



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques
Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé

THÈSE

Présentée par :

Loubna EL HAJJI

Pour l'obtention du grade de

DOCTORAT NATIONAL

Discipline :

Contribution à la valorisation des résidus du figuier de barbarie, *Opuntia ficus-indica*, dans l'alimentation animale

Date de la soutenance : le 19/05/2022 devant la commission d'examen :

Présidente : Pr. Fatiha CHIGR : Université Sultan Moulay Slimane, FST, Béni Mellal

Rapporteur : Pr. Mohamed MOUNCIF : Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, IAV, Rabat

Rapporteur : Pr. Mohamed BENSALAH : Université Sultan Moulay Slimane, FST Béni Mellal

Rapporteur : Pr. Mustapha BOUZAID : Université Sultan Moulay Slimane, FST, Béni Mellal

Examineur : Pr. Khalid BOUTOIL : Université Sultan Moulay Slimane, EST, Béni Mellal

Invitée : Dr. Kaoutar EL FAZAZI : Institut National de Recherche Agronomique, INRA, Béni Mellal

Directrice de thèse : Pr. SALMAOUI Souad : Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal

Remerciements

À ma Directrice de Thèse,

Madame **SALMAOUI Souad**, Professeur à la Faculté des Sciences Techniques de Béni Mellal. Aucun mot et aucune phrase ne peut exprimer réellement ce que j'ai toujours pensé de vous, en tant que responsable, en tant que scientifique ou en tant que personne. Il me suffit de revoir les moments d'appréhension qui m'ont accompagné de façon permanente. Je vous remercie de m'avoir fait l'honneur de diriger ma thèse, d'avoir veillé au bon déroulement de toutes les étapes de ma thèse et de m'avoir accompagné avec bienveillance sur ce sujet. Merci pour votre disponibilité permanente, votre réactivité, votre confiance et surtout pour votre grande sympathie. Veuillez accepter l'expression de mon profond respect et qu'il me soit permis de vous témoigner ma plus profonde reconnaissance. Merci et on ne peut qu'être fier d'une professeur comme vous. J'espère que vous trouverez en ce modeste travail, une récompense à ce que vous avez fait pour moi.

À ma Présidente de Jury,

Madame **Fatiha CHGR**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal. Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en acceptant de présider le Jury de ma thèse. Je vous prie d'accepter l'expression de ma profonde estime et veuillez trouver ici le témoignage de mes remerciements les plus sincères.

À mes Juges,

Mr. **Mohamed MOUNCIF**, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II de Rabat ; Mr. **Mohammed BENSALAH**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal ; Mr. **Mustapha BOUZAI**D, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal ; Mr. **Khalid BOUTOIL**, Professeur à l'Ecole Supérieur de Technologie de Béni Mellal, je vous remercie de m'avoir fait l'honneur et le plaisir d'être membres du Jury de ma thèse. Merci pour votre disponibilité. Veuillez trouver ici l'expression de mes plus vifs remerciements.

Je souhaite remercier aussi **Dr. Kaoutar EL FAZAZI**, Chercheur à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Béni Mellal, merci d'avoir accepté d'assister et honorer ma soutenance.

J'adresse également tous mes remerciements à l'ensemble de l'équipe du Laboratoire Génie Environnemental, Écologique et Agro-industriel que j'ai eu la chance de côtoyer et avec qui j'ai passé toute la période de préparation de ma thèse. Je vous remercie pour la bonne ambiance et la bonne humeur dans laquelle j'ai pu travailler. Je vous remercie et vous estime grandement.

Merci à **Mr. Mustapha ARIF** et à tout le corps professoral et de direction. Voyez ici l'expression de ma profonde estime et de mes remerciements les plus sincères.

Enfin je renouvelle toute mon amitié et ma sympathie à ceux qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien constant tout au long de ce travail de recherche.

Dédicaces

Je dédie cette thèse :

À mes parents, à Sanaa et Siham mes petites sœurs, sans vous le néant, tout simplement. Je vous remercie d'avoir fait ce que je suis. Je suis reconnaissante d'avoir pu grandir dans une famille qui a su m'apporter tant de connaissances et d'ouvertures intellectuelles. Je pense que les mots n'existent pas pour exprimer l'amour que je vous porte.

À ma sœur, ma deuxième maman Fatima, mon amie, les mots ne pourront jamais exprimer la profondeur de mon respect, ma considération, ma reconnaissance. De toutes les amies, tu as été la meilleure, tu as su m'entourer d'attention, m'inculquer les valeurs nobles de la vie. Merci d'avoir été toujours là pour moi, un grand soutien tout au long de mes études. Tu as été et tu seras toujours un exemple à suivre pour tes qualités humaines, ta persévérance et ton perfectionnisme.

À Ahmed, mon professeur de collègue, mon maître spirituel, la lumière dans les moments sombres.

À ma nièce, ma petite adorable Malak.

À mon amie de toujours Soukaina.

À mes amies, Safaa, Nawal, Fatima Ezzahra, Latifa, Aicha et Zhour. Merci d'être dans ma vie, Merci pour toutes ces années d'amitié.

À toute ma famille, merci pour votre soutien de grande qualité. Merci pour tous ces bons moments passés ensemble.

Une pensée pour ceux qui nous ont quittés, ils resteront immortels dans nos cœurs. Que Dieu prenne soin de vous. Il serait trop long d'exprimer tout l'amour que je porte à chacun d'entre vous.

Avant-propos

- ❑ **Nom et Prénom** : Loubna EL HAJJI

- ❑ **Directeur de thèse** : Madame SALMAOUI Souad, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni Mellal.

- ❑ **Intitulé de l'étude** : Contribution à la valorisation des résidus du figuier de barbarie, d'*Opuntia ficus-indica*, dans l'alimentation animale
 - Caractérisation biochimique et microbiologique des rebuts des fruits de figuier de barbarie ;
 - Application de la méthode d'ensilage pour la conservation des rebuts et des pelures des fruits de figuier de barbarie, en vue de leur utilisation en alimentation animale ;
 - Enrichissement protéique des rebuts des fruits de figuier de barbarie ;
 - Etude de l'effet de la mélasse sur l'ensilage des rebuts des fruits de figuier de barbarie.

- ❑ **Laboratoire où l'étude a été réalisée** : Laboratoire Génie Environnemental, Écologique et Agro-industriel, équipe d'écologie et développement durable à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal.

- ❑ **Date de démarrage de l'étude** : 2015

- ❑ **Liste des articles publiés**
 - **EL HAJJI Loubna**, Azzouzi Hanan, Achchoub Mouad, El fazazi Kaoutar, Souad SALMAOUI: « **Ensiling characteristics of prickly pear (*Opuntia-ficus indica*) rejects with and without molasses for animal feed**». *International journal of recycling organic waste in agriculture*, March, 2022.

 - **Loubna EL HAJJI**, Souad SALMAOUI: « **Biochemical and microbiological characterization of prickly pear rejects**». *International journal of innovative science research technology*. Vol 5, issue 7, july 2020

 - Achchoub Mouad, Azzouzi Hanan, **El Hajji Loubna**, Benbati Mohammed, El fazazi Kaoutar, Salmaoui Souad. **Evaluation of physicochemical, functional and sensory properties of carob pulp beverage (*Ceratonia siliqua* L)**. *Bioscience Biotechnology Research Asia*. Vol 18, issue 3, September 2021.

- Azzouzi Hanane, **El Hajji loubna**, Achchoub Mouad, Benbati Mohammed, El fazazi Kaoutar et Salmaoui Souad. **Assessment of Total Phenolic Content and Antioxidant Activity Potential of Clementine Extract Obtained by Microwave Assisted Extraction Method.** *Bioscience Biotechnology Research Asia. Vol 18, issue 4, 2021*

❑ **Communications internationales et nationales**

- Participation au 5^{ème} colloque international "Environnement et Développement Durable" du 10 au 15 Octobre sous le thème "Changements Climatiques : Causes, Impacts, Atténuation et Adaptation" :

Communication 1 : Contribution à la valorisation des pelures de figues de barbarie.

Communication 2 : Contribution à la caractérisation des oranges.

- Participation au 6th Food Safety Congress, le 03-04 Mai 2018 à Istunbul, Turquie.

Communication 3: Evaluation of the silage quality of “opuntia ficus indica” fruit peels

❑ **Formations**

- Participation au 5ème Workshop de cycle de formation du centre Alym Academy, le 27 et 28 Avril 2019 intitulé : **analyse des données avec SPSS : nettoyage des données, tests d’hypothèse et AFE.**

- Participation au cycle de formation réalisé par “**Researcher Academy On Campus**” :

- Comment affiner ma recherche sur Science Direct pour accélérer la découverte des littératures pertinentes ? at ‘Institut Marocain de l'Information Scientifique et Technique (IMIST)’, on Tuesday 07 April, 2020. Presented by Nadine Iskander, Conseillère de Recherche.

- Comment choisir le sujet de ma recherche ? at ‘Institut Marocain de l'Information Scientifique et Technique (IMIST)’, on Friday 03 April, 2020. Presented by Nadine Iskander, Conseillère de Recherche.

- Comment Choisir Une Revue Pour Publier ? (60 minutes) at ‘Institut Marocain de l'Information Scientifique et Technique (IMIST)’, on Friday 10 April, 2020 Presented by Nadine Iskander, Conseillère de Recherche.

