

Évaluation des biofilms à ensilage
5. Qualité de l'ensilage de maïs
entreposé à l'extérieur

Rapport final

Réalisé par
André Amyot,
IRDA, Deschambault

Avec la collaboration de
Patrick Denoncourt,
Blaise Ouattara et
Monique Lacroix
Institut Armand-Frappier

Projet de recherche # 110121

supporté par le
Fonds FCAR-IRDA
et le
CDAQ

Juillet 2003



Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2004
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2004
©IRDA

TABLE DES MATIÈRES

	Page
LISTE DES TABLEAUX, DES FIGURES ET DES ANNEXES.....	5
RÉSUMÉ.....	7
REMERCIEMENTS.....	9
INTRODUCTION.....	11
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	13
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	17
 1 Généralités.....	17
 2 Caractéristiques de l'ensilage après 4 semaines d'entreposage.....	19
2.1 Caractéristiques générales	
a. Teneur en matière sèche.....	19
b. Moisissures.....	20
c. Perte de matière sèche.....	21
2.2 Fermentation	
a. pH.....	22
2.3 Synthèse (4 semaines)	23
 3 Caractéristiques de l'ensilage après 8 semaines d'entreposage.....	24
3.1 Caractéristiques générales	
a. Teneur en matière sèche.....	24
b. Moisissures.....	25
c. Chauffage.....	26
d. Perte de matière sèche.....	28
e. Cendres.....	29
3.2 Fermentation	
a. pH.....	30
b. Acide lactique.....	31
c. Acide acétique.....	32
d. Acide propionique.....	33
e. Azote ammoniacal.....	34
f. Sucres solubles.....	35
3.3 Valeur nutritive	
a. Protéine brute.....	36
b. Protéine liée.....	37
c. Fibre par détergent acide.....	38
d. Fibre par détergent neutre.....	39
3.4 Synthèse (8 semaines)	40
 4 Effet de la durée d'entreposage.....	44
CONCLUSION.....	45
BIBLIOGRAPHIE.....	47
ANNEXES.....	49

LISTE DES TABLEAUX, DES FIGURES ET DES ANNEXES

	Page
TABLEAUX	
1 Caractéristiques du maïs fourrager au moment de la mise en silo.....	17
2 Effet des couvertures sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur, pour l'ensemble du silo (0-38 cm).....	18
FIGURES	
1 Teneur en matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage.....	19
2 Note de moisissures selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage	20
3 Perte de matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage	21
4 pH selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage	22
5 Teneur en matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	24
6 Note de moisissures selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	25
7 Température maximale et nombre de jours pour l'atteindre, selon le type de couverture et la profondeur, dans l'ensilage entreposé pendant 8 semaines.....	26
8 Production de chaleur selon le type de couverture et la profondeur pendant 8 semaines d'entreposage	27
9 Perte de matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	28
10 Teneur en cendres selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	29
11 pH selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	30
12 Teneur en acide lactique selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	31
13 Teneur en acide acétique selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	32

14	Teneur en acide propionique selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	33
15	Teneur en azote ammoniacal (éq. PB) selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	34
16	Teneur en sucres solubles selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	35
17	Teneur en protéine brute selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	36
18	Teneur en protéine liée selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	37
19	Teneur en fibre par détergent acide selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	38
20	Teneur en fibre par détergent neutre selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage	39

ANNEXES

1	Effet du type de couverture et de la profondeur sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur.....	49
2	Analyse de variance de l'effet du type de couverture et de la profondeur sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur.....	50
3	Températures moyennes et précipitations hebdomadaires enregistrées à Deschambault du 30 septembre au 24 novembre 2001.....	51
4	Analyse de variance de l'effet de la durée d'entreposage, selon le type de couverture et la profondeur dans le silo, sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur	52
5	Température de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur en fonction du type de couverture, de la profondeur et de la durée.....	53

RÉSUMÉ

Dans le but d'éliminer les déchets plastiques associés à l'utilisation du film de polyéthylène pour assurer l'étanchéité des silos, certains chercheurs ont proposé des bioenrobages comestibles à base d'amidon, de protéines ou d'huiles végétales (Brusewitz et al, 1991). Toutefois les bioenrobages développés jusqu'à date n'ont pas assuré une bonne étanchéité à l'air et à l'eau, de sorte que cette technique n'est pas utilisée en pratique. Une expérience a été réalisée pour évaluer deux enrobages biodégradables, l'un à base de protéine de soya et l'autre à base de caséine, comme matériel de recouvrement pour protéger l'ensilage de maïs exposé à la pluie et au soleil, dans un environnement naturel. L'ensilage de maïs a été récolté à 39% de matière sèche (MS) et ensilé dans des seaux de 29,5 litres (33,6 cm de diamètre par 38 cm de profondeur) à une densité moyenne de 200 kg MS/m³. Nous avons comparé l'effet des deux bioenrobages, du plastique (0,15 mm) et de l'absence de couverture sur les caractéristiques de l'ensilage, après 4 semaines et 8 semaines d'entreposage, dans trois segments du silo : surface (S) (0-13 cm), intermédiaire (I) (13-26 cm) et profond (P) (26-38 cm). Les résultats montrent que les deux bioenrobages ont assuré le même niveau de protection à l'ensilage de maïs durant les 8 semaines d'entreposage. Ils ont protégé l'ensilage de maïs contre l'infiltration d'eau, prévenu la détérioration associée à l'infiltration d'air (chauffage, croissance des moisissures et pertes de MS) et limité la baisse de valeur nutritive dans les 13 premiers cm beaucoup mieux qu'en l'absence de couverture. Pour ces caractéristiques, l'ensilage protégé avec les bioenrobages se compare beaucoup mieux à l'ensilage sous plastique qu'à l'ensilage non couvert, même s'il en diffère un peu. Les couvertures n'ont influencé que légèrement la qualité de l'ensilage dans le segment profond (26-38 cm). À cette profondeur, les bioenrobages ont donné un ensilage de qualité comparable au plastique globalement et un peu meilleure que le non couvert au niveau des paramètres de la fermentation, à cause de l'infiltration d'air et l'infiltration d'eau jusqu'à ce niveau dans l'ensilage non couvert. Cependant les bioenrobages n'ont pas permis une aussi bonne fermentation que le plastique dans les 26 premiers cm. Celle-ci a plutôt été comparable à celle de l'ensilage non couvert après 8 semaines d'entreposage. En fait les ensilages sous bioenrobage ont subi une meilleure fermentation que le non couvert dans les 13 premiers cm pendant les 4 premières semaines d'entreposage, mais après 8 semaines leur pH a atteint un niveau aussi élevé que dans l'ensilage non couvert dans les 26 premiers cm. La détérioration aérobie de l'ensilage couvert avec les bioenrobages semble avoir été initiée par l'activité des bactéries aérobies, puisqu'on a observé une acidification sans développement apparent de moisissures, mais elle a atteint un stade beaucoup moins avancé que dans l'ensilage non couvert, dans les 26 premiers cm. Ces données permettent de prédire que, sous les conditions du Québec, les bioenrobages sous étude permettront probablement de protéger convenablement jusqu'au printemps l'ensilage de maïs récolté à la fin de septembre.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier particulièrement M. Michel Atkins et Mme Sylvie Atkins de l'IRDA à Deschambault pour le suivi technique de l'expérience. Des remerciements vont également au personnel du CRSAD impliqué dans ce projet pour la réalisation des silos expérimentaux et pour les analyses en laboratoire. Merci aussi à Mme Michèle Grenier de l'IRDA à Sainte-Foy pour le support apporté au niveau de l'analyse statistique des résultats. Nous tenons aussi à remercier Mme Karine Marcoux, étudiante en agronomie, pour son assistance au niveau de la préparation de ce rapport. Merci finalement au fonds FCAR-IRDA et au Conseil pour le développement de l'agriculture au Québec (CDAQ) pour leur soutien financier.

INTRODUCTION

Les silos horizontaux gagnent de la popularité parce qu'ils présentent des avantages économiques par rapport aux silos tours pour les fermes qui doivent entreposer de grandes quantités d'ensilage. Cependant, puisqu'ils ont une grande surface exposée à l'air, ces silos présentent un risque élevé de subir des pertes de matière sèche importantes suite à l'infiltration d'air si le scellage n'est pas adéquat. L'entrée d'air dans le silo pendant la période d'entreposage affecte de façon marquée non seulement la perte de matière sèche et les caractéristiques de la fermentation, mais aussi la valeur nutritive de l'ensilage et sa stabilité aérobie après l'ouverture du silo (Bolsen et al, 1993 ; Bolsen, 1997 ; Buckmaster et al, 1989 ; Ruppel et al, 1995).

Le film de polyéthylène convient bien pour protéger l'ensilage et en empêcher la détérioration parce qu'il est relativement imperméable à l'infiltration d'air (McDonald et al, 1991), peu coûteux et flexible. Cependant l'application du film de polyéthylène sur l'ensilage demande beaucoup de travail et la disposition du polyéthylène est devenue un problème environnemental. Selon Hunt et al (1990) le plastique est un matériel inerte et non-biodégradable qui représente 30% des déchets solides municipaux. Dans le but de réduire la quantité de déchet de ce polymère synthétique, un grand nombre de travaux de recherche ont porté sur la production, à partir de produits naturels, de films constitués de polymères biodégradables. L'utilisation d'un film comestible qui fournirait une bonne protection contre l'infiltration d'air et pourrait être mêlé à l'ensilage lors de l'alimentation constitue une alternative au film plastique. Un produit de Nutri-Shield Inc., qui est sous licence et approuvé par le FDA, est disponible en deux formulations, l'une à base de caséine (NSI) et l'autre à base de tourteau de soya (NSII). La formulation NSI a réduit de façon efficace l'absorption d'eau dans le foin de luzerne en cubes (Huhnke et Brusewitz, 1990). Par ailleurs, l'ensilage de maïs protégé avec le biofilm à base de soya (NSII) ne s'est pas mieux conservé que l'ensilage non protégé Brusewitz et al (1991). Une limitation majeure des films protéiques est leur faible efficacité en tant que barrière à la vapeur d'eau, qui peut être attribuée à la nature hydrophile des substances protéiques dont ils sont constitués (Krochta, 1992 ; McHugh et al, 1993). Différentes modifications des propriétés barrières peuvent être obtenues en induisant la formation de liens chimiques intermoléculaires et intramoléculaires par des moyens physiques et chimiques (Ghorpade et al, 1995 ; Gennedios et al, 1995 ; Yannas et Tobolsky, 1967). Les films SPI, qui ne contenaient pas de glycérol, un polyol, étaient cassants et inutilisables (Cunningham et al, 2000). Le glycérol a amélioré de façon significative la formation de liens dans les chaînes protéiques du lait, notamment les caséinates (Brault et al, 1997). Des polysaccharides acides tels le «carboxymethyl cellulose» forment des complexes électrostatiques avec la protéine (Imeson et al, 1977). Les interactions qui conduisent à la formation de liens covalents entre la protéine et le polysaccharide sont particulièrement désirables, parce que le complexe ainsi formé est plus stable à la chaleur et aux effets ioniques.

Il y a aussi eu des recherches sur les enrobages à base d'amidon depuis plusieurs années. L'amidon est un polysaccharide très abondant, qui est très biodégradable et est peu dispendieux. Un enrobage biodégradable à base d'amidon et de glycérol (20%) récemment développé a eu à peu près les mêmes propriétés mécaniques que le polystyrène. Cependant sa résistance à l'eau n'était pas suffisante pour qu'on puisse l'utiliser pour remplacer le plastique dans l'industrie de l'emballage alimentaire (Chen et al, 2002). Par ailleurs, Berger et al (2002) ont essayé de développer un bioenrobage économiquement intéressant pour protéger l'ensilage. Ils ont utilisé un enrobage à base d'amidon et de sel recouvert d'une mince couche de paraffine fondu pour recouvrir l'ensilage de maïs. Ils rapportent une réduction de 92% de la quantité d'ensilage non consommable à la surface du silo et une augmentation de 73% de la quantité d'ensilage servie aux animaux comparativement à l'ensilage non couvert.

L'objectif de cette expérience est donc d'évaluer deux enrobages biodégradables, l'un à base de protéine de soya et l'autre à base de caséine, comme matériel de recouvrement pour protéger l'ensilage dans un environnement naturel comme c'est généralement le cas en silos horizontaux sans toit.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Réactifs

De l'isolat de protéine de soya (900 g de protéine/kg) a été acheté de Dupont Campbell Protein Technologies (St-Louis, MO, USA). Du caséinate de calcium (CAS) en poudre a été obtenu de New Zeland Milk product Inc. (Santa Rosa, CA, USA). Un sel de sodium de « carboxymethyl cellulose » (CMC) de haute viscosité a été acheté de Sigma-Aldrich (Montréal, QC, Canada). Du glycérol (grade réactif 99,5%) a été obtenu de American Chemicals Ltd (Montréal, QC, Canada). De la poudre d'ensilage a été préparée dans nos laboratoires avec un moulin à broyer (Braun KSM 2B modèle 4041) d'une capacité de 70 g.

Préparation des bioenrobages

Bioenrobage A : Enrobage de base : La protéine de soya a d'abord été ajoutée à l'eau au taux de 50 g/kg et chauffée à 45°C pendant 10 minutes. Le glycérol, la poudre d'ensilage et le CMC ont ensuite été ajoutés à la protéine liée aux taux de 25 g/kg, 10 g/kg et 2,5 g/kg respectivement. Revêtement protecteur : la même formule à base de protéine de soya a été chauffée à 90°C pendant 30 minutes et appliquée directement sur le revêtement de base.

Bioenrobage B : Enrobage de base : La caséinate a d'abord été ajoutée à l'eau au taux de 50 g/kg et chauffée à 45°C pendant 10 minutes. Le glycérol, la poudre d'ensilage et le CMC ont ensuite été ajoutés à la protéine liée aux taux de 25 g/kg, 10 g/kg et 2,5 g/kg respectivement. Revêtement protecteur : la même formule à base de caséinate a été chauffée à 90°C pendant 30 minutes et appliquée directement sur le revêtement de base.

Récolte du fourrage et préparation des silos expérimentaux

Un hybride de maïs (*Zea māis* L., Pioneer 39Y85, 2450 UTM) cultivée sur la ferme du Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) a été récoltée le 27 septembre 2001 (répétitions 1 et 2) et le 28 septembre 2001 (répétitions 3 et 4) à 35-40% de matière sèche. La récolte a été effectuée avec une fourragère conventionnelle réglée pour donner une longueur théorique de hachage de 6 à 12mm. 20 kg de fourrage ont été compressés dans des seaux de 29,5 litres (33,6 cm de diamètre et 38 cm de profondeur) à une densité moyenne 200 kg MS/m³. Chaque silo a été rempli en trois couches successives, soit 0-13 cm (S), 13-26 cm (I) et 26-38 cm (P), séparées par des moustiquaires de plastique pour faciliter la séparation des couches après la période de conservation. La couche de surface (0-13 cm) a été couverte avec l'un des traitements suivants :

- 1- Non couvert,
- 2- Film de polyéthylène de couleur noire de 0,15 mm d'épaisseur (plastique),
- 3- Bioenrobage A et
- 4- Bioenrobage B.

Deux couches de bioenrobage ont été appliquées sur les ensilages des traitements 3 et 4. Pour ces deux traitements, 1,10 kg et 0,25 kg des enrobages de base et des revêtements protecteurs respectifs ont été appliqués sur chaque silo de 0,096 m² pour un taux combiné d'application de 14 kg/m².

Les silos ont été entreposés à l'extérieur sans protection additionnelle de façon à simuler les conditions rencontrées dans des silos sans toit. La moitié des silos ont été ouverts et vidés après quatre semaines et l'autre moitié après huit semaines. Ainsi, un total de 32 silos expérimentaux ont été fabriqués (4 traitements x 4 répétitions x 2 durées d'entreposage).

Suivi de température de l'ensilage et données météorologiques

Lors du remplissage des silos, des fils thermocouples ont été insérés dans la moitié des silos (les silos entreposés pendant huit semaines), au centre de chaque couche d'ensilage, c'est-à-dire à 6 cm, 19 cm et 32 cm de la surface et les températures ont été enregistrées en continu aux 10 minutes avec moyennes aux 4 heures pendant toute la durée d'entreposage. Ces données ont permis de déterminer la température moyenne journalière et la température moyenne journalière maximale pour chaque couche d'ensilage. De plus le degré de chauffage de l'ensilage dû à la fermentation et à l'introduction d'air a été caractérisé en faisant la somme des écarts journaliers de température par rapport à la température ambiante pendant toute la durée d'entreposage. Finalement les données de température et de précipitations enregistrées à la station météorologique située sur la ferme du CRSAD pendant les 8 semaines qu'a durée l'expérience ont été compilées sur une base hebdomadaire.

Prélèvement d'échantillons et analyse de l'ensilage

Des échantillons d'ensilage ont été prélevés dans chaque silo et dans chaque couche, lors du remplissage et après la période d'entreposage. Une partie de l'échantillon d'ensilage a été séchée au four à 60°C jusqu'à ce que le poids se stabilise pour déterminer la matière sèche. Ces échantillons ont été broyés à 1 mm et conservés pour analyse ultérieure. La seconde partie de l'échantillon d'ensilage a été congelée jusqu'au moment des analyses. Les paramètres de la fermentation ont été analysés sur les échantillons congelés alors que les paramètres de la valeur nutritive l'ont été sur les échantillons séchés.

Le développement des moisissures, la teneur en matière sèche (MS), la perte de MS et le pH ont été déterminés après 4 semaines et 8 semaines. Les hydrates de carbone solubles (HCS), les acides organiques (lactique, acétique, propionique et butyrique), l'azote ammoniacal (N-NH₃), la protéine brute (PB), la fibre par détergent acide (ADF), la fibre par détergent neutre (NDF), la protéine liée (ADF-protéine) et les cendres totales ont été déterminées après 8 semaines d'entreposage.

