du rapport lactate : acétate (2,66 vs 4,85), une faible augmentation de la teneur en azote ammoniacal (0,76% vs 0,58% éq. PB) et une augmentation marquée du pH (5,65 vs 4,07) par rapport à l'ensilage de moyenne densité. Les résultats indiquent donc que dans l'ensilage de densité élevée la fermentation n'a pratiquement pas été influencée par la présence de perforations dans les murs du silo. Par contre, elle a été un peu limitée à moyenne densité et très limitée à faible densité par l'épuisement des sucres résultant de l'introduction d'air par ces perforations.

En silo non couvert, on a observé en moyenne des teneurs en acide lactique (1,57% vs 3,63%) en acide acétique (0,62% vs 0,87%) et en sucres solubles (0,47% vs 0,65%), et un rapport lactate : acétate (1,95 vs 4,16) inférieurs à ceux observés en silo perforé. Par contre, la teneur en azote ammoniacal (1,09% vs 0,63% éq. PB) et le pH (6,38 vs 4,52) ont été supérieurs à ceux du silo perforé. De plus, la fermentation a été encore plus influencée par la densité de l'ensilage qu'en silo perforé. Dans l'ensilage de densité élevée, les teneurs en acide lactique, en acide acétique et en sucres solubles, ainsi que le rapport lactate : acétate, ont été moins élevés que ceux observés en silo étanche, alors que la teneur en azote ammoniacal et le pH ont été plus élevés. Dans l'ensilage de moyenne densité, on a assisté à une diminution significative des teneurs en acide lactique (1,49% vs 3,23%) et en sucres solubles (0,46% vs 0,85%), ainsi que du rapport lactate : acétate (1,79 vs 4,06), par rapport à la densité élevée, et une augmentation significative de la teneur en azote ammoniacal (1,16% vs 0,73% éq. PB) et du pH (5,69 vs 4,36).

Dans l'ensilage de faible densité, les sucres solubles ont été épuisés (0,10% vs 0,46%) de sorte que les teneurs en acide lactique (0,00% vs 1,49%) et en acide acétique (0,17% vs 0,89%), ainsi que le rapport lactate : acétate (0,01 vs 1,79), ont été moins élevés qu'à moyenne densité, et on a observé une augmentation marquée du pH (9,08 vs 5,69) par rapport à la moyenne densité. Les résultats indiquent donc que le fait de ne pas sceller la surface du silo a influencé la fermentation quelle que soit la densité, mais de façon d'autant plus marquée que la densité était faible.

Effet de la durée de conservation

La durée de conservation a influencé la fermentation de façon différente selon l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage. En silo étanche, du 85^{ième} au 245^{ième} jour de conservation, la teneur en acide lactique n'a pas varié de façon significative (5,26% vs 5,14%), la teneur en acide acétique a peu varié (augmentation significative seulement dans l'ensilage de densité élevée : 1,19% vs 1,04%) et le rapport lactate : acétate n'a diminué que légèrement (en moyenne 4,63 vs 5,10). Par contre, la teneur en sucres solubles a diminué de façon marquée (1,04% vs 1,62%) et la teneur en azote ammoniacal a augmenté (0,63% vs 0,49% éq. PB). Cela s'est traduit en une légère augmentation de pH (3,84 vs 3,81) sauf dans l'ensilage de moyenne densité. L'ensilage conservé en silo étanche a donc été relativement stable dans le silo, quelle que soit la durée de conservation.

En silo perforé, la teneur en azote ammoniacal a augmenté quelle que soit la densité du 85^{ième} au 245^{ième} jour de conservation (0,82% vs 0,44% éq. PB) alors que la teneur en sucres solubles a diminué seulement dans les ensilage de densité moyenne (0,31% vs 0,84%) et de densité élevée (1,02% vs 1,55%), puisqu'elle était nulle après 85 jours à faible densité. De plus, les teneurs en acide lactique (2,44% vs 0,81%) et en acide acétique (1,18% vs 0,24%) ont augmenté, et le pH (4,77 vs 6,52) a diminué dans l'ensilage de faible densité. Ceci semble dû au fait que dans ces conditions la fermentation a été retardée par le manque de sucres solubles. Celle qui a pu prendre place plus tard, après le 85^{ième} jour de conservation, par suite de l'hydrolyse de certains sucres complexes en sucres simples, a été plus hétérolactique, comme l'indique son plus faible rapport lactate : acétate (2,11 vs 3,20). Par contre, la diminution de la teneur en acide lactique (3,82% vs 4,39%) et du rapport lactate : acétate (4,21 vs 5,49) observée dans l'ensilage de moyenne densité ne s'est pas traduite en une augmentation significative de pH (4,16 vs 3,98).

En silo non couvert, on a assisté, entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation, à une augmentation de la teneur en azote ammoniacal quelle que soit la densité (en moyenne 1,62% vs 0,56% éq. PB), mais d'autant plus marqué que la densité était faible. L'ensilage de densité élevée s'est détérioré modérément, puisque sa teneur en sucres a diminué (0,55% vs 1,16%) sans qu'il y ait de variation significative des teneurs en acide lactique et en acide acétique, ainsi que du rapport lactate : acétate. Dans cet ensilage, l'augmentation de pH observée (4,55 vs 4,17) semble due essentiellement à la production d'azote ammoniacal (0,94% vs 0,52% éq. PB). Par contre, l'ensilage de moyenne densité s'est fortement détérioré pendant cette période. On a observé une diminution des teneurs en sucres solubles (0,15% vs 0,76%) et en acide lactique (0,99% vs 2,00%), ainsi que du rapport lactate : acétate (1,05 vs 2,53), et une augmentation des teneurs en acide acétique (0,96% vs 0,81%) et en azote ammoniacal (1,77% vs 0,54% éq. PB) et du pH (6,57 vs 4,82), qui révèlent que cet ensilage a subi une détérioration tardive prononcée. Quant à l'ensilage de faible densité, il était déjà très détérioré après 85 jours de conservation (pH de 8,73), de sorte qu'il s'est peu détérioré par la suite. Seule l'activité protéolytique a pris place entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation, puisque les teneurs en sucres solubles, en acide lactique et en acide acétique étaient déjà nulles ou presque. Ainsi, l'augmentation de pH observée (9,43 vs 8,73) semble due essentiellement à la production d'azote ammoniacal (2,16% vs 0,61% éq. PB), comme dans l'ensilage de faible densité.

Effet de l'inoculation avec le *Fusarium graminearum*

L'ensilage de maïs inoculé avec le *F. graminearum* a produit plus d'acide lactique que le non inoculé (3,55% vs 3,38%). De plus, son pH a été plus bas que celui du maïs non inoculé 1° dans l'ensilage de faible densité en silo perforé (5,50 vs 5,80) et 2° dans l'ensilage de moyenne densité en silo non couvert (5,45 vs 5,94). Somme toute, l'inoculation avec le *F. graminearum* n'a pas influencé négativement la fermentation. Au contraire, la fermentation semble avoir été légèrement améliorée par l'inoculation, du moins dans certaines conditions. Cet effet bénéfique pourrait être dû à la compétition des *Fusarium* avec des microorganismes indésirables. Il est difficile d'expliquer pourquoi cette compétition a eu un effet sur le pH final seulement lorsque la fermentation a été retardée (ensilage de faible densité en silo perforé) et lorsque la détérioration a été tardive (ensilage de moyenne densité en silo non couvert). Ce pourrait être lié au maintien d'un pH peu acide (entre 4,8 et 6,6) quelle que soit la durée de conservation de ces ensilages.

2.4 Valeur nutritive

Protéines brutes

La teneur en protéines brutes (PB) a été de 7,12% à la mise en silos alors qu'elle a été de 8,62% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été comparable quelle que soit la densité en silo étanche (7,45% en moyenne). Par contre, en silo perforé elle a été plus élevée à faible densité (8,50%) qu'à densité moyenne (7,68%) et à densité élevée (7,39%). En silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (12,67%) qu'à densité moyenne (10,14%), et à densité moyenne qu'à densité élevée (8,88%). De plus, la teneur en protéines brutes n'a pas été influencée par la durée de conservation en silo étanche alors qu'elle a été plus élevée après 245 jours qu'après 85 jours en silo perforé à faible densité (9,53% vs 7,47%) et à moyenne densité (8,00% vs 7,37%), de même qu'en silo non couvert quelle que soit la densité (en moyenne 11,99% vs 9,13%). Cependant, elle n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 17).

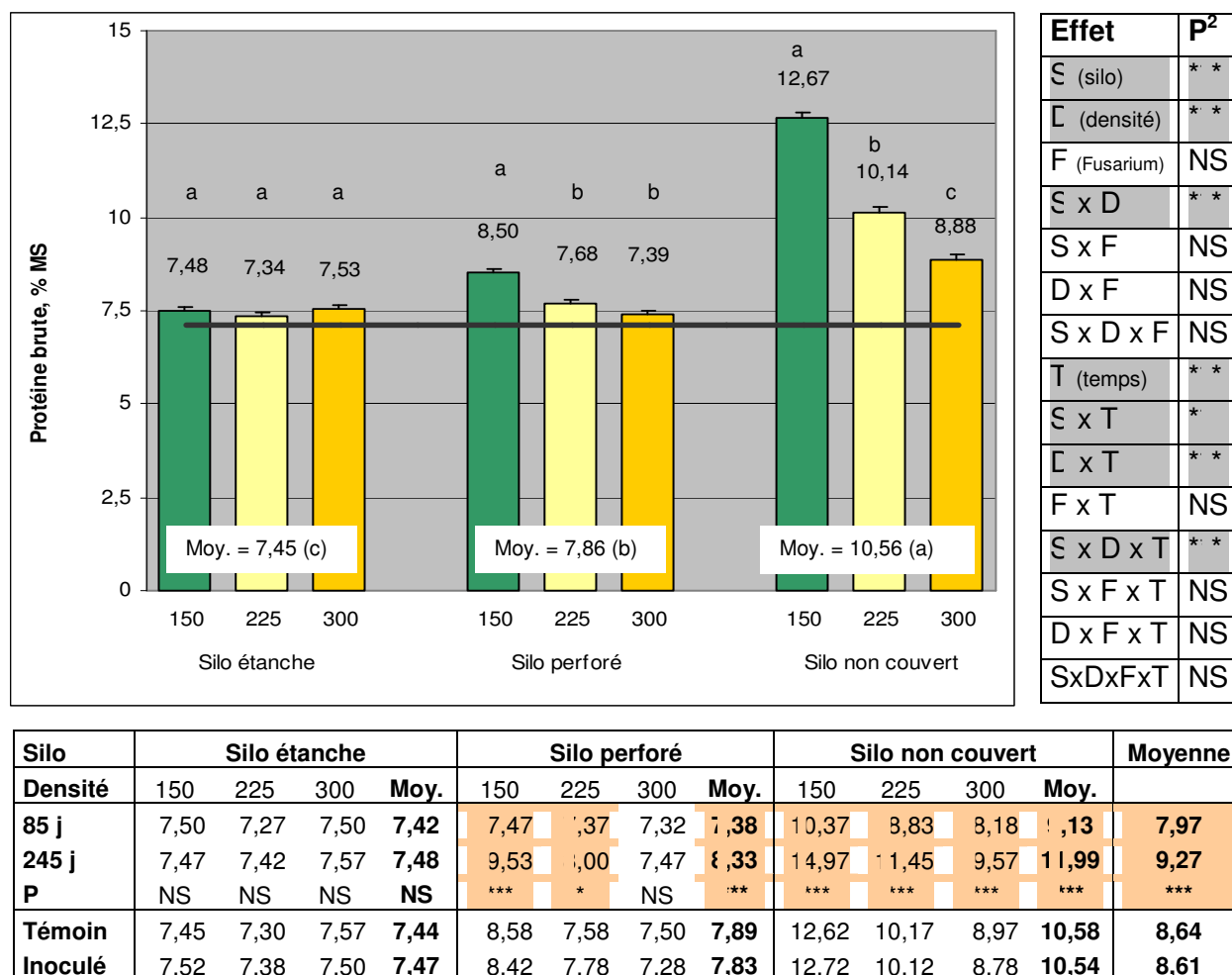


Figure 17. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en protéines brutes de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Solubilité des protéines

La solubilité des protéines a été de 33,48% à la mise en silos alors qu'elle a été de 37,08% en moyenne à l'ouverture des silos. En fait, elle a alors été comparable quelle que soit la densité en silo étanche (39,83% en moyenne). Par contre, en silo perforé elle a été moins élevée à faible densité (32,23%) qu'à densité moyenne (38,01%) et à densité élevée (38,77%) alors qu'en silo non couvert elle a été moins élevée à faible densité (34,07%) et moyenne densité (32,49%) qu'à densité élevée (38,67%). Par ailleurs, la solubilité des protéines a augmenté de façon significative avec la durée de conservation quelle que soit l'étanchéité du silo, mais de façon plus prononcée en silo perforé (+7,08% soit 39,87% vs 32,79%) qu'en silo étanche (+4,29% soit 41,97% vs 37,68%) et en silo non couvert (+3,57% soit 36,96% vs 33,39%). Cependant, elle n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 18).

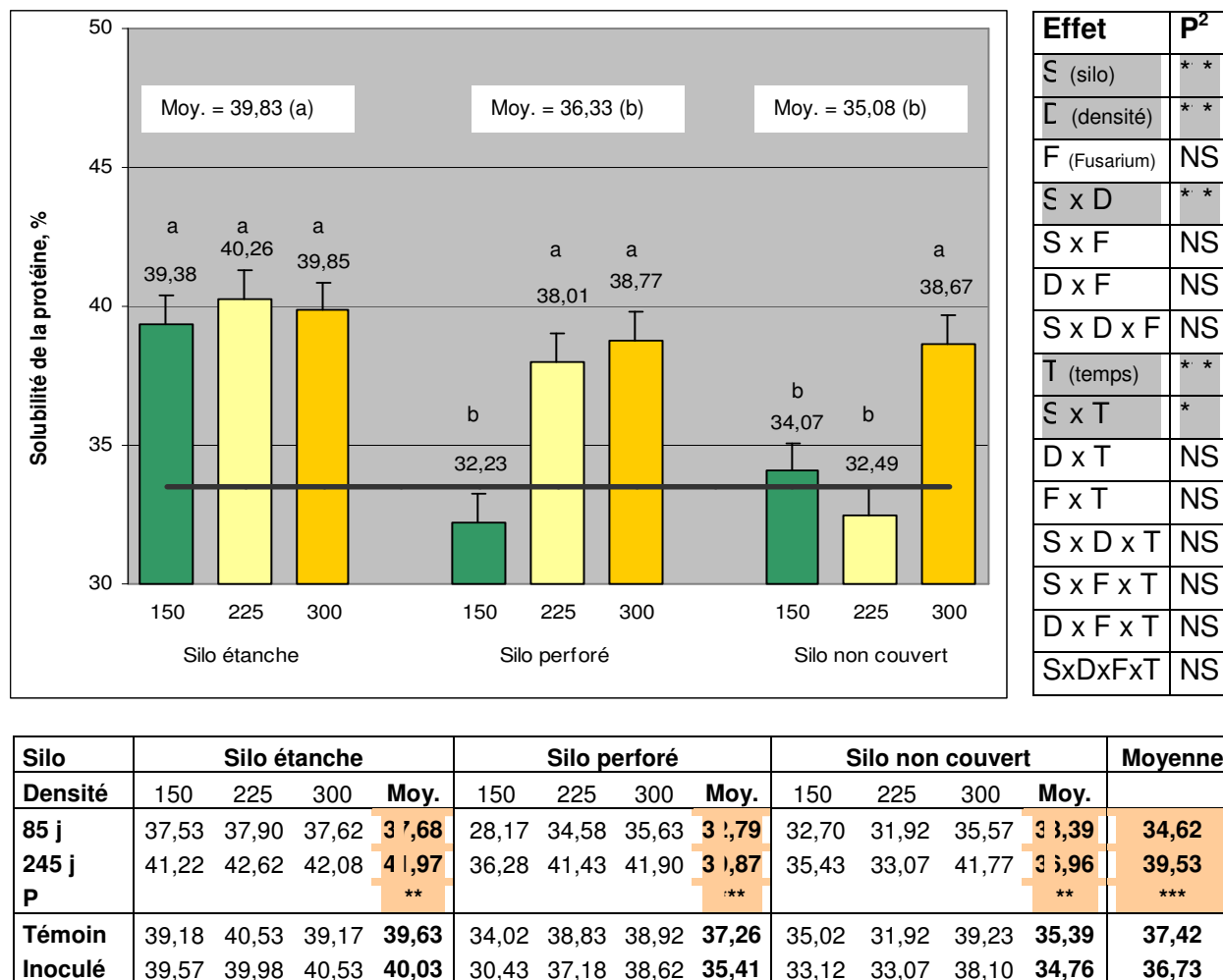


Figure 18. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la solubilité des protéines de l'ensilage de maïs¹