- Identifying a research topic (Part 2 of 5, in Arabic language) at ‘Egyptian Knowledge Bank’, on Monday 06 April, 2020 Presented by Dr. Yehia Eissa, Consultant, Research Intelligence, Elsevier, Mr. Khalid Shalan, Consultant, Core Research Solutions, Elsevier
- Planning your article (Part 4 of 5, in Arabic language) at ‘Egyptian Knowledge Bank’, on Monday 13 April, 2020 Presented by Dr. Yehia Eissa, Consultant, Research Intelligence, Elsevier, Mr. Khalid Shalan, Consultant, Core Research Solutions, Elsevier
- Que peux-je faire sur ScienceDirect autre que télécharger les PDFs des articles qui m’intéressent ? at ‘Institut Marocain de l'Information Scientifique et Technique (IMIST)’, on Monday 13 April, 2020 Presented by Nadine Iskander, Conseillère de Recherche

❑ Encadrements

- Participation à l’encadrement des étudiants pendant les séances de **Travaux Pratiques** 24h*2 groupes du module **Biochimie et Technologie Des aliments**, programmé dans le cadre de la filière LST **Technologies Alimentaires** sous la responsabilité de Mme SLAMOUI Souad durant le deuxième semestre de l’année universitaire 2014-2015
- Participation à l’encadrement des étudiants pendant les séances de **Travaux Pratiques** (24h) du module **Technologie Des Industries Agro-Alimentaires** programmé dans le cadre du Master **Management de la qualité dans les Industries agro-Alimentaires** sous la responsabilité de Mme. SALMAOUI Souad, Durant le deuxième semestre de l’année universitaire 2015-2016.
- Participation à l’encadrement des étudiants pendant les séances de **Travaux Pratiques** (24h*3 groupes) du module **Biochimie et Technologie des Aliments** programmé dans le cadre de la filière Licence **Technologie et Qualité des Produits Alimentaires** sous la responsabilité de Mme. SALMAOUI Souad, Durant le deuxième semestre de l’année universitaire 2015-2016.

Résumé

L'adaptation du figuier de Barbarie aux conditions désertiques et semi désertiques lui permet de constituer une culture à intérêt écologique et socio-économique indéniable. Récemment, au Maroc, la culture de plusieurs espèces et variétés s'est développée à des fins de production fruitière commercialisable et les surfaces plantées de cactus ont triplé, passant de près de 45 000 ha début 1990, à une estimation de 150 000 ha en 2016. Une telle augmentation de surface s'accompagne certainement d'une augmentation de production, engendrant des résidus importants, notamment les rebuts de fruits délaissés aux champs en fin de saison et les pelures générés par l'alimentation humaine directe ou par les industries de transformation du cactus.

Dans l'objectif de valoriser ces résidus, nous nous sommes proposés, dans le présent travail, d'évaluer les potentialités de leur utilisation dans l'alimentation animale après leur stabilisation par deux procédés : ensilage et séchage solaire.

Pour ce faire, nous avons commencé par la caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des différentes fractions du fruit de figuier de barbarie (pelure, pulpe et graine). Les résultats ont montré qu'elles sont riches en sucres (32,34 % MS pour les fruits et 31,19 % MS pour les pelures), en minéraux (soient des valeurs respectives pour le Ca, Na, Mg, K, Fe et Cu de 86,45 ; 6,38 ; 11,75 ; 119,31, 0,23 et 0,23 mg/100g MF pour les fruits et 108,76 ; 1,4 ; 9,42 ; 25,97 ; 0,29 et 0,64 mg/100 g MF pour les pelures) et fibres (27,23 % MS pour les fruits et 11,72 % MS pour les pelures) mais pauvres en protéines (11,98 % MS pour les fruits et 4,84 % MS pour les pelures). Par ailleurs, ils sont chargés en micro-organismes pouvant être utiles tels que les bactéries lactiques, ce qui fait de ces résidus de cactus un sous-produit se prêtant bien aux fermentations.

Les essais d'ensilage des rebuts et des pelures de fruits de cactus ont permis de baisser le pH au-dessous de 4,5, pH auquel les entérobactéries et les bactéries aérobies facultatifs sont inhibés. Ainsi ces résidus ensilés sont stables et peuvent être conservés pour leur utilisation en alimentation animale. En revanche, une partie de leurs éléments nutritifs notamment les sucres, éléments minéraux et protéines, ont été perdus sous forme hydrosolubles dans les eaux évacuées au cours de la fermentation.

De part cette perte en éléments nutritifs et la teneur initiale faible en protéines des résidus du cactus, nous avons menés d'autres essais d'ensilage après leur avoir associé des plantes fourragères (atriplex ou luzerne) connues par leur richesse en protéine. Par ailleurs, nous avons réalisé un autre procédé de stabilisation de ces mélanges (rebut de fruits de cactus et plantes fourragères) qui est le séchage solaire. L'ajout de la luzerne ou de l'atriplex a permis d'améliorer considérablement le statut nutritionnel des ensilages et des produits séchés. Le séchage préserve mieux la qualité nutritionnelle des produits.

Et dans le but d'optimiser ce procédé d'ensilage des rebuts du fruit de cactus, nous avons effectué des essais d'ensilage sans et avec ajout de la mélasse à différentes proportions (0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10%). Les résultats obtenus montrent que l'ajout de mélasse a favorisé la croissance des bactéries lactiques ce qui a entraîné une chute rapide du pH, dont l'effet était l'inhibition totale des coliformes. Cependant, les proportions élevées de mélasse (10%) ont engendré un développement important de levures lors du test de stabilité aérobie. D'où l'intérêt d'ajouter la mélasse à des proportions modérées (6%) pour favoriser la fermentation lactique, sans engendrer de problèmes lors de l'ouverture d'ensilage pour utilisation.

Nous estimons que les résultats trouvés seront utiles aux agriculteurs dans le sens d'utiliser ces techniques pour conserver les rebuts de fruits et les pelures du cactus en vue de leur utilisation en alimentation animale.

Mots clés : *Opuntia ficus-indica*, Rebut, Pelure, Caractérisation, Chimique, Biochimique, Microbiologique, Valorisation, Ensilage, Alimentation animale.

Abstract

The adaptation of the prickly pear to the desert and the semi-desert conditions allowed it to be a culture of undeniable ecological and socioeconomic interest. Recently, in Morocco, the cultivation of several species and varieties has expanded for commercial fruit production and the area planted with the cactus has tripled from almost 45.000 ha at the outset of 1990, to an estimated 150.000 ha in 2016.

Such increase in surface area is certainly accompanied by an increase in production, creating important residues, in particular fruit waste left in the fields at the end of the season and peelings generated by the direct human food or by the cactus processing industries.

In order to valorize these residues, we aimed in the present work to evaluate the potentials of their utilization in animal feed after their stabilization by the silage and drying process. To do this, we started with the chemical, biochemical and microbiological characterization of the different fractions of the prickly pear fruit (peel, pulp and seed). The results showed that they are rich in sugars (32.34% DM for fruits and 31.19% DM for peels), minerals (i.e. respective values for Ca, Na, Mg, K, Fe and Cu of 86.45; 6.38; 11.75; 119.31, 0.23 and 0.23 mg/100g FM for fruits and 108.76; 1.4; 9.42; 25.97; 0.29 and 0.64 mg/100g FM for peels) and fibers (27.23% DM for fruits and 11.72% DM for peels) but poor in proteins (11.98% DM for fruit and 4.84% DM for peels). Moreover, they are enriched with microorganisms that can be useful such as lactic acid bacteria, which makes these cactus residues a by-product suitable for fermentations. The ensiling experiments of cactus fruit scraps and peels have allowed to decrease the pH under 4.5, pH at which enterobacteria and facultative aerobic bacteria are inhibited. Therefore, these silage waste products are stable and can be preserved for use in animal feed. On the other hand, some of their nutrients, including sugars, minerals and proteins, have been lost in water-soluble form in the water released during fermentation.

Because of this loss of nutrients and the low initial protein content of the cactus residues, we have conducted other silage essays after having associated forage plants (atriplex or alfalfa) known by their high protein content. Furthermore, we have carried out another process of stabilization of these mixtures (cactus fruit scraps and forage plants) which is the solar drying. The addition of alfalfa or atriplex has considerably improved the nutritional status of silages and dried products. The drying process better preserves the nutritional quality of the products. In order to optimize this process of ensiling cactus fruit waste, we carried out ensiling essays without and with the addition of molasses at different proportions (0%, 2%, 4%, 6%, 8% and 10%). The results obtained show that the addition of molasses favored the growth of lactic acid bacteria, which led to a quick decrease in pH, the effect of which was the total inhibition of coliforms. However, the high proportion of molasses (10%) resulted in a significant development of yeasts during the aerobic stability test. Therefore, it is interesting to add molasses at moderate proportions (6%) to promote lactic fermentation, without causing problems during the silage opening for use.

We believe that the found results will be useful to farmers in the sense of using these techniques to conserve fruit scraps and cactus peels for animal feed utilization.

Keywords: *Opuntia ficus-indica*, Scraps, Peels, Characterization, Chemical, Biochemical, Microbiological, Valorization, Silage, Animal feed.

ملخص

إن تكيف التين الشوكي مع الظروف الصحراوية والشبه صحراوية يجعل منه نبتة ذات أهمية كبرى على المستوى الايكولوجي والسوسيو اقتصادي. في الآونة الأخيرة، في المغرب، تم تطوير زراعة العديد من الأنواع والأصناف لإنتاج الفاكهة القابلة للتسويق، وزادت المساحة المزروعة بالتين الشوكي ثلاث مرات من حوالي 45000 هكتار في بداية عام 1990، إلى ما يعادل 150000 هكتار في عام 2016. مثل هذه الزيادة ينتج عنها زيادة في الانتاج مما يولد كمية كبيرة من المخلفات ولا سيما الثمار المتروكة في الحقول في نهاية الموسم والقشور الناتجة عن غذاء الإنسان أو عن طريق الصناعات التحويلية للصابون. من أجل تثمين هذه المخلفات، نقترح في هذا العمل، تقييم إمكانية استخدامها في علف الحيوانات على شكل سيلاج وتجفيف.