Le développement des moisissures a été évalué visuellement selon une échelle de 0 à 5 (0 = aucune moisissure détectable, 5 = mycelium très dense). La perte de matière sèche (MS) a été déterminée en pesant le fourrage de chaque couche lors de la mise en silo et après 4 semaines ou 8 semaines d'entreposage et en déterminant la teneur en MS. Le pH a été déterminé sur 10-15 g d'ensilage placé dans 20-30 ml d'eau distillée pendant 20 minutes, en insérant l'électrode dans le mélange (Fisher Scientific Accumet 925). Les hydrates de carbone solubles (HCS), les acides organiques et l'azote ammoniacal (N-NH₃) ont été dosés après avoir réalisé une extraction avec de l'acide sulfurique 0,2 N (Smith et al, 1964). Les hydrates de carbone 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 0,0025N avec un débit de 0,4 ml/min et une température de 40°C. La détection des acides organiques et des sucres solubles a été faite avec un détecteur à indice de réfraction (Waters 410) selon la méthode du CRSAD (communication personnelle). Le dosage de N-NH₃ a été réalisé par colorimétrie (CPAQ, 1982) avec un spectrophotomètre de marque Milton Roy (modèle 1201).

Le dosage des PB (N x 6,25) a été réalisé selon la méthode Kjeldahl (A.O.A.C., 978.02 et 954.01, 1990) avec un appareil Tecator (modèle Kjeltec Auto 1030 Analyser) après minéralisation de l'échantillon d'ensilage (digestion system 20, 1015 Digestor). Les teneurs en fibres par détergent acide (ADF) (A.O.A.C., 973.18, 1990) et en fibres par détergent neutre (NDF) (CPAQ, 1982) ont été déterminées selon la méthode de Van Soest sur un appareil Tecator

(Fibertec System 1010 Extractor). La protéine liée (ADF-protéine) a été déterminée selon la méthode Kjeldahl après avoir traité l'échantillon selon la méthode de Van Soest (A.O.A.C., 1990). Les cendres totales ont été déterminées par incinération à 600°C pendant 2 heures (CPAQ, 1982).

Analyse statistique

Toutes les données ont été analysées statistiquement avec la procédure GLM de SAS (SAS, Cary, North Carolina, USA). Les paramètres étudiés à la fois après 4 semaines et 8 semaines d'entreposage ont d'abord été analysés selon un dispositif en tiroirs, avec les 4 couvertures et les 2 durées d'entreposage en parcelles principales et les 3 profondeurs en parcelles secondaires. Puisque cette analyse a révélé des interactions significatives « couverture x durée x profondeur », chaque durée d'entreposage a été analysée séparément. Ainsi ces paramètres, tout comme ceux étudiés seulement après 8 semaines, ont été analysés selon un dispositif en tiroirs avec les 4 couvertures en parcelles principales et les 3 profondeurs en parcelles secondaires, selon le modèle suivant :

<u>Source de variation</u>	<u>Degrés de liberté</u>
4 couvertures	3
4 blocs	3
Erreur A	9
3 profondeurs	2
Couvertures x profondeurs	6
Erreur B	24
Total	47

La méthode des contrastes orthogonaux a été utilisée pour séparer l'effet des différents traitements. Les contrastes ont été définis *a priori*. Les comparaisons pour les couvertures ont été :

1- Bioenrobages vs ensilage non couvert,

2- Bioenrobages vs plastique,

3- Bioenrobage A vs bioenrobage B.

Pour les profondeurs, les comparaisons ont été :

1- Couche de surface vs couches intermédiaire et couche profonde,

2- Couche intermédiaire vs couche profonde.

Les combinaisons de ces contrastes ont aussi été utilisées pour apporter des précisions au niveau de l'interaction couverture par profondeur.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Généralités

Les principales caractéristiques du maïs fourrager, tel que mesurées au moment de la mise en silo, sont présentées au tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques du maïs fourrager au moment de la mise en silo

Critère	Valeur
Hybride	Pioneer 39Y85 (2450 UTM)
Date de récolte	27 et 28 septembre 2001
Matière sèche (%)	39,23
Sucres solubles (%)	5,67
Protéine brute (%)	7,05
Protéine liée à la fibre (%)	0,59
Fibre par détergent acide (%)	25,89
Fibre par détergent neutre (%)	46,24
Cendres (%)	3,19

Les résultats expérimentaux obtenus après 4 semaines et 8 semaines d'entreposage à l'extérieur sont présentés à l'annexe 1 (effet des couvertures et des profondeurs sur les différents paramètres étudiés) et à l'annexe 2 (analyse de variance correspondante). Une synthèse de l'effet des couvertures, pour l'ensemble du silo, sur chacun des paramètres étudiés est présentée au tableau 2. Les couvertures ont influencé de façon significative la plupart des paramètres analysés. L'effet des couvertures de même que l'effet de la profondeur dans le silo et l'interaction de ces deux facteurs, pour chacun des paramètres analysés, sont discutés ci-après.

Tableau 2. Effet des couvertures sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs, pour l'ensemble du silo (0-38 cm)

Critère	Couvertures				Probabilité d'une différence significative (1)	
	Non couvert	Plastique	Bioenrobage A	Bioenrobage B		
4 semaines						
Caractéristiques générales						
Teneur en MS (%)	23,33	38,63	37,25	37,87	**	
Moisissures (0-5)	1,29	0	0	0	**	
Perte de MS (%)	18,15	4,33	5,12	4,53	**	
Fermentation						
pH	5,75	4,01	4,3	4,45	**	
8 semaines						
Caractéristiques générales						
Teneur en MS (%)	21,45	37,95	34,35	33,47	**	
Moisissures (0-5)	0,88	0	0	0	**	
Chauffage (2) (°C)	124,69	-5,52	26,12	35,03	**	
Perte de MS (%)	18,95	4,58	6,88	7,13	**	
Cendres (%)	3,31	3,14	3,22	3,16	NS	
Fermentation						
pH	5,35	3,96	5,22	5,30	*	
Acide lactique (%)	1,55	3,39	1,41	1,27	**	
Acide acétique (%)	0,64	0,91	0,39	0,37	**	
Acide propionique (%)	0,39	0,25	0,28	0,26	NS	
Azote ammoniacal (éq. PB) (%)	0,29	0,37	0,20	0,19	**	
Sucres solubles (%)	0,60	2,02	1,43	1,24	**	
Valeur nutritive						
Protéine brute (%)	8,48	7,33	7,83	7,80	**	
Protéine liée (%)	0,72	0,53	0,57	0,58	NS	
ADF (%)	26,09	24,13	24,09	24,25	NS	
NDF (%)	44,60	40,88	41,62	42,08	**	

(1) ** = probabilité <0,01 ; * = probabilité <0,05 ; NS = différence non significative

(2) sonne des écarts journaliers de température par rapport à la température ambiante

2 Caractéristiques de l'ensilage après 4 semaines d'entreposage

2.1 Caractéristiques générales

a. Teneur en matière sèche

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en MS comparable entre eux (37,25% et 37,87%) ($P=0,3310$) et non significativement différente du plastique (38,63%) ($P=0,0685$) mais nettement plus élevée que le non couvert (23,33%) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé la teneur en matière sèche de l'ensilage de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). Dans l'ensilage non couvert, la teneur en matière sèche a été plus faible en surface qu'en profondeur (20,00%, 24,20% et 25,80% dans les couches S, I et P) alors que dans l'ensilage sous plastique elle a été comparable à toutes les profondeurs (38,90%, 38,55% et 38,45% dans les couches S, I et P) (figure 1).

Les bioenrobages A et B ont quant à eux donné un ensilage avec une teneur en matière sèche légèrement plus faible dans la couche S que dans les couches I et P (36,60%, 37,15% et 38,00% pour le bioenrobage A et 37,15%, 37,70% et 38,75% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P). L'écart a été comparable pour les deux bioenrobages ($P=0,9083$), plus faible que chez le non couvert ($P=0,0001$) mais non significativement différent du plastique ($P=0,0673$). Par contre l'écart entre la couche I et la couche P n'a pas été influencé par les couvertures (figure 1).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0001	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0685	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0673
Bio. A vs Bio. B	0,3310	A vs B X S vs I et P	0,9083
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,4564
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,2333
I vs P	0,0232	A vs B X I vs P	0,8418

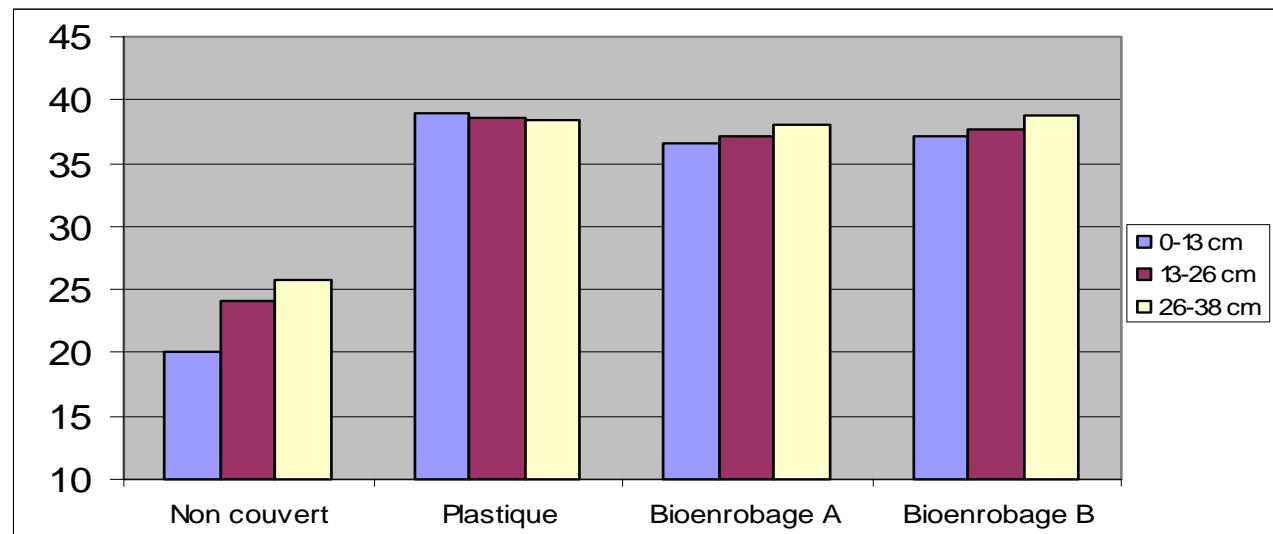


Figure 1. Teneur en matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage

Les effets observés s'expliquent par l'infiltration d'eau de précipitations dans l'ensilage non couvert jusque dans la couche la plus profonde alors que les bioenrobages ont pratiquement empêché toute infiltration d'eau dans l'ensilage pendant les 4 premières semaines d'entreposage. Pendant cette période, 113,7 mm de précipitations ont été enregistrés à Deschambault (annexe 3).

b. Moisissures

Les bioenrobages A et B ont tous les deux ($P=1,000$) donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec aucune moisissure, tout comme le plastique ($P=1,0000$) et contrairement au non couvert (1,29) ($P=0,0004$). Dans ce dernier l'épaisseur de la couche d'ensilage détériorée suite au développement des moisissures et jugée inconsommable a été de 8,75 cm en moyenne.

De plus les couvertures ont influencé le développement des moisissures de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). Dans l'ensilage non couvert les notes de moisissures ont été plus élevées en surface qu'en profondeur (2,75, 1,13 et 0 dans les couches S, I et P) alors que ce ne fut pas le cas dans l'ensilage sous plastique (figure 2).

L'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B n'a pas présenté, lui non plus, plus de moisissures dans la couche S ($P=0,0001$) et dans la couche I ($P=0,0025$) que dans les couches plus profondes comme ce fut le cas dans le non couvert (figure 2).

Effets principaux	Probabilités Note (0-5)	Épaisseur	Interactions	Probabilités Note (0-5)
Couverture	0,0022	0,0066	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0004	0,0013	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	1,0000	1,0000	A + B vs plast. X S vs I et P	1,0000
Bio. A vs Bio. B	1,0000	1,0000	A vs B X S vs I et P	1,0000
Profondeur	0,0002		A + B vs tem. X I vs P	0,0025
S vs I et P	0,0001		A + B vs plast. X I vs P	1,0000
I vs P	0,0493		A vs B X I vs P	1,0000

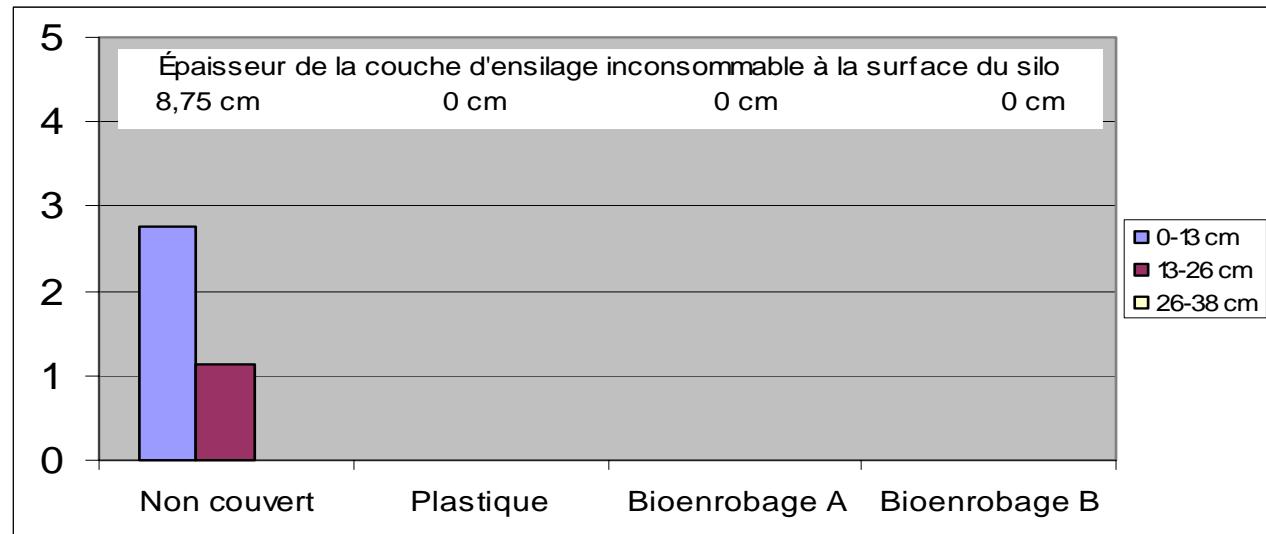


Figure 2. Note de moisissures selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage¹

1 : échelle de 0 à 5 (0 = aucune moisissure, 5 = complètement moisi)

c. Perte de matière sèche

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, une perte de matière sèche comparable entre eux (5,12% et 4,53%) ($P=0,5364$) et comparable à l'ensilage sous plastique (4,33%) ($P=0,5464$) mais plus faible que l'ensilage non couvert (18,15%) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé la perte de matière sèche de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). Dans l'ensilage sous plastique la perte de matière sèche a été relativement uniforme à toutes les profondeurs (4,45%, 4,45% et 3,10% dans les couches S, I et P) alors que dans l'ensilage non couvert elle a été beaucoup plus élevée dans les couches S et I (33,38%, 16,20% et 4,88% dans les couches S, I et P), ce qui est la conséquence d'une forte dégradation de l'ensilage de ces couches (figure 3).

On observe par ailleurs dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B une perte de matière sèche légèrement plus élevée dans la couche S que dans les couches I et P et dans la couche I que dans la couche P, avec des valeurs de 6,35%, 5,25% et 3,76% pour le bioenrobage A et 6,03%, 5,19% et 2,38% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. Les écarts sont comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,8166$ et $0,5102$) et comparables à ceux observés sous plastique ($P=0,8008$ et $0,6428$) mais beaucoup plus faibles que dans l'ensilage non couvert ($P=0,0001$ et $0,0001$) (figure 3).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0001	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,5464	A + B vs plast. X S vs I et P	0,8008
Bio. A vs Bio. B	0,5364	A vs B X S vs I et P	0,8166
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,0001
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,6428
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,5102

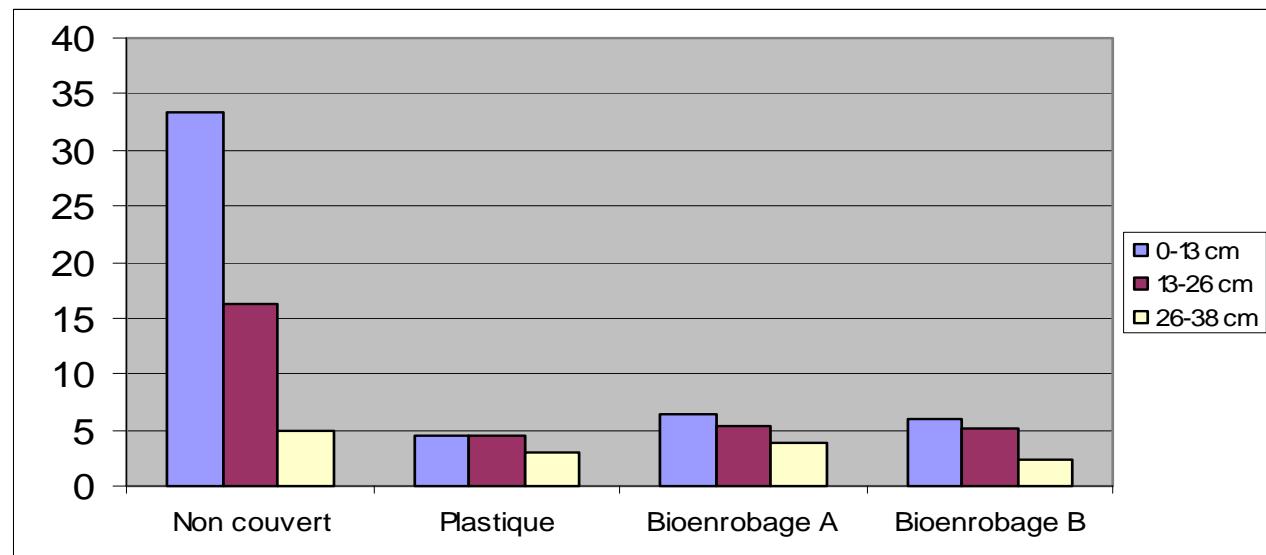


Figure 3. Perte de matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage

2.2 Fermentation

a. pH

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec un pH comparable entre eux (4,30 et 4,45) ($P=0,4335$) et non significativement différent du plastique (4,01) ($P=0,0585$) mais plus bas que le non couvert (5,75) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé le pH de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). L'ensilage sous plastique a maintenu un pH uniforme et bas quelle que soit la profondeur (4,00, 4,03 et 4,01 pour les couches S, I et P), ce qui est un indice d'une bonne qualité de conservation à la grandeur du silo. Par contre, le pH de l'ensilage non couvert a été beaucoup plus élevé en surface qu'en profondeur (6,67, 6,53 et 4,01 dans les couches S, I et P), ce qui indique que la qualité de conservation a été bonne seulement dans la couche P (figure 4).