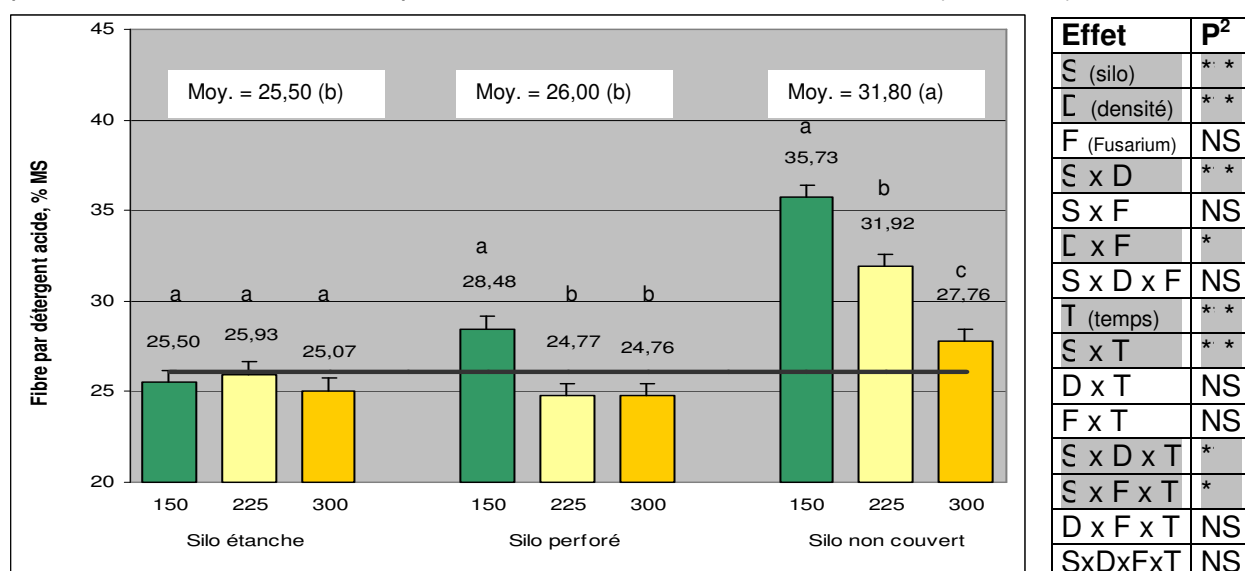
¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Fibres par détergent acide

La teneur en fibres par détergent acide (fibres ADF) a été de 26,05% à la mise en silos et de 27,77% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été semblable quelle que soit la densité en silo étanche (25,50% en moyenne). En silo perforé, elle a été plus élevée à faible densité (28,48%) qu'à densité moyenne (24,77%) et à densité élevée (24,76%). En silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (35,73%) qu'à densité moyenne (31,92%), et à densité moyenne qu'à densité élevée (27,76%). Par ailleurs, la teneur en fibres par détergent acide a augmenté avec la durée de conservation en silo perforé à faible densité (31,15% vs 25,80%) et à moyenne densité (25,78% vs 23,75%), de même qu'en silo non couvert quelle que soit la densité (en moyenne 34,89% vs 28,71%) (figure 19). Finalement, en silo étanche le maïs inoculé avec le *F. graminearum* a connu une augmentation de sa teneur en fibres par détergent acide (+1,40% soit 26,13% vs 24,73%) entre le 85^{ième} jour et le 245^{ième} jour de conservation, mais pas le non inoculé (-0,35% soit 25,39% vs 25,74%). Par contre, en silo perforé l'augmentation a été comparable dans le maïs inoculé (+ 2,56% soit 27,39% vs 24,83%) et non inoculé (+3,24% soit 27,51% vs 24,27%) alors qu'en silo non couvert elle a été plus importante dans le maïs non inoculé (+7,38% soit 35,56% vs 28,18%) que dans l'inoculé (+4,98% soit 34,22% vs 29,24%). Ainsi, en silo étanche l'augmentation de la teneur en fibres par détergent acide entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation a été plus prononcée dans le maïs inoculé que dans le non inoculé alors que ce fut le contraire en silo non couvert (annexe 2).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	26,21	25,28	24,22	25,24	25,80	23,75	24,10	24,55	31,65	28,72	25,77	28,71	26,17
245 j	24,78	26,58	25,92	25,76	31,15	23,78	25,42	26,45	39,80	35,12	29,75	31,89	29,37
P	NS	NS	NS	NS	***	*	NS	***	***	***	***	***	***
Témoin	26,32	25,43	24,95	25,57	28,92	23,72	25,03	25,89	35,73	31,65	28,22	31,87	27,77
Inoculé	24,68	26,43	25,18	25,43	28,03	25,82	24,48	26,11	35,72	32,18	27,30	31,73	27,76

Figure 19. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en fibres par détergent acide de l'ensilage de maïs¹

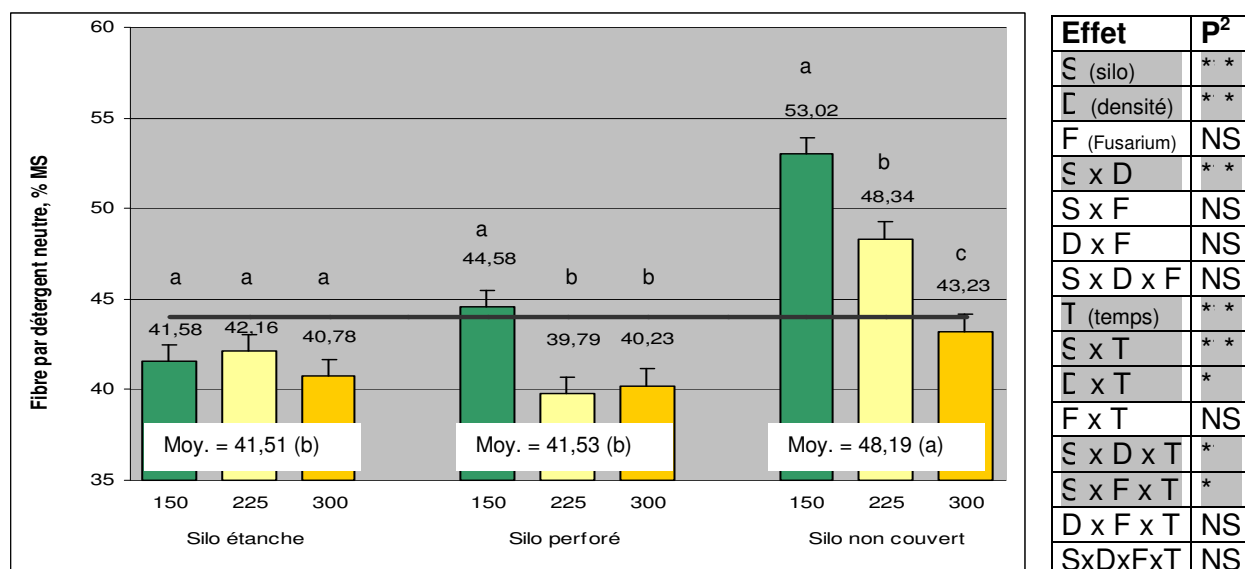
¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Fibres par détergent neutre

La teneur en fibres par détergent neutre (fibres NDF) a été de 43,98% à la mise en silos et de 43,74% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été semblable quelle que soit la densité (41,51% en moyenne) en silo étanche. En silo perforé, elle a été plus élevée à faible densité (44,58%) qu'à densité moyenne (39,79%) et à densité élevée (40,23%). En silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (53,02%) qu'à densité moyenne (48,34%), et à densité moyenne qu'à densité élevée (43,23%). Par ailleurs, la teneur en fibres par détergent neutre a augmenté avec la durée de conservation en silo perforé à faible densité (48,15% vs 41,00%) et en silo non couvert à toutes densités (52,26% vs 44,13% en moyenne) (figure 20). Finalement, en silo étanche le maïs inoculé avec le *F. graminearum* a connu une augmentation de sa teneur en fibres par détergent neutre entre le 85^{ième} jour et le 245^{ième} jour de conservation (+2,06% soit 42,38% vs 40,32%) mais pas le non inoculé (-1,24% soit 41,04% vs 42,28%). Par contre, en silo perforé l'augmentation a été comparable dans le maïs inoculé (+3,13% soit 43,22% vs 40,09%) et non inoculé (+3,87% soit 43,34% vs 39,47%) alors qu'en silo non couvert elle a été plus importante dans le non inoculé (+9,80% soit 52,26% vs 43,18%) que dans l'inoculé (+6,44% soit 51,53% vs 45,09%). Ainsi, en silo étanche l'augmentation de la teneur en fibres par détergent neutre entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation a été plus prononcée dans le maïs inoculé que dans le non inoculé alors que ce fut le contraire en silo non couvert (annexe 2).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	42,57	41,73	39,60	41,30	41,00	38,88	39,45	39,78	47,00	44,55	40,85	44,13	41,74
245 j	40,58	42,58	41,97	41,71	43,15	40,70	41,00	41,28	53,03	48,13	43,60	48,26	45,75
P	NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	**	***	***	***	***	***
Témoin	42,73	41,63	40,62	41,66	45,22	38,28	40,72	41,41	52,58	48,03	43,62	48,08	43,71
Inoculé	40,42	42,68	40,95	41,35	43,93	41,30	39,73	41,66	53,45	48,65	42,83	48,31	43,77

Figure 20. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en fibres par détergent neutre de l'ensilage de maïs¹

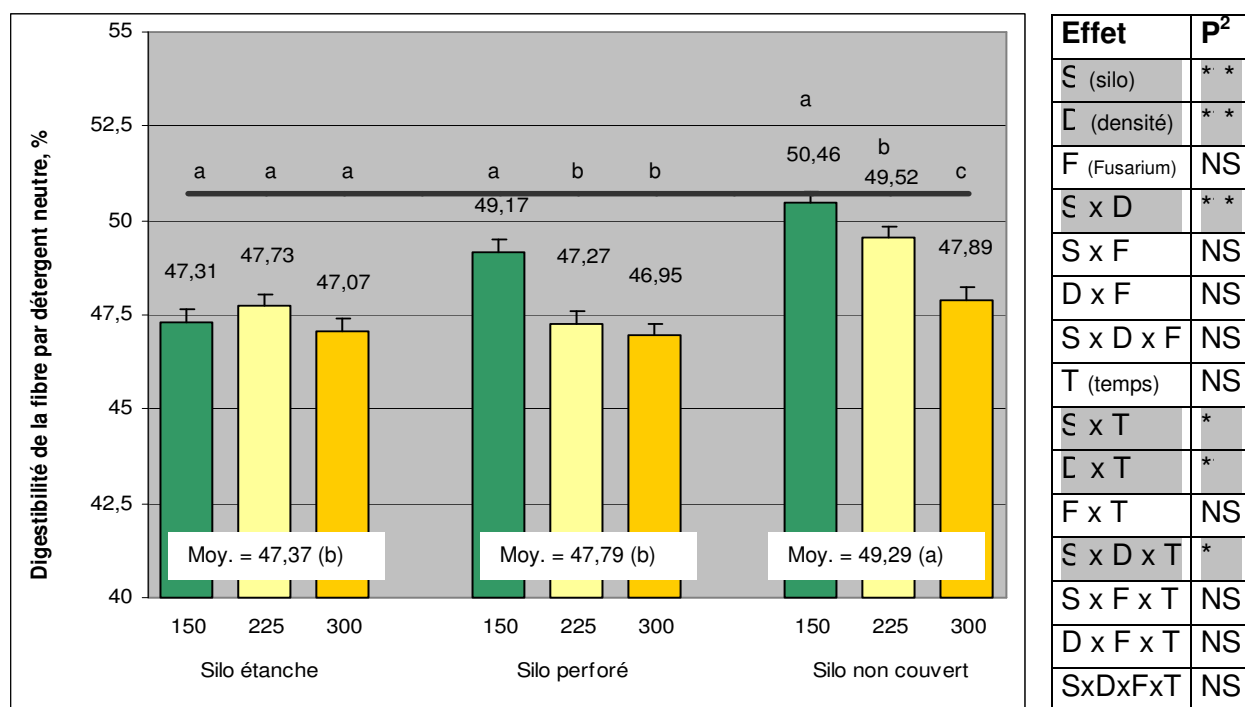
¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Digestibilité des fibres par détergent neutre

La digestibilité des fibres par détergent neutre (fibres NDF) a été de 50,73% à la mise en silos et de 48,15% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été semblable quelle que soit la densité en silo étanche (47,37% en moyenne). En silo perforé, elle a été plus élevée à faible densité (49,17%) qu'à densité moyenne (47,27%) et à densité élevée (46,95%). En silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (50,46%) qu'à densité moyenne (49,52%), et à densité moyenne qu'à densité élevée (47,89%). Par ailleurs, la digestibilité des fibres par détergent neutre a diminué après le 85^{ième} jour de conservation en silo perforé dans l'ensilage de faible densité (48,09% vs 50,24%) qui a subi une fermentation tardive. Cependant, elle n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 21).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	47,74	47,66	46,87	47,42	50,24	47,27	46,95	48,15	50,41	49,20	47,69	49,10	48,22
245 j	46,88	47,80	47,28	47,32	48,09	47,27	46,95	47,44	50,52	49,84	48,09	49,48	48,08
P	NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
Témoin	47,70	47,59	47,01	47,43	49,31	47,05	46,91	47,76	50,45	49,52	47,94	49,30	48,16
Inoculé	46,93	47,87	47,14	47,31	49,02	47,49	46,99	47,83	50,48	49,53	47,84	49,28	48,14

Figure 21. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la digestibilité des fibres par détergent neutre de l'ensilage de maïs¹