لقيام بذلك، بدأنا أولاً بتقييم الجودة الكيميائية والبيوكيميائية والميكروبيولوجية للأجزاء المختلفة المكونة للفاكهة (القشور واللب والبذور). وأظهرت النتائج أنها غنية بالسكريات (32,34% للفواكه و 31.19% للقشور) والمعادن (قيم كل من الكالسيوم، الصوديوم، المغنيزيوم، البوتاسيوم، الحديد والزنك هي على التوالي 6.38 ؛ 11.75 ؛ 119.31 و 0.23 و 0.23 و 0.23 ميليغرام لكل 100 غرام بالنسبة للفواكه و 108.76 ؛ 1.4 ؛ 9.42 ؛ 25.97 و 0.29 و 0.64 ميليغرام لكل 100 غرام بالنسبة للقشور) والألياف (27.23% للفواكه و 11.72% للقشور) ولكنها تفتقر إلى البروتينات (11.98% للفواكه و 4.84% للقشور). بالإضافة إلى ذلك، فهي محملة بالكائنات الحية الدقيقة المفيدة مثل بكتيريا حمض اللاكتيك، مما يجعل بقايا الصبار هذه منتجاً ثانوياً قابلاً للتخمير.

أدت تجارب السيلاج لمخلفات الثمار والقشور إلى خفض درجة الحموضة إلى أقل من 4,5، وهي القيمة التي يتم عندها تثبيط البكتيريا المعوية والبكتيريا الهوائية. وبالتالي فإن هذه المخلفات المخمرة مستقرة ويمكن الحفاظ عليها لاستخدامها في علف الحيوانات. من ناحية أخرى فإن هذه المخلفات فقدت جزءاً من عناصرها الغذائية خاصة السكريات والعناصر المعدنية والبروتينات مع المياه التي يتم إخراجها أثناء التخمر. بسبب فقدان العناصر الغذائية والمحتوى الأولي المنخفض للبروتين لبقايا الصبار قمنا بإجراء تجارب أخرى على السيلاج بعد دمجها مع نباتات العلف (أتريلكس أو البرسيم) المعروفة بمحتواها العالي من البروتين. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بتنفيذ عملية التجفيف الشمسي لتثبيت هذه الخلائط (مخلفات الثمار والنباتات العلفية). أدت إضافة البرسيم أو الأتريلكس إلى تحسين كبير في الحالة التغذوية للسيلاج والمنتجات المجففة بشكل ملحوظ. يحافظ التجفيف بشكل أفضل على الجودة الغذائية للمنتجات.

وبهدف إتقان عملية السيلاج، أجرينا اختبارات السيلاج بدون إضافة دبس السكر (0%) وبإضافة دبس السكر بنسب مختلفة (2% ، 4% ، 6% ، 8% و 10%). أظهرت النتائج أن إضافة دبس السكر ساعد على نمو بكتيريا حمض اللاكتيك مما أدى إلى انخفاض سريع في الرقم الهيدروجيني، والذي كان أثره هو التثبيط التام لبكتيريا القولونيات. ومع ذلك، أدت النسب العالية من دبس السكر (10%) إلى نمو مهم في الخمائر أثناء اختبار الثبات الهوائي. ومن هنا جاءت الفائدة من إضافة دبس السكر بنسب معتدلة (6%) لتعزيز التخمر اللبني دون التسبب في مشاكل عند فتح السيلاج للاستخدام.

نعتقد أن النتائج التي تم العثور عليها ستكون مفيدة للمزارعين في إطار استخدام هذه التقنيات لحفظ مخلفات الفاكهة وقشور الصبار لاستخدامها في تغذية الحيوانات.

الكلمات المفتاح: مخلفات، قشور، تقييم، كيميائية، بيوكيميائية، ميكروبيولوجية، تثمين، سيلاج، تغذية حيوانية

Table des matières

<i>Remerciements</i>	2
<i>Avant-propos</i>	5
<i>Résumé</i>	8
<i>Abstract</i>	9
<i>ملخص</i>	10
<i>Liste des figures</i>	17
<i>Liste des tableaux</i>	20
<i>Liste des annexes</i>	22
<i>Liste des abréviations</i>	22
<i>Introduction générale</i>	24
PARTIE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	27
Chapitre 1 : Synthèses des données sur le figuier de barbarie	28
Introduction	29
1. Historique	29
2. Répartition géographique	31
2.1. Répartition mondiale	31
2.2. Répartition à l'échelle nationale	32
3. Aspect botanique	33
3.1. Position systématique	33
3.2. Biologie	34
4. Exigences écologiques	37
4.1. Température	37
4.2. Précipitations	37
4.3. Sol	37
5. Composition chimique de la figue de barbarie	38
5.1. Cladodes	38
5.2. Fruits	42
5.2.1. Ecorce	43

5.2.2.	Pulpe.....	44
5.2.3.	Graine	45
6.	Importance économique, écologique et thérapeutique	49
6.1.	Importance économique.....	50
6.1.1.	Alimentation humaine	50
6.1.2.	Alimentation animale	50
6.1.3.	Production de colorants et élevage de la cochenille	51
6.1.4.	Production du biogaz et d'éthanol.....	52
6.1.5.	Industries ago-alimentaires	52
6.1.6.	Extraction des pectines	54
6.2.	Importance thérapeutique.....	55
6.3.	Importance écologique.....	56
6.3.1.	Préservation des sols.....	56
6.3.2.	Traitements : Adsorption, coagulation et floculation	57
	Conclusion.....	57

Chapitre 2 : Données bibliographiques sur l'ensilage

	Introduction	59
1.	Définition et historique	59
1.1.	Définition	59
1.2.	Historique.....	60
2.	Phases de l'ensilage.....	62
2.1.	Phase 1: Phase initiale aérobie	62
2.2.	Phase 2 : Phase de fermentation principale	63
2.3.	Phase 3 : Phase de stabilité	63
2.4.	Phase 4 : Période d'alimentation.....	64
3.	Additifs d'ensilage	65
3.1.	Inoculants bactériens	66
3.1.1.	Bactéries lactiques homo-fermentaires	66
3.1.2.	Bactéries Lactiques hétéro-fermentaires	66
3.1.3.	Autres inoculants	67
3.1.3.1.	Streptococcus bovis	67
3.1.3.2.	Levures	68
3.1.3.3.	Espèces de Bacillus	68
3.2.	Additifs chimiques.....	69
3.2.1.	Additifs à base d'acide	69

3.2.2.	Additifs à base de sel	70
3.3.	Additifs enzymatiques	70
3.4.	Produits sucrés.....	71
3.5.	Nutriments.....	73
3.6.	Absorbants	74
4.	Micro-organismes du processus d'ensilage	75
4.1.	Bactéries lactiques	75
4.2.	Entérobactéries	76
4.3.	Clostridia.....	77
4.4.	Levures et moisissures	78
4.5.	Bactéries de l'acide propionique.....	79
4.6.	Autres bactéries	79
5.	Stockage des ensilages	80
5.1.	Silos	81
5.1.1.	Silo tour.....	81
5.1.2.	Silo horizontal	82
5.2.	Ensilage sous plastique sans structure	83
5.2.1.	Ensilage en sac (silos boudins).....	83
5.2.2.	Ensilage en tas (silos-meules)	85
5.3.	Ensilage en grosses balles	86
6.	Pertes liées au stockage de l'ensilage	87
6.1.	Respiration	87
6.2.	Fermentation	88
6.3.	Effluents.....	90
7.	Qualité hygiénique de l'ensilage	91
7.1.	Rôle des bactéries formant des endospores.....	91
7.2.	Bactéries pathogènes et toxines bactériennes.....	92
7.2.1.	Listeria	92
7.2.2.	Clostridium.....	92
7.2.3.	Moisissures et mycotoxines	93
	Conclusion	94
	 PARTIE II : MATERIELS ET METHODES	95
	Introduction	96
1.	Collecte des échantillons	97

2.	Déroulement des essais expérimentaux	98
2.1.	Caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des rebuts	98
2.2.	Ensilage des pelures et des fruits du cactus.....	99
2.3.	Enrichissement protéique des résidus de figue de barbarie.....	101
2.4.	Ensilage des rejets de fruit de cactus avec et sans ajout de mélasse.....	103
3.	Analyses physico-chimiques et microbiologiques	105
3.1.	Analyses physico-chimiques	105
3.1.1.	Matière sèche et Humidité	105
3.1.2.	pH.....	105
3.1.3.	Cendres brutes	105
3.1.4.	Sucres.....	106
3.1.4.1.	Sucres réducteurs.....	106
3.1.4.2.	Sucres totaux	108
3.1.5.	Protéines.....	108
3.1.6.	Fibres (Van Soest et al., 1991)	109
3.1.6.1.	Fibres au détergent neutre (NDF)	109
3.1.6.2.	Fibres au détergent acide (ADF)	110
3.1.6.3.	Dosage de la lignine (ADL)	111
3.1.6.4.	Hémicellulose.....	112
3.1.6.5.	Cellulose	113
3.1.7.	Matière grasse	113
3.1.8.	Eléments minéraux	113
3.2.	Analyses microbiologiques	114
3.2.1.	Bactéries lactiques	115
3.2.2.	Levures et moisissures	115
3.2.3.	Flore mésophile aérobie totale	116
3.2.4.	Coliformes totaux et Fécaux	116
3.2.5.	Escherichia Coli	117
3.2.6.	Staphylocoques.....	118
3.2.7.	Salmonella.....	118
3.3.	Analyses statistiques	119
 PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS		120
Chapitre 1 : Caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des rebuts de cactus		121

Introduction	122
1. Composition chimique et biochimique de la pelure	122
2. Composition chimique et biochimique de la pulpe	123
3. Composition chimique et biochimique de la graine	124
4. Caractérisation microbiologique du fruit de cactus	126
5. Comparaison des différentes fractions du fruit de cactus	126
5.1 Composition globale	126
5.2 Teneur en fibres	128
5.3 Teneur en éléments minéraux	129
Conclusion	131