Les bioenrobages A et B ont par ailleurs donné, contrairement à l'ensilage sous plastique ($P=0,0240$), un pH plus élevé dans la couche S que dans les couches I et P, avec des valeurs de 4,5, 4,37 et 4,02 pour le bioenrobage A et 5,11, 4,21 et 4,05 pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. L'écart a été beaucoup moins élevé que chez le non couvert ($P=0,0089$) et plus élevée avec le bioenrobage B qu'avec le bioenrobage A ($P=0,0435$). Les bioenrobages ont aussi donné un pH légèrement plus élevé dans la couche I que dans la couche P. L'écart a été comparable entre les deux bioenrobages ($P=0,6176$), pas suffisamment élevée pour les différencier du plastique ($P=0,4844$) et beaucoup moins élevée que chez le non couvert ($P=0,0001$) (figure 4).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0001	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0089
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0585	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0240
Bio. A vs Bio. B	0,4335	A vs B X S vs I et P	0,0435
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,0001
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,4844
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,6176

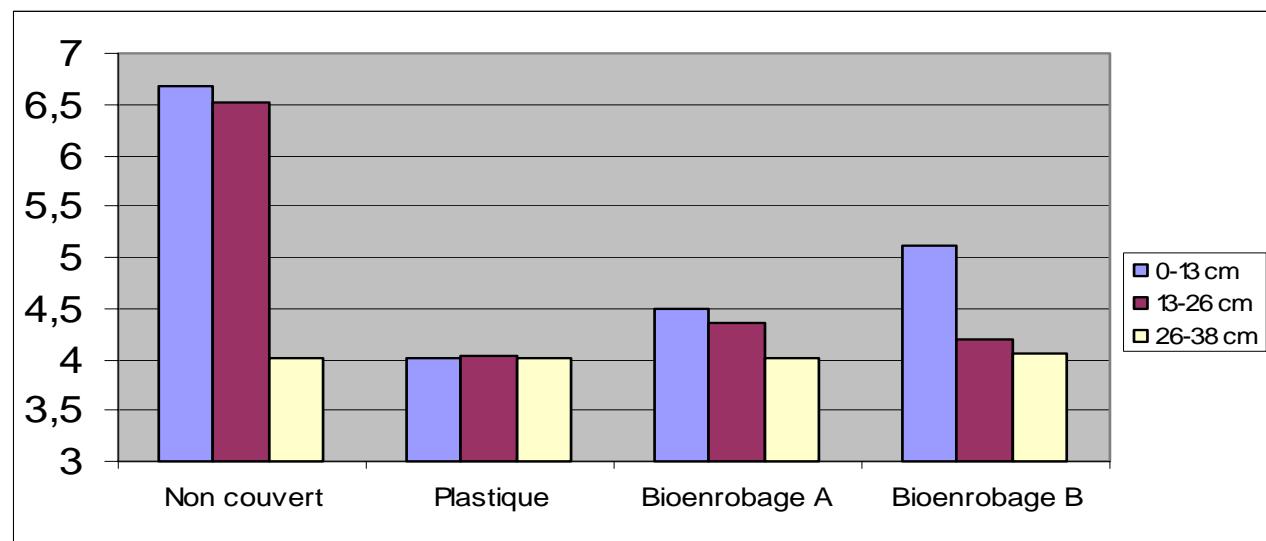


Figure 4. pH selon le type de couverture et la profondeur après 4 semaines d'entreposage

2.3 Synthèse (4 semaines)

Dans l'ensilage recouvert de plastique et gardé à l'extérieur pendant quatre semaines, la teneur en matière sèche a démontré une grande uniformité (38,90%, 38,55% et 38,45% pour S, I et P), avec une moyenne de 38,63% dans les trente-huit centimètres analysés. Aussi, la perte de matière sèche a été inférieure à 5% (4,45%, 4,45% et 3,10% pour S, I et P) et aucune moisissure n'a été détectée dans chaque couche. Finalement le pH s'est abaissé à environ 4,0 à toutes les profondeurs.

Quant à l'ensilage non couvert, on y a observé une diminution de la teneur en matière sèche à un niveau compris entre 20 et 26% selon la profondeur (20,00%, 24,20% et 25,80% pour S, I et P), conséquence de l'infiltration d'eau, et le développement des moisissures surtout dans la couche S (2,75) mais aussi dans la couche I (1,13), indice que l'infiltration d'air s'est faite jusqu'à ce niveau. L'altération des couches S (0-13 cm) et I (13-26 cm) s'est reflétée aussi par des pH supérieurs à 6 dans les couches S et I et par une perte de matière sèche supérieure à 30% dans la couche S et à 15% dans la couche I.

Les bioenrobages A et B se sont comportés de la même façon pour chacun des paramètres analysés après 4 semaines sauf le pH. En fait les bioenrobages ont donné un ensilage avec une teneur en matière sèche (37,25% et 37,87% vs 38,63%) et une perte de matière sèche (5,12% et 4,53% vs 4,33%) comparables au plastique et n'ont donné lieu à aucun développement des moisissures tout comme le plastique. Cela peut être interprété comme un signe que l'infiltration d'eau et l'infiltration d'air ont été négligeables ou nulles pendant les quatre premières semaines d'entreposage. Cependant ces ensilages ont moins bien fermenté en surface que celui sous plastique, tel qu'indiqué par un pH significativement plus élevé dans la couche S que dans les couches plus profondes. Cela est probablement la conséquence d'une légère infiltration d'air. En ce sens le bioenrobage A (4,50 vs 4,37 et 4,02) a fait meilleure figure que le B (5,11 vs 4,21 et 4,05). Cependant, dans un cas comme dans l'autre, l'augmentation de pH a été beaucoup plus faible que dans l'ensilage non couvert qui a présenté un pH très élevé même dans la couche I (6,67, 6,53 et 4,01 pour les couches S, I et P).

3 Caractéristiques de l'ensilage après 8 semaines d'entreposage

3.1 Caractéristiques générales

a. Teneur en matière sèche

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en matière sèche comparable entre eux (34,35% et 33,47%) ($P=0,5534$) et plus faible que le plastique (37,95%) ($P=0,0100$) mais plus élevée que le non couvert (21,45%) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé la teneur en matière sèche de l'ensilage de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0220$). Dans l'ensilage non couvert, la teneur en matière sèche a été plus faible en surface qu'en profondeur (17,65%, 21,80% et 24,90% dans les couches S, I et P) alors que dans l'ensilage sous plastique elle a été comparable à toutes les profondeurs (37,70%, 38,05% et 38,10% dans les couches S, I et P). Les bioenrobages A et B ont quant à eux présenté une plus faible teneur en matière sèche dans la couche S que dans les couches plus profondes, avec des valeurs de 32,95%, 34,60% et 35,50% pour le bioenrobage A et 32,00%, 33,35% et 35,05% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. L'écart a été moins prononcé que chez le non couvert ($P=0,0082$) et pas suffisamment important pour les différencier du plastique ($P=0,1628$) (figure 5).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0001	Couverture x profondeur	0,0220
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0082
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0100	A + B vs plast. X S vs I et P	0,1628
Bio. A vs Bio. B	0,5534	A vs B X S vs I et P	0,9446
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,2182
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,3886
I vs P	0,0208	A vs B X I vs P	0,6309

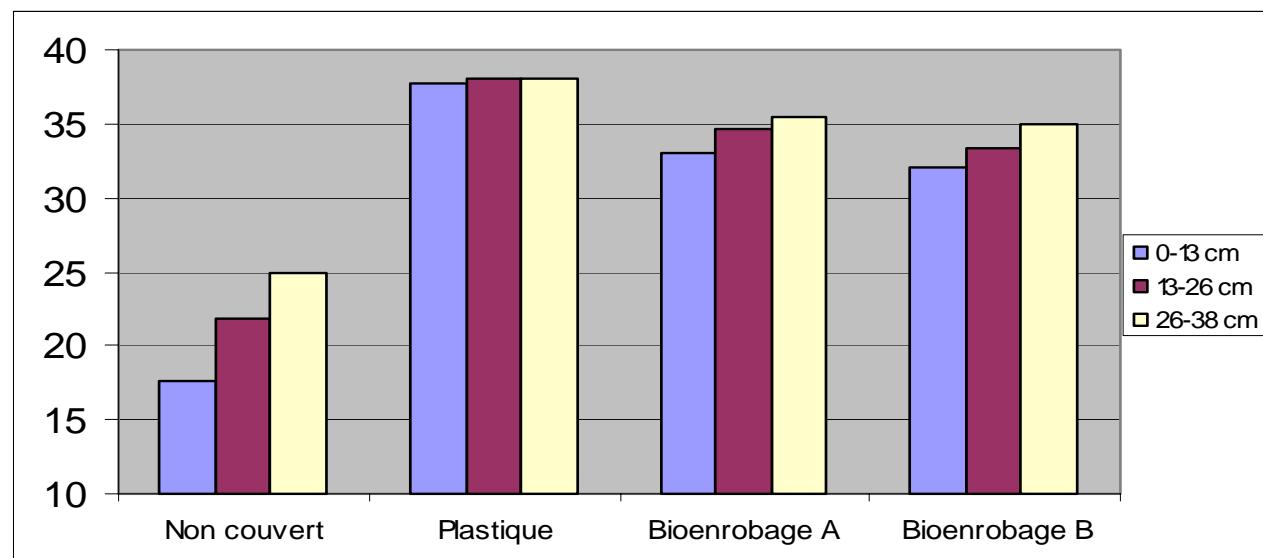


Figure 5. Teneur en matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

La plus faible teneur en matière sèche de l'ensilage non couvert par rapport à l'ensilage sous plastique s'explique principalement par l'infiltration d'eau de précipitations jusque dans les couches les plus profondes. L'effet a été beaucoup moins prononcé avec les bioenrobages que chez le non couvert puisque l'infiltration d'eau a commencé à se produire seulement après une certaine durée d'entreposage et que seulement 46,5 mm de précipitations ont été enregistrés à Deschambault pendant les 4 dernières semaines d'entreposage alors qu'il y en avait eu 113,7 mm pendant les 4 premières semaines (annexe 3).

b. Moisissures

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec aucune moisissure ($P=1,0000$) tout comme le plastique ($P=1,0000$) et contrairement au non couvert (0,88) ($P=0,0005$). Dans ce dernier l'épaisseur de la couche d'ensilage détériorée suite au développement des moisissures et jugée inconsommable a été de 8,0 cm en moyenne. De plus, l'ensilage non couvert présentait, à la grandeur du silo, une mauvaise odeur qui semblait due plus à une mauvaise fermentation qu'au développement des moisissures.

Les couvertures ont influencé le développement des moisissures de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). Dans l'ensilage non couvert les notes de moisissures ont été un peu plus élevées en surface qu'en profondeur (1,50, 0,88 et 0,25 dans les couches S, I et P) alors que ce ne fut pas le cas dans l'ensilage sous plastique (figure 6).

L'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B n'a pas présenté, lui non plus, plus de moisissures dans la couche S ($P=0,0001$) et dans la couche I ($P=0,0001$) que dans les couches plus profondes comme ce fut le cas dans le non couvert (figure 6).

Effets principaux	Probabilités Note (0-5)	Épaisseur	Interactions	Probabilités Note (0-5)
Couverture	0,0025	0,0001	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0005	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	1,0000	1,0000	A + B vs plast. X S vs I et P	1,0000
Bio. A vs Bio. B	1,0000	1,0000	A vs B X S vs I et P	1,0000
Profondeur	0,0001		A + B vs tem. X I vs P	0,0001
S vs I et P	0,0001		A + B vs plast. X I vs P	1,0000
I vs P	0,0017		A vs B X I vs P	1,0000

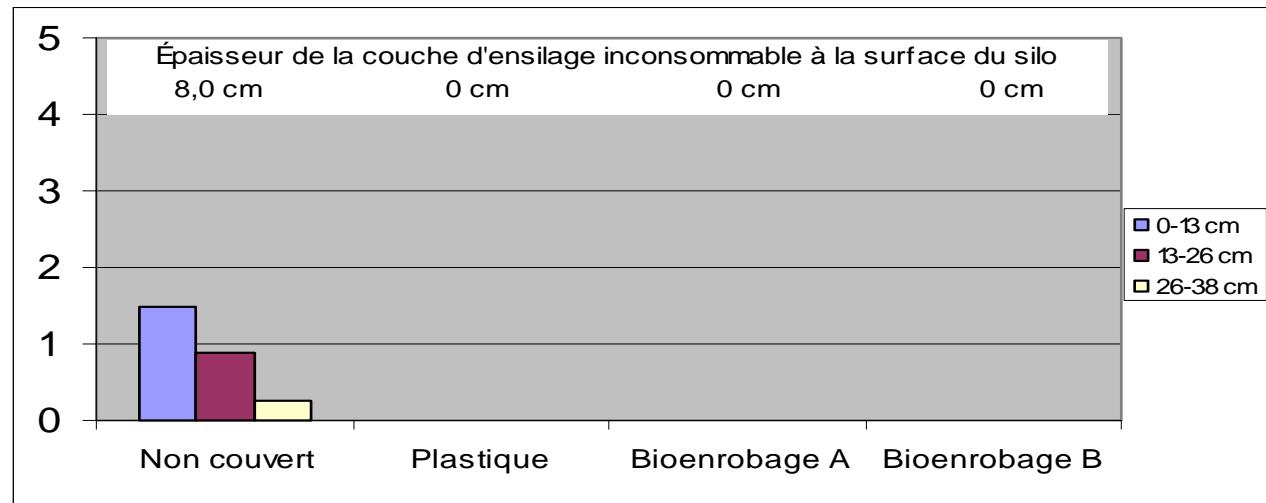


Figure 6. Note de moisissures selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage¹

1 : échelle de 0 à 5 (0 = aucune moisissure, 5 = complètement moisie)

c. Chauffage

Température maximale et nombre de jours pour l'atteindre

Dans l'ensilage sous bioenrobage, la température maximale a été d'environ 15°C quelle que soit la profondeur, tout comme dans l'ensilage sous plastique. Dans l'ensilage non couvert la température a atteint des niveaux plus élevés dans la couches S (34,01°C) et dans la couche I (21,44°C), mais pas dans la couche P (15,51°C). De plus ces températures ont été atteintes après 4 à 6 jours d'entreposage chez le non couvert, mais seulement après 16 à 17 jours dans l'ensilage protégé avec les bioenrobages et avec le plastique (annexe 8 et figure 7).

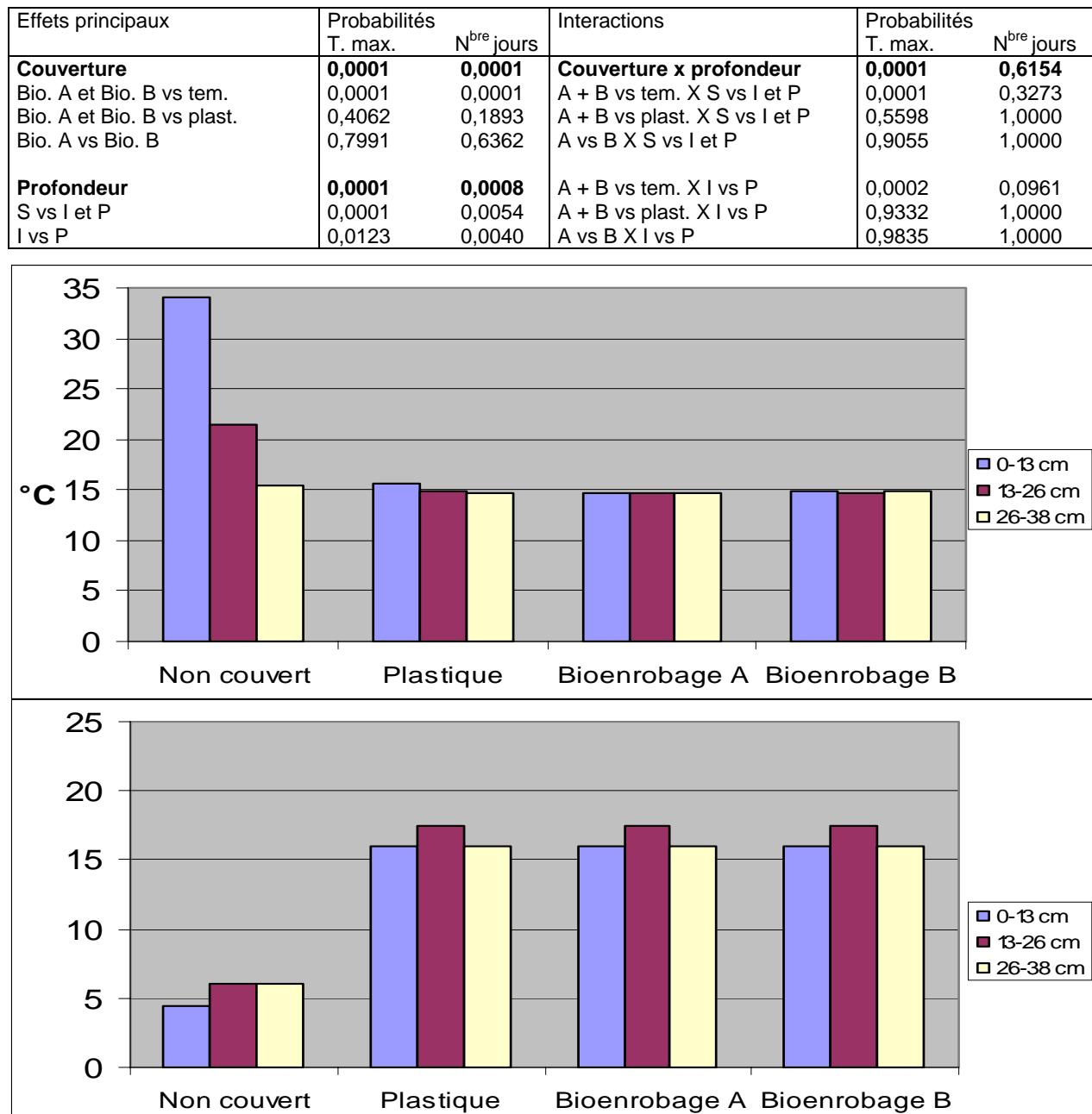


Figure 7. Température maximale et nombre de jours pour l'atteindre, selon le type de couverture et la profondeur, dans l'ensilage entreposé pendant 8 semaines

Somme des écarts journaliers de température par rapport à la température ambiante

Les bioenrobages A et B ont entraîné, pour l'ensemble du silo, une production de chaleur comparable entre eux ($26,12^{\circ}\text{C}$ et $35,03^{\circ}\text{C}$) ($P=0,3484$) mais plus grande que l'ensilage sous plastique ($-5,52^{\circ}\text{C}$) ($P=0,0012$) et plus faible que l'ensilage non couvert ($124,69^{\circ}\text{C}$) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé la production de chaleur de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). Dans l'ensilage sous plastique la production de chaleur a été positive uniquement dans la couche S avec des valeurs de $8,7^{\circ}\text{C}$, $-9,6^{\circ}\text{C}$ et $-15,6^{\circ}\text{C}$ dans les couches S, I et P alors que dans l'ensilage non couvert elle a été de $214,4^{\circ}\text{C}$, $139,3^{\circ}\text{C}$ et $20,3^{\circ}\text{C}$ dans les mêmes couches, ce qui est un indice d'une forte dégradation de l'ensilage des couches S et I (figure 8).