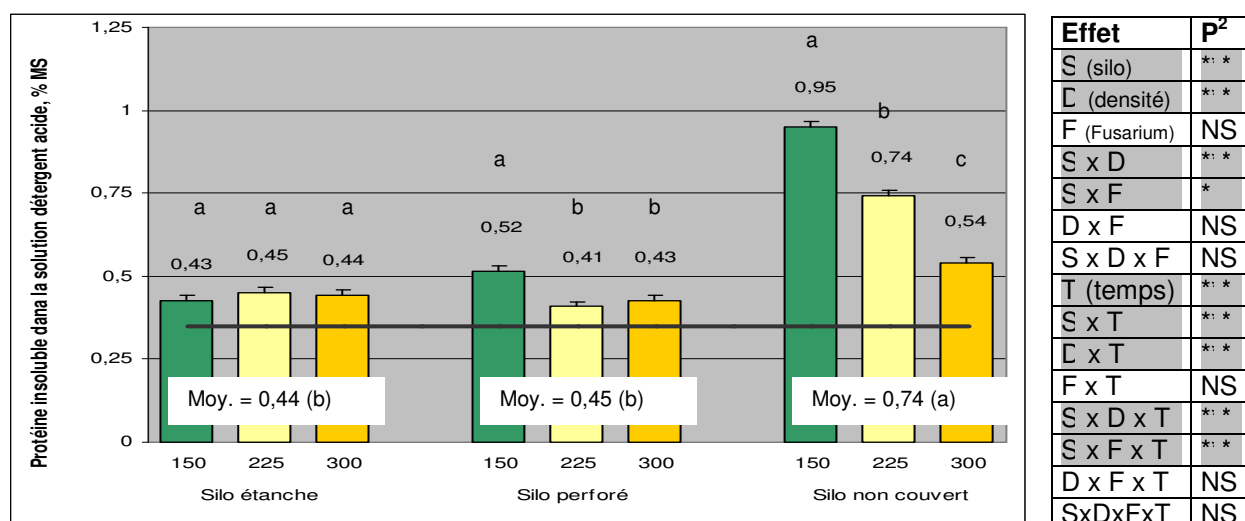
¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Protéines insolubles dans la solution détergent acide

La teneur en protéines insolubles dans la solution détergent acide (PB-ADF) a été de 0,35% à la mise en silos et de 0,54% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été semblable quelle que soit la densité en silo étanche (0,44% en moyenne). En silo perforé, elle a été plus élevée à faible densité (0,52%) qu'à densité moyenne (0,41%) et à densité élevée (0,43%). En silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (0,95%) qu'à densité moyenne (0,74%) et à densité élevée (0,54%). Par ailleurs, la teneur en protéines insolubles dans la solution détergent acide a augmenté avec la durée de conservation en silo étanche à densité élevée (0,48% vs 0,40%), en silo perforé à faible densité (0,67% vs 0,37%) et à moyenne densité (0,45% vs 0,37%), et en silo non couvert quelle que soit la densité (0,88% vs 0,61% en moyenne) (figure 22). Après 85 jours de conservation, elle a été plus faible dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans le non inoculé en silo étanche (0,39% vs 0,48%) alors que ce fut le contraire en silo non couvert (0,64% vs 0,57%). Mais par la suite, entre le 85^{ième} jour et le 245^{ième} jour de conservation, elle a augmenté dans le maïs inoculé (+0,07% soit 0,46% vs 0,39%) mais pas dans le non inoculé (-0,05% soit 0,43% vs 0,48%), en silo étanche. Par contre, en silo perforé elle a augmenté de façon comparable dans le maïs inoculé (+0,13% soit 0,52% vs 0,39%) et non inoculé (+0,15% soit 0,52% vs 0,37%) alors qu'en silo non couvert l'augmentation a été plus importante dans le maïs non inoculé (+0,32% soit 0,88% vs 0,57%) que dans l'inoculé (+0,24% soit 0,88% vs 0,64%). Ainsi, en silo étanche elle a augmenté de façon plus prononcée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation dans le maïs inoculé que dans le non inoculé alors que ce fut le contraire en silo non couvert (annexe 2).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	0,45	0,45	0,40	0,43	0,37	0,37	0,40	0,38	0,73	0,63	0,45	0,61	0,47
245 j	0,40	0,45	0,48	0,44	0,67	0,45	0,45	0,52	1,17	0,85	0,63	0,88	0,62
P	NS	NS	**	NS	***	**	NS	***	***	***	***	***	***
Témoin	0,45	0,45	0,47	0,46	0,52	0,38	0,43	0,44	0,90	0,75	0,63	0,73	0,54
Inoculé	0,40	0,45	0,42	0,42	0,52	0,43	0,42	0,46	1,00	0,73	0,55	0,76	0,54

Figure 22. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en protéines insolubles dans la solution détergent acide de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$). Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Protéines insolubles dans la solution détergent neutre

La teneur en protéines insolubles dans la solution détergent neutre (PB-NDF) a été inférieure à 1,5% à la mise en silos et de 1,58% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été semblable quelle que soit la densité en silo étanche, (1,40% en moyenne) et en silo perforé (1,42% en moyenne). Par contre en silo non couvert, elle a été plus élevée à faible densité (2,54%) qu'à densité moyenne (1,78%), et à densité moyenne qu'à densité élevée (1,42%). Par ailleurs, la teneur en protéines insolubles dans la solution détergent neutre a augmenté avec la durée de conservation en silo non couvert à faible densité (3,37% vs 1,72%) et à moyenne densité (2,17% vs 1,40%). Cependant, elle n'a pas été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 23).

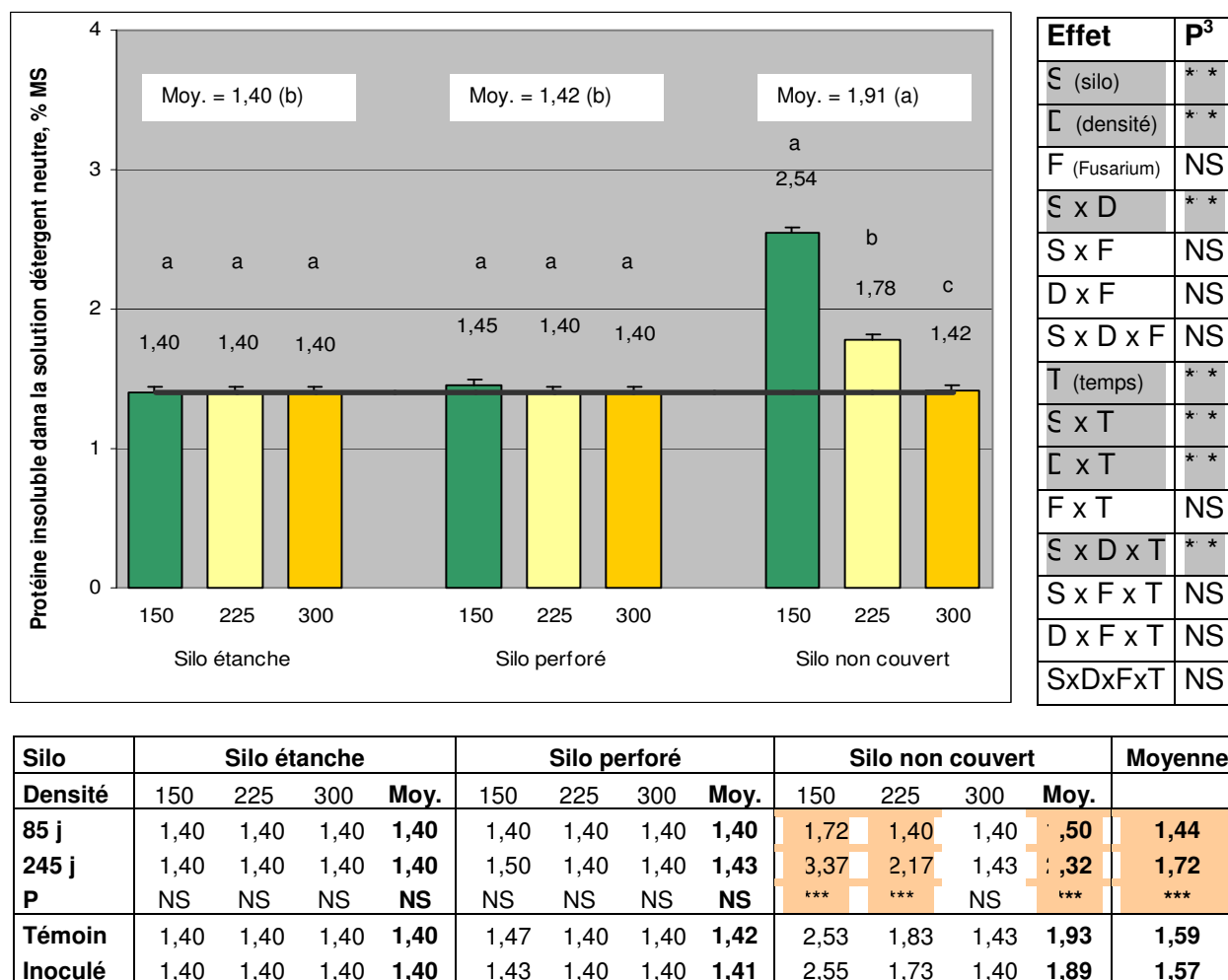


Figure 23. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en protéines insolubles dans la solution détergent neutre de l'ensilage de maïs^{1,2}

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

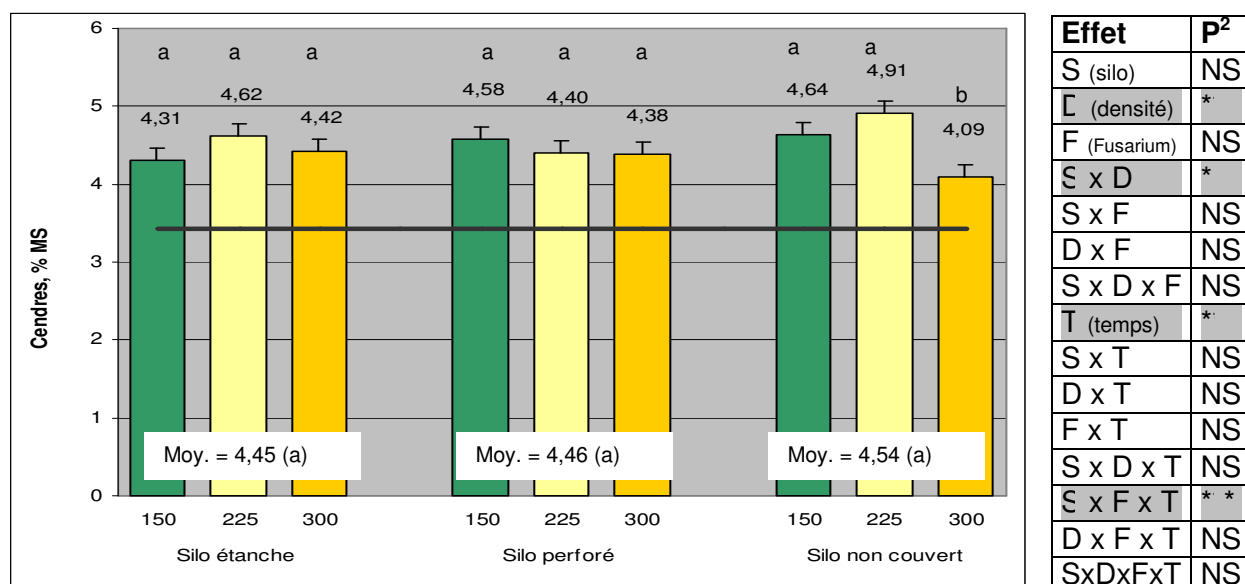
Le trait horizontal indique que la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos est inférieure à 1,5%.

² Tous les échantillons qui avaient une teneur inférieure à la limite de détection (1,5%) se sont vus attribuer une teneur de 1,4%.

³ Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Cendres

La teneur en cendres a été de 3,43% à la mise en silos contre 4,48% en moyenne à l'ouverture des silos. À ce moment, elle a été semblable quelle que soit la densité en silo étanche (4,45% en moyenne) et en silo perforé (4,46% en moyenne) alors qu'elle a été plus élevée à faible densité (4,64%) et à moyenne densité (4,91%) qu'à densité élevée (4,09%) en silo non couvert. Par ailleurs, la teneur en cendres a augmenté avec la durée de conservation (4,61% vs 4,36% en moyenne), mais l'augmentation a été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum* de façon différente selon l'étanchéité du silo (figure 24). Après 85 jours de conservation, elle a été plus faible dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans le non inoculé en silo étanche (4,03% vs 4,72%) alors que ce fut le contraire en silo non couvert (4,66% vs 3,98%). Mais par la suite, entre le 85^{ième} jour et le 245^{ième} jour de conservation, elle a augmenté dans le maïs inoculé (+0,55% soit 4,58% vs 4,03%) mais pas dans le non inoculé (−0,26% soit 4,46% vs 4,72%) en silo étanche. Par contre, en silo perforé elle a augmenté de façon comparable dans le maïs inoculé (+0,26% soit 4,63% vs 4,37%) et non inoculé (+0,04% soit 4,43% vs 4,39%) alors qu'en silo non couvert l'augmentation a été plus importante dans le maïs non inoculé (+1,05% soit 5,03% vs 3,98%) que dans l'inoculé (−0,14% soit 4,52% vs 4,66%). Ainsi, en silo étanche elle a augmenté de façon plus prononcée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation dans le maïs inoculé que dans le non inoculé alors que ce fut le contraire en silo non couvert (annexe 2).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	4,35	4,57	4,22	4,38	4,42	4,35	4,37	4,38	4,33	4,52	4,10	4,32	4,36
245 j	4,27	4,67	4,62	4,52	4,75	4,45	4,40	4,53	4,95	5,30	4,08	4,78	4,61
P													**
Témoin	4,52	4,58	4,67	4,59	4,52	4,32	4,40	4,41	4,58	5,02	3,92	4,51	4,50
Inoculé	4,10	4,65	4,17	4,31	4,65	4,48	4,37	4,50	4,70	4,80	4,27	4,59	4,47

Figure 24. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la teneur en cendres de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).
Le trait horizontal indique la moyenne de 6 échantillons composites au moment de la mise en silos.

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Synthèse

Globalement la valeur nutritive de l'ensilage de maïs a été plus influencée par la densité en silo non couvert qu'en silo perforé, et en silo perforé qu'en silo étanche. En effet, en silo étanche, la valeur nutritive a été semblable quelle que soit la densité (en moyenne 7,45% de PB, 39,83% de solubilité des protéines, 25,50% de fibres ADF, 41,51% de fibres NDF, 47,37% de digestibilité des fibres NDF, 0,44% de PB-ADF, 1,40% de PB-NDF et 4,45% de cendres). Par contre, en silo perforé l'ensilage de maïs a présenté des teneurs plus élevées en PB (8,50% vs 7,68% et 7,39%, respectivement), en fibres ADF (28,48% vs 24,77% et 24,76%, respectivement), en fibres NDF (44,58% vs 39,79% et 40,23%, respectivement) et en PB-ADF (0,52% vs 0,41% et 0,43%, respectivement), une moins grande solubilité des protéines (32,23% vs 38,01% et 38,77%, respectivement) et une plus grande digestibilité des fibres NDF (49,17% vs 47,27% et 46,95%, respectivement) à faible densité qu'à densité moyenne et à densité élevée. Par contre, les teneurs en PB-NDF (1,40% à 1,45 %) et en cendres (4,38% à 4,58%) ont été comparables quelle que soit la densité. En silo non couvert, on a noté l'augmentation des teneurs en PB (8,88%, 10,14% et 12,67%, respectivement), en fibres ADF (27,76%, 31,92% et 35,73%, respectivement), en fibres NDF (43,23%, 48,34% et 53,02%, respectivement) en PB-ADF (0,54%, 0,74% et 0,95%, respectivement), en PB-NDF (1,42%, 1,78% et 2,54%, respectivement), et de la digestibilité des fibres NDF (47,89%, 49,52% et 50,46%, respectivement) à mesure que la densité diminuait, alors que la teneur en cendres a été plus élevée (4,64% et 4,91% vs 4,09%) et la solubilité des protéines moins élevée (34,07% et 32,49% vs 38,67%) à faible densité et à moyenne densité qu'à densité élevée.