Chapitre 2 : Ensilage des pelures et des fruits de figuier de barbarie.....132

Introduction	133
1. Composition chimique et biochimique des mélanges initiaux	133
2. Composition chimique et biochimique des mélanges après ensilage	136
3. Etude cinétique de l'ensilage	139
3.1 Evolution du pH au cours de l'ensilage	139
3.2 Cinétique de dégradation des sucres au cours de l'ensilage	140
3.3. Cinétique de dégradation des protéines au cours de l'ensilage	142
4. Caractérisation microbiologique des mélanges et des produits de l'ensilage	143
Conclusion	146

Chapitre 3 : Essai d'enrichissement protéique des rebuts de figue de barbarie.....147

Introduction	148
1. Caractérisation chimique et biochimique	148
1.1. Caractérisation chimique et biochimique des ingrédients	148
1.2. Caractérisation chimique et biochimique des mélanges initiaux	151
1.3. Caractérisation chimique et biochimique des mélanges après ensilage	154
1.4. Caractérisation chimique et biochimique des mélanges après séchage	157
1.5. Effet du mode de conservation et de la nature des ingrédients des mélanges sur les différents composants.	160
2. Caractérisation microbiologique	161
2.1. Caractérisation microbiologique des mélanges initiaux.....	161
2.2. Caractérisation microbiologique des mélanges après ensilage	162
2.3. Caractérisation microbiologique des mélanges après séchage	163

2.4.	Effet du mode de conservation et la nature des ingrédients des mélanges sur le nombre des micro-organismes.	164
	Conclusion	165

Chapitre 4 : Ensilage des rejets de fruit cactus avec et sans ajout de mélasse
.....167

	Introduction	168
1.	Caractéristiques des composants des mélanges	168
2.	Composition des mélanges initiaux	169
3.	Composition des mélanges après ensilage	172
4.	Effet de la quantité de mélasse ajoutée sur les différent composants	175
5.	Suivi de la fermentation au cours de l'ensilage	176
5.1.	Evolution du pH	176
5.2.	Evolution de la croissance des bactéries lactiques.....	177
5.3.	Evolution de la croissance des levures.....	178
5.4.	Evolution de la croissance des coliformes	179
5.5.	Evolution de la croissance de la flore mésophile aérobie totale	180
6.	Test de stabilité aérobie	181
6.1.	Levures.....	181
6.2.	pH et Température	182
	Conclusion	184

Conclusion générale185

Perspectives.....189

Références bibliographiques190

Annexes213

Liste des figures

Figure 1: la plante <i>Opuntia ficus-indica</i>	Figure 2 : Blason du Mexique	30
Figure 3: Distribution géographique du figuier de barbarie dans le monde (Orwa et al., 2009)		32
Figure 4 : Les différentes parties du figuier de barbarie		35
Figure 5: Cycle photosynthétique des plantes du type CAM		36
Figure 6: Composition chimique du figuier de barbarie (en % de matière fraîche) et constituant du fruit en % du poids frais		42
Figure 7: Fragmentation du fruit de cactus.....		43
Figure 8: Schéma technologique de la transformation agroalimentaire de la figue de barbarie.....		54
Figure 9: Propriétés médicinales et thérapeutiques du cactus (Inglese, 2019)		56
Figure 10: Les différentes étapes d'évolution d'un ensilage		64
Figure 11: Silo tour		81
Figure 12: Silo-couloir avec porte de tête pour permettre l'auto-alimentation.....		82
Figure 13: Ensilage en sac (silo boudin)		84
Figure 14: Ensilage en tas (silo-meules)		85
Figure 15: Ensilage en grosse balles		87
Figure 16: Localisation géographique de la zone d'étude		97
Figure 17: Données climatiques de la zone d'étude		98
Figure 18: Teneur en cendres, protéines, matière grasse, sucres réducteurs et sucres totaux dans les différentes parties du fruit de cactus.		127
Figure 19: Représentation graphique des trois fractions de fruits dans le plan 1-2 d'une analyse en composantes principales basée sur la détermination biochimique (matière sèche, humidité, sucres réducteurs, sucres totaux, cendres et matière grasse).....		128
Figure 20: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les différentes parties du fruit de cactus.....		128
Figure 21: Représentation graphique des trois fractions du fruit dans le plan 1-2 d'une analyse en composantes principales effectuée à partir de la détermination des fibres (NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose)		129
Figure 22: Teneur éléments minéraux Ca, K, Na, Cu, Mg et fer dans différentes parties du fruit du cactus.		130
Figure 23: Représentation graphique des trois fractions du fruit dans le plan 1-2 d'une analyse en composantes principales effectuée à partir de la détermination des éléments minéraux (Ca, Cu, K, Mg et Fer).....		130

Figure 24: Teneur en cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs dans le mélange à base de fruits et le mélange à base d'écorces	135
Figure 25: Teneur en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans le mélange à base de fruits et le mélange à base d'écorces	135
Figure 26: Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans le mélange à base de fruits et le mélange à base d'écorces.....	136
Figure 27: Teneur en cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs dans les deux ensilages.	138
Figure 28: Teneur en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les deux ensilages. .	138
Figure 29: Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les deux ensilages.	139
Figure 30: Evolution du pH pendant le processus d'ensilage.	140
Figure 31: Evolution de la teneur en sucres totaux au cours de l'ensilage.	141
Figure 32: Evolution de la teneur en sucres réducteurs au cours de l'ensilage.	141
Figure 33: Evolution de la teneur en protéines brutes au cours de l'ensilage.	143
Figure 34: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les trois plantes....	150
Figure 35 : Teneur en NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les trois plantes	150
Figure 36 : Teneur en éléments minéraux Ca, K, Mg, Na, Cu et Fe dans les trois plantes	151
Figure 37: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les trois mélanges initiaux	152
Figure 38: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les trois mélanges initiaux	153
Figure 39: Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Cu et Fe dans les trois mélanges initiaux.	153
Figure 40: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les trois mélanges après ensilage	156
Figure 41: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les trois mélanges après ensilage	156
Figure 42 : Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Cu et Fe dans les trois mélanges après ensilage	157
Figure 43: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les mélanges après séchage.....	159
Figure 44: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les mélanges après séchage	159
Figure 45 : Teneur en minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les mélanges après séchage.....	160
Figure 46: Teneur des mélanges initiaux en (cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs) dans les différents mélanges.	170

Figure 47: Teneur des mélanges initiaux en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les différents mélanges.....	171
Figure 48: Teneur des mélanges initiaux en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les différents mélanges.	171
Figure 49 : Teneur en cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs dans les différents mélanges après ensilage.	173
Figure 50: Teneur en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les différents mélanges après ensilage	174
Figure 51: Teneur en éléments minéraux, K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les différents mélanges après ensilage	174
Figure 52: Evolution du pH pendant l'ensilage des mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.	177
Figure 53: Cinétique de croissance des bactéries lactiques pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.	178
Figure 54: Cinétique de croissance des levures pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.	179
Figure 55: Cinétique de croissance des coliformes totaux pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.	180
Figure 56: Cinétique de croissance de la flore mésophile aérobie totale pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.	180
Figure 57: Développement des levures (log UFC/g MF) pendant le test de stabilité aérobie	182
Figure 58: Evolution de la température pendant le test de stabilité aérobie	183
Figure 59: Evolution du pH pendant le test de stabilité aérobie	183

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique des jeunes cladodes du figuier de barbarie (Stintzing & Carle, 2005).	39
Tableau 2 : Composition en éléments minéraux des cladodes de figuier de barbarie (Feugang et al., 2006; Ayadi et al., 2009; de Chávez et al., 1995).	40
Tableau 3 : Composition en acides aminés des cladodes de figuier de barbarie (El-Mostafa et al., 2014; Feugang et al., 2006; Sawaya et al., 1983).	40
Tableau 4 : Composition des huiles de cladodes en acides gras exprimée en g/100g d'acide gras (Abidi et al., 2009).	41
Tableau 5 : Distribution des teneurs en vitamines des différentes fractions du fruit de cactus (mg/100g de tissu) (Stintzing & Carle, 2005; Fernández-López et al., 2010 ; Ramadan & Moersel, 2003; Salim et al., 2009; Tesoriere et al., 2005).	41
Tableau 6 : Composition chimique des différentes fractions du fruit de cactus (El Kossori et al., 1998; Habibi, 2004; Sawaya et al., 1983; Askar & El Samahy, 1981; de Chávez et al., 1995; Sepúlveda & Sáenz, 1990).	46
Tableau 7 : Répartition des teneurs en fibres dans les différentes parties du fruit de cactus en % MS (El Kossori et al., 1998).	46
Tableau 8 : Répartition des teneurs en sucres dans les différentes parties du fruit de cactus (El Kossori et al., 1998).	47
Tableau 9 : Répartition des teneurs en composés minéraux dans les différentes parties du fruit de cactus. En mg/100g MS (Sawaya et al., 1983; Feugang et al., 2006; Contreras-Padilla et al., 2011).	47
Tableau 10 : Répartition des teneurs en acides aminés dans les différentes parties du fruit de cactus en g/100g MS (El-Mostafa et al., 2014; Feugang et al., 2006; Sawaya et al., 1983).	47
Tableau 11 : Composition en acides gras dans les différentes parties du fruit de cactus (en g/100g d'acide gras) (Ramadan & Moersel, 2003; Ennouri et al., 2005; Ramadan & Mörsel, 2003).	48
Tableau 12 : Distribution des teneurs en vitamines des différentes fractions du fruit de cactus (mg/100g de tissu) (Fernández-López et al., 2010 ; Ramadan & Moersel, 2003; Ramadan & Mörsel, 2003; Salim et al., 2009; Tesoriere et al., 2005).	49
Tableau 13 : Les utilisations du figuier de barbarie (Inglese et al., 1995).	57
Tableau 14 : Efficacités d'acidification et de fermentation des principales voies de fermentation des bactéries d'ensilage (Woolford, 1984).	79
Tableau 15 : Réactions de fermentation de l'ensilage et pertes de matière sèche associées (McGechan, 1990; McDonald et al., 1991)	89
Tableau 16 : Proportions des mélanges M1, M2 et M3 en pourcentage (%)	101