On observe aussi dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B une plus grande production de chaleur dans les couches S et I que dans les couches respectivement plus profondes, tel qu'indiqué par les valeurs de $40,77^{\circ}\text{C}$, $39,97^{\circ}\text{C}$ et $-2,37^{\circ}\text{C}$ pour le bioenrobage A et $48,92^{\circ}\text{C}$, $49,60^{\circ}\text{C}$ et $6,58^{\circ}\text{C}$ pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. Les écarts ont été comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,8980$ et $0,9471$) mais un peu plus grands que sous plastique ($P=0,9866$ et $0,0003$) et beaucoup plus faibles que dans l'ensilage non couvert ($P=0,0001$ et $0,0001$) (figure 8).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0001	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0012	A + B vs plast. X S vs I et P	0,9886
Bio. A vs Bio. B	0,3484	A vs B X S vs I et P	0,8980
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,0001
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,0003
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,9471

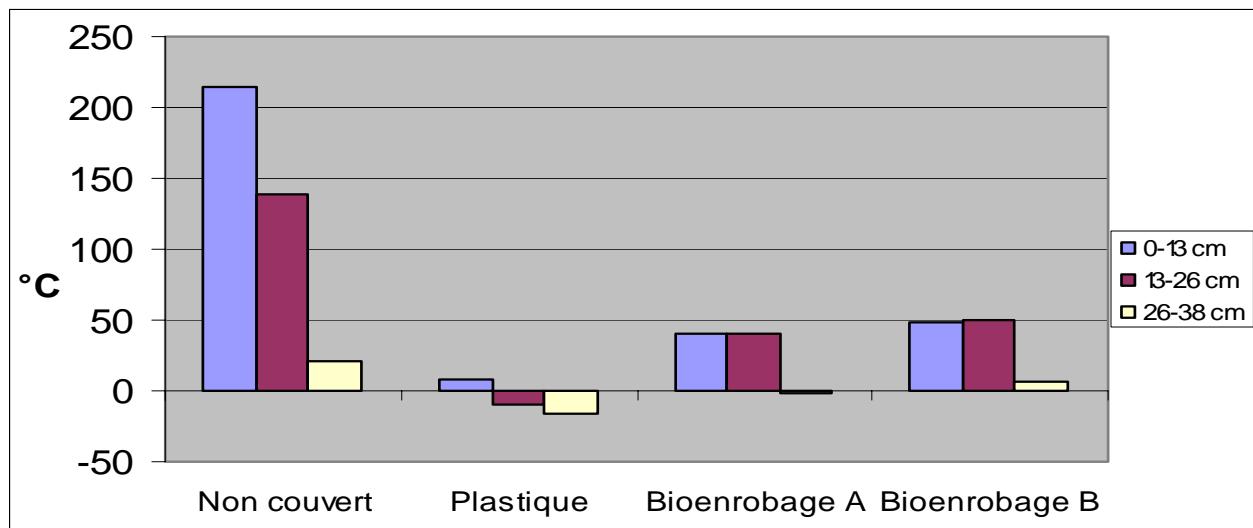


Figure 8. Production de chaleur selon le type de couverture et la profondeur dans l'ensilage entreposé pendant 8 semaines¹

1 : somme des écarts journaliers de température par rapport à la température ambiante

d. Perte de matière sèche

Les bioenrobages A et B ont entraîné, pour l'ensemble du silo, une perte de matière sèche comparable entre eux (6,88% et 7,13%) ($P=0,8578$) et non significativement différente de l'ensilage sous plastique (4,58%) ($P=0,0697$) mais beaucoup plus faible que l'ensilage non couvert (18,95%) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé la perte de matière sèche de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). Dans l'ensilage sous plastique la perte de matière sèche a été seulement un peu plus élevée dans les couches S et I que dans la couche P, avec des valeurs de 6,12%, 5,48% et 2,14% dans les couches S, I et P. Par contre, dans l'ensilage non couvert elle a été beaucoup plus élevée dans les couches S et I que dans la couche P, avec des valeurs de 34,27%, 17,91% et 4,68% dans les mêmes couches, ce qui est la conséquence d'une forte dégradation de l'ensilage des couches S et I (figure 9).

Dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B, la perte de matière sèche a été un peu plus élevée dans la couche S que dans les couches I et P et dans la couche I que dans la couche P, avec des valeurs de 7,59%, 8,39% et 4,67% pour le bioenrobage A et 7,98%, 7,90% et 5,53% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. Les écarts ont été comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,9109$ et $0,5237$) et comparables au plastique ($P=0,4720$ et $0,8732$) mais beaucoup plus faibles que dans l'ensilage non couvert ($P=0,0001$ et $0,0001$) (figure 9).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0001	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0001	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0697	A + B vs plast. X S vs I et P	0,4740
Bio. A vs Bio. B	0,8578	A vs B X S vs I et P	0,9109
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,0001
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,8732
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,5237

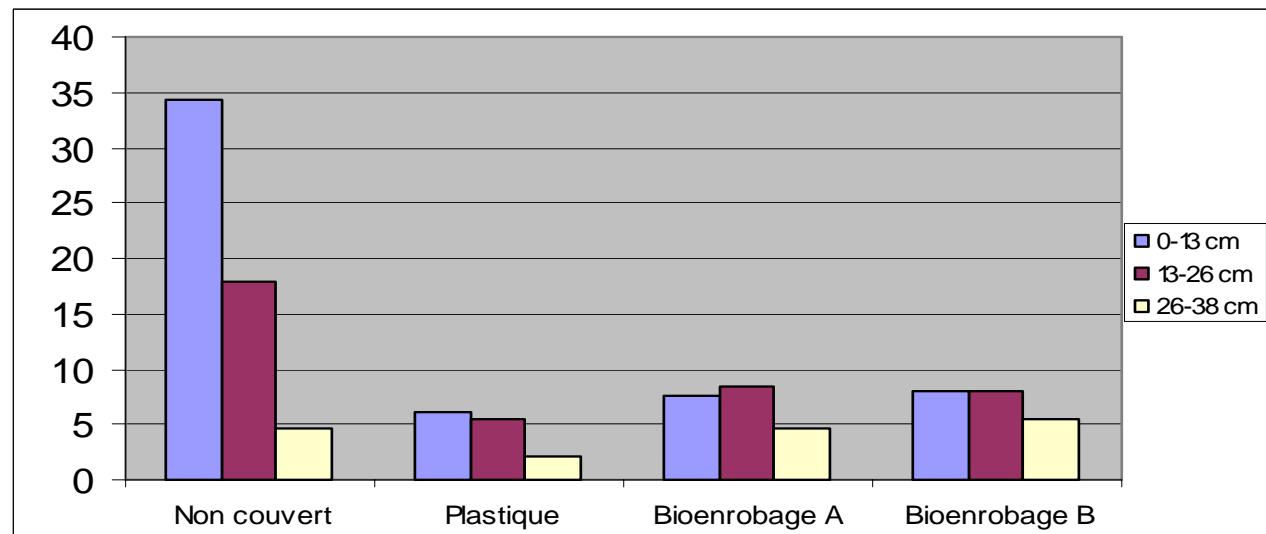


Figure 9. Perte de matière sèche selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

e. Cendres

La teneur en cendres de l'ensilage a été de 3,21% en moyenne et n'a pas été influencée de façon significative par les couvertures et les profondeurs (figure 10). Ce résultat est surprenant. On s'attendait à une augmentation de la teneur en cendres dans l'ensilage non couvert puisqu'il a subi une perte de matière sèche importante dans les couches S et I. Le résultat obtenu peut être dû au fait que le lessivage a été tellement important dans l'ensilage non couvert, qu'une grande partie des éléments minéraux se sont retrouvés au fond des seaux, même collés à la paroi, et n'ont donc pas été récupérés lors du prélèvement des échantillons d'ensilage.

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,3006	Couverture x profondeur	0,2194
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,1531	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0849
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,5686	A + B vs plast. X S vs I et P	0,7573
Bio. A vs Bio. B	0,5305	A vs B X S vs I et P	0,1495
Profondeur	0,1197	A + B vs tem. X I vs P	0,1495
S vs I et P	0,3249	A + B vs plast. X I vs P	0,5932
I vs P	0,0686	A vs B X I vs P	0,8166

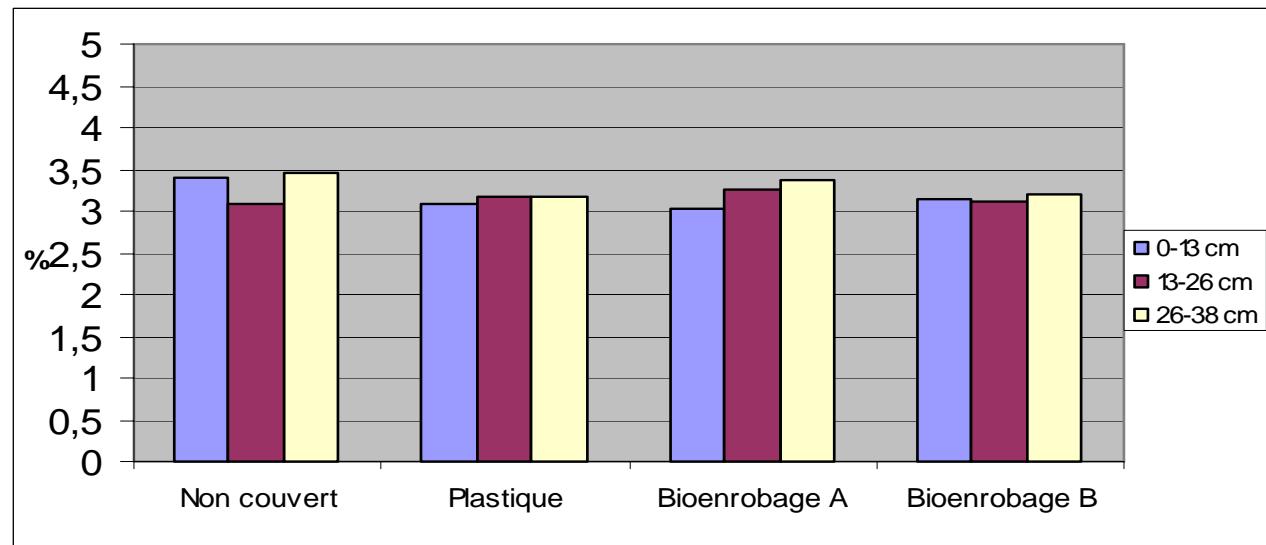


Figure 10. Teneur en cendres selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

3.2 Fermentation

a. pH

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec un pH comparable entre eux (5,22 et 5,30) ($P=0,8410$) et comparable au non couvert (5,35) ($P=0,7986$) mais plus élevé que le plastique (3,96) ($P=0,0042$).

Les couvertures ont cependant influencé le pH différemment selon la profondeur dans le silo ($P=0,0033$). L'ensilage sous plastique a maintenu un pH uniforme et bas quelle que soit la profondeur (3,93, 3,98 et 3,96 pour les couches S, I et P), ce qui est un indice d'une bonne fermentation à la grandeur du silo. Par contre, le pH de l'ensilage non couvert a été beaucoup plus élevé en surface qu'en profondeur (6,27, 5,82 et 3,96 dans les couches S, I et P), ce qui indique que la fermentation a été bonne seulement dans la couche P (figure 11).

Les bioenrobages A et B ont donné un ensilage avec un pH plus élevé dans la couche S que dans les couches I et P et dans la couche I que dans la couche P, avec des valeurs de 5,80, 5,56 et 4,30 pour le bioenrobage A et 5,79, 5,96 et 4,16 pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. Les écarts ont été comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,7537$ et $0,3060$) et comparables au non couvert ($P=0,1483$ et $0,4706$) mais plus élevés que sous plastique ($P=0,0381$ et $0,0023$) (figure 11).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0179	Couverture x profondeur	0,0033
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,7986	A + B vs tem. X S vs I et P	0,1483
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0042	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0381
Bio. A vs Bio. B	0,8410	A vs B X S vs I et P	0,7537
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,4706
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,0023
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,3060

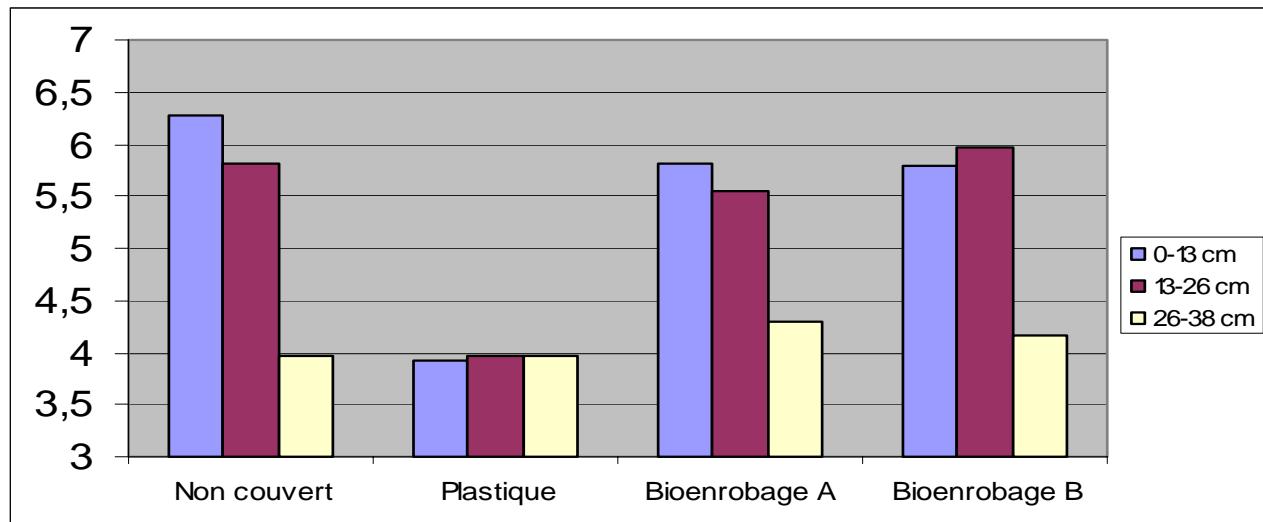


Figure 11. pH selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

b. Acide lactique

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en acide lactique comparable entre eux (1,41% et 1,27%) ($P=0,6856$) et comparable au non couvert (1,55%) ($P=0,5050$) mais plus faible que le plastique (3,39%) ($P=0,0001$).

Les couvertures ont cependant influencé la teneur en acide lactique de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0001$). L'ensilage sous plastique a présenté une teneur en acide lactique très homogène à toutes les profondeurs (3,31%, 3,37% et 3,51% pour les couches S, I et P) alors que dans l'ensilage non couvert elle a été beaucoup plus faible en surface qu'en profondeur (0,12%, 0,68% et 3,86% dans les couches S, I et P) (figure 12).

Les bioenrobages A et B ont donné un ensilage avec une plus faible teneur en acide lactique dans la couche S que dans les couches I et P et dans la couche I que dans la couche P, avec des valeurs de 0,33%, 1,01% et 2,91% pour le bioenrobage A et 0,26%, 0,80% et 2,74% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. Les écarts ont été comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,8182$ et $0,9419$), mais plus grands que sous plastique ($P=0,0027$ et $0,0016$) et moins grands que dans l'ensilage non couvert ($P=0,1926$ et $0,0181$). En fait ceci semble la conséquence d'une production supérieure d'acide lactique dans la couche P de l'ensilage non couvert à cause de sa plus faible teneur en matière sèche (figure 12).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0006	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,5050	A + B vs tem. X S vs I et P	0,1926
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0001	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0027
Bio. A vs Bio. B	0,6856	A vs B X S vs I et P	0,8182
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,0181
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,0016
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,9419

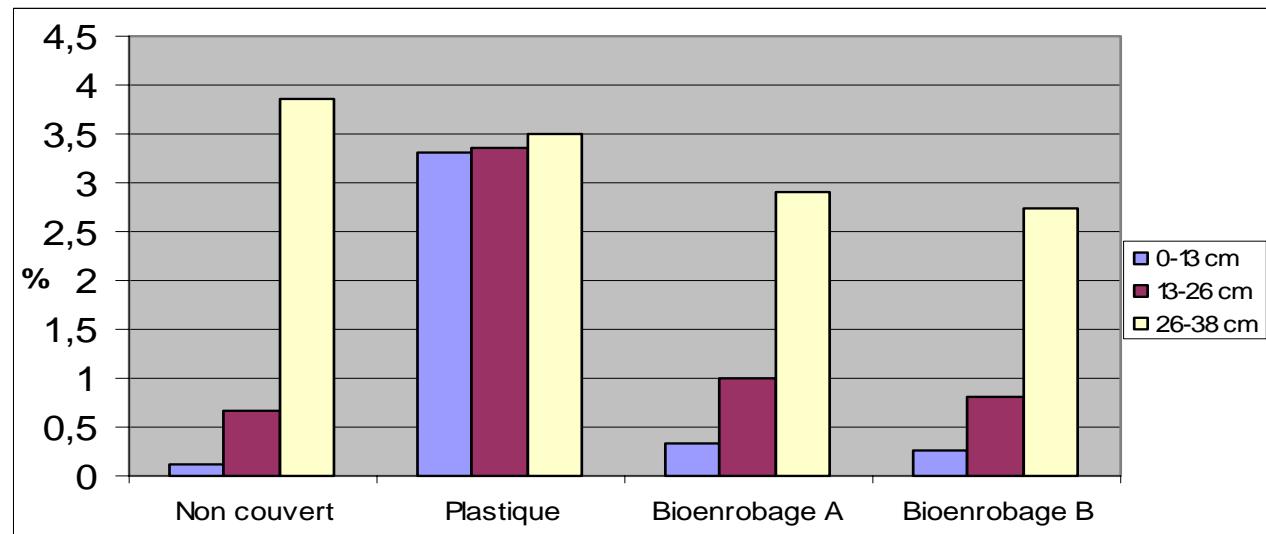


Figure 12. Teneur en acide lactique selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

c. Acide acétique

Les bioenrobages A et B ont donné pour l'ensemble du silo un ensilage avec une teneur en acide acétique comparable entre eux (0,39% et 0,37%) ($P=0,7802$) mais plus faible que le plastique (0,91%) ($P=0,0002$) et que le non couvert (0,64%) ($P=0,0150$).