Globalement, la valeur nutritive de l'ensilage de maïs s'est modifiée plus avec la durée de conservation, c'est-à-dire entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation, en silo perforé qu'en silo étanche, et en silo non couvert qu'en silo perforé. En effet, si la teneur en cendres a augmenté légèrement avec la durée de conservation (en moyenne 4,61% après 245 jours vs 4,36% après 85 jours) quelle que soit l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage, ce ne fut pas le cas pour les autres paramètres analysés. En silo étanche, la solubilité des protéines a augmenté de façon comparable quelle que soit la densité (en moyenne 41,97% vs 37,68%), et les PB-ADF ont augmenté à densité élevée (0,48% vs 0,40%), alors que les autres paramètres ont été relativement stables. En silo perforé, la solubilité des protéines a augmenté de façon comparable quelle que soit la densité (en moyenne 39,87% vs 32,79%) alors que les PB (en moyenne 8,33% vs 7,38%), les fibres ADF (en moyenne 27,45% vs 24,55%) et les PB-ADF (en moyenne 0,52% vs 0,38%) ont augmenté de façon significative à faible densité et à moyenne densité mais pas à densité élevée. De plus, les fibres NDF ont augmenté (48,15% vs 41,00%) et leur digestibilité a diminué (48,09% vs 50,24%) de façon significative à faible densité mais pas à densité moyenne et à densité élevée. En silo non couvert, les PB (en moyenne 11,99% vs 9,13%), les fibres ADF (en moyenne 34,89% vs 28,71%), les fibres NDF (en moyenne 52,26% vs 44,13%) et les PB-ADF (en moyenne 0,88% vs 0,61%) ont augmenté quelle que soit la densité, mais d'autant plus que la densité était faible. De plus, la solubilité des protéines a augmenté quelle que soit la densité (en moyenne 36,96% vs 33,39%) alors que les PB-NDF ont augmenté seulement à faible densité (3,37% vs 1,72%) et à moyenne densité (2,17% vs 1,40%).

L'inoculation avec le *F. graminearum* a peu influencé la valeur nutritive de l'ensilage de maïs. En effet, la teneur en PB et la solubilité des protéines, de même que les PB-NDF et la digestibilité des fibres NDF ont été semblables quelle que soit la durée de conservation dans le maïs inoculé et non inoculé. Cependant, les résultats indiquent que les fibres ADF, les fibres NDF, les PB-ADF et les cendres ont augmenté à un rythme différent selon l'étanchéité des silos, dans le maïs inoculé et le maïs non inoculé : en silo étanche elles ont été plus faibles après 85 jours de conservation (PB-ADF et cendres) et/ou ont augmenté de façon plus prononcée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour (fibres ADF, fibres NDF, PB-ADF et cendres) dans le maïs inoculé que dans le maïs non inoculé, alors que ce fut le contraire en silo non couvert.

On retient principalement que dans les ensilages bien fermentés, on a assisté pendant la conservation en silos à une augmentation de la solubilité des protéines (résultat de la protéolyse) et de la teneur en cendres (résultat de la perte de matière sèche), et une diminution de la digestibilité des fibres par détergent neutre (résultat de l'hydrolyse enzymatique des hydrates de carbone structuraux les plus digestibles). Ainsi, en silo étanche la solubilité des protéines est passé de 33,48% à 39,83%, la teneur en cendres de 3,43% à 4,48% et la digestibilité des fibres par détergent neutre de 50,73% à 47,37%.

Dans les ensilages qui se sont détériorés, la teneur en cendres a atteint des niveaux encore plus élevés que dans les ensilages bien fermentés (résultat d'une perte de matière sèche accrue). Par contre, la solubilité des protéines a été plus basse que dans les ensilages bien fermentés (résultat d'une protéolyse moins importante), soit à des niveaux plus ou moins comparables à celui observé avant fermentation, alors que la digestibilité des fibres par détergent neutre a été plus élevée que dans les ensilages bien fermentés (résultat de l'hydrolyse enzymatique moins importante), soit à des niveaux comparables ou légèrement inférieurs à celui observé avant fermentation. Quant aux autres paramètres analysés, soit les protéines brutes, les fibres par détergent acide, les fibres par détergent neutre, les protéines insolubles dans la solution détergent acide et les protéines insolubles dans la solution détergent neutre, ils ont tous augmenté pour atteindre des niveaux plus élevés que dans les ensilages bien fermentés. En fait, presque tous ces paramètres ont présenté des niveaux comparables quelle que soit la densité en silo étanche, et plus élevés à faible densité qu'à densité moyenne et à densité élevée en silo perforé. Par contre, en silo non couvert ils ont été plus élevés à faible densité qu'à moyenne densité, et à moyenne densité qu'à densité élevée. Dans ce type de silo, certains paramètres (PB, fibres ADF et PB-ADF) ont atteint, même dans l'ensilage de densité élevée, des niveaux qui semblent plus élevés que ceux observés dans les ensilages bien fermentés.

3. Test de stabilité aérobie

3.1 Échauffement

Dans le test de stabilité aérobie, la température de l'ensilage a été influencée de façon importante par l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage et la durée de conservation (saison d'ouverture des silos), alors qu'elle a peu été influencée par l'inoculation avec le *F. graminearum*.

Ensilage conservé en silo pendant 85 jours

Au début du test de stabilité aérobie réalisé en hiver, c'est-à-dire avec le maïs ensilé pendant 85 jours, la température de l'ensilage était légèrement inférieure ou égale à 10°C. Par la suite, elle a augmenté relativement lentement et de façon assez comparable quelle que soit la densité dans l'ensilage provenant de silos étanches, pour atteindre 20°C après 35 à 65 heures d'exposition à l'air et son maximum (34°C à 37°C) seulement après 180 à 285 heures d'exposition à l'air. Dans l'ensilage provenant de silos perforés, la température a atteint 20°C plus rapidement à faible densité et à moyenne densité (environ 10 h) qu'à densité élevée (environ 45 h). La température maximale (42°C à 44°C) a également été atteinte plus rapidement à faible densité et à moyenne densité (70 à 85 h) qu'à densité élevée (145 h). Ceci démontre bien qu'il est plus important de réaliser un ensilage de densité élevée en silo perforé qu'en silo étanche. Quant à l'ensilage provenant de silos non couverts, il a atteint une température de 20°C très rapidement (10 à 15 h) quelle que soit la densité mais sa température maximale a été moins élevée et atteinte plus tard à faible densité (environ 43°C après 75 heures) qu'à densité moyenne et à densité élevée (environ 52°C après 40 à 55 heures). Ceci est probablement la conséquence de l'épuisement des sucres et du très grand développement du mycélium dans l'ensilage de faible densité au début du test de stabilité aérobie (figure 25).

Ensilage conservé en silo pendant 245 jours

Au début du test de stabilité aérobie réalisé en été, c'est-à-dire avec le maïs ensilé pendant 245 jours, la température de l'ensilage était un peu supérieure à 20°C. Dans l'ensilage provenant de silos étanches, elle s'est maintenue à environ 20°C pendant 30 à 45 heures et a augmenté relativement lentement par la suite et de façon assez comparable quelle que soit la densité, pour atteindre son maximum (41°C à 46°C) seulement après 155 à 165 heures d'exposition à l'air. Dans l'ensilage provenant de silos perforés, elle a atteint son maximum plus rapidement à faible densité (30 h) qu'à densité moyenne et à densité élevée (125-135 h). Quant à l'ensilage provenant de silos non couverts, il s'est échauffé beaucoup moins et atteint son maximum beaucoup plus tard à faible densité (30°C après 130 h) qu'à densité moyenne (46°C après 20 h) et à densité élevée (48°C après 45 h). Dans ce type de silo, l'écart de température entre l'ensilage de faible densité et ceux de densité moyenne et de densité élevée était plus grand après 245 jours qu'après 85 jours (figure 26).

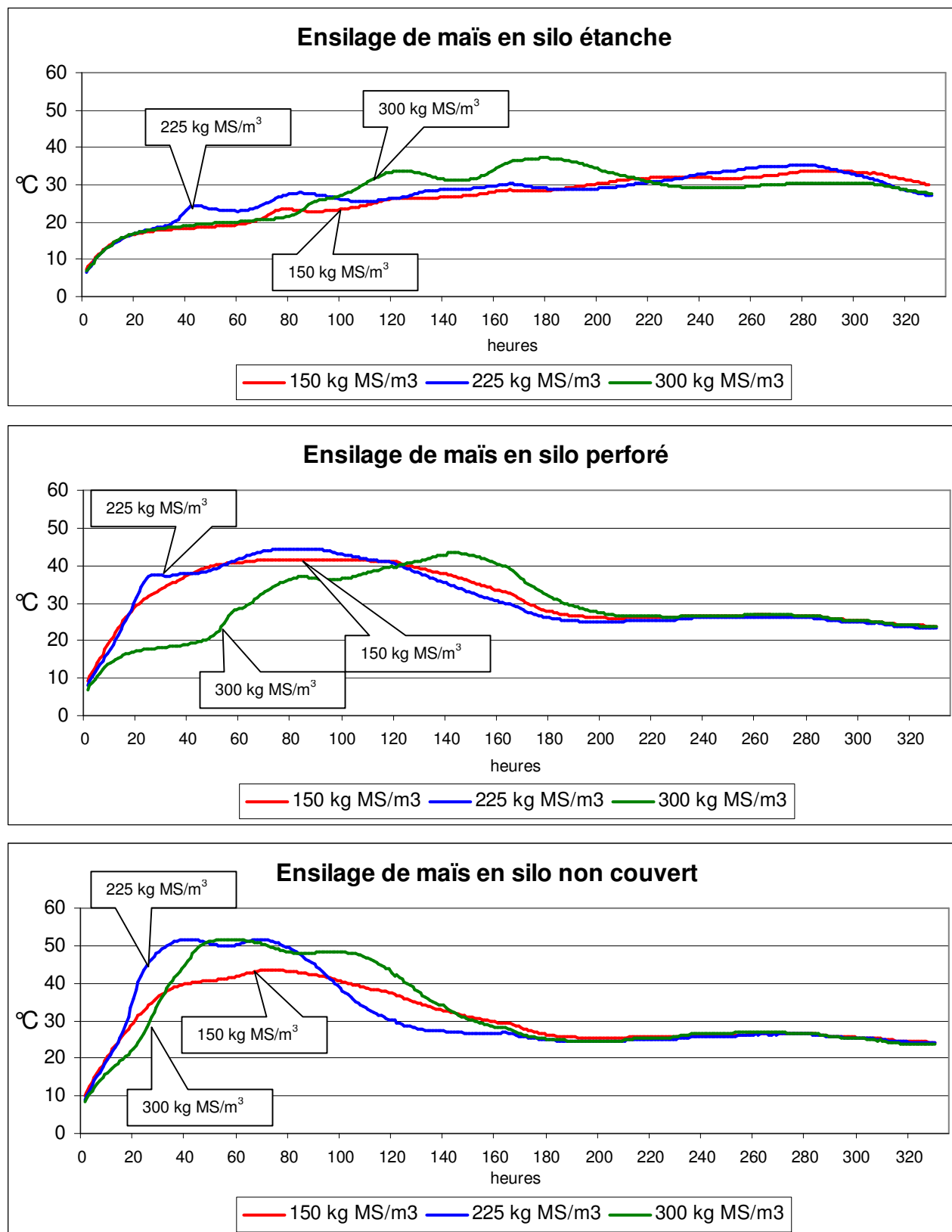


Figure 25. Effet de l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage de maïs sur l'évolution de sa température dans le test de stabilité aérobie réalisé après 85 jours de conservation

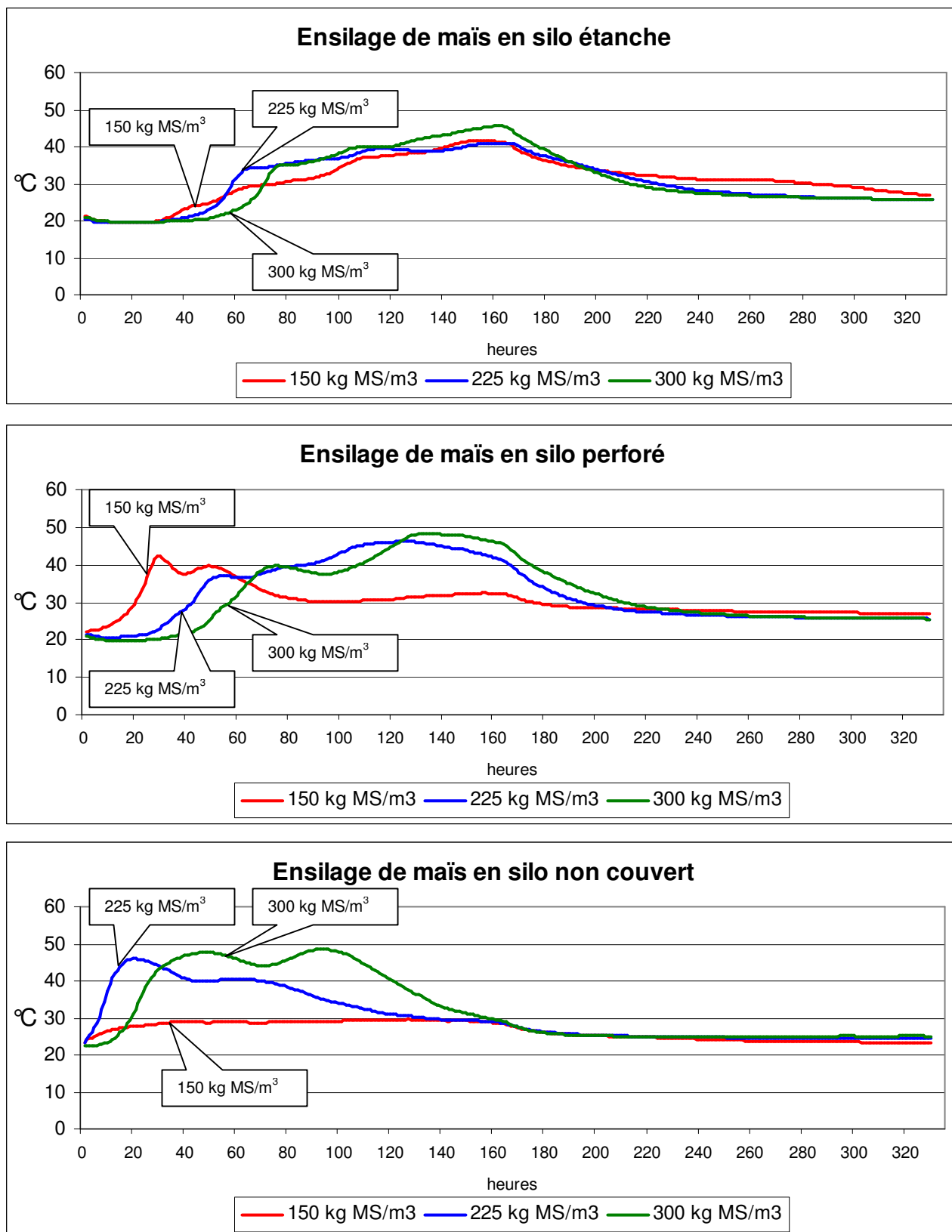


Figure 26. Effet de l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage de maïs sur l'évolution de sa température dans le test de stabilité aérobie réalisé après 245 jours de conservation

Indice de stabilité aérobie

Le temps d'exposition à l'air nécessaire pour faire augmenter la température de l'ensilage de 2°C par rapport à des témoins inertes est un indice de sa stabilité aérobie puisqu'il nous indique le moment où il commence à s'échauffer. En moyenne, l'échauffement est survenu beaucoup plus rapidement dans l'ensilage provenant des silos non couverts que dans celui provenant de silos perforés (4,61 h vs 21,46 h) qui s'est lui-même échauffé plus rapidement que celui provenant de silos étanches (69,53 h). De plus, l'échauffement a commencé très tard quelle que soit la densité en silo étanche (plus de 60 h), d'autant plus tard que la densité était élevée en silo perforé (3,67 h, 15,79 h et 44,92 h pour des densités de 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement) et légèrement plus tard à densité élevée qu'à faible densité et à moyenne densité en silo non couvert (7,50 h vs 2,58 h et 3,75 h, respectivement). En fait, l'ensilage de maïs conservé en silo pendant 245 jours a commencé à s'échauffer plus rapidement à la sortie du silo que celui conservé pendant 85 jours 1° en silo étanche à faible densité (55,50 h vs 117,33 h), 2° en silo perforé à densité moyenne (10,42 h vs 21,17 h) et à densité élevée (36,00 h vs 53,83 h) et 3° en silo non couvert quelle que soit la densité (en moyenne 0,00 h vs 9,22 h). Finalement, l'indice de stabilité aérobie n'a pas été influencé par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 27).