Tableau 17: Composition chimique et biochimique de la pelure du cactus (n=12).....	123
Tableau 18: Composition chimique et biochimique de la pulpe du cactus (n=12).....	124
Tableau 19: Composition chimique et biochimique de la graine du cactus (n=12).....	125
Tableau 20: Caractérisation microbiologique des fruits de figue de barbarie.....	126
Tableau 21: Caractérisation microbiologique des mélanges initiaux et des ensilages (n=4).	145
Tableau 22: Effet moyen statistiquement significatif.	161
Tableau 23: Caractérisation microbiologique des mélanges initiaux (n=3).	162
Tableau 24: Caractérisation microbiologique des mélanges après ensilage (n=3).	163
Tableau 25 : Caractérisation microbiologique des mélanges après séchage (n=3)	164
Tableau 26: Effet statistique moyen.	165
Tableau 27 : Composition chimique et biochimique des composants des mélanges.....	168
Tableau 28: Effet moyen statistiquement significatif.	175

Liste des annexes

Annexe 1 : Table de Bertrand	213
Annexe 2: Composition chimique et biochimique des fruits gâchés, des écorces de fruits et des mélanges initiaux.	214
Annexe 3: Composition chimique et biochimique des ensilages de fruits et d'écorces.	215
Annexe 4 : Composition chimique et biochimique des fruits de cactus, luzerne et atriplex.	216
Annexe 5: Composition chimique et biochimique des mélanges M1, M2 et M3 avant ensilage.	217
Annexe 6: Composition chimique et biochimique des mélanges M1, M2 et M3 après ensilage.	218
Annexe 7: Composition chimique et biochimique des mélanges M1, M2 et M3 après séchage.	219
Annexe 8: Composition chimique et biochimique des mélanges initiaux à 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de mélasse.	220
Annexe 9: Composition chimique et biochimique des ensilages à 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de mélasse.	221

Liste des abréviations

°C : Degré Celsius

ABS : Absence

ABS : Absorbance

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADF : Fibres dans un détergent Acide

ADL : Lignine dans un détergent acide

AL : Acide Lactique

ANOVA : Analyse de la variance

BL : Bactéries lactiques

Ca : Calcium

CAM : Crassulacean Acid Métabolism

CB : Cendres brutes

CF : Coliformes Fécaux

CT : Coliformes Totaux

Cu : Cuivre

DH : Dirham
e- : Electron
E.Coli : Escherichia coli
ED : Eau distillée
Fe²⁺ : Ions ferreux
Fe³⁺: Ions ferriques
Fer : Fer
FMAT : Flore Mésophile Aérobie Total
g : Gramme
H : Humidité
K : Potassium
Kg : Kilogramme
MF : Matière Fraiche
MG : Matière Grasse
MS : Matière sèche
Na : Sodium
NDF : Fibres dans un détergent neutre
NPN : Azote Non Protéique
NS : Non significatif
NTU: Nephelometric Turbidity Unit
P: Poids
P : Probabilité
UFC : Unité Formant Colonie

Introduction générale

Le changement survenu dans le système climatique de la terre au cours du siècle dernier est l'un des plus importants défis auquel le monde doit faire face aujourd'hui et dans le futur. Plusieurs pays du sud, y compris le Maroc sont soumis à des périodes de sécheresse prolongées où les populations rurales pauvres et les petits propriétaires sont les plus touchés (Inglese, 2019; Mulas and Mulas 2004).

Au Maroc, les régimes pluviométriques ont connu de grandes perturbations ces deux dernières décennies. Aussi, l'avenir des régions arides et semi-arides dépend largement de la mise en place de systèmes de production agricoles basés sur des cultures peu exigeantes en eau et en fertilisants, capables de supporter la sécheresse et de s'adapter aux conditions difficiles (Khatabi et al., 2016). Ces régions sont aussi caractérisées par des ressources alimentaires limitées, et la production de fourrage vert est rare, en particulier pendant la saison chaude (été); pour cela les animaux sont fortement complétés par l'aliment concentré (Nefzaoui and Salem 2000; Rouissi et al., 2002). A ce propos, le cactus semble être parmi les cultures les plus adaptées pour une agriculture durable dans notre pays, grâce à sa résistance à la sécheresse, ses faibles besoins en eau, sa lutte contre la désertification et son utilisation dans l'alimentation de l'Homme et du bétail (Arba, 2009). Cette plante présente donc plusieurs intérêts : nutritionnels, socioéconomiques, écologiques et environnementaux pour l'Homme et pour l'animal (Khatabi et al., 2016).

Par ailleurs, la production animale augmente d'année en année afin de répondre au besoin croissant de produits alimentaires d'origine animale (Purser, 1981). Cependant, au Maroc comme dans d'autres pays du Sud, les ressources alimentaires sont l'un des facteurs limitant la production animale (Ait Hammou, 2000). Face à cette pénurie pressante d'aliments pour animaux, il est donc indispensable de faire une prospection des nouveaux aliments, disponibles et de faible valeur marchande.

Le Maroc dispose d'une gamme variée de sous-produits agricoles disponibles en quantités considérables et qui sont totalement ou partiellement sous-exploités. Parmi ces ressources alimentaires non-conventionnelles, le cactus, notamment les fruits gâchés ou non commercialisés, qui représentent l'une des rares alternatives pour le cheptel des régions arides (De Kock 2001; Tegegne et al., 2007 ; Nefzaoui and Salem 2001 ; Abidi et al. 2010).

Le cactus est un produit saisonnier produisant des grandes quantités de fruits en peu de temps, la période de maturité des fruits est relativement courte surtout lorsque la période estivale s'accompagne de forte chaleur. En conséquence, entre 30 et 50% de ces fruits mûrissent rapidement et deviennent impropres à la consommation humaine (Bendaou, 2013; Ait-Oubahou and Bartali, 2015). De surcroît, les quantités en figue de barbarie se trouvent en surabondance dans les lieux de production que sur les lieux de vente. Certes les lieux de production se trouvent loin de ceux de consommation et les périodes de récolte coïncident avec les moments chauds. Tant de facteurs facilitent d'avantage l'altération des fruits par divers phénomènes physiques, chimiques, enzymatiques et microbiologiques. De telles altérations entraînent d'énormes pertes au niveau de la production. Il est donc nécessaire de chercher de nouveaux usages pour valoriser ces résidus comme les utiliser dans l'alimentation animale.

Cependant, ces résidus sont périssables, leur stockage sans traitement se traduit par une détérioration considérable de la matière et par la perte d'éléments nutritifs. Il est donc évident que leur valorisation nécessite leur traitement afin qu'ils remplissent parfaitement le rôle qu'ils pourraient occuper dans l'alimentation animale.

Assurément, plusieurs procédés utilisant des traitements physiques, chimiques ou microbiologiques peuvent être proposés. Les techniques biotechnologiques comme l'ensilage et le séchage solaire semblent les mieux adaptées à ces problèmes par leur coût moindre relativement aux installations et aux dépenses énergétiques et par leur accessibilité de point de vue technologique aux petits agriculteurs.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de recherche et qui ont comme objectif la mise au point d'une technique biotechnologique, notamment l'ensilage, et d'autre physique qui est le séchage solaire, pour la stabilisation et l'amélioration de la valeur alimentaire des pelures et des rebuts de fruits de cactus.

La première partie de ce rapport consiste en une mise au point bibliographique mettant l'accent sur la répartition du figuier de barbarie dans le monde et au Maroc, son importance dans les différents domaines, la composition chimique des différentes composantes de la plante. Nous avons présenté également la méthode d'ensilage comme méthode de conservation des fourrages.

La deuxième partie présente les principaux matériels et méthodes utilisés pour la réalisation des essais expérimentaux. Alors que la troisième partie expose les principaux résultats obtenus et discussions. Nous regroupons les résultats en quatre chapitres :

Le premier chapitre porte sur l'étude des caractéristiques chimiques, biochimiques et microbiologiques des pelures et fruits de figue de barbarie collectés en fin de saison dans la région de Béni Mellal.

Le deuxième chapitre concerne la valorisation de ces rebuts par ensilage en association avec la paille et le son de blé. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la composition chimique, biochimique et microbiologique des mélanges à base de pelures et de fruits de cactus avant et après ensilage. Nous avons suivi aussi la cinétique de l'ensilage à travers certains paramètres tels que le pH, les sucres totaux, les sucres réducteurs et les protéines.

Le troisième chapitre vise l'enrichissement protéique des rebuts de fruits de cactus par le biais de l'ajout de l'atriplex ou de la luzerne afin d'en choisir en même temps le plus riche en protéines et le moins coûteux, et aussi la comparaison de deux modes de conservation des aliments pour animaux : l'ensilage et le séchage. Pour ce faire nous avons réalisé d'une part l'ensilage, et d'autre part le séchage des mélanges à base de fruit de cactus seul, de cactus et d'atriplex, et de cactus et de luzerne. Nous avons mesuré les paramètres chimiques, biochimiques et microbiologiques des mélanges initiaux, après ensilage de 30 jours, et après séchage solaire.

Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation d'un ensilage à base fruit de cactus avec l'ajout d'une source d'hydrocarbures ayant pour objectif d'améliorer et accélérer la fermentation et de mieux préserver l'ensilage. La substance adoptée dans notre cas est la mélasse qui est ajoutée en différents pourcentages afin de mieux optimiser le processus de fermentation et aussi la formulation. Nous avons réalisé une étude de la composition chimique, biochimique et microbiologique du mélange avant et après fermentation ainsi qu'un suivi du pH et des paramètres microbiologiques tout au long de la fermentation fixée à 30 jours. En plus nous avons réalisé un test de stabilité aérobie.

PARTIE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Synthèses des données sur le figuier de barbarie

Chapitre 2 : Données bibliographique sur l'ensilage

Chapitre 1 : Synthèses des données sur le figuier de barbarie

Introduction

Dans les régions arides et semi-arides, le cactus a pris une grande importance, tant au niveau économique que sociologique (Beyene et al., 2015). C'est une culture durable avec une faible demande d'intrants et nécessite moins d'investissement, et son rendement peut être plus élevé que d'autres cultures pratiquées dans ces zones, y compris les cultures d'ornement (Arba, 2017; Le Houerou, 2002). Par conséquent, les cultures comme le cactus sont une alternative appropriée pour produire de la nourriture pour les humains et pour le bétail (Dubeux, 2016; Rodrigues et al., 2016).

Au Maroc, le cactus connaît actuellement un intérêt particulier à cause de sa résistance à la sécheresse et de son rôle socioéconomique : production de fruits comestibles et de fourrage pour le bétail et valorisation de la plante en produits de haute valeur ajoutée pour les agriculteurs et les populations locales (produits agro-alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques) (Arba, 2017). La culture du cactus présente un faible coût de production et constitue une source financière pour les agriculteurs et les populations rurales de la région. C'est une espèce de grandes potentialités économiques, tout est valorisable dans la plante et rien ne se perd; on pourrait tirer profit d'une multitude de produits à partir des fruits, des graines, des fleurs et des cladodes (Arba, 2017).

Ce chapitre décrit l'importance du cactus comme culture alimentaire et fourragère au niveau mondiale et nationale.

1. Historique

Le nom commun du figuier de barbarie est le cactus qui vient du mot grec « kaktos », il signifie la plante épineuse (Defelice, 2004). Il appartient à la famille des Cactaceae, celle qui a la plus grande importance agronomique, tant pour ses fruits comestibles que pour ses raquettes utilisées comme fourrage ou comme légumes (Scheinvar, 1995). Le cactus compte actuellement environ 1600 espèces dont l'*Opuntia ficus-indica* (figure 1) est la plus connue et est cultivée dans plusieurs pays pour ses fruits, et en tant que fourrage (Nobel, 2002; Nefzaoui et al., 2014).

Cette plante (figure 1) a été adoptée par l'homme pour différentes fins comme : fruit consommé frais ou conservé, raquette, légumes (jeune raquette ou "Nopalitos"), plante pharmaceutique (fleurs, cladodes), plante industrielles (confiture, jus, colorants naturels, boisson alcoolisée, produits cosmétiques), plante apicole, outil de contrôle contre l'érosion en agroforesterie et en amélioration pastorale et plante clôture/haie. Elle peut pousser dans des climats arides et semi-

arides avec une répartition géographique englobant le Mexique, l'Amérique latine, l'Afrique du Sud et les pays de la Méditerranée (Valente et al., 2010).

Le figuier de barbarie est originaire du Mexique (Mulas et al., 1992), qui figure d'ailleurs sur l'emblème du drapeau mexicain (figure 2). A l'aube du seizième siècle, la plante s'est répandue dans le bassin méditerranéen suite aux expansions espagnoles et aussi par le retour des arabes à leur pays dans le nord -africain suite à leur expulsion par Philippe III en 1610. Les expulsés appelés «morisqués » ont ramené avec eux des raquettes qu'ils ont plantées autours de leurs villages. La plantation du figuier de barbarie a été considérablement étendue dans la région du sud de l'Afrique (1772), l'Inde (1780), les Philippines (1695), la Chine (1700) et l'Indochine (1790) (Bhira, 2012).

Le figuier de Barbarie fut introduit en Afrique du Nord (Algérie, Tunisie, Maroc) vers le 16^{ème} siècle. Sa culture s'est diffusée rapidement dans le bassin de la Méditerranée. Il s'est également répandue dans l'hémisphère sud, notamment en Afrique du Sud, à Madagascar, à la Réunion, à l'île Maurice, en Inde, à Ceylan et en Australie. On peut également le trouver au Canada, en Argentine et au Pérou à une altitude pouvant atteindre 5100 m. Il est actuellement introduit dans plus de 30 pays où il est utilisé pour la production des fruits, comme fourrage et comme plante cosmopolite (Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 2012). Il est cultivé actuellement en Amérique, en Afrique, en Asie, en Europe et en Océanie (Casas & Barbera, 2002). Les Opuntias font maintenant partie de l'environnement naturel et des systèmes agricoles et *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. est l'espèce ayant la plus grande importance économique dans le monde (Kiesling, 1998).



Figure 1: La plante *Opuntia ficus-indica*



Figure 2 : Blason du Mexique

2. Répartition géographique

2.1. Répartition mondiale

Les Cactaceae sont l'une des familles de plantes les plus intrigantes des régions arides et semi-arides du monde, ces dernières couvrant environ 30% de la surface continentale du monde (Lazcano et al., 1999). On peut les rencontrer dans les zones tempérées (Italie), subtropicales africaines et américaines, et en Asie (Chine, Corée du Sud) (Russell & Felker, 1987).

La distribution géographique du cactus est très large (figure 3) : Mexique, Sicile, Chili, Brésil, Turquie, Corée, Argentine et Afrique du Nord (Barbera et al., 1992 ; Felker et al., 2005). Il est par essence développé sur la partie Ouest de la Méditerranée: Sud de l'Espagne, le Portugal, et l'Afrique du Nord (Tunisie, Algérie et Maroc) (Arba, 2009; Nefzaoui et al., 2002a).

Dans certains pays tels que l'Italie, l'Espagne ou le Mexique; la culture du cactus est pratiquée de façon intensive et moderne avec des programmes de recherche et développement pour la production du fruit ou du fourrage et même pour des usages industriels. En revanche, en Australie et en Afrique du Sud, ce végétal, en particulier la variété asperme est considérée comme une mauvaise herbe à cause de la facilité avec laquelle, elle se propage (Mulas & Mulas, 2004).

Les cactus sont cultivés sur 2,6 millions d'hectares à travers le globe et sont principalement utilisés pour le fourrage ou le pâturage. En Tunisie actuellement, la surface couverte par les cactus est d'environ 600 000 ha. Au Brésil la surface de production est de l'ordre de 500 000 ha (Inglese, 2019). En Afrique du sud on estime la surface de plantation à 150 000 ha. Au Mexique la surface plantée couvre 53 876 ha, c'est la cinquième culture dans le pays ; et la production globale annuelle a atteint 428 763 tonnes/an (Méndez et al., 2013). En Algérie la culture de l'Opuntia s'étendent sur plus de 30 000 ha (Inglese, 2019). En Italie, la culture du figuier de Barbarie est concentrée en Sicile, qui compte pour 90% de la production totale (3 500 ha de zones spécialisées, 15 000 ha au total) (Inglese, 2019). En Argentine la surface de production de figuiers de Barbarie est estimée à 1 650 ha (Targa et al., 2010). En Jordanie la surface actuelle de cactus est d'environ 300 ha (Nasr, 2013). En Australie l'industrie moderne du figuier de Barbarie est vraiment petite avec moins de 200 ha. Au Portugal plus de 200 ha ont été plantés et 500 ha supplémentaires vont être plantés dans les prochaines années (Inglese, 2019).

La figure 3 distingue l'aire d'origine du figuier qui est le Mexique (en vert) et les nouvelles aires de distribution (en noir) : le Brésil, le Chili, les Etats Unies, l'Inde, l'Italie, l'Espagne, l'Erythrée, le Portugal, l'Algérie, la Tunisie, la Libye, le Maroc, l'Afrique du Sud, l'Éthiopie, le Soudan, la Tanzanie, le Kenya et l'Ouganda.

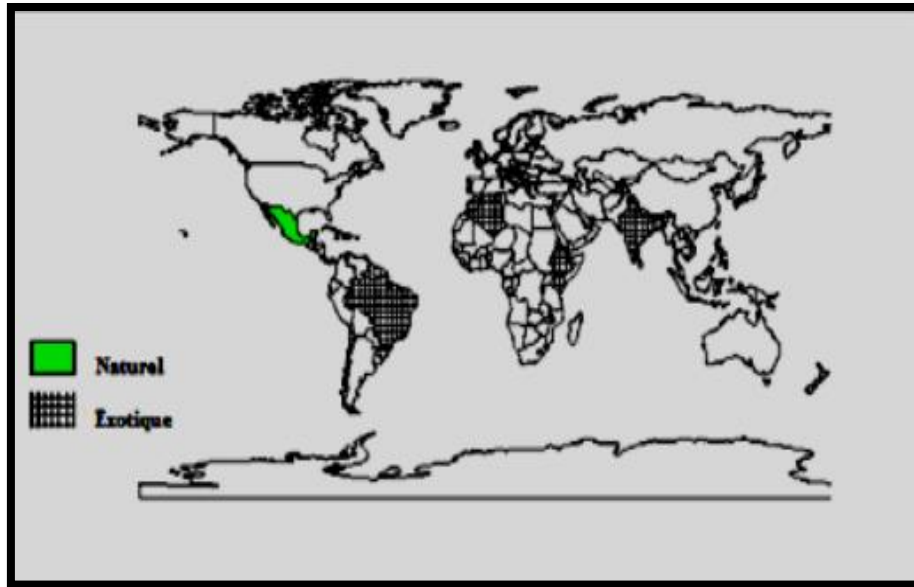


Figure 3: Distribution géographique du figuier de barbarie dans le monde (Orwa et al., 2009)

2.2. Répartition à l'échelle nationale

Le cactus a été introduit au Maroc en 1770 et est aujourd'hui bien représenté à travers le paysage national. Plusieurs cultivars existent, et se distinguent par la forme des fruits, la couleur de la fleur, la couleur de la pulpe du fruit, les périodes de floraison et les caractéristiques organoleptiques des fruits (Projet d'Accès aux Marchés pour les Produits & Terroir, 2015). Il est connu sous plusieurs appellations « hendia », « zaâboul » ou « aknarai ». Il est cultivé pour ses fruits comestibles et le fourrage de ses raquettes pendant les périodes de sécheresse.