Les couvertures ont cependant influencé la teneur en acide acétique de façon différente selon la profondeur dans le silo ($P=0,0002$). Dans l'ensilage sous plastique, la teneur en acide acétique a été de 1,06%, 0,82% et 0,84% pour les couches S, I et P. La teneur un peu plus élevée en surface peut être la conséquence d'une légère infiltration d'air. Par contre, dans l'ensilage non couvert elle a été beaucoup plus faible en surface qu'en profondeur avec des valeurs de 0,27%, 0,42% et 1,22% dans les couches S, I et P (figure 13).

Les bioenrobages A et B ont donné un ensilage avec une plus faible teneur en acide acétique dans la couche S que dans les couches I et P et dans la couche I que dans la couche P, avec des valeurs de 0,32%, 0,24% et 0,63% pour le bioenrobage A et 0,27%, 0,16% et 0,67% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. Les écarts ont été comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,8967$ et $0,5357$), mais plus grands que sous plastique ($P=0,0178$ et $0,0157$) et moins grands que dans l'ensilage non couvert ($P=0,0060$ et $0,0365$). En fait les différences entre les bioenrobages et le non couvert peuvent être la conséquence de l'effet conjugué de deux facteurs : d'une part une production supérieure d'acide acétique (fermentation plus hétérolactique) dans la couche P chez le non couvert à cause de sa plus faible teneur en matière sèche et/ou d'une légère infiltration d'air jusqu'à ce niveau et d'autre part une dégradation importante de l'acide acétique dans les couches S et I dans les deux cas (figure 13).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0013	Couverture x profondeur	0,0002
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0150	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0060
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0002	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0178
Bio. A vs Bio. B	0,7802	A vs B X S vs I et P	0,8967
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,0365
S vs I et P	0,0185	A + B vs plast. X I vs P	0,0157
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,5357

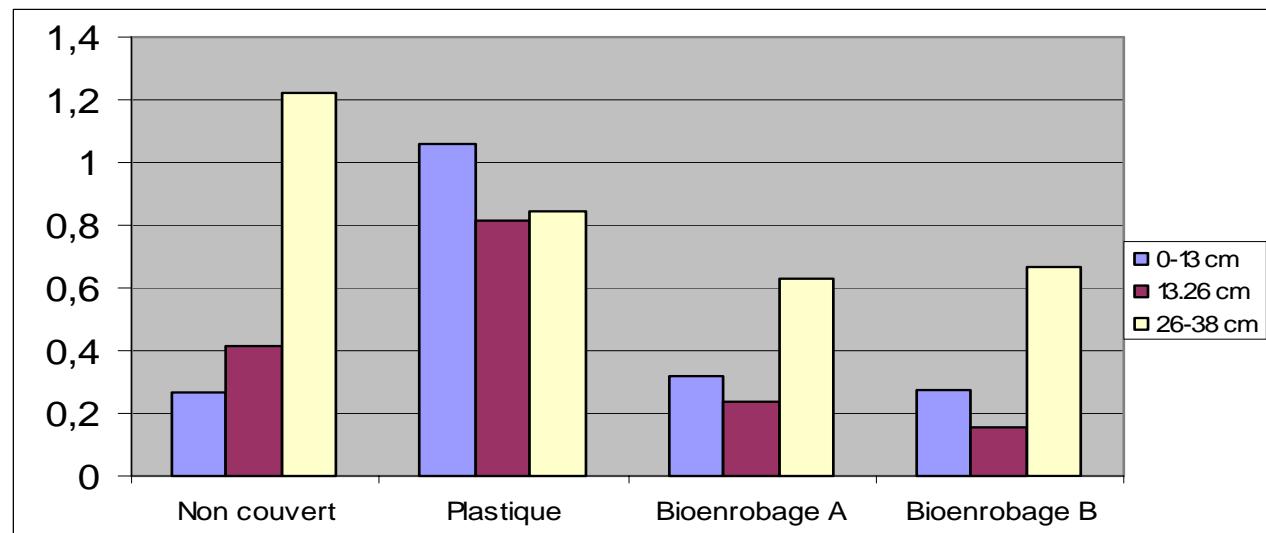


Figure 13. Teneur en acide acétique selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

d. Acide propionique

Les bioenrobages ont donné pour l'ensemble du silo un ensilage avec une teneur en acide propionique comparable entre eux (0,28% et 0,26%) ($P=0,8018$) et comparable au plastique (0,25%) mais un peu plus faible, sans être significativement différente, de l'ensilage non couvert (0,39%) ($P=0,0545$). La teneur en acide propionique a été influencée principalement par la profondeur dans le silo ($P=0,0264$). Pour l'ensemble des couvertures, elle a été plus élevée dans la couche I que dans la couche P (0,30% vs 0,26% ; $P=0,0411$) mais la différence n'est pas significative lorsqu'on compare la couche S aux couches I et P ($P=0,0619$). Cela vient du fait que dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B elle n'a pas été plus élevée dans la couche S que dans les couches plus profondes comme ce fut le cas dans l'ensilage non couvert ($P=0,0146$) et dans l'ensilage sous plastique ($P=0,0689$) (figure 14).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,1691	Couverture x profondeur	0,2128
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0545	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0146
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,7177	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0689
Bio. A vs Bio. B	0,8018	A vs B X S vs I et P	0,6725
Profondeur	0,0264	A + B vs tem. X I vs P	0,9009
S vs I et P	0,0619	A + B vs plast. X I vs P	0,9404
I vs P	0,0411	A vs B X I vs P	0,3689

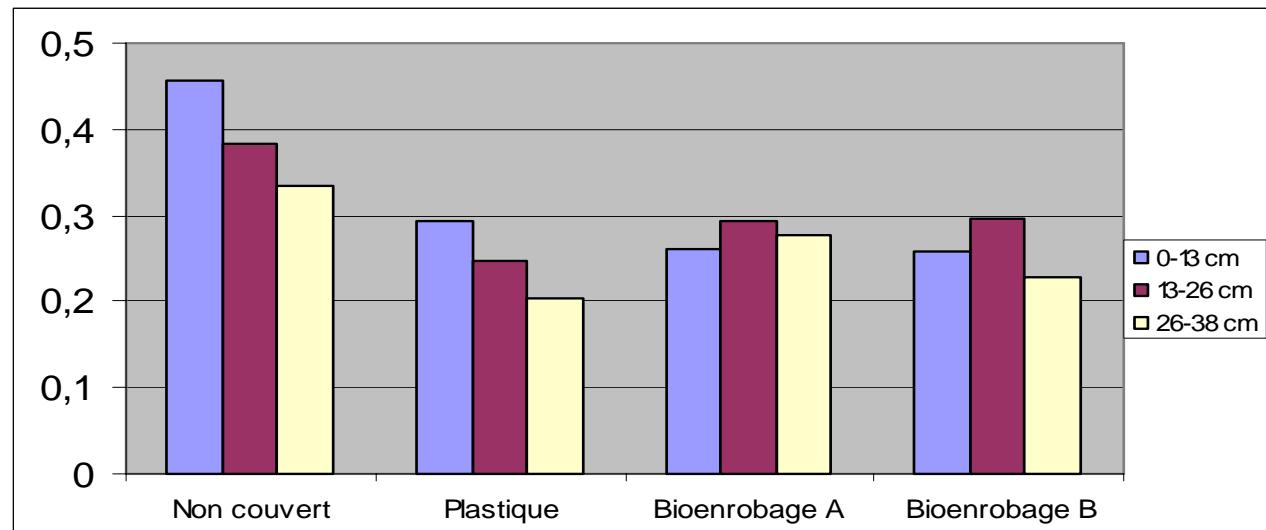


Figure 14. Teneur en acide propionique selon la profondeur après 8 semaines d'entreposage

e. Azote ammoniacal

Les bioenrobages A et B ont donné pour l'ensemble du silo un ensilage avec une teneur en azote ammoniacal (éq. PB) comparable entre eux (0,20% et 0,19%) ($P=0,7187$) mais plus faible que l'ensilage non couvert (0,29%) ($P=0,0038$) et que l'ensilage sous plastique (0,37%) ($P=0,0001$).

Par ailleurs, pour l'ensemble des couvertures, la teneur en azote ammoniacal (éq. PB) a été plus faible dans la couche S que dans les couches I et P ($P=0,0001$) et dans la couche I que dans la couche P ($P=0,0001$) avec des valeurs de 0,20%, 0,23% et 0,36% (éq. PB) pour les couches S, I et P. Cependant l'écart entre les couches d'ensilage observé chez les bioenrobages A et B a été comparable à celui observé chez le non couvert mais plus grand que sous plastique (A + B vs plast. X I vs P : $P=0,0171$), puisque ce dernier avait une teneur pratiquement aussi élevée dans les couches S et I que dans la couche P. Cette différence semble principalement due au fait que dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages la fermentation a été plus limitée dans les couches S et I que dans la couche P tout comme dans l'ensilage non couvert, alors que dans l'ensilage sous plastique la fermentation a été assez homogène à toutes les profondeurs. (figure 15).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0004	Couverture x profondeur	0,3100
Bio. A + Bio. B vs tem.	0,0038	A + B vs tem. X S vs I et P	0,7962
Bio. A + Bio. B vs plast.	0,0001	A + B vs plast. X S vs I et P	0,4411
Bio. A vs Bio. B	0,7187	A vs B X S vs I et P	0,8814
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,4583
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,0171
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,7962

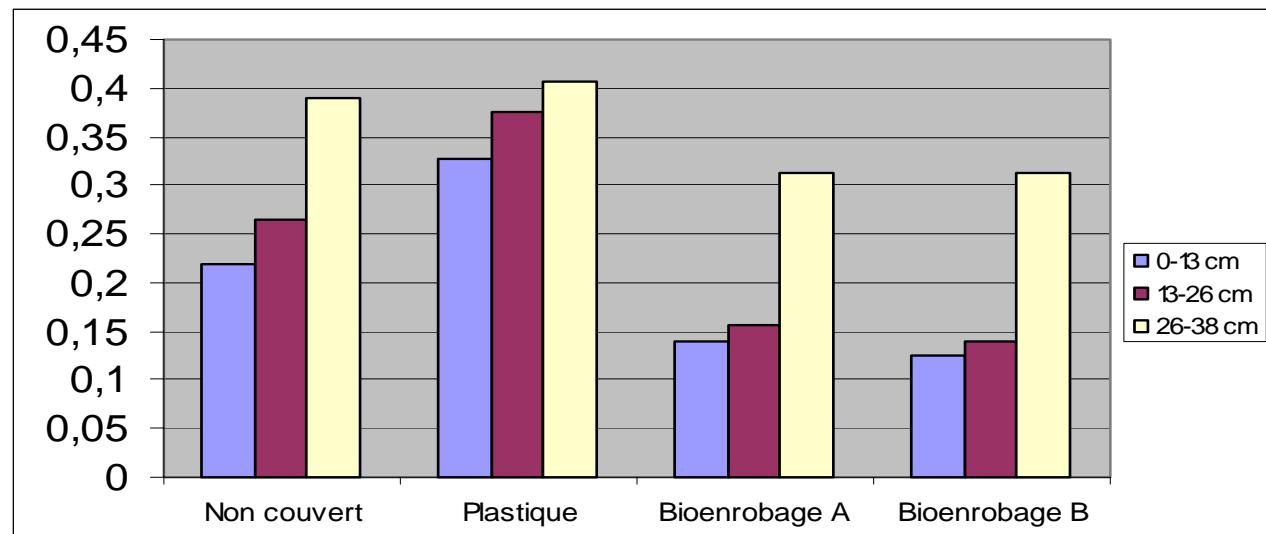


Figure 15. Teneur en azote ammoniacal (éq. PB) selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

f. Sucres solubles

Les bioenrobages A et B ont présenté pour l'ensemble du silo une teneur en sucres résiduels comparable entre eux (1,43% et 1,24%) ($P=0,4567$) mais plus élevée que le non couvert (0,60%) ($P=0,0056$) et plus faible que le plastique (2,02%) ($P=0,0087$). Un faible teneur en sucres résiduels peut être la conséquence d'une fermentation plus poussée ou d'une plus grande infiltration d'air.

Par ailleurs, pour l'ensemble des couvertures, la teneur en sucres résiduels a été de plus en plus faible à mesure qu'on s'approchait de la surface (S vs I et P : $P=0,0001$) (I vs P : $P=0,0001$) avec des valeurs de 0,41%, 1,23% et 2,32% pour les couches S, I et P. Ceci peut être dû en partie à une moindre compaction des couches de surface. Cependant l'écart entre les couches d'ensilage observé chez les bioenrobages A et B a été comparable à celui observé sous plastique mais plus faible que chez le non couvert (A + B vs tem. X S vs I et P : $P=0,0151$), puisque ce dernier avait pratiquement épuisé tous les sucres non seulement de la couche S mais aussi de la couche I. Cela peut être dû à une fermentation moins poussée, résultat d'une teneur en matière sèche plus élevée, et à l'infiltration d'air moins en profondeur avec les bioenrobages. (figure 16).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0016	Couverture x profondeur	0,1234
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0056	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0151
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0087	A + B vs plast. X S vs I et P	0,9737
Bio. A vs Bio. B	0,4567	A vs B X S vs I et P	0,8315
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,4451
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,2663
I vs P	0,0001	A vs B X I vs P	0,3966

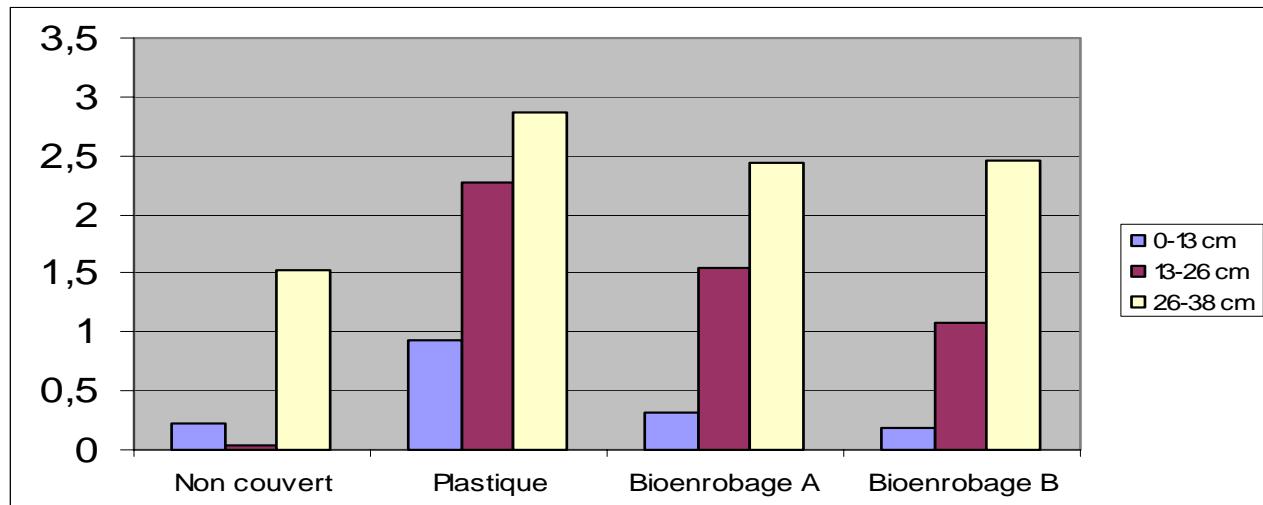


Figure 16. Teneur en sucres solubles selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

3.3 Valeur nutritive

a. Protéine brute

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en protéine brute comparable entre eux (7,83% et 7,80%) ($P=0,9056$) mais plus élevée que le plastique (7,33%) ($P=0,0244$) et plus faible que le non couvert (8,48%) ($P=0,0043$).

Les couvertures ont cependant influencé la teneur en protéine brute de façon différente selon la profondeur ($P=0,0001$). Dans l'ensilage sous plastique, la teneur en protéine brute a été uniforme quelle que soit la profondeur (7,25%, 7,5% et 7,25% pour les couches S, I et P). Par contre, dans l'ensilage non couvert elle a été plus élevée en surface qu'en profondeur (9,68%, 8,30% et 7,48% pour les couches S, I et P). Cette augmentation semble la conséquence des pertes de matière sèche élevées suite à l'utilisation d'une plus grande quantité de substances solubles par la fermentation, par la respiration ou par les moisissures (figure 17).

Dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B, la teneur en protéine brute a été plus élevée dans la couche S que dans les couches I et P, avec des valeurs de 8,48%, 7,78% et 7,23% pour le bioenrobage A et 8,45%, 7,70% et 7,25% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P. L'écart a été comparable pour les deux bioenrobages ($P=1,0000$) mais plus grand que sous plastique ($P=0,0002$) et moins grand que dans l'ensilage non couvert ($P=0,0037$). Ces données suggèrent qu'une partie de la protéine des bioenrobages a été lessivée dans les premières couches d'ensilage, puisque la perte de matière sèche n'a pas été élevée comme chez le non couvert (figure 17).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0026	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0043	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0037
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,0244	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0002
Bio. A vs Bio. B	0,9056	A vs B X S vs I et P	1,0000
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,2764
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,4001
I vs P	0,0002	A vs B X I vs P	0,7692

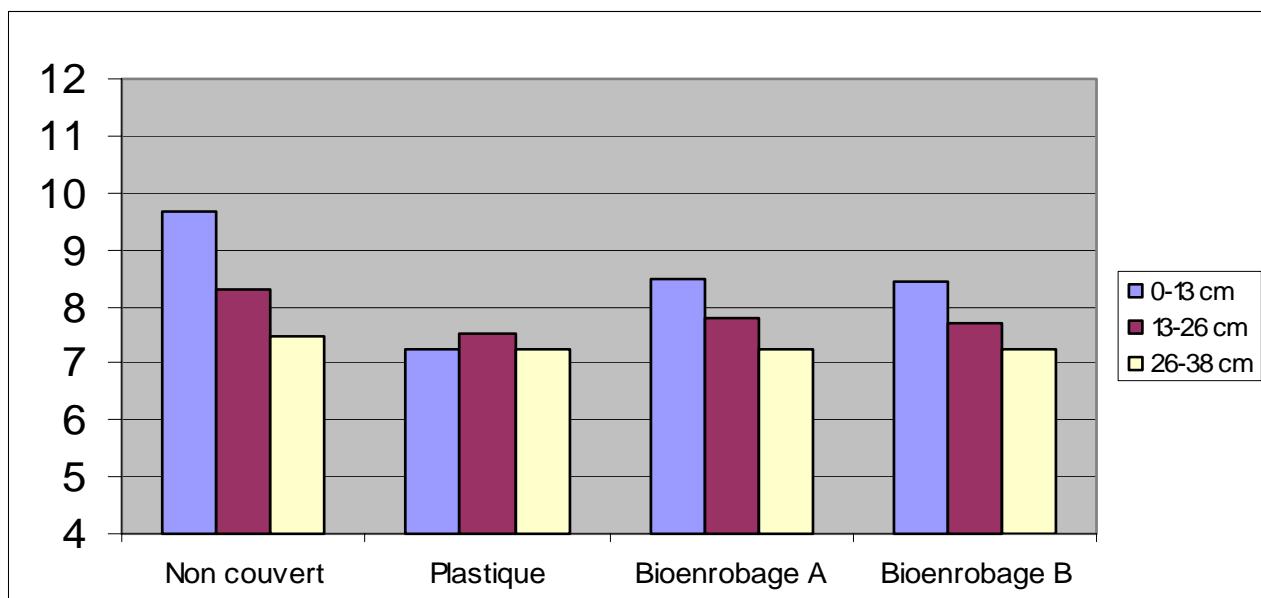


Figure 17. Teneur en protéine brute selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

b. Protéine liée

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en protéine liée comparable entre eux (0,57% et 0,58%) ($P=0,9360$) et comparable au plastique (0,53%) ($P=0,4166$) mais inférieure à l'ensilage non couvert (0,72%) ($P=0,0396$).

Les couvertures ont cependant influencé la teneur en protéine liée de façon différente selon la profondeur ($P=0,0001$). Dans l'ensilage sous plastique, la teneur en protéine liée a été assez uniforme (0,55%, 0,52% et 0,51% pour les couches S, I et P). Par contre, dans l'ensilage non couvert elle a été plus élevée en surface qu'en profondeur (1,02%, 0,65% et 0,50% pour les couches S, I et P). Une augmentation de la teneur en protéine liée peut être la conséquence d'un chauffage excessif (figure 18)

Dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B, la teneur en protéine liée a peu varié en fonction de la profondeur (0,59%, 0,62% et 0,52% pour le bioenrobage A et 0,59%, 0,58% et 0,57% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P). Les écarts entre les couches ont été comparables pour les deux bioenrobages ($P=0,9418$ et $0,2135$) et comparables au plastique ($P=0,7834$ et $0,4901$). Ainsi les bioenrobages se différencient de l'ensilage non couvert par le fait qu'ils n'ont pas donné lieu à une élévation marquée de la protéine liée dans la couche S comparativement aux couches I et P ($P=0,0001$) mais les différences observées entre la couche I et la couche P n'ont pas été significatives ($P=0,1967$) (figure 18).

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0905	Couverture x profondeur	0,0001
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0396	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,4166	A + B vs plast. X S vs I et P	0,7843
Bio. A vs Bio. B	0,9360	A vs B X S vs I et P	0,9418
Profondeur	0,0001	A + B vs tem. X I vs P	0,1967
S vs I et P	0,0001	A + B vs plast. X I vs P	0,4901
I vs P	0,0214	A vs B X I vs P	0,2135

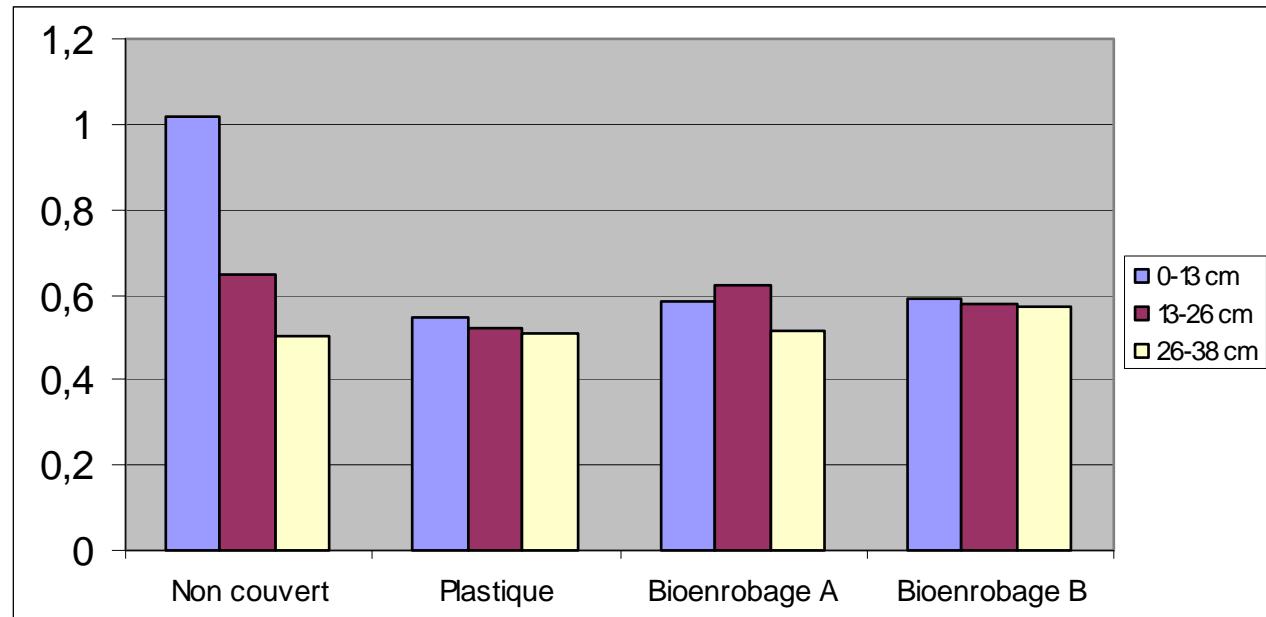


Figure 18. Teneur en protéine liée selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

c. Fibre par détergent acide

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, une teneur en fibre par détergent acide comparable entre eux (24,09% et 24,25%) ($P=0,8571$) et comparable au plastique (24,13%) ($P=0,9607$) mais plus faible que le non couvert (26,09%) ($P=0,0290$).

De plus les bioenrobages A et B ont donné une teneur en fibre par détergent acide plus faible dans la couche S que dans les couches plus profondes, avec des valeurs de 22,78%, 25,08% et 24,43% pour le bioenrobage A et 23,23%, 23,95% et 25,58% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P, contrairement à l'ensilage non couvert ($P=0,0065$) et à l'ensilage sous plastique ($P=0,0324$) qui ont présenté une teneur plus élevée en surface qu'en profondeur, avec des valeurs de 27,83%, 26,00% et 24,45% pour le non couvert et de 25,18%, 23,70 % 23,53% pour le plastique (figure 19).

Les valeurs élevées observées dans les couches S et I de l'ensilage non couvert semblent principalement la conséquence des pertes de matière sèche élevées dues à une respiration intense. Dans l'ensilage sous plastique, les écarts entre les couches peuvent être dus, au moins en partie, à une fermentation un peu moins bonne dans la couche S tel qu'indiqué par une teneur en acide acétique plus élevée et une teneur en sucres solubles plus faible qu'en profondeur. Les faibles valeurs observées dans la couche S des ensilages protégés avec les bioenrobages peuvent être, au moins en partie, la conséquence du lessivage des substances solubles des bioenrobages dans l'ensilage.

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,1191	Couverture x profondeur	0,0709
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0290	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0065
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,9607	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0324
Bio. A vs Bio. B	0,8571	A vs B X S vs I et P	0,7976
Profondeur	0,9288	A + B vs tem. X I vs P	0,2390
S vs I et P	0,7877	A + B vs plast. X I vs P	0,6981
I vs P	0,7878	A vs B X I vs P	0,2544

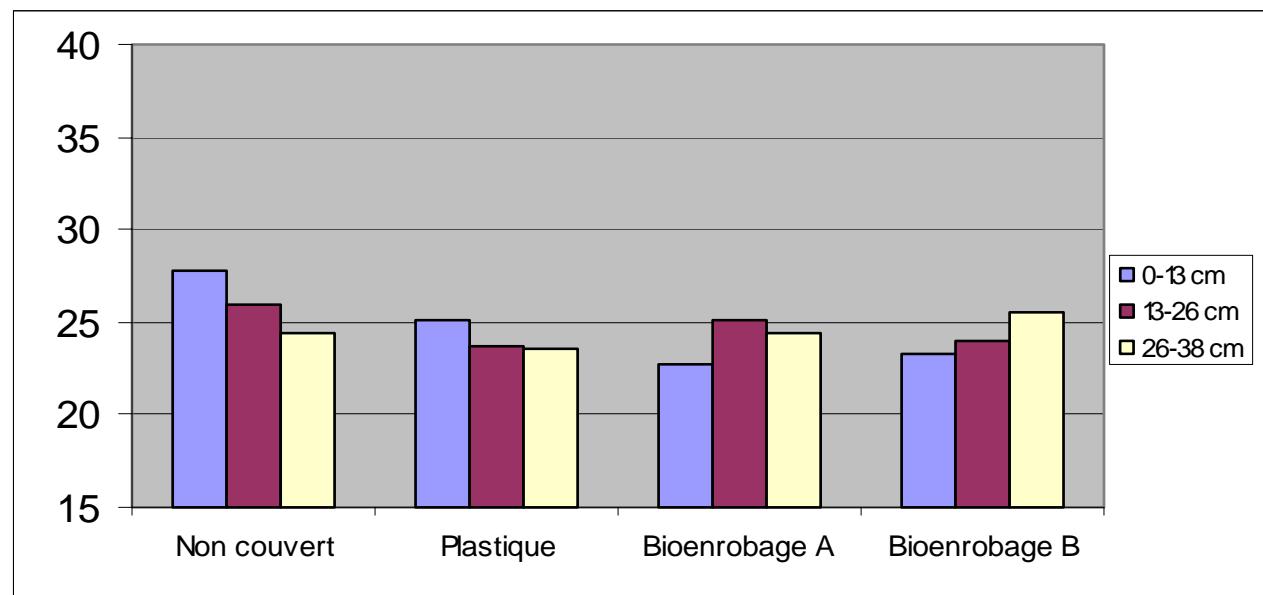


Figure 19. Teneur en fibre par détergent acide selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

d. Fibre par détergent neutre

Les bioenrobages A et B ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en fibre par détergent neutre comparable entre eux (41,62% et 42,08%) ($P=0,5750$) et comparable au plastique (40,88%) ($P=0,1940$) mais plus faible que le non couvert (44,60%) ($P=0,0033$).

De plus les bioenrobages A et B ont donné un ensilage avec une teneur en fibre par détergent neutre plus faible dans la couche S que dans les couches I et P, avec des valeurs de 39,63%, 42,60% et 42,63% pour le bioenrobage A et 41,10%, 42,05% et 43,10% pour le bioenrobage B dans les couches S, I et P, contrairement à l'ensilage non couvert ($P=0,0001$) et l'ensilage sous plastique ($P=0,0106$) qui ont présenté une teneur plus élevée en surface qu'en profondeur avec des valeurs de 49,20%, 42,33% et 42,28% pour le non couvert et de 42,40%, 40,10% et 40,13% pour le plastique (figure 20).

La valeur très élevée observée dans la couche S de l'ensilage non couvert est sûrement due en partie aux pertes de matière sèche élevées mais peut aussi être la conséquence d'une moindre hydrolyse de l'hémicellulose en sucres solubles utilisables par les bactéries, dû à une moindre activité enzymatique. Par ailleurs les faibles valeurs observées dans la couche S des ensilages protégés avec les bioenrobages peuvent être, au moins en partie, la conséquence du lessivage des substances solubles des bioenrobages dans l'ensilage, mais pourraient aussi être dues à une meilleure activité enzymatique.

Effets principaux	Probabilités	Interactions	Probabilités
Couverture	0,0063	Couverture x profondeur	0,0010
Bio. A et Bio. B vs tem.	0,0033	A + B vs tem. X S vs I et P	0,0001
Bio. A et Bio. B vs plast.	0,1940	A + B vs plast. X S vs I et P	0,0106
Bio. A vs Bio. B	0,5750	A vs B X S vs I et P	0,4295
Profondeur	0,2162	A + B vs tem. X I vs P	0,7576
S vs I et P	0,0886	A + B vs plast. X I vs P	0,7877
I vs P	0,7356	A vs B X I vs P	0,6415

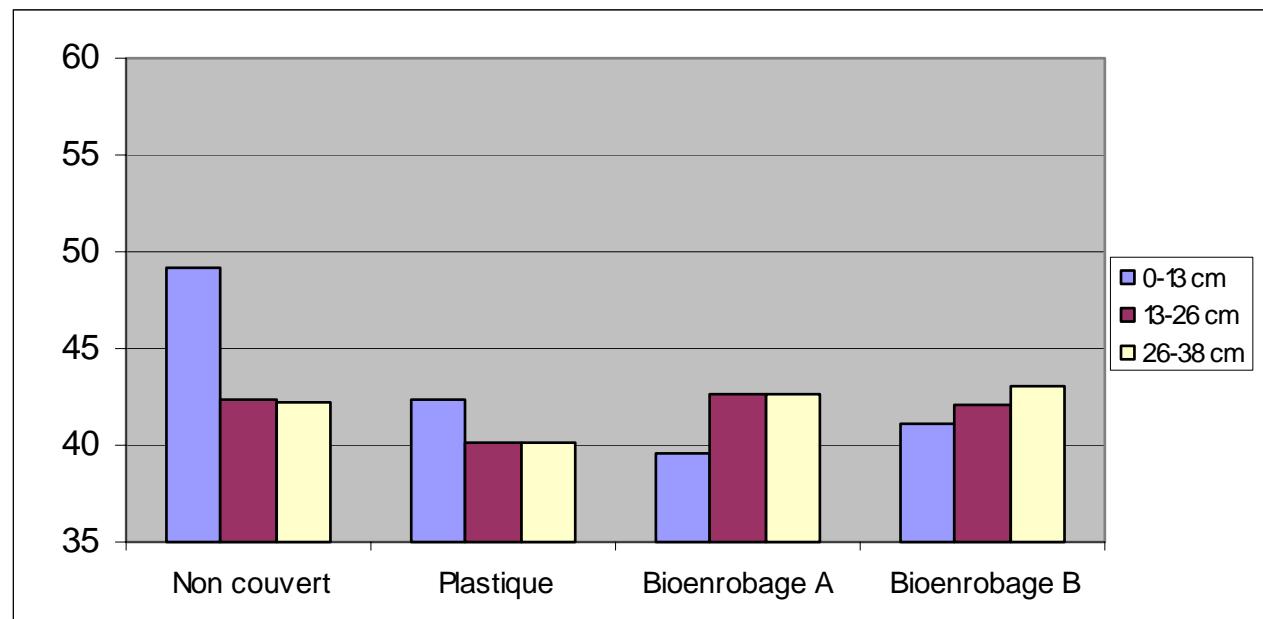


Figure 20. Teneur en fibre par détergent neutre selon le type de couverture et la profondeur après 8 semaines d'entreposage

3.4 Synthèse (8 semaines)

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Après 8 semaines d'entreposage à l'extérieur, l'ensilage de maïs recouvert de plastique a été complètement exempt de moisissure et a présenté une teneur en matière sèche (37,95% en moyenne), une production de chaleur (-5,52°C en moyenne) et une perte de matière sèche (4,58% en moyenne) assez homogènes à toutes les profondeurs.

Quant à l'ensilage laissé à découvert, sa teneur en matière sèche a été faible dans toutes les couches (21,45% en moyenne) et plus faible en surface qu'en profondeur (17,65%, 21,80% et 24,90% dans S, I et P). De plus, le développement des moisissures (1,50, 0,88 et 0,25 dans S, I et P), la production de chaleur (214,4°C, 139,3°C et 20,3°C dans S, I et P) et la perte de matière sèche (34,27%, 17,91% et 4,68% dans S, I et P) ont été beaucoup plus prononcés dans les couches S et I qu'en profondeur. Cela indique que l'infiltration d'eau a affecté l'ensemble du silo alors que l'infiltration d'air a affecté principalement les couches S et I (0 à 26 cm).