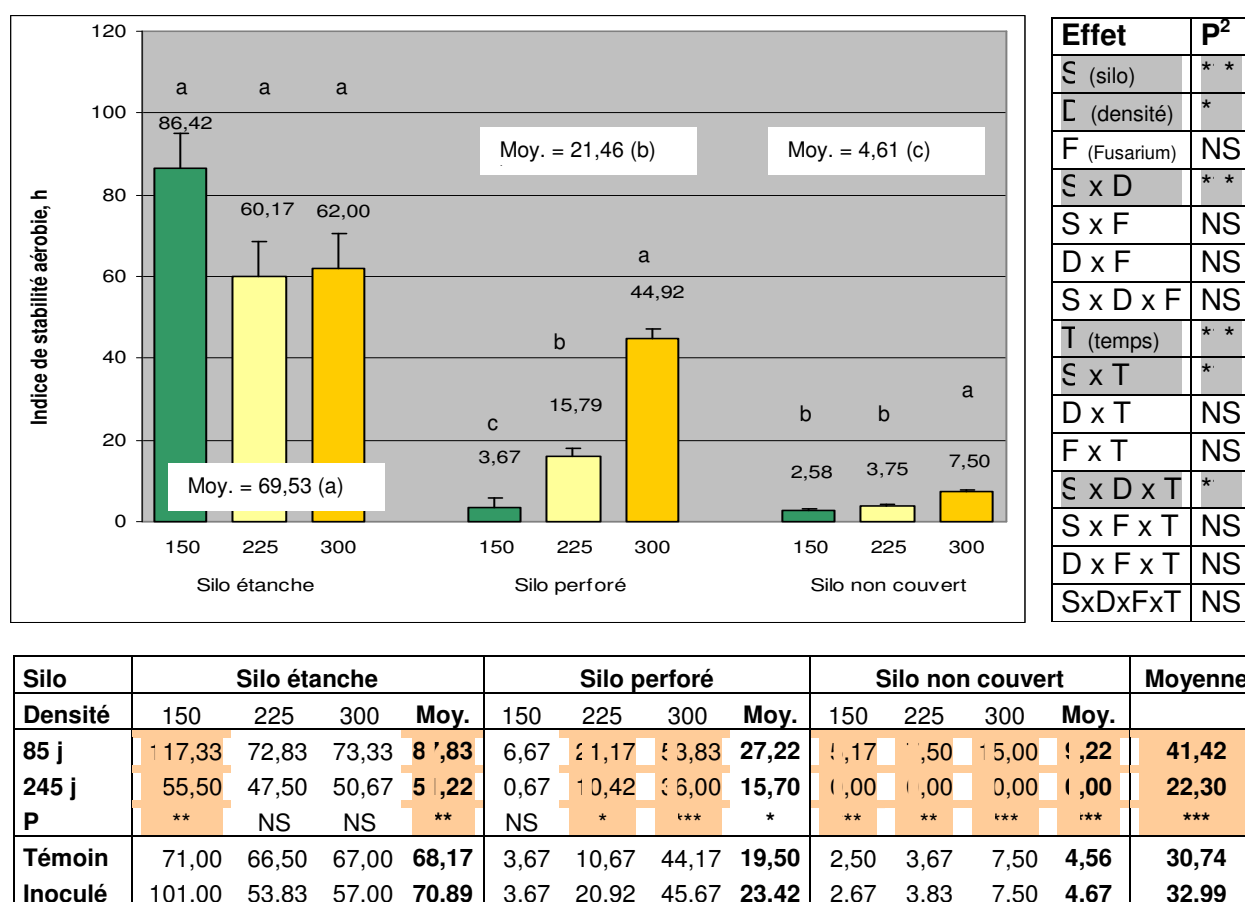


Figure 27. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur l'indice de stabilité aérobie de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Indice d'instabilité aérobie

Le rapport « température maximale de l'ensilage : nombre de jours pour l'atteindre » est un indice de son instabilité aérobie puisqu'il représente la vitesse d'augmentation de la température jusqu'au maximum. En moyenne, l'ensilage provenant de silos non couverts a vu sa température augmenter plus rapidement que celui provenant de silos perforés (26,03 °C/j vs 14,94 °C/j) et encore plus rapidement que celui provenant de silos étanches (6,89 °C/j). Si le taux d'augmentation de température a été comparable quelle que soit la densité en silo étanche, il a par contre été fortement influencé par la densité en silo perforé et en silo non couvert. En fait, il a diminué avec l'augmentation de la densité en silo perforé (23,73°C/j, 12,59°C/j et 8,49°C/j pour 150, 225 et 300 kg MS/m³), alors qu'en silo non couvert il a été à son maximum dans l'ensilage de moyenne densité (40,45°C/j) et à son minimum dans celui de faible densité (15,16°C/j). Le taux d'augmentation de température a été plus élevé après 245 jours qu'après 85 jours 1° en silo étanche à faible densité (7,41°C/j vs 4,40°C/j), 2° en silo perforé à faible densité (34,48°C/j vs 12,98°C/j) et à moyenne densité (15,57°C/j vs 9,61°C/j), et 3° en silo non couvert à moyenne densité (52,45°C/j vs 28,45°C/j) (figure 28). De plus, l'augmentation observée en silo non couvert s'est produite uniquement dans le maïs non inoculé avec le *F. graminearum* (35,10°C/j après 245 jours vs 21,44°C/j après 85 jours) (annexe 2).

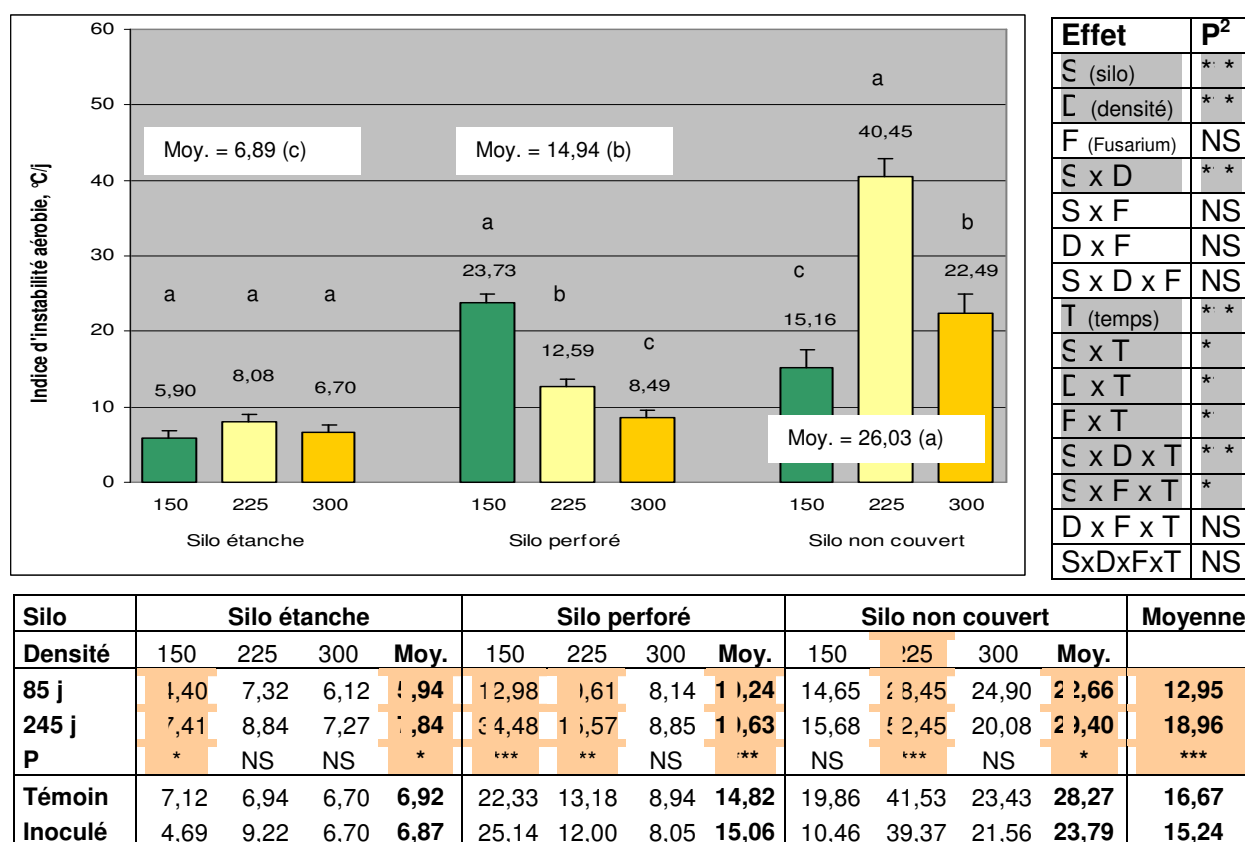


Figure 28. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur l'indice d'instabilité aérobie de l'ensilage de maïs¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05).

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Synthèse

Le maïs conservé en silo étanche a commencé à s'échauffer (élévation de 2°C par rapport aux témoins inertes) assez lentement quelle que soit la densité et la durée de conservation (69,53 h en moyenne) parce qu'il était d'excellente qualité (pH inférieur à 4, relativement peu de moisissures et aucun mycélium), mais plus rapidement en été qu'en hiver du moins à faible densité (55,50 h vs 117,33 h). En fait, en hiver l'échauffement a commencé plus tard à faible densité qu'à densité moyenne et à densité élevée (117,33 h vs 72,83 h et 73,33 h, respectivement) alors que ça n'a pas été le cas en été (55,50 h vs 47,50 h et 50,67 h, respectivement). Cela peut être lié au fait qu'en hiver la teneur en sucres résiduels de l'ensilage de faible densité était moins élevée que celle des ensilages de densité moyenne et de densité élevée (1,40% vs 1,76% et 1,71%, respectivement) alors qu'elle était semblable quelle que soit la densité en été (1,01% à 1,09%). De plus, le taux d'augmentation de la température a été comparable quelle que soit la densité (6,89°C/jour en moyenne), mais un peu plus élevé en été qu'en hiver à faible densité (7,41°C/j vs 4,40°C/j), ce qui semble confirmer que l'ensilage de faible densité était plus stable que ceux de densité plus élevée en hiver mais pas en été.

Le maïs conservé en silo perforé a commencé à s'échauffer (élévation de 2°C par rapport aux témoins inertes) d'autant plus tard que la densité était élevée (3,67 h, 15,79 h et 44,92 h pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement) et a présenté un taux d'augmentation de température d'autant plus faible que la densité était élevée (23,73°C/j, 12,59°C/j et 8,49°C/j pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement). Ainsi, l'échauffement du maïs de silo perforé a été très influencé par la densité. Seule la densité élevée a permis de retarder l'échauffement et de limiter le taux d'augmentation de la température à un niveau se rapprochant de celui observé en silo étanche. Dans ce type de silo, l'avantage des ensilages de densité croissante semble lié à une population de moisissures (9,23, 8,21 et 5,52 log ufc/g, respectivement) et un développement du mycélium (0,96, 0,47 et 0,04, respectivement) d'autant plus faibles que la densité était élevée. De plus, l'ensilage provenant des silos perforés a été moins stable en été qu'en hiver quelle que soit sa densité. Entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation, c'est dans l'ensilage de faible densité que l'indice d'instabilité aérobie a augmenté le plus (34,48°C/j après 245 jours vs 12,98°C/j après 85 jours) alors que c'est dans celui de densité élevée que l'indice de stabilité aérobie a diminué le plus (36,00 h après 245 jours vs 53,83 h après 85 jours).

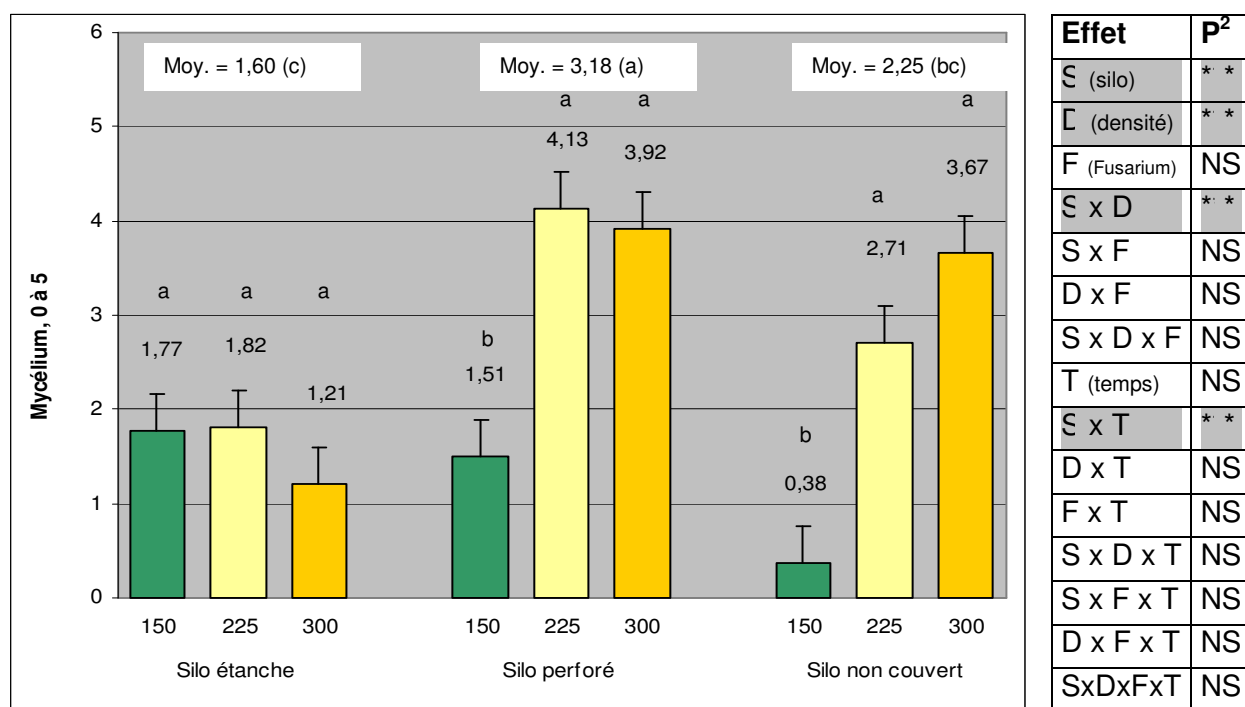
Le maïs conservé en silo non couvert a commencé à s'échauffer (élévation de 2°C par rapport aux témoins inertes) très rapidement quelle que soit la densité et la durée de conservation (4,61 h en moyenne), puisqu'il était fortement envahi par les moisissures (en moyenne 9,78 log₁₀ ufc/g), mais un peu moins rapidement à densité élevée qu'à faible densité et à moyenne densité (7,50 h vs 2,58 h et 3,75 h, respectivement). Cependant, le taux d'augmentation de la température a été moins élevé en moyenne dans les ensilages de faible densité (15,16°C/jour) et de densité élevée (22,49°C/j) que dans celui de moyenne densité (40,45°C/jour). Cela s'explique par le fait qu'au moment de l'ouverture des silos l'ensilage de faible densité était déjà fortement décomposé (pH de 8,73 en hiver et 9,43 en été) et celui de densité élevée encore bien conservé (pH de 4,17 en hiver et 4,55 en été) quelle que soit la durée de conservation, alors que celui de moyenne densité montrait des signes de détérioration croissante (pH de 4,82 en hiver et 6,57 en été). De plus, l'ensilage provenant des silos non couverts a commencé à s'échauffer plus rapidement en été qu'en hiver quelle que soit sa densité (en moyenne 0 h vs 9,22 h) mais il a présenté un taux d'augmentation de température plus élevé en été qu'en hiver seulement à moyenne densité (52,45°C/j vs 28,45°C/j).