Nous retrouvons le figuier de barbarie un peu partout au Maroc, en plantations plus au moins régulières, autour des villages ou en plantes de clôture limitant les parcelles des cultures ou les vergers. Dans les régions côtières depuis Sidi Ifni jusqu'à Tanger, mais aussi dans presque toutes les zones continentales (Arba et al., 2000).

En conséquence de la sécheresse, la surface du cactus a significativement évolué au cours des deux dernières décennies : de 50 000 ha en 1998 à plus de 150 000 ha en 2016 (Khatabi et al., 2016). La région de Guelmim-Sidi Ifni représente plus de 50% (>50 000 ha) de la surface

nationale, suivi par Haouz-El Kelaa des Sraghna avec 30% (environ 30 000 ha), Khouribga est en troisième position, Doukkala en quatrième. Cette évolution de la surface de cactus durant les deux dernières décennies est le résultat de nombreuses opérations de plantation menées par des fermiers en collaboration avec des agences de développement et des organismes de conseil au sein de programmes nationaux de contrôle de la sécheresse (Arba, 2009). La modernisation de l'agriculture marocaine (Plan Maroc Vert) encourage la plantation de cactus comme culture alternative dans les régions moins favorables. Chaque année, plus de 4 000 ha sont plantés dans le centre et le sud du pays (Hamou, 2007). Au cours des 10 dernières années, plusieurs entreprises et coopératives de femmes rurales ont été créées pour la transformation de cactus. Les produits principaux sont : la confiture, le vinaigre, le fourrage, la farine et l'huile de graines (Inglese, 2019). Cependant l'intérêt principal réside dans son rôle de source de fourrage pour le bétail durant les fréquentes années sèches (Inglese, 2019).

3. Aspect botanique

3.1. Position systématique

La position systématique du figuier de barbarie est la suivante comme était établie par Britton & Rose (1963).

Règne : Plantae

Sous règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous-classe : Caryophyllidae

Ordre : Caryophyllales

Famille : Cactaceae

Sous-famille : Opuntioideae

Tribu : Opuntieae

Genre : Opuntia

Sous-genre : Platyopuntia

Espèce : Opuntia ficus indica

Nom commun : Figuier de Barbarie

Nom latin : Opuntia ficus-indica

Autres noms : Figuier des Indes, figue du désert, nopal, semelle du pape, figuier d'Espagne

3.2. Biologie

Le Figuier de Barbarie est une espèce permanente ligneuse, dont les plantes atteignent une hauteur variable de 1 à 5 m (Hills, 1995). De point de vue morphologique, la caractéristique principale est le fait que les branches sont transformées en organes aplatis de forme elliptique ou ovoïdale, carnées et de couleur verte, appelées raquettes (Inglese et al., 1995) (figure 4c). Les feuilles sont rudimentaires, de forme conique et ont un caractère éphémère, tandis qu'à la surface des raquettes on trouve des aréoles (figure 4d), qui sont des petites protubérances à la surface des cactées d'où émergent les aiguillons ou les soies, portent des épines et des poils spéciaux appelés les glochides. Ces épines (figure 4e) sont blanchâtres, sclérifiées, solidement implantées, avec une longueur de 1 à 2 cm. Il existe des variétés inermes (sans épines) (figure 1). A partir des tissus méristématiques des aréoles se développent les nouvelles cladodes, racines et fleurs (Hills, 1995). Les fleurs (figure 4a) sont hermaphrodites, solitaires et de différentes couleurs selon les espèces avec des épales, pétales et étamines en disposition spiralé, leur gynécée est formé par un ovaire inféré constitué de 5 carpelles soudées qui se transforme à maturité en un fruit comestible (Nerd et al., 1991; Hills, 1995). Le fruit (figure 4b) est une baie de couleur blanche, jaune ou rouge à la maturation, normalement doté de nombreuses graines (Inglese, 2019). Les racines (figure 4f) sont généralement superficielles et facilitent ainsi l'absorption des eaux météoriques de faible consistance, mais en même temps, elles sont robustes et capables de coloniser de façon efficace les milieux difficiles. La capacité de colonisation des milieux de faible fertilité pédologique est améliorée par la possibilité d'accueillir dans les racines des micro-organismes fixateurs d'azote (Mulas & Mulas, 2004).

Les fruits d'*Opuntia-ficus indica* ici sont du type baies, se développant à la fois à partir de l'ovaire et du réceptacle qui entoure l'ovaire. Le réceptacle devient la pelure, et seule une fine couche interne de pelure est apportée par le péricarpe (paroi de l'ovaire). La pulpe se développe principalement à partir des funicules qui relient les ovules à la paroi ovarienne (Boke, 1980).

Le cactus est une plante succulente, qui a la capacité à emmagasiner l'eau dans leurs racines ou tiges et feuilles de manière à limiter la transpiration, cette faculté la rend bien adaptée à la sécheresse. L'unique différence entre le cactus et les autres plantes succulentes, est due à la présence des aréoles. La plante *Opuntia* est une plante de type CAM (Crassulacean Acid Metabolism) capable de diminuer leur transpiration par la fermeture des stomates pendant les heures ensoleillées et chaudes et leur ouverture pendant la nuit (Nobel, 2002). Le métabolisme de photosynthèse CAM (figure 5) peut être 4 à 5 fois plus efficace en matière de fixation de

CO₂ par la photosynthèse que les graminées les plus efficaces (Kluge & Ting, 2012; Russell & Felker, 1987).

Attribué à l'origine à la famille des Crassulaceae, le CAM représente un mécanisme de concentration du CO₂ qui a évolué en réponse à la sécheresse dans les environnements terrestres et au manque de carbone inorganique dans les milieux aquatiques (Keeley, 1998).



a. La fleur



b. Le fruit



c. Les raquettes



d. L'aréole



e. Les épines



f. Les racines

Figure 4 : Les différentes parties du figuier de barbarie

Le métabolisme CAM peut se résumer dans quatre phases :

- **Phase 1** : Durant la nuit, la fixation du CO_2 a lieu quand les stomates s'ouvrent et que le CO_2 se diffuse dans les espaces intracellulaires du mésophylle puis dans le cytosol, où il est lié à du phosphoénolpyruvate (PEP), un composé à trois C, grâce à la PEP carboxylase (PEPc). L'enzyme catalyse la formation d'oxaloacétate qui peut être transformé en malate par NAD^+ malate déshydrogénase. Pour éviter l'inhibition, le malate est activement transporté du cytosol vers la vacuole, où il est converti en acide malique, engendrant une augmentation sensible de l'acidité. Les vacuoles des cellules du chlorenchyme occupent plus de 90% du volume des cellules à cause de l'accumulation nocturne d'acides organiques (Inglese, 2019).
- **Phase 2** : Tôt le matin, la transition a lieu entre l'activité de la PEPc et de la Rubisco.
- **Phase 3** : Pendant la journée, les plantes ferment leurs cellules de garde, les stomates sont scellés et le pH augmente. Le malate se diffuse hors de la vacuole et est décarboxylé. Le CO_2 est relâché (augmentant de 0.2 à 2.5%) dans le cytosol et est fixé par le cycle de Calvin dans les chloroplastes par la ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase (Rubisco) menant à la synthèse d'amidon ou autres glucanes.
- **Phase 4** : En fin d'après-midi, la PEPc devient active. Dans des conditions environnementales très sèches, le cycle CAM pourrait être réduit à cette unique phase (Inglese, 2019).

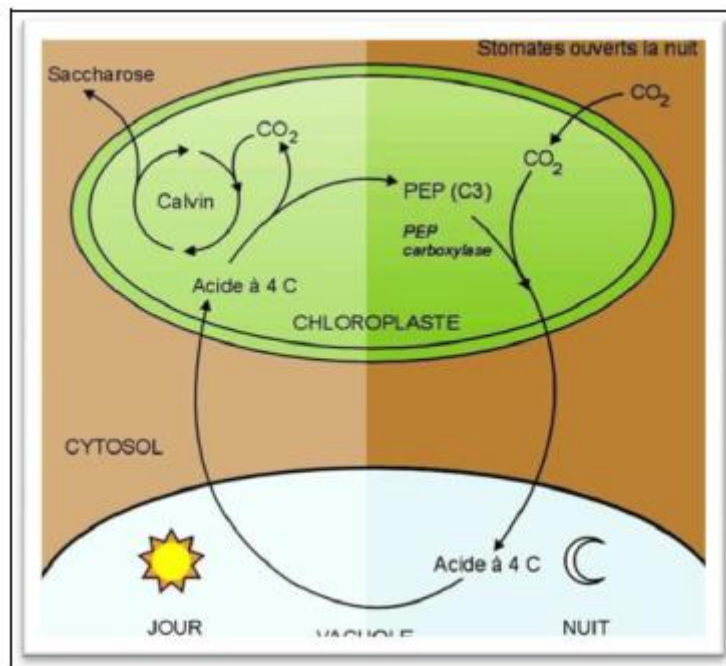


Figure 5: Cycle photosynthétique des plantes du type CAM

4. Exigences écologiques

Le figuier de barbarie possède une grande adaptation aux conditions les plus hostiles, sa remarquable variabilité génétique lui procure une forte adaptabilité écologique, ce qui lui permet de survivre sous différentes conditions climatiques (Stintzing et al., 2001). Son extension est limitée surtout par les basses températures hivernales (FAO, 2005). Il peut tolérer des conditions limitées en eau, des températures élevées et des sols pauvres. Par conséquent, la poire de cactus est de plus en plus cultivée dans les zones semi-arides du monde, y compris en Afrique du Sud (FAO, 2005).