Le bioenrobage A et le bioenrobage B se sont comportés de la même façon pour chacune de ces caractéristiques (teneur en MS, développement des moisissures, chauffage et perte de MS). En fait les ensilages protégés avec les bioenrobages A et B ont présenté, pour l'ensemble du silo, une teneur en matière sèche (34,35% et 33,47% en moyenne) un peu plus faible que l'ensilage sous plastique (37,95% en moyenne) mais beaucoup plus élevée que l'ensilage non couvert (21,45% en moyenne) dont ils se distinguent aussi par des écarts plus faibles entre la couche S et les couches plus profondes. Cela semble la conséquence d'une légère infiltration d'eau. De plus la perte de matière sèche (6,88% et 7,13% en moyenne pour le bioenrobage A et le bioenrobage B) a été non significativement différente de celle observée dans l'ensilage sous plastique (4,58% en moyenne) mais beaucoup plus faible que dans l'ensilage non couvert (18,95% en moyenne). Elle n'a pas été beaucoup plus élevée dans les couches S et I que dans les couches respectivement plus profondes comme ce fut le cas chez le non couvert. Cela indique que l'étanchéité à l'air a été maintenue pendant presque toute sinon toute la durée d'entreposage. La production de chaleur (26,12°C et 35,03°C en moyenne pour le bioenrobage A et le bioenrobage B) a été légèrement plus élevée que dans l'ensilage sous plastique (-5,52°C en moyenne) malgré des températures maximales comparables et beaucoup plus faibles que dans l'ensilage non couvert (124,69°C en moyenne). Elle n'a pas été beaucoup plus élevée dans les couches S et I que dans les couches respectivement plus profondes comme ce fut le cas chez le non couvert. De plus cet ensilage n'a présenté aucune moisissure tout comme l'ensilage sous plastique alors qu'il y en a eu dans l'ensilage non couvert (0,88 en moyenne) surtout dans les couches S et I. Cela démontre aussi l'efficacité des bioenrobages à protéger l'ensilage contre l'infiltration d'air. En effet on a observé dans l'ensilage sous bioenrobage, pour chacun de ces paramètres, une variation relativement faible en fonction de la profondeur et généralement comparable à celle observée dans l'ensilage sous plastique mais beaucoup plus faible que dans l'ensilage non couvert. Cela indique que, tout comme dans l'ensilage sous plastique et contrairement à l'ensilage non couvert, il n'y a pas vraiment eu plus de détérioration en surface qu'en profondeur dans l'ensilage sous bioenrobage.

La teneur en cendres de l'ensilage a été de 3,21% en moyenne et n'a pas été influencée de façon significative par les couvertures et les profondeurs. Ce résultat est surprenant. On s'attendait à une augmentation de la teneur en cendres dans l'ensilage non couvert puisqu'il a subi une perte de matière sèche importante dans les couches S et I. Le résultat obtenu peut être dû au fait que le lessivage a été tellement important dans l'ensilage non couvert, qu'une grande partie des éléments minéraux se sont retrouvés au fond des seaux, même collés à la paroi, et n'ont donc pas été récupérés lors du prélèvement des échantillons d'ensilage.

FERMENTATION

Après 8 semaines d'entreposage à l'extérieur, l'ensilage de maïs recouvert de plastique a présenté une qualité de fermentation assez homogène à toutes les profondeurs. Cet ensilage a subi une fermentation complète, tel qu'indiqué par son pH (3,96 en moyenne). Ses teneurs en acide lactique (3,39% en moyenne) et en acide acétique (0,91% en moyenne) sont caractéristiques d'une fermentation homolactique alors que son contenu en azote ammoniacal (0,37% éq. PB en moyenne) indique que la dégradation de la protéine a été limitée (5% de l'azote total) quelle que soit la profondeur. Cependant la teneur en sucres résiduels a été plus faible en surface (0,92%, 2,27% et 2,86% dans S, I et P), probablement à cause d'une moindre compaction de cette partie du silo.

Quant à l'ensilage laissé à découvert, on y a observé une forte altération et une réduction importante de la fermentation dans les couches S et I (0 à 26 cm). En effet, un pH alcalin a été mesuré à ces profondeurs (6,27 et 5,82 respectivement), ainsi qu'une très faible teneur en acide lactique (0,12% et 0,68%) et en acide acétique (0,27% et 0,42%). La teneur un peu plus élevée en acide propionique en surface qu'en profondeur (0,46%, 0,38% et 0,34% dans S, I et P) est aussi un indice de l'altération des couches de surface. De plus le contenu en azote ammoniacal (0,22% et 0,27% éq. PB) de cet ensilage est quand même significatif puisque la protéolyse est favorisée par un pH près de la neutralité. Finalement la respiration intense et la croissance des moisissures se sont traduits par l'utilisation d'à peu près tous les sucres disponibles dans les couches S et I (0,23% et 0,03%). Plus en profondeur, c'est-à-dire dans la couche P (26-38 cm), on observe un pH acide (3,96) et une teneur en acide lactique (3,86%) caractéristiques d'une bonne fermentation. Les teneurs en acide acétique (1,22%), en azote ammoniacal (0,39% éq. PB) et en sucres solubles (1,53%) sont aussi plus élevées que dans les couches superficielles. Les teneurs un peu plus élevées en acide lactique (3,86% vs 3,51%) et surtout en acide acétique (1,22% vs 0,84%) que dans l'ensilage recouvert de plastique dans la couche P sont dues principalement à la teneur en matière sèche plus faible de l'ensilage non couvert.

Ainsi la fermentation de l'ensilage non couvert a été marquée par deux facteurs principaux. Dans la couche P, la plus faible teneur en matière sèche résultant de l'infiltration d'eau a été le facteur prépondérant et a favorisé une fermentation plus poussée et plus hétérolactique que celle observée dans l'ensilage sous plastique à la même profondeur. Par contre, dans les couches S et I, l'épuisement des sucres résultant d'une respiration intense a annulé l'effet d'une teneur en matière sèche plus faible et a limité énormément la fermentation mais beaucoup moins la protéolyse.

Le bioenrobage A et le bioenrobage B se sont comportés exactement de la même façon pour chacun des paramètres de la fermentation analysés. En fait les bioenrobages ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en acide propionique comparable au plastique mais des teneurs en acide lactique, en acide acétique, en azote ammoniacal et en sucres solubles plus faibles et un pH plus élevé que l'ensilage sous plastique. De plus, contrairement à l'ensilage sous plastique, les ensilages protégés avec les bioenrobages ont présenté un contenu beaucoup plus faible en acide lactique, en acide acétique et en azote ammoniacal et un pH beaucoup plus élevé dans les 26 premiers cm (couches S et I) qu'en profondeur. Par contre, la teneur en sucres solubles a présenté le même gradient entre les couches que dans l'ensilage sous plastique. La teneur en acide propionique n'a pas varié elle non plus de façon significativement différente de celle de l'ensilage sous plastique en fonction de la profondeur dans le silo.

Les bioenrobages ont par ailleurs donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec des teneurs en acide lactique et en acide propionique et un pH comparables à l'ensilage non couvert, mais des teneurs en acide acétique et en azote ammoniacal plus faibles et une teneur en sucres

résiduels plus élevée que ce dernier. L'ensilage protégé avec les bioenrobages se distingue aussi de l'ensilage non couvert par le fait que :

1° la teneur en sucres solubles a été plus élevée en profondeur qu'en surface comme chez le non couvert, mais l'écart entre les couches a été plus grand que chez le non couvert principalement parce que les couches I et P ont conservé plus de sucres que chez le non couvert. Cela semble la conséquence d'une infiltration d'air moins en profondeur.

2° les teneurs en acide lactique et en acide acétique ont été plus élevées en profondeur qu'en surface comme chez le non couvert, mais l'écart entre les couches a été plus faible que chez le non couvert, principalement parce que la couche P a produit moins d'acide lactique et d'acide acétique que chez le non couvert. Cela semble la conséquence d'une moindre infiltration d'eau. En effet, dans l'ensilage non couvert, l'infiltration d'eau a fait baisser la teneur en matière sèche de l'ensilage, ce qui a activé la fermentation dans la couche P mais pas dans les couches S et I dont les sucres ont été épuisés par une respiration intense.

3° la teneur en azote ammoniacal a été moins élevée que chez le non couvert dans toutes les couches et l'écart entre les couches a été comparable. Cela semble aussi la conséquence d'une moindre infiltration d'eau que chez le non couvert. En effet la dégradation de la protéine dépend directement de la teneur en matière sèche et seulement indirectement de la quantité de sucres disponibles.

4° la teneur en acide prorpionique n'a pas été plus élevée en surface qu'en profondeur comme ce fut le cas chez le non couvert. C'est un indice d'une moindre dégradation ou d'une dégradation selon un mécanisme différent des acides produits par la fermentation.

VALEUR NUTRITIVE

Après 8 semaines d'entreposage à l'extérieur, l'ensilage de maïs recouvert de plastique a présenté des teneurs en protéine brute (7,33% en moyenne) et en protéine liée (0,53% en moyenne) homogènes à toutes les profondeurs, alors que les teneurs en fibre par détergent acide (25,18%, 23,70% et 23,53% dans S, I et P) et en fibre par détergent neutre (42,40%, 40,10% et 40,13% dans S, I et P) ont été un peu plus élevées dans la couche S que dans les couches I et P.

Quant à l'ensilage laissé à découvert, il a présenté, pour chacun de ces paramètres, des niveaux beaucoup plus élevés en surface qu'en profondeur, avec des valeurs dans les couches S, I et P de 9,68%, 8,30% et 7,48% pour la protéine brute, de 1,02%, 0,65% et 0,50% pour la protéine liée, de 27,83%, 26,00% et 24,45% pour la fibre par détergent acide et de 49,20%, 42,33% et 42,28% pour la fibre par détergent neutre. L'augmentation de chacun de ces paramètres pendant la période d'entreposage doit être interprétée comme un signe de détérioration.

Le bioenrobage A et le bioenrobage B se sont comportés exactement de la même façon pour chacun des paramètres de la valeur nutritive analysés. En fait les bioenrobages ont donné, pour l'ensemble du silo, un ensilage avec une teneur en protéine brute plus élevée que le plastique mais inférieure au non couvert et des teneurs en protéine liée, fibre par détergent acide et fibre par détergent neutre comparables au plastique mais inférieures au non couvert. L'ensilage protégé avec les bioenrobages se distingue aussi de la façon suivante :

1° la teneur en protéine brute a été plus élevée en surface qu'en profondeur (S vs I et P), contrairement à l'ensilage sous plastique, probablement à cause du lessivage d'une partie de la protéine des bioenrobages. Cependant l'écart entre la couche S et les couches I et P a été moins prononcé que dans le non couvert car ce dernier a subi de fortes pertes de matière sèche en surface.

2° la teneur en protéine liée n'a pas été significativement plus élevée en surface qu'en profondeur (S vs I et P) tout comme dans l'ensilage sous plastique, alors que l'écart entre la couche S et les couches I et P a été important dans le non couvert car ce dernier a chauffé beaucoup plus en surface.

3° les teneurs en fibre (ADF et NDF) ont été un peu plus faibles en surface qu'en profondeur (S vs I et P) alors qu'elles ont été un peu plus élevées en surface qu'en profondeur dans l'ensilage sous plastique et beaucoup plus élevées dans le non couvert car ce dernier a subi de fortes pertes de matière sèche en surface. Ceci peut aussi, du moins en partie, être la conséquence du lessivage des substances solubles des bioenrobages dans l'ensilage ou d'une plus grande transformation des hydrates de carbone des parois en sucres simples, dû à une meilleure activité enzymatique dans l'ensilage protégé avec les bioenrobages.

4 Effet de la durée d'entreposage

Entre la quatrième et la huitième semaine d'entreposage, les couvertures ont influencé l'évolution de la teneur en matière sèche de l'ensemble du silo et l'évolution des moisissures et du pH dans certaines parties du silo alors que la perte de matière sèche a évolué de la même façon quel que soit le type de couverture.

La perte de matière sèche a été seulement un peu plus élevée après 8 semaines d'entreposage qu'après 4 semaines (9,39% vs 8,03% en moyenne) ($P=0,0334$) pour l'ensemble des couvertures et la variation observée n'a pas été influencée par le type de couverture ($P=0,5258$) (annexe 4). C'est donc pendant les quatre premières semaines d'entreposage que s'est produit l'essentiel des pertes de matière sèche dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages tout comme dans l'ensilage non couvert et dans l'ensilage sous plastique.

La teneur en matière sèche de l'ensilage sous plastique a été stable (37,95% après 8 sem. vs 38,63% après 4 sem. en moyenne) alors que celle de l'ensilage non couvert a diminué avec la durée d'entreposage (21,45% après 8 sem. vs 23,33% après 4 sem. en moyenne). Par ailleurs on a observé dans l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B, contrairement à l'ensilage sous plastique ($P=0,0329$), une diminution de la teneur en matière sèche entre la quatrième et la huitième semaine d'entreposage (34,35% après 8 sem. vs 37,25% après 4 sem. pour le bioenrobage A et 33,47% après 8 sem. vs 37,87% après 4 sem. pour le bioenrobage B en moyenne) et celle-ci a été aussi prononcée que dans l'ensilage non couvert ($P=0,1883$) (annexe 4). Cela laisse supposer que les bioenrobages n'ont pas limité l'infiltration d'eau pendant les 4 dernières semaines d'entreposage.

Aucune moisissure ne s'est développée dans les ensilages couverts avec les bioenrobages A et B même après 8 semaines d'entreposage. Par contre dans l'ensilage non couvert les moisissures ont régressé dans la couche S (1,5 vs 2,75), probablement à cause du manque de sucres, mais ont commencé à coloniser la couche P entre la quatrième et la huitième semaine d'entreposage ($P=0,0001$) (annexe 4).

Entre la quatrième et la huitième semaine d'entreposage, le pH n'a pas évolué de la même façon dans l'ensilage sous bioenrobage que dans l'ensilage sous plastique ($P=0,0217$) et dans l'ensilage non couvert ($P=0,0052$) en ce qui concerne l'écart entre la couche I (13-26 cm) et la couche P (26-38 cm). En effet le pH de l'ensilage sous bioenrobage a augmenté de façon marquée dans la couche I (5,56 après 8 sem. vs. 4,37 après 4 sem. pour le bioenrobage A et 5,96 après 8 sem. vs 4,21 après 4 sem. pour le bioenrobage B) pendant cette période, alors que ce ne fut pas le cas dans l'ensilage sous plastique (son pH est resté bas dans toutes les couches), ni dans l'ensilage non couvert (son pH est resté élevé dans les couches S et I et bas dans la couche P). Cela démontre que l'ensilage couvert avec les bioenrobages A et B s'est détérioré plus, au niveau de la couche I, que l'ensilage non couvert et que l'ensilage sous plastique pendant cette période. Cependant cette analyse ne révèle pas de différence significative de pH entre le bioenrobage A et le bioenrobage B en fonction de la durée d'entreposage et de la profondeur dans le silo (annexe 4).

Une augmentation de pH doit être interprétée avec prudence. Dans un ensilage fermenté, l'augmentation de pH est généralement le premier signe de détérioration à se manifester après une exposition à l'air. Elle est due principalement à la dégradation des acides, même si la production d'ammoniac peut y contribuer. Elle peut prendre place sans qu'il y ait de chauffage ni de pertes importantes de matière sèche. Un ensilage avec un pH élevé mais sans moisissure apparente est à un stade de détérioration beaucoup moins avancé que celui qui a été envahi par les moisissures.

CONCLUSION

Les résultats de cette expérience peuvent se résumer en 7 points :

1- Le bioenrobage A et le bioenrobage B ont donné des ensilages de maïs avec des caractéristiques identiques après 8 semaines d'entreposage, puisque aucune différence significative n'a été détectée entre ces deux couvertures pour chacun des paramètres étudiés.

2- Les ensilages protégés avec les bioenrobages n'ont pratiquement pas été affectés par l'infiltration d'eau alors qu'il en a résulté une forte diminution de la teneur en matière sèche dans les 38 cm de l'ensilage non couvert. Ces ensilages n'ont pas présenté non plus des signes de détérioration (chauffage, développement des moisissures et perte de matière sèche) dans les 26 premiers cm et de modification de leur valeur nutritive (PB, P. liée, ADF et NDF plus élevées) dans les 13 premiers cm comparables à ceux observés dans l'ensilage non couvert après 8 semaines d'entreposage. Pour ces propriétés, les ensilages sous bioenrobage se comparent beaucoup plus aux ensilage sous plastique, même si on observe certaines différences.

3- Les couvertures n'ont influencé que légèrement la qualité de l'ensilage dans la couche profonde (26-38 cm). À cette profondeur, les bioenrobages ont donné un ensilage de qualité comparable au plastique globalement et dont la fermentation a été moins hétérolactique et plus efficace que dans l'ensilage non couvert, puisque l'infiltration d'eau a fait diminuer la teneur en matière sèche de façon très importante même à cette profondeur dans l'ensilage non couvert.

4- Les bioenrobages n'ont pas permis une fermentation aussi bonne que le film plastique dans les 26 premiers cm. Dans cette partie du silo, la fermentation des ensilages protégés avec les bioenrobages a plutôt été comparable à celle de l'ensilage non couvert après 8 semaines d'entreposage, puisqu'on y a observé, tout comme dans l'ensilage non couvert, une faible teneur en acide lactique et un pH élevé. Par contre les ensilages sous bioenrobage ont eu une moindre teneur en acide acétique et en azote ammoniacal que l'ensilage non couvert et que l'ensilage sous plastique.

5- Les ensilages protégés avec les bioenrobages ont d'abord subi une fermentation qui a conduit à une acidification beaucoup plus prononcée que l'ensilage non couvert dans les 26 premiers cm mais moins prononcée que l'ensilage sous plastique dans les 13 premiers cm après 4 semaines d'entreposage. Cependant suite à la perte plus ou moins importante de l'étanchéité des bioenrobages, on a assisté à la dégradation des acides produits précédemment et à l'augmentation du pH à un niveau comparable à celui observé dans l'ensilage non couvert dans les 26 premiers cm après 8 semaines d'entreposage.

6- Dans les ensilages couverts avec les bioenrobages, l'activité bactérienne semble avoir initié la détérioration aérobie puisque qu'on a observé une acidification sans développement apparent de moisissures. En effet il est généralement reconnu que dans l'ensilage de maïs la détérioration aérobie est souvent initiée par les bactéries, avant que des levures et des moisissures se développent. Cependant la détérioration aérobie a atteint un stade beaucoup moins avancé dans l'ensilage sous bioenrobage que dans l'ensilage non couvert puisque dans ce dernier la respiration intense et la croissance des moisissures ont entraîné des pertes de matière sèche et une modification significative de la valeur nutritive en surface.