L'inoculation avec le *F. graminearum* n'a pas influencé le début de l'échauffement mais il est difficile d'expliquer pourquoi le taux d'augmentation de la température n'a pas été plus élevé en été qu'en hiver dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* (23,70°C/j vs 23,88°C/j) alors que ce fut le cas dans le maïs non inoculé (35,10°C/j vs 21,44°C/j).

3.2 Caractéristiques de l'ensilage après 7 jours d'exposition à l'air

Mycélium

Après 7 jours d'exposition à l'air, le développement du mycélium a été relativement faible et comparable (1,60 en moyenne) dans le maïs conservé en silo étanche. En silo perforé, il a été plus important à densité moyenne (4,13) et à densité élevée (3,92) qu'à faible densité (1,51). Et il en fut de même en silo non couvert (2,71 et 3,67 vs 0,38, respectivement). Par ailleurs, le développement du mycélium a augmenté avec le séjour en silo étanche (2,52 après 245 jours vs 0,67 après 85 jours) alors qu'il a diminué en silo perforé (2,31 vs 4,06, respectivement) et en silo non couvert (1,53 vs 2,97, respectivement). Cependant, il n'a pas été influencé de façon significative par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 29).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	0,83	0,68	0,50	0,67	2,52	5,00	4,67	4,06	0,75	3,17	5,00	2,97	2,57
245 j	2,70	2,95	1,92	2,52	0,50	3,25	3,17	2,31	0,00	2,25	2,33	1,53	2,12
P				***				**				**	NS
Témoin	2,50	2,17	1,50	2,06	1,58	4,67	4,50	3,58	0,17	1,83	4,00	2,00	2,55
Inoculé	1,03	1,47	0,92	1,14	1,43	3,58	3,33	2,78	0,58	3,58	3,33	2,50	2,14

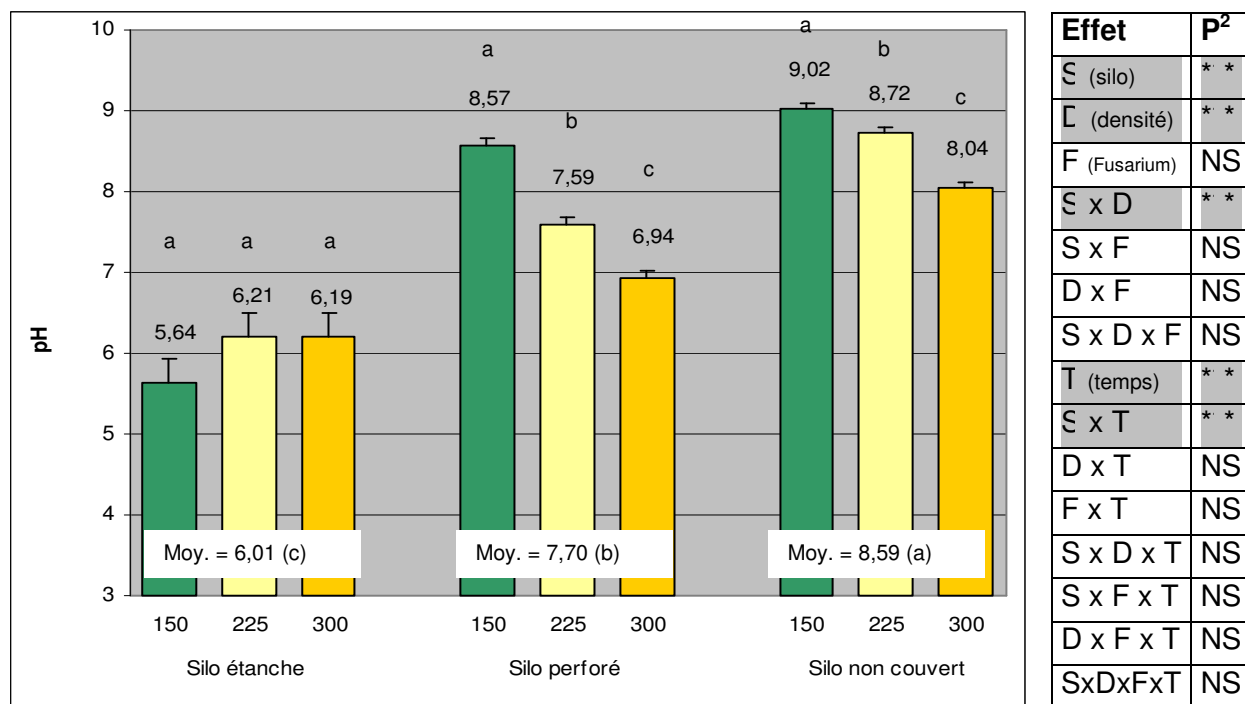
Figure 29. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le développement du mycélium dans l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

pH

Après 7 jours d'exposition à l'air, le pH a été plus bas en silo étanche (6,01 en moyenne) qu'en silo perforé (7,70 en moyenne) et en silo perforé qu'en silo non couvert (8,59 en moyenne). De plus, le pH a été comparable quelle que soit la densité en silo étanche (5,64 à 6,21) alors qu'en silo perforé (8,57 à 6,94) et en silo non couvert (9,02 à 8,04) il a été d'autant plus élevé que la densité était faible. Par ailleurs, le pH a été plus élevé dans le maïs conservé pendant 245 jours que dans celui conservé pendant 85 jours (en moyenne 7,97 vs 6,90) quelle que soit l'étanchéité du silo, mais l'effet a été plus prononcé en silo étanche (6,97 vs 5,06) qu'en silo perforé (7,99 vs 7,41) et en silo non couvert (8,96 vs 8,23). Cependant, le pH n'a pas été influencé de façon significative par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 30).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	4,71	5,09	5,39	5,06	8,23	7,38	6,61	7,41	8,74	8,26	7,70	8,23	6,90
245 j	6,57	7,33	7,00	6,97	8,91	7,80	7,27	7,99	9,30	9,19	8,38	8,96	7,97
P				***				**				**	***
Témoin	5,84	5,85	6,10	5,93	8,59	7,51	6,87	7,66	9,01	8,76	8,11	8,62	7,40
Inoculé	5,44	6,57	6,28	6,10	8,55	7,68	7,00	7,74	9,03	8,69	7,97	8,56	7,47

Figure 30. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur le pH de l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05).

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Évolution du pH

Pendant les 7 jours du test de stabilité aérobie, le pH a monté moins en silo étanche (2,19 en moyenne) qu'en silo perforé (3,18 en moyenne). En fait, l'élévation de pH a été comparable quelle que soit la densité en silo étanche (1,81 à 2,37). Par contre, en silo perforé elle a été plus grande à moyenne densité qu'à faible densité (3,57 vs 2,93). En silo non couvert, elle a été nulle à faible densité et a crû avec l'augmentation de la densité (-0,06, 3,03 et 3,68 pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement). En silo étanche, l'élévation de pH a été plus prononcée dans le maïs conservé pendant 245 jours que dans celui conservé pendant 85 jours quelle que soit la densité (en moyenne 3,13 vs 1,25), alors qu'en silo perforé l'écart a été significatif seulement à faible densité (4,14 vs 1,71) et à densité élevée (3,42 vs 2,79). Par contre, en silo non couvert l'élévation de pH a été plus prononcée après 245 jours qu'après 85 jours à densité élevée (3,83 vs 3,52) mais plus faible à moyenne densité (2,62 vs 3,44). Finalement, l'évolution du pH n'a pas été influencée de façon significative par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 31).

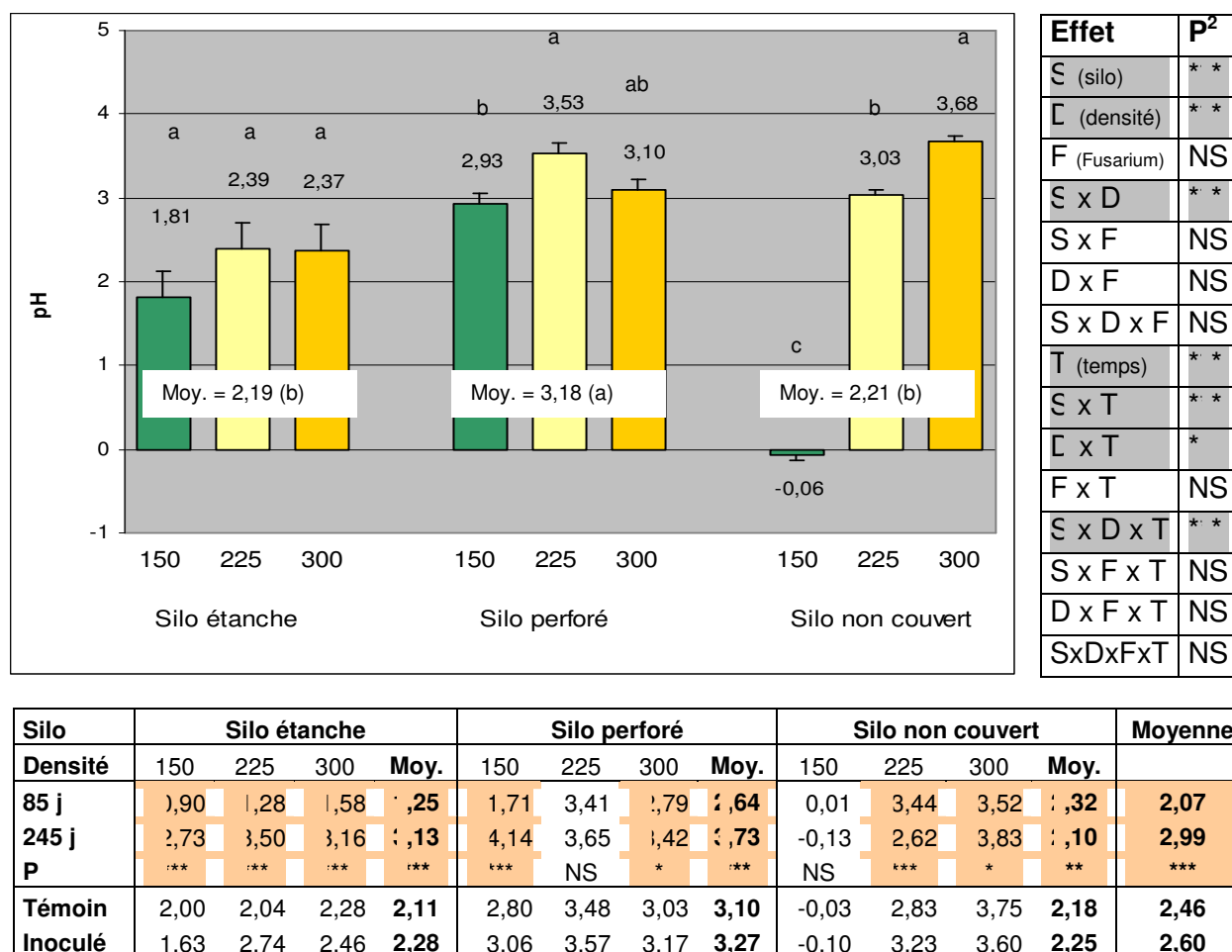


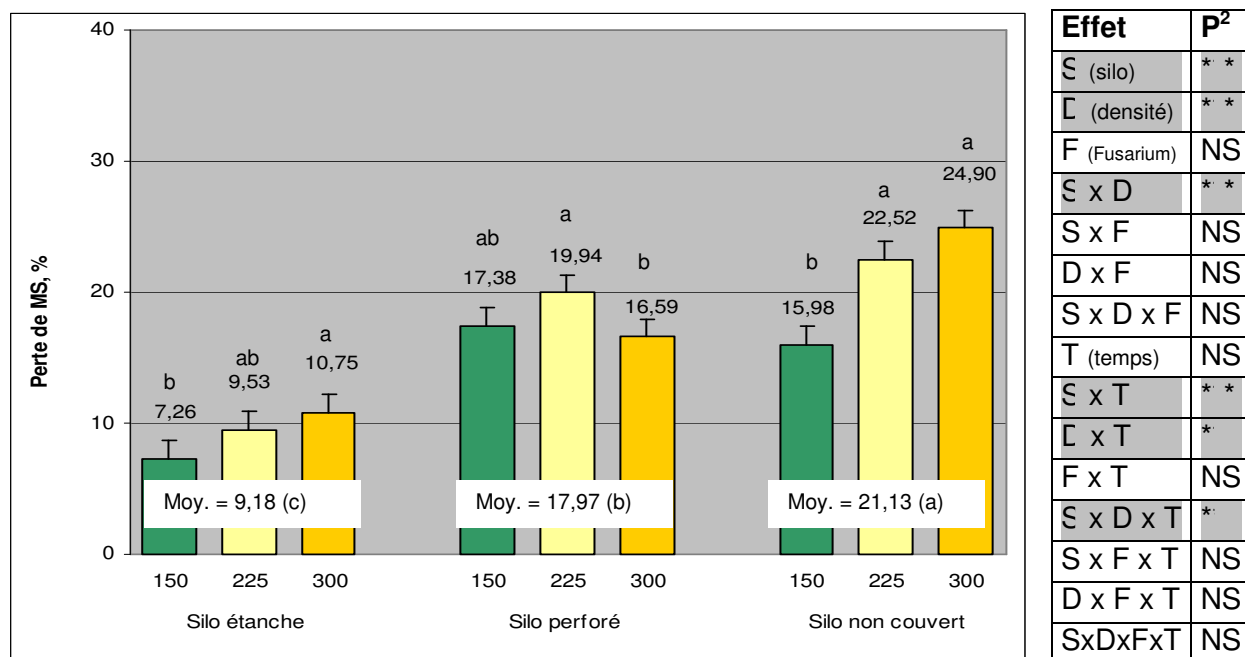
Figure 31. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur l'élévation de pH de l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05).