7- Les bioenrobages permettront probablement de protéger convenablement l'ensilage de maïs jusqu'au printemps puisqu'ils ont complètement inhibé le développement des moisissures et ont limité la perte de matière sèche au même niveau que le film plastique de 0,15 mm d'épaisseur pendant les 8 premières semaines d'entreposage (octobre à décembre) et que les températures froides des mois hivernaux permettront d'en maintenir la qualité au même niveau de décembre à avril.

Ainsi cette expérience a permis de démontrer que dans des conditions naturelles :

- 1- Le bioenrobage A à base de protéine de soya et le bioenrobage B à base de caséinate ont une performance semblable après 8 semaines d'entreposage.
- 2- Lorsqu'on utilise ces bioenrobages pour couvrir un ensilage de maïs moyennement perméable à l'oxygène (39% MS, 200 kg MS/m³), on n'observe pas de signe de détérioration marqué en surface après 8 semaines d'entreposage : il n'y a pas de développement de moisissure, pas d'ensilage inconsommable et pas plus de perte de matière sèche que dans l'ensilage sous plastique. Cependant le pH élevé de l'ensilage dans les 26 premiers cm témoigne d'un début activité biologique indésirable.
- 3- Ceci s'explique par le fait que ces bioenrobages sont suffisamment étanches pendant les premières semaines d'entreposage pour permettre une fermentation à peu près normale de l'ensilage, mais pas assez pour empêcher complètement l'activité biologique indésirable de prendre place après 8 semaines.

Cette expérience nous a aussi appris que :

- 1- Les températures fraîches qui prévalent pendant les semaines qui suivent la récolte de l'ensilage de maïs sont favorables à la réussite de l'ensilage sous bioenrobage parce qu'elles limitent l'activité des organismes responsables de la détérioration de l'ensilage.
- 2- La réalisation d'un ensilage peu perméable à l'oxygène c'est-à-dire pas trop sec et surtout de forte densité semble un facteur important pour obtenir une plus longue durée de conservation des ensilages protégés avec les bioenrobages.

BIBLIOGRAPHIE

- A.O.A.C. Official Methods of Analysis. 1990. 15th Edition. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, Virginia, USA.
- Berger, L.L., N.A. Pyatt and J.R. Sewell. 2002. Edible Covering Reduces Spoilage in Bunkers Silos. *J. Dairy Sc.* : 85 (supp 1) / *J. Anim. Sc.* : 80 (supp 1), p. 93.
- Bolsen, K.K. 1997. Issues of Top Spoilage Losses in Horizontal Silos. Proceedings from the "Silage : Field to Feedbunk" North American Conference. Hershey, Pennsylvania, February 11-13, Northeast Regional Agricultural Engineering Service, pub. NRAES-99, p. 137-150.
- Bolsen, K.K., J.T. Dickersen, B.E. Brent Jr., R.N. Sonon, B.S. Dalke, C. Lin and J.E. Boyer Jr. 1993. Rate and Extent of Top Spoilage in Horizontal Silos. *J. Dairy Sci.* 76:2940-2962.
- Brault, D., G. D'Aprano and M. Lacroix. 1997. Formation of Free-standing Sterilised Edible Film from Irradiated Caseinates. *J. Agric. Food Chem.* 45: 2964-2969.
- Brusewitz G.H., R.L. Huhnke, E.M. Barnes. 1991. Performance of Nutri-Shield in Protecting Bunker-Stored Silage. *Applied Engineering in Agriculture*, 7 (5) : 515-519.
- Buckmaster, D.R., C.A. Rotz and R E. Muck. 1989. A Comprehensive Model of Forage Changes in the Silo. *Transactions of the ASAE* 32:1143-1152.
- Chen, Y., Z.Y. Zhang, Y. Ishikawa and T. Mackawa. 2002. Mechanical Properties and Water Resistance of an Acetylated Starch-based Plastic. *Transactions of the ASAE*, 45:1051-1056.
- CPAQ. Répertoire des Méthodes d'analyse des Aliments du Bétail. 1982. Conseil des Productions Animales du Québec, Québec, Canada. Agdex 400-55, 32 p.
- Cunningham, P., A.A. Ogale, P.L. Dawson and J.C. Acton. 2000. Tensile Properties of Soy Protein Isolate Films Produced by a Thermal Compaction Technique. *J. Food Sci.* 65(4): 662-671.
- Gennedios, A., V.M. Ghorpade, C.L. Weller and M.A. Hanna. 1996. Heat Curing of Soy Protein Films. *Transactions of ASAE* 39: 575-579.
- Ghorpade, V.M., H. Li, A. Gennadios and M.A. Hanna. 1995. Chemically Modified Soy Protein Films. *Transactions of the ASAE* 38: 1805-1808.
- Huhnke, R.L. and G.H. Brusewitz. Nutri-Shield Treated Alfalfa Hay Cubes. 1990. *Applied Engineers in Agriculture* 6 (1): 9-11.
- Hunt R.G., V.R. Sellers, W.E. Franklin, J.M. Nelson, W.L. Rathje, W.W. Hughes and D.C. Wilson. 1990. Estimation of the volume of Municipal Solid Waste and Selected Components in Trash Cans and Landfills. Franklin Associates Ltd, Prairie Village, KS, and the Garbage Project, Tucson, AZ.
- Imeson, A.P., D.A. Ledward and J.R. Mitchell. On the nature of the interaction between some anionic polysaccharides and proteins. *J. Sci. Food Agric.* 28: 661.

- Krochta, J.M. 1992. Control of Mass Transfer in Foods with Edible Coating and Films. In *Advances in Food Engineering*. R.P. Singh and M.A. Wirakaratakusumah (Ed.). CRC Press Inc, NY. p 517-538.
- McDonald, P., A.R. Henderson, S.J.E. Heron. 1991. *The Biochemistry of silage*, Second Ed., Chalcombe Publication, 340 p.
- McHugh, T.H., R. Avena-Bustillos and J.M. Krochta. 1993. Hydrophilic edible films : modified procedure for water vapor permeability and explanation of thickness effects. *J. Food Sci.* 58(4) : 899-903.
- Ruppel, K. A. 1993. Bunker silo Management and its Effects on Hay Crop Quality. Proceedings from the National Silage Production Conference "Silage Production from Seed to Animal", Syracuse, New-York, February 23-25, Northeast Regional Agricultural Engineering Service, pub.NRAES-67, p. 67-84.
- Ruppel, K.A., R.E. Pitt, L.E. Chase and D.M. Galton. 1995. Bunker Silo Management and its Relationship to Forage Preservation on Dairy Farms. *J. Dairy Sci.* 78:141-153.
- Smith, D., G.M. Paulsen and C.A. Raguse. 1964. Extraction of Total Available Carbohydrates from Grass and Legume Tissue. *Plant Physiology* 39(6):960-962.
- Yannas, I.V. and A.V. Tobolsky. 1967. Cross-linking of Gelatine by Dehydration. *Nature* 215: 509-510.

ANNEXE 1

**Effet du type de couverture et de la profondeur
sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur**

	Moyennes											
	Non couvert			Plastique			Bioenrobage A			Bioenrobage B		
	S	I	P	S	I	P	S	I	P	S	I	P
4 semaines												
pH	6,67	6,53	4,01	4,00	4,03	4,01	4,50	4,37	4,02	5,11	4,21	4,05
Matière sèche (%)	20,00	24,20	25,80	38,90	38,55	38,45	36,60	37,15	38,00	37,15	37,70	38,75
Perte de matière sèche (%)	33,38	16,20	4,88	4,45	4,45	3,10	6,35	5,25	3,76	6,03	5,19	2,38
Note de moisissures	2,75	1,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 semaines												
pH	6,27	5,82	3,96	3,93	3,98	3,96	5,80	5,56	4,30	5,79	5,96	4,16
A. lactique (%)	0,12	0,68	3,86	3,31	3,37	3,51	0,33	1,01	2,91	0,26	0,80	2,74
A. acétique (%)	0,27	0,42	1,22	1,06	0,82	0,84	0,32	0,24	0,63	0,27	0,16	0,67
A. propionique (%)	0,46	0,38	0,34	0,29	0,25	0,20	0,26	0,29	0,28	0,26	0,30	0,23
Sucres solubles (%)	0,23	0,03	1,53	0,92	2,27	2,86	0,31	1,54	2,44	0,19	1,09	2,46
N ammoniacal (éq. PB) (%)	0,22	0,27	0,39	0,33	0,38	0,41	0,14	0,16	0,31	0,13	0,14	0,31
Protéine brute (%)	9,68	8,30	7,48	7,25	7,50	7,25	8,48	7,78	7,23	8,45	7,70	7,25
Protéine liée (%)	1,02	0,65	0,50	0,55	0,52	0,51	0,59	0,62	0,52	0,59	0,58	0,57
ADF (%)	27,83	26,00	24,45	25,18	23,70	23,53	22,78	25,08	24,43	23,23	23,95	25,58
NDF (%)	49,20	42,33	42,28	42,40	40,10	40,13	39,63	42,60	42,63	41,10	42,05	43,10
Cendres (%)	3,40	3,08	3,45	3,08	3,18	3,18	3,03	3,25	3,38	3,15	3,13	3,20
Matière sèche (%)	17,65	21,80	24,90	37,70	38,05	38,10	32,95	34,60	35,50	32,00	33,35	35,05
Perte de matière sèche (%)	34,27	17,91	4,68	6,12	5,48	2,14	7,59	8,39	4,67	7,98	7,90	5,53
Note de moisissures	1,50	0,88	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chauffage (1) (°C)	214,38	139,35	20,35	8,68	-9,64	-15,58	40,77	39,97	-2,37	48,92	49,60	6,58

S (couche superficielle) = 0-13 cm

I (couche intermédiaire) = 13-26 cm

P (couche profonde) = 26-38 cm

(1) Somme des écarts journaliers de température par rapport à la température ambiante

ANNEXE 2

Analyse de variance de l'effet du type de couverture et de la profondeur sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur

	Effets						Contrastes *										
	Couverture		Profondeur		Couv. x prof.		Couverture			Profondeur		Couv. X prof.					
	SEM	Pr	SEM	Pr	SEM	Pr	1	2	3	4	5	1 X 4	2 X 4	3 X 4	1 X 5	2 X 5	3 X 5
4 semaines																	
pH	0,1055	0,0001	0,0914	0,0001	0,1829	0,0001	0,0001	0,0585	0,4335	0,0001	0,0001	0,0089	0,0240	0,0435	0,0001	0,4844	0,6176
Matière sèche	0,2862	0,0001	0,2479	0,0001	0,4958	0,0001	0,0001	0,0685	0,3310	0,0001	0,0232	0,0001	0,0673	0,9083	0,4564	0,2333	0,8418
Perte de matière sèche	0,5668	0,0001	0,4908	0,0001	0,9817	0,0001	0,0001	0,5464	0,5364	0,0001	0,0001	0,0001	0,8008	0,8166	0,0001	0,6428	0,5102
Note de moisissures	0,1109	0,0022	0,0960	0,0002	0,1921	0,0001	0,0004	1,0000	1,0000	0,0001	0,0493	0,0001	1,0000	1,0000	0,0025	1,0000	1,0000
8 semaines																	
pH	0,1483	0,0179	0,1285	0,0001	0,2570	0,0033	0,7986	0,0042	0,8410	0,0001	0,0001	0,1483	0,0381	0,7537	0,4706	0,0023	0,3060
A. lactique	0,1667	0,0006	0,1444	0,0001	0,2887	0,0001	0,5050	0,0001	0,6856	0,0001	0,0001	0,1926	0,0027	0,8182	0,0181	0,0016	0,9419
A. acétique	0,0540	0,0013	0,0468	0,0001	0,0935	0,0002	0,0150	0,0002	0,7802	0,0185	0,0001	0,0060	0,0178	0,8967	0,0365	0,0157	0,5357
A. propionique	0,0166	0,1691	0,0144	0,0264	0,0287	0,2128	0,0545	0,7177	0,8018	0,0619	0,0411	0,0146	0,0689	0,6725	0,9009	0,9404	0,3689
Sucres solubles	0,1589	0,0016	0,1376	0,0001	0,2752	0,1234	0,0056	0,0087	0,4567	0,0001	0,0001	0,0151	0,9737	0,8315	0,4451	0,2663	0,3966
N ammo. (éq. PB)	0,0173	0,0004	0,0150	0,0001	0,0300	0,3100	0,0038	0,0001	0,7187	0,0001	0,0001	0,7962	0,4411	0,8814	0,4583	0,0171	0,7962
Protéine brute	0,0973	0,0026	0,0842	0,0001	0,1684	0,0001	0,0043	0,0244	0,9056	0,0001	0,0002	0,0037	0,0002	1,0000	0,2764	0,4001	0,7692
Protéine liée	0,0226	0,0905	0,0196	0,0001	0,0391	0,0001	0,0396	0,4166	0,9360	0,0001	0,0214	0,0001	0,7843	0,9418	0,1967	0,4901	0,2135
ADF	0,5625	0,1191	0,4871	0,9288	0,9742	0,0709	0,0290	0,9607	0,8571	0,7877	0,7878	0,0065	0,0324	0,7976	0,2390	0,6981	0,2544
NDF	0,6274	0,0063	0,5433	0,2162	1,0867	0,0010	0,0033	0,1940	0,5750	0,0886	0,7356	0,0001	0,0106	0,4295	0,7576	0,7877	0,6415
Cendres	0,0616	0,3006	0,0533	0,1197	0,1067	0,2194	0,1531	0,5686	0,5305	0,3249	0,0686	0,0849	0,7573	0,1495	0,1495	0,5932	0,8166
Matière sèche	0,4745	0,0001	0,4109	0,0001	0,8218	0,0220	0,0001	0,0100	0,5534	0,0001	0,0208	0,0082	0,1628	0,9446	0,2182	0,3886	0,6309
Perte de matière sèche	0,6045	0,0001	0,5235	0,0001	1,0471	0,0001	0,0001	0,0697	0,8578	0,0001	0,0001	0,0001	0,4740	0,9109	0,0001	0,8732	0,5237
Note de moisissures	0,0361	0,0025	0,0312	0,0001	0,0624	0,0001	0,0005	1,0000	1,0000	0,0001	0,0017	0,0001	1,0000	1,0000	0,0001	1,0000	1,0000
Chauffage	2,9185	0,0001	2,5275	0,0001	5,0549	0,0001	0,0001	0,0012	0,3484	0,0001	0,0001	0,0001	0,9886	0,8980	0,0001	0,0003	0,9471

* 1 = Bioenrobage A (Bio A.) + Bioenrobage B (Bio. B) vs Non couvert (Tém.)

4 = S vs I + P

2 = Bio. A + Bio. B vs Plast.

5 = I vs P

3 = Bio. A vs Bio. B

ANNEXE 3

**Températures moyennes et précipitations hebdomadaires
enregistrées à Deschambault du 30 septembre au 24 novembre 2001**

Dates	Températures moyennes (°C)	Précipitations (mm)
30 septembre – 6 octobre	10,81	46,2
7 octobre – 13 octobre	9,20	7,0
14 octobre – 20 octobre	10,04	32,4
21 octobre – 27 octobre	7,69	28,1
Sous-total (4 semaines)	9,44	113,7
28 octobre – 3 novembre	3,73	12,3
4 novembre – 10 novembre	3,21	21,0
11 novembre – 17 novembre	1,27	4,4
18 novembre – 24 novembre	1,20	8,8
Sous-total (4 semaines)	2,35	46,5
TOTAL	5,90	160,2

ANNEXE 4

Analyse de variance de l'effet de la durée d'entreposage, selon le type de couverture et la profondeur dans le silo, sur les caractéristiques de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur

	Effets										
	Couv.	Durée	Couv x durée	Prof.	Couv. x prof.	Durée x prof.	Couv. x durée x prof.				
pH Pr	0,0001	0,0561	0,0198	0,0001	0,0001	0,1090	0,0144				
SEM	0,0910	0,0644	0,1287	0,0788	0,1577	0,1115	0,2230				
Matière sèche (%) Pr	0,0001	0,0001	0,1174	0,0001	0,0001	0,2066	0,9906				
SEM	0,2771	0,1959	0,3918	0,2399	0,4799	0,3393	0,6787				
Perte de matière sèche (%)	0,0001	0,0334	0,5258	0,0001	0,0001	0,3679	0,9424				
Pr SEM	0,4143	0,2930	0,5860	0,3588	0,7177	0,5075	1,0149				
Note de moisissures Pr	0,0001	0,3746	0,4959	0,0001	0,0001	0,0357	0,0052				
SEM	0,0583	0,0412	0,0825	0,0505	0,1010	0,0714	0,1428				
Contrastes*											
	Couv. X durée			Durée X prof.		Couv. X durée X prof.					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
pH	0,0042	0,0275	0,8708	0,7452	0,0383	0,6658	0,6985	0,1416	0,0052	0,0217	0,2577
Matière sèche (%)	0,1883	0,0329	0,3287	0,1197	0,3910	0,7691	0,8089	1,0000	0,4414	0,9048	0,7560
Perte de matière sèche (%)	0,3532	0,1988	0,6237	0,7792	0,1677	0,6401	0,4841	0,9382	0,7868	0,6627	0,3574
Note de moisissures	0,1534	1,0000	1,0000	0,0149	0,3858	0,0001	1,0000	1,0000	0,1361	1,0000	1,0000

* seuls les contrastes impliquant l'effet durée sont présentés

1= (Bioenrobage A (Bio. A) + Bio. B vs Non couvert) X (4 semaines (4S) vs (8S)

2= (Bio. A + Bio. B vs Pastique) X (4S vs 8S)

3= (Bio. A vs Bio. B) X (4S vs 8S)

4= (4S vs 8S) X (S vs I + P) où S= 0-13cm, I= 13-26cm et P= 26-38cm

5= (4S vs 8S) X I vs P)

6 = (Bio. A + Bio. B vs Non couvert). X (4S vs 8S) X (S vs I + P)

7 = (Bio. A + Bio. B vs Plastique) X (4S vs 8S) X (S vs I + P)

8 = (Bio. A vs Bio. B) X (4S vs 8S) X (S vs I + P)

9 = (Bio. A + Bio. B vs Non couvert) X (4S vs 8S) X (I vs P)

10= (Bio. A + Bio. B vs Plastique) X (4S vs 8S) X (I vs P)

11= (Bio. A vs Bio. B) X (4S vs 8S) X (I vs P)

ANNEXE 5
**Température de l'ensilage de maïs entreposé à l'extérieur,
en fonction du type de couverture, de la profondeur et de la durée**