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Perte de matière sèche

Après 7 jours d'exposition à l'air, la perte de matière sèche a été la plus faible dans le maïs conservé en silo étanche (9,18% en moyenne) contre 17,97% en moyenne en silo perforé et 21,13% en moyenne en silo non couvert. En silo étanche, la perte de matière sèche a été plus élevée à densité élevée (10,75%) qu'à faible densité (7,26%). En silo perforé, elle a été plus élevée à moyenne densité (19,92%) qu'à densité élevée (16,59%). En silo non couvert, elle a été plus élevée à densité moyenne (22,52%) et à densité élevée (24,90%) qu'à faible densité (15,98%). Par ailleurs, en silo étanche la perte de matière sèche après 7 jours d'exposition à l'air a été plus élevée dans l'ensilage conservé pendant 245 jours que dans celui conservé pendant 85 jours quelle que soit la densité (en moyenne 12,97% vs 5,39%) alors qu'en silo perforé et en silo non couvert elle a été plus faible après 245 jours qu'après 85 jours dans les ensilages de faible densité (13,14% vs 21,62% et 12,17% vs 19,78%, respectivement) et de moyenne densité (17,78% vs 22,11% et 20,26% vs 24,79%, respectivement). Cependant, la perte de matière sèche n'a pas été influencée de façon significative par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 32).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	3,46	1,58	3,14	1,39	21,62	21,11	17,34	21,36	19,78	14,79	23,63	22,73	16,16
245 j	11,06	14,48	13,37	12,97	13,14	17,78	15,84	15,59	12,17	20,26	26,17	19,44	16,03
P	**	***	**	***	***	*	NS	***	**	*	NS	***	NS
Témoin	9,38	9,80	11,06	10,08	17,55	20,06	17,95	18,52	16,23	22,98	25,46	21,56	16,72
Inoculé	5,13	9,26	10,45	8,28	17,22	19,83	15,23	17,43	15,72	22,07	24,35	20,71	15,47

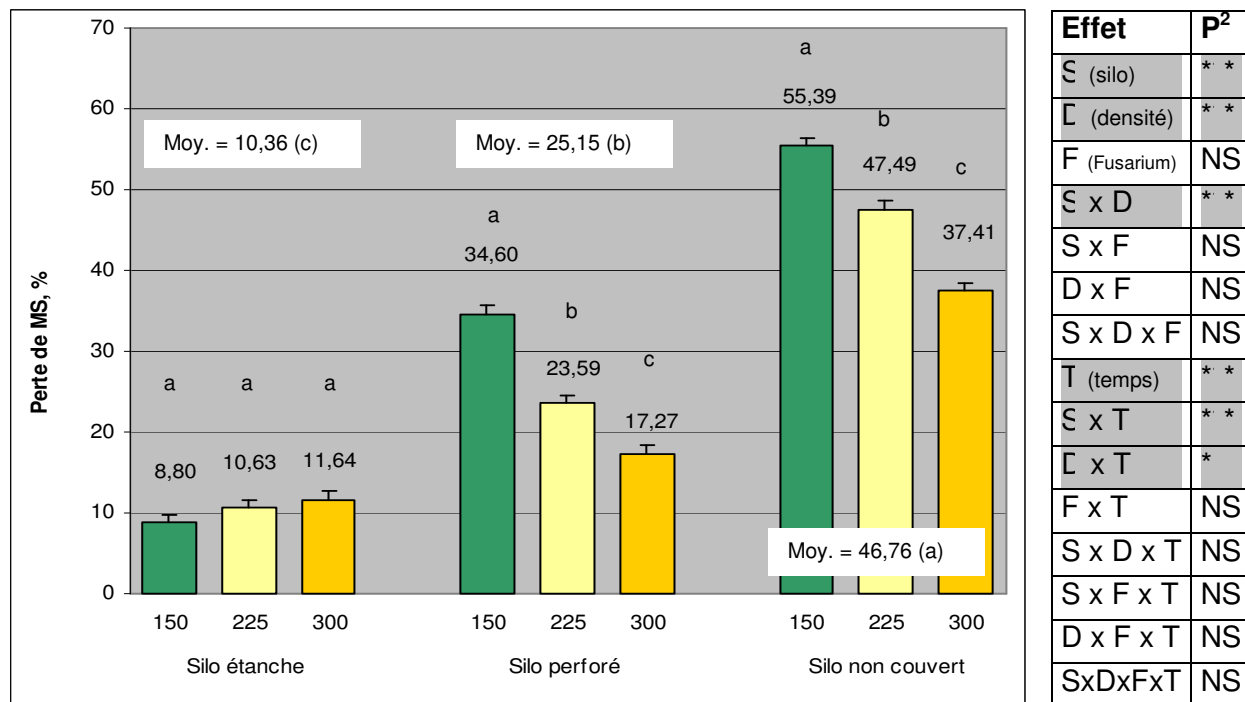
Figure 32. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la perte de matière sèche dans l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$).

² Probabilité : *** = significatif à $P < 0,0001$; ** = significatif à $P < 0,01$; * = significatif à $P < 0,05$; NS = non significatif ($P > 0,05$).

Perte de matière sèche totale

Après 7 jours d'exposition à l'air, la perte de matière sèche totale, c'est-à-dire celle mesurée à l'ouverture des silos plus celle cumulée pendant les 7 jours d'exposition à l'air, a été la plus faible dans le maïs conservé en silo étanche (10,36% en moyenne) contre 25,15% en moyenne en silo perforé et 46,76% en moyenne en silo non couvert. La perte de matière sèche a été comparable quelle que soit la densité en silo étanche alors qu'elle a diminué avec l'augmentation de la densité en silo perforé (34,60%, 23,59% et 17,27% pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement) et en silo non couvert (55,39%, 47,49% et 37,41% pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement). De plus, elle a augmenté de façon marquée avec le séjour en silo étanche (14,15% vs 6,56%) et en silo non couvert (53,53% vs 40,00%) alors qu'en silo perforé l'écart observé n'a pas été significatif (26,07% vs 24,24% ; P=0,07). Cependant, elle n'a pas été influencée de façon significative par l'inoculation avec le *F. graminearum* (figure 33).



Silo	Silo étanche				Silo perforé				Silo non couvert				Moyenne
Densité	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	150	225	300	Moy.	
85 j	5,16	5,58	8,95	1,56	31,49	23,73	17,49	21,24	47,86	40,32	31,82	41,00	23,60
245 j	12,44	15,69	14,32	11,15	37,72	23,45	17,05	24,07	62,92	54,66	42,99	53,52	31,25
P				***				0,07				***	***
Témoin	10,87	10,23	11,71	10,93	34,56	22,72	18,36	25,21	55,17	47,83	36,87	46,62	27,59
Inoculé	6,73	11,04	11,56	9,78	34,65	24,46	16,18	25,09	55,61	47,15	37,94	46,90	27,26

Figure 33. Effet de l'étanchéité du silo, la densité de l'ensilage, la durée de conservation et l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* sur la perte de matière sèche totale dans l'ensilage de maïs après 7 jours d'exposition à l'air¹

¹ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés et les barres sont les erreurs types. Pour chaque niveau de comparaison, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes (P>0,05).

² Probabilité : *** = significatif à P<0,0001 ; ** = significatif à P<0,01 ; * = significatif à P<0,05 ; NS = non significatif (P>0,05).

Synthèse

Après 7 jours d'exposition à l'air, le maïs de silos étanches a présenté un développement du mycélium relativement faible (1,60 en moyenne), une élévation de pH modérée (2,19 en moyenne) et un pH final relativement bas (6,01 en moyenne), tous comparables quelle que soit la densité. Pendant ces 7 jours la perte de MS a été inférieure à 10% en moyenne, mais significativement plus élevée à densité élevée (10,75%) qu'à densité faible (7,26%).

Par contre, le maïs de silos perforés a présenté un développement du mycélium beaucoup plus important à densité moyenne (4,13) et à densité élevée (3,92) qu'à faible densité (1,51), ce qui semble la conséquence de l'épuisement complet des sucres pendant la période de conservation dans l'ensilage de faible densité. De plus, son pH a été supérieur à 6,9 quelle que soit la densité et d'autant plus faible que la densité était élevée (8,57, 7,59 et 6,94 pour des densités de 150, 225 et 300 kg MS/m³), même si l'élévation de pH pendant les 7 jours d'exposition à l'air a été plus grande à moyenne densité qu'à faible densité (3,53 vs 2,93). Pendant ces 7 jours la perte de MS a été supérieure à 16% pour toutes les densités, présentant son plus bas niveau dans l'ensilage de densité élevée (16,59%) et son plus haut niveau dans celui de moyenne densité (19,94%).

Le maïs de silos non couverts a présenté aussi un développement du mycélium beaucoup plus important à densité moyenne et à densité élevée qu'à faible densité (2,71 et 3,67 vs 0,38) et un pH d'autant plus faible que la densité était élevée (9,02, 8,72 et 8,04 pour des densités de 150, 225 et 300 kg MS/m³), même si l'élévation de pH pendant les 7 jours d'exposition à l'air a été nulle à faible densité et a crû avec l'augmentation de la densité (-0,06, 3,03 et 3,68 pour des densités de 150, 225 et 300 kg MS/m³). Pendant ces 7 jours, la perte de MS a été significativement plus élevée à densité moyenne et à densité élevée qu'à faible densité (22,52% et 24,90% vs 15,98%).

Le maïs conservé en silo étanche pendant 245 jours (silos ouverts en été) s'est détérioré beaucoup plus pendant les 7 jours du test de stabilité aérobique que celui conservé pendant seulement 85 jours (silos ouverts en hiver). Il a présenté un plus grand développement de mycélium (2,52 vs 0,67), une plus grande élévation de pH (+1,88 soit 3,13 vs 1,25), un pH final beaucoup plus élevé (6,97 vs 5,06) et une plus grande perte de matière sèche (12,97% vs 5,39%) quelle que soit la densité. Par contre, le maïs conservé en silo perforé et celui conservé en silo non couvert se sont détériorés moins dans le test de stabilité aérobique réalisé après 245 jours de conservation que dans celui réalisé après 85 jours. Ils ont présenté moins de mycélium (2,31 vs 4,06 et 1,53 vs 2,97, respectivement), une élévation de pH variable selon la densité mais en moyenne relativement faible ou même nulle (+1,09 soit 3,73 vs 2,64 et -0,22 soit 2,10 vs 2,32, respectivement), un pH final seulement un peu plus élevé (7,99 vs 7,41 et 8,96 vs 8,23, respectivement) et moins de perte de matière sèche à faible densité (13,14% vs 21,62% et 12,17% vs 19,78%, respectivement) et à moyenne densité (17,78% vs 22,11% et 20,26% vs 24,79%, respectivement). Cette différence semble due au fait que le maïs conservé en silo perforé et celui conservé en silo non couvert étaient déjà passablement détériorés après 85 jours de conservation et très détériorés après 245 jours, contrairement à celui conservé en silo étanche.

Quant à la perte de matière sèche totale, c'est-à-dire celle mesurée à l'ouverture des silos plus celle cumulée pendant les 7 jours d'exposition à l'air, elle a été comparable quelle que soit la densité en silo étanche (10,36% en moyenne). Par contre, en silo perforé elle a été supérieure à 17% quelle que soit la densité et d'autant plus élevée que la densité était faible (34,60%, 23,59% et 17,27% pour des densités de 150, 225 et 300 kg MS/m³) alors qu'en silo non couvert elle a été supérieure à 37% quelle que soit la densité et d'autant plus élevée que la densité était faible (55,39%, 44,49% et 37,41% pour des densités de 150, 225 et 300 kg MS/m³).

CONCLUSION

Le *F. graminearum* ne survit pas jusqu'à l'ouverture des silos et le degré d'infestation du maïs par le *F. graminearum* au moment de la mise en silos n'influence pas la teneur en mycotoxines de l'ensilage de maïs et n'influence que légèrement sa fermentation, sa stabilité aérobie et sa valeur nutritive. De plus, la teneur en vomitoxine de l'ensilage de maïs n'est pas influencée par l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage mais augmente avec le séjour en silo (en moyenne 2,16 ppm après 245 jours vs 1,44 ppm après 85 jours) alors que sa teneur en zéaralénone est plus élevée en silo non couvert (0,30 ppm) qu'en silo étanche et en silo perforé (0,06 ppm) mais n'est pas influencée par la durée de conservation.

Un silo parfaitement étanche permet une très bonne fermentation de l'ensilage de maïs, maintient la perte de matière sèche en silo très basse (moins de 2%), préserve la valeur nutritive du maïs et donne un ensilage stable après l'ouverture du silo même après une longue conservation (245 jours), que celui-ci soit bien compacté ou non dans le silo. Par contre, dans un silo dont les parois laissent infiltrer une certaine quantité d'air, il faut compacter l'ensilage à une densité de 300 kg MS/m³ pour obtenir une qualité de fermentation comparable, pour maintenir la perte de matière sèche en silo aussi basse, pour préserver autant la valeur nutritive du maïs et pour donner un ensilage dont la stabilité aérobie se rapproche de celle obtenue en silo étanche, même après une longue conservation (245 jours).

Dans un silo qui n'est pas parfaitement étanche, il faut une densité minimale de l'ensilage de 225 kg MS/m³. À une telle densité, la fermentation est très bonne, la valeur nutritive du maïs est préservée et la perte de matière sèche en silo reste basse à court terme (environ 2% après 85 jours). Cependant, si la conservation se prolonge jusqu'à 245 jours, la teneur en acide lactique peut diminuer et la perte de matière sèche atteindre un niveau significativement plus élevé (environ 7% après 245 jours) par suite de l'augmentation de la population fongique, sans que la valeur nutritive du maïs soit modifiée de façon marquée. De plus, dans ces conditions la stabilité aérobie de l'ensilage est moins bonne à court terme (85 jours), et beaucoup moins bonne après un long séjour dans le silo (245 jours), qu'à une densité de 300 kg MS/m³.

Ces conclusions reposent sur les observations suivantes :

La fermentation du maïs fourrager n'est pratiquement pas influencée par la présence de perforations dans les murs du silo si on réalise un ensilage de densité élevée (300 kg MS/m³), alors qu'elle est un peu limitée à moyenne densité (225 kg MS/m³) et très limitée à faible densité (150 kg MS/m³), à la suite de la combustion des sucres résultant de l'introduction d'air par ces perforations. Par contre, elle est influencée négativement par le non-scellage du silo quelle que soit la densité, mais de façon d'autant plus marquée que la densité est faible. De plus, la durée de conservation (245 jours vs 85 jours) influence la fermentation de façon différente selon l'étanchéité du silo et la densité de l'ensilage. En silo étanche, l'ensilage est relativement stable quelle que soit la densité et le séjour en silo. Par contre, en silo perforé seul l'ensilage de densité élevée est stable dans le silo entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation : l'ensilage de faible densité subit une fermentation tardive c'est-à-dire plus poussée après 245 jours qu'après 85 jours de conservation, alors que celui de moyenne densité montre quelques signes de détérioration pendant la même période. En silo non couvert, seul l'ensilage de faible densité ne se détériore pas pendant cette période, puisqu'il est déjà très détérioré après 85 jours. L'ensilage de densité élevée se détériore modérément et celui de moyenne densité fortement.

La perte de matière sèche du maïs fourrager pendant sa conservation en silo est d'autant plus élevée que la densité est faible en silo perforé (de 0,80% à 20,42%) et en silo non couvert (de 16,75% à 46,37%) alors qu'elle est très faible quelle que soit la densité en silo étanche (1,29% en moyenne). Ceci est dû au fait que dans le maïs conservé en silo étanche le nombre de levures et de moisissures est relativement faible ($5,40 \log_{10}$ ufc/g en moyenne) au moment de l'ouverture des silos et on n'observe aucun mycélium quelle que soit la densité de l'ensilage. Par contre, en silo perforé et en silo non couvert l'infestation fongique est d'autant plus prononcée que la densité est faible. De plus, la perte de matière sèche n'est pas influencée par le séjour en silo étanche quelle que soit la densité, ni en silo perforé à densité élevée, alors qu'elle augmente de façon marquée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour de conservation en silo non couvert quelle que soit la densité, de même qu'en silo perforé à faible densité et à moyenne densité.

La valeur nutritive de l'ensilage de maïs est plus influencée par la densité en silo non couvert qu'en silo perforé, et en silo perforé qu'en silo étanche. Les PB, les fibres ADF, les fibres NDF, les PB-ADF et les PB-NDF (sauf en silo perforé) atteignent en silo étanche des niveaux comparables quelle que soit la densité, et en silo perforé des niveaux plus élevés à faible densité qu'à densité moyenne et à densité élevée. Par contre, en silo non couvert ils sont plus élevés à faible densité qu'à moyenne densité, et à moyenne densité qu'à densité élevée. Dans ce type de silo, certains paramètres (PB, fibres ADF et PB-ADF) présentent, même dans l'ensilage de densité élevée, des niveaux qui semblent plus élevés que ceux observés dans les ensilages bien fermentés. Dans les ensilages détériorés, la teneur en cendres atteint des niveaux plus élevés, la solubilité des protéines est plus basse et la digestibilité des fibres NDF est plus élevée que dans les ensilages bien fermentés. De plus, la durée de conservation (245 jours vs 85 jours) influence plus la valeur nutritive en silo non couvert qu'en silo perforé, et en silo perforé qu'en silo étanche. Par exemple, en silo étanche les PB, les fibres ADF et les fibres NDF sont relativement stables quelle que soit la densité. Par contre, en silo perforé ils augmentent avec la durée de conservation dans l'ensilage de faible densité mais pas dans celui de densité élevée, alors qu'en silo non couvert c'est le cas quelle que soit la densité et l'effet est d'autant plus marqué que la densité est faible.

Lorsqu'il est exposé à l'air de façon prolongée, comme ce fut le cas dans le test de stabilité aérobie, l'ensilage de maïs conservé en silo étanche commence à s'échauffer assez lentement quelle que soit la densité et la durée de conservation (69,53 h en moyenne) parce qu'il est d'excellente qualité (pH inférieur à 4, relativement peu de moisissures et aucun mycélium), alors que celui conservé en silo non couvert commence à s'échauffer très rapidement quelle que soit la densité et la durée de conservation (4,61 h en moyenne), puisqu'il est fortement envahi par les moisissures (en moyenne $9,78 \log_{10}$ ufc/g), mais un peu moins rapidement à densité élevée qu'à faible densité et à moyenne densité (7,50 h vs 2,58 h et 3,75 h, respectivement). Par contre, en silo perforé l'échauffement commence d'autant plus tard que la densité est élevée (3,67 h, 15,79 h et 44,92 h pour 150, 225 et 300 kg MS/m³, respectivement). Seule la densité élevée permet de retarder l'échauffement presque comme en silo étanche. Dans ce type de silo, l'avantage des ensilages de densité croissante semble lié à une population de moisissures (9,23, 8,21 et 5,52 log ufc/g, respectivement) et un développement du mycélium (0,96, 0,47 et 0,04, respectivement) d'autant plus faibles que la densité est élevée. Finalement, l'ensilage réalisé en silo étanche et compacté à une densité de 225 kg MS/m³ ou plus est aussi stable après 245 jours de conservation qu'après 85 jours alors que les autres ensilages évalués sont moins stables après 245 jours qu'après 85 jours, tel qu'indiqué par un échauffement plus précoce et/ou un taux d'augmentation de la température plus élevé.

Par suite de l'inoculation du maïs ensilage avec le *F. graminearum* au moment du remplissage des silos, les populations de moisissures évoluent de façon différente selon le type de silo et la perte de matière sèche est 1% plus élevée à l'ouverture des silos. Les seuls effets sur la fermentation sont une augmentation de 0,17% de la teneur en acide lactique et une diminution du pH de 0,3 à 0,5 dans les ensilages qui maintiennent un pH peu acide (entre 4,8 et 6,6) pendant tout le séjour en silo, c'est-à-dire l'ensilage de faible densité en silo perforé et l'ensilage de moyenne densité en silo non couvert. Il en résulte aussi une réduction du taux d'augmentation de la température jusqu'au maximum (indice d'instabilité aérobie) en silo non couvert, mais aucun effet retardateur sur l'échauffement (indice de stabilité aérobie). Ces effets positifs mineurs pourraient être dus à la compétition faite par *F. graminearum*, au début de la conservation, à des microorganismes responsables de la détérioration de l'ensilage. Finalement, les effets de l'inoculation avec le *F. graminearum* sur la valeur nutritive de l'ensilage de maïs dépendent de l'étanchéité du silo et de la durée de conservation : en silo étanche les fibres ADF, les fibres NDF, les PB-ADF et les cendres sont plus faibles après 85 jours de conservation et/ou augmentent de façon plus prononcée entre le 85^{ième} et le 245^{ième} jour dans le maïs inoculé que dans le maïs non inoculé, alors que c'est le contraire en silo non couvert.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

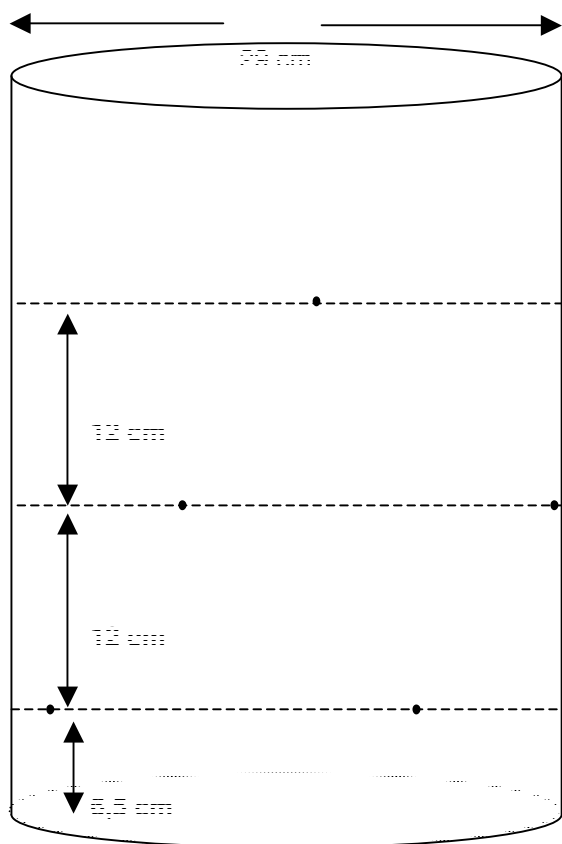
- Amyot, A. et L. Couture. 2008. Effet de l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* et de l'étanchéité des silos sur la production de mycotoxines et sur l'efficacité des agents de conservation dans l'ensilage de maïs épi humide. *Agrosolutions*.19(1): 25-38.
- ASAE. 2000. Moisture measurement – forages. ASAE S358.2. In ASAE standards 2000, 565. St-Joseph, MI : American Society of Agricultural Engineers.
- Berger, L.L. et K.K. Bolsen. 2006. Sealing strategies for bunker silos and drive-on piles. Proceedings from “Silage for dairy farms : growing, harvesting, storing and feeding” : 266-283. NRAES Publication 181, Cooperative Extension, Ithaca, NY.
- CPAQ. 1982. Répertoire des méthodes d'analyse des aliments du bétail. Conseil des productions animales du Québec. Québec, Canada. Agdex 400-55, 32 p.
- D'Amours, L. et P. Savoie. 2005. Density profile of corn silage in bunker silo. *Canadian Biosystems Engineering*. 47: 2.21-2.28.
- Driehuis, F., S.J.W.H. Oude Elferink et P.G. Van Wikselaar. 2001. Fermentation characteristics and aerobic stability of grass silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria. *Grass and Forage Sci*. 56 : 330-343.
- Escula, L. 1979. *Fusarium graminearum* dans les ensilages. Production de zéaralénone. *Ann. Rech. Vét.* 10(4): 615-617.
- Gotlieb. A. 1997. Causes of mycotoxins in silages. Proceedings from the “Silage : field to feedbunk” North American Conference : 213-221. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY.
- Jelinek, C., A. Pohland et G. Wood. 1989. Worldwide occurrence of mycotoxins in food and feeds – An update. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 72: 223-230.
- Kuldau, G.A. et M.A. Mansfield. 2006. Mycotoxins and mycotoxigenic fungi in silages. Proceedings from the “Silage for dairy farms : growing, harvesting, storing and feeding” conference. January 23-25. Harrisburg, Pennsylvania. Natural resource, agricultural and engineering service (NRAES), Publication 181. Ithaca, New York. p. 91-99.
- Mansfield, M.A., E.D. De Wolf et G.A. Kuldau. 2005. Relationships between weather conditions, agronomic practices and fermentation characters with deoxynivalenol content in fresh and ensiled maize. *Plant Dis*. 89: 1151-1157.
- McDonald, P., A.R. Henderson et S.J.E. Heron. 1991. The biochemistry of silage. 2nd edition. Chalcombe Publications, Marlow, UK. 340 p.
- Moran, J.P., Z.G. Weinberg, G. Ashbell, Y. Hen et T.R. Owen. 1996. A comparison of two methods for the evaluation of the aerobic stability of whole crop wheat silage. Page 162 in *Proc. XI Int. Silage Conf.* Aberystwyth, UK. University of Newcastle upon Tyne, Tyne and Wear, UK.

- National Forage Testing Association, 1993. NFTA-Forage analyses procedures. Method 2.2.2.4, 3.4, 4.2 et 5.3. National Forage Testing Association. Omaha, Nebraska.
- National Research Council. 2001. Nutrients requirements of dairy cattle. Seventh revised edition. National Academy Press. Washington, DC. 381 p.
- Niderkorn, V., H. Boudra et D.P. Morgavi. 2007. Les fusariotoxines : comment limiter leur présence dans les ensilages et leur impact chez les ruminants? *Fourrages* 189: 111-123.
- Papavizas, G.C. 1967. Evaluation of various media and antimicrobial agents for isolation of *Fusarium* from soil. *Phytopathology* 57: 848-852.
- Romer Labs Inc. 2000. Reference method for vomitoxin analysis by HPLC # don-1c-03-00.1. Romer Labs Inc. Union, Montana. 4 p.
- Romer Labs Inc. 2000a. Reference method for zearalenone analysis by HPLC # zon-1c-01-00.3. Romer Labs Inc. Union, Montana. 4 p.
- Ruppel, K.A., R.E. Pitt, L.E. Chase et D.M. Galton. 1995. Bunker silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms. *J. Dairy Sci.* 78: 141-153.
- Santé Canada. 2004. Dénombrement des levures et des moisissures dans les aliments. Méthode MFHPB-22. Direction générale des produits de santé et des aliments. Santé Canada, Ottawa. 10 p.
- Savoie, P., L. D'Amours, A. Amyot et R. Thériault. 2006. Effet de la couverture, la densité, la profondeur et le temps sur les pertes d'ensilage de maïs en silo couloir. Demi-journée scientifique sur les plantes fourragères. CRAAQ et CQPF. Victoriaville, 14 février, p. 61-69.
- Scudamore, K.A. et C.T. Livesey. 1998. Occurrence and significance of mycotoxins in forage crops and silage : a review. *J. Sci. Food Agric.* 77: 1-17.
- Smith, D., G.M. Paulsen et C.A. Raguse. 1964. Extraction of total available carbohydrates from grass and legume tissue. *Plant Physiology* 39: 960-962.
- Trilogy Analytical Laboratory. 1999. Analyse of zearalenone. Trilogy Analytical Laboratory. Washington, DC. 5 p.
- Tuite, J. 1969. *Plant Pathological Methods*. Burgess Publishing Company, Minneapolis. 239 p.
- Whitlow, L.W. et W.M. Hagler. 2001. La contamination des aliments par les mycotoxines : un facteur de stress additionnel pour les bovins laitiers. Symposium sur les bovins laitiers. CRAAQ. St-Hyacinthe, 17 octobre, p. 9-30.

ANNEXE 1

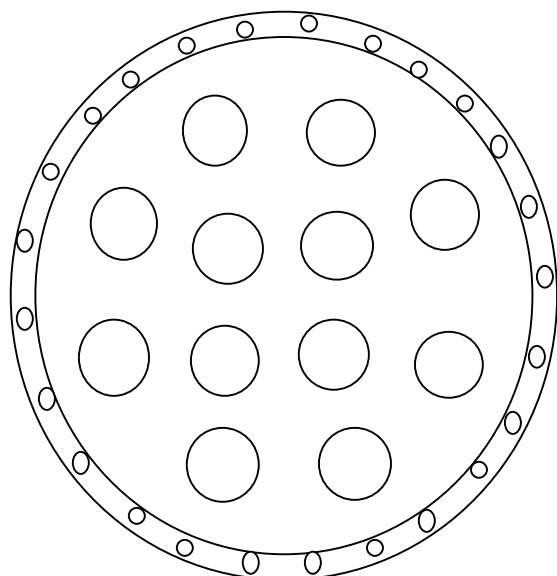
Détails des silos perforés et des silos non couverts

A- Distribution des trous sur la surface cylindrique des silos perforés



B- Distribution des trous dans le couvercle des silos non couverts

Couvercle



ANNEXE 2

Effet de l'inoculation avec le *Fusarium graminearum*, selon l'étanchéité du silo et la durée de conservation, sur les paramètres qui ont présenté une interaction « Silo x Fusarium x Temps » significative

Moississures (log ₁₀ ufc/g)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1 ¹	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	5,51	4,19	*	7,53	8,42	*	9,36	10,01	*
Inoculé	5,90	3,78	**	7,47	7,19	NS	9,30	10,44	***
P2 ²	NS	NS		NS	**		NS	NS	
Moyenne									
Levures et moississures (log ₁₀ ufc/g)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	5,85	4,86	0,07	8,80	8,54	NS	9,47	10,06	*
Inoculé	6,46	4,45	**	8,63	7,50	**	9,40	10,50	***
P2	NS	NS		NS	*		NS	NS	
Moyenne									
Fibres par détergent acide (% MS)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	25,74	25,39	NS	24,27	27,51	**	28,18	35,56	***
Inoculé	24,73	26,13	*	24,83	27,39	**	29,24	34,22	***
P2	NS	NS		NS	NS		NS	NS	
Moyenne									
Fibres par détergent neutre (% MS)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	42,28	41,04	NS	39,47	43,34	**	43,18	52,98	***
Inoculé	40,32	42,38	*	40,09	43,22	*	45,09	51,53	***
P2	NS	NS		NS	NS		NS	NS	
Moyenne									
Protéines insolubles dans la solution détergent acide (% MS)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	0,48	0,43	NS	0,37	0,52	***	0,57	0,89	***
Inoculé	0,39	0,46	*	0,39	0,52	***	0,64	0,88	***
P2	**	NS		NS	NS		**	NS	
Moyenne									
Cendres (% MS)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	4,72	4,46	NS	4,39	4,43	NS	3,98	5,03	***
Inoculé	4,03	4,58	*	4,37	4,63	NS	4,66	4,52	NS
P2	**	NS		NS	NS		**	NS	
Moyenne									
Indice d'instabilité aérobie (°C/jour)									
	Silo étanche			Silo perforé			Silo non couvert		
	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1	85 j	245 j	P1
Témoin	5,31	8,52	NS	12,09	17,55	*	21,44	35,10	***
Inoculé	6,58	7,16	NS	12,38	17,74	*	23,88	23,70	NS
P2	NS	NS		NS	NS		NS	***	
Moyenne									

¹ P1 : Probabilité d'un effet « Temps » significatif.

² P2 : probabilité d'un effet « *Fusarium* » significatif.