4.1. Température

Si les températures très élevées constituent le facteur limitant la dissémination géographique des espèces végétales, les cactacées en général et les espèces du genre *Opuntia* en particulier, arrivent à supporter les valeurs les plus extrêmes. Le figuier de Barbarie peut survivre à de fortes chaleurs pendant une semaine, il peut même supporter sans dommages l'effet d'une température de 60°C durant une heure. Le niveau le plus bas de température où le développement est possible est l'isotherme de 1,5 à 2 °C de la moyenne journalière du mois le plus froid (généralement janvier) qui correspond à la moyenne mensuelle de 7 à 9 °C, mais avec un maximum journalier supérieur ou égal à 12 °C (Inglese, 2019; Nobel, 1989). Durant la phase de croissance, les besoins en chaleur se situent entre 15 et 25 °C. Les températures moyennes annuelles de 15 à 18 °C lui conviennent parfaitement. Les températures inférieures à 0°C, pendant 4 heures, produisent des dommages irréversibles sur les tissus des cladodes et des fruits (Inglese, 2019).

4.2. Précipitations

Les exigences en précipitations sont variables en fonction de la nature des sols. En effet, pour des sols sableux et profonds, le minimum de précipitation requis tourne autour de 300 à 400 mm/an, alors que sur des sols vaseux et limoneux, la moyenne des précipitations minimales requise est de 200 mm/an; mais le cactus peut être cultivé tant que l'eau additionnelle de l'érosion permet au sol d'emmagasiner 300 à 400 mm (Inglese, 2019).

4.3. Sol

Le cactus peut pousser avec succès dans des zones avec une diversité de sols. Il est caractérisé par un système racinaire superficiel, et peut se contenter d'un sol peu profond (5 à 20cm de

profondeur). En effet, ses racines superficielles lui facilitent l'absorption de la moindre précipitation. L'espèce présente une large faculté d'adaptation avec une préférence pour les sols très perméables, sableux ou caillouteux et à faible taux d'argiles (< 20%). Il redoute les sols lourds et mal drainés. Il supporte aussi bien les sols acides que les sols très calcaires, voire salins (moins de 70 mol de NaCl/ cm³). Les sols préférés sont des sols légers, sablonneux-limoneux, il s'agit de sols légèrement pauvres en matière organique (0.1-1.8), ayant des pH légèrement acides (5.1 - 6.7) (Nerd et al., 1991; Inglese et al., 1995).

Le figuier de barbarie permet de combiner la conservation à long terme du sol avec des fonctions productrices à court terme (Reijntjes & Bayer, 1995). Il est recommandé d'éviter les sols argileux qui peuvent être saturés temporairement et mal drainés (Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 2012).

5. Composition chimique de la figue de barbarie

5.1 Cladodes

La composition des cladodes varie en fonction des facteurs édaphiques du site de culture, de la saison et de l'âge de la plante. (Batista et al., 2003 ; Rodríguez & Cantwell, 1988). La composition chimique des jeunes cladodes frais est rapportée par Stintzing & Carle, (2005) (tableau1). Les jeunes cladodes sont constitués principalement d'eau (88-95 g/100g) suivi des glucides avec une teneur comprise entre 64 et 71 g /100 g par rapport au poids sec et de 3 et 7 g/100g de poids frais. Une teneur en cendres entre 19 et 23 g/100g de poids sec, et en lipides entre 1 et 4 g/100g. La teneur en protéines reste faible au niveau des jeunes cladodes, comme dans la plupart des légumes et fruits. Elle est de 11g /100 g de poids frais ou de 0,5 g/100g de poids sec (Stintzing & Carle, 2005). D'autres auteurs ont observé que cette teneur diminue avec l'âge et dépend de la nature des sols et de la fumure apportée (Nefzaoui et al., 1995; Le Houérou, 1996). Les fibres constituent 18g/100g MS (Stintzing & Carle, 2005) (tableau1). Le cladode est un aliment peu calorique avec 27 kcal/100 g (Amador & García, 2002). Stintzing & Carle, (2005) rapportent que les cladodes de figuier de barbarie sont moins nutritives que les épinards et plus nutritives que la laitue. Le cladode de cactus est caractérisé par sa forte appétence c'est-à-dire son désir d'usage, et son attirance au tant que produit consommable, et sa digestibilité élevée (Salem & Nefzaoui, 2003).

Le potassium est le principal minéral contenu dans les cladodes et représente environ 60 % de l'ensemble de la teneur totale en cendres (entre 166 et 235 mg/100g MF), suivie par le calcium (entre 56,4 mg/100 g et 179,5 mg/100g MF), de sodium (entre 2 mg/ 100 g et 4 mg/100g MF),

de fer (entre 0,9 et 1,6 mg/100 g MF), de phosphore (entre 1,5 et 25,9 mg/100g MF) alors que le zinc, le cuivre et le magnésium n’ont pas été détecté (tableau 2) (Chávez et al., 1995; Feugang et al., 2006; Ayadi et al., 2009).

Les principaux acides aminés contenus dans les cladodes sont la glutamine, suivie par la valine, la sérine, la lysine, l’arginine, thréonine et histidine, isoleucine, phénylalanine, asparagine, méthionine, leucine, tyrosine, et l’alanine. La proline, la taurine et la glycine sont présents en état de traces (tableau 3) (El-Mostafa et al., 2014; Sawaya et al., 1983; Feugang et al., 2006).

Les analyses chromatographiques des lipides totaux extraits des raquettes de cactus (tableau 4) montrent que l’acide linoléique (C18 :2), l’acide linoléique (C18 :3), l’acide palmitique (C16 :0) et l’acide oléique (C18 :1) représentent à eux seuls plus 90% des acides gras totaux avec des fractions respectives de 34,87, 32,83, 13,87 et 11,16 g/100g. L’acide linoléique et linoléique, principaux acides gras polyinsaturés, représentent 68,1% de la teneur total en acides gras (tableau 4) (Abidi et al., 2009). La teneur en acide linoléique dans la raquette (34,87 g/100g d’acide gras extraits) est proche de celle de l’huile d’argan (29 g/100g à 40,41 g/100g d’acide gras) rapportée par (Charrrouf & Guillaume, 2007). Les cladodes sont aussi riche en vitamine C (7-22 mg/100g de tissu) comme rapporté par Stintzing & Carle, (2005) (tableau 5).

Tableau 1 : Composition chimique des jeunes cladodes du figuier de barbarie (Stintzing & Carle, 2005).

Composant	En g/100g (Matière sèche)	En g/100g (Poids frais)
Eau	-	88-95
Glucides	64-71	3-7
Cendres	19-23	1-2
Fibres	18	1-2
Protéines	4-10	0,5-1
Lipides	1-4	0,2

Tableau 2 : Composition en éléments minéraux des cladodes de figuier de barbarie (Feugang et al., 2006; Ayadi et al., 2009; de Chávez et al., 1995).

Composant	mg/100g poids frais
Potassium	166-235
Calcium	56,41-79.5
Sodium	2-4
Magnésium	0-88
Fer	0,9-1,6
Phosphore	--
Zinc	--
Cuivre	--

Tableau 3 : Composition en acides aminés des cladodes de figuier de barbarie (El-Mostafa et al., 2014; Feugang et al., 2006; Sawaya et al., 1983).

Composant	g/100g MS
Glutamine	36,12
Valine	7,72
Sérine	6,68
Lysine	5,22
Arginine	5,01
Thréonine	4,18
Histidine	4,18
Isoleucine	3,97
Phénylalanine	3,55
Asparagine	3,13
Méthionine	2,92
Leucine	2,71
Tyrosine	1,46
Alanine	1,25

Tableau 4 : Composition des huiles de cladodes en acides gras exprimée en g/100g d'acide gras (Abidi et al., 2009).

Composant	g/100g
C 12 :0	1,33
C 14 :0	1,96
C 16 :0	13,87
C 16 :1	0,24
C 18 :0	3,33
C 18 :1	11,16
C 18 :2	34,87
C 18 :3	33,23
C 20 :0	--
C 22 :0	--
C 22 :1	--
C 24 :0	--

Tableau 5: Distribution des teneurs en vitamines des différentes fractions du fruit de cactus (mg/100g de tissu) (Stintzing & Carle, 2005; Fernández-López et al., 2010 ; Ramadan & Moersel, 2003; Salim et al., 2009; Tesoriere et al., 2005).

Composant	mg/100g
Vitamine K1	--
Vitamine C	7-22
Vitamine B1	0,14
Vitamine B2	0,60
Vitamine B3	0,46
α-tocophérol	--
β-tocophérol	--
γ-tocophérol	--
σ-tocophérol	--
Vitamine E totale	--

5.2. Fruits

Plusieurs recherches scientifiques (figure 6) ont confirmé que le cactus possède des propriétés nutritionnelles et médicinales importantes, à cet effet il peut être utilisé comme source de nutriments et de produits phytochimiques tels que les sucres, les fibres, les vitamines, le mucilage. La composition en nutriments des fruits de cactus dépend de plusieurs facteurs : l'espèce, la variété, les facteurs environnementaux et la maturité du fruit (Inglese, 2019).

Le cactus est caractérisé par sa forte appétence et sa digestibilité élevée, avec une teneur élevée en eau, glucides solubles, cendres, Ca, K et vitamine A (Nefzaoui & Ben Salem, 2001).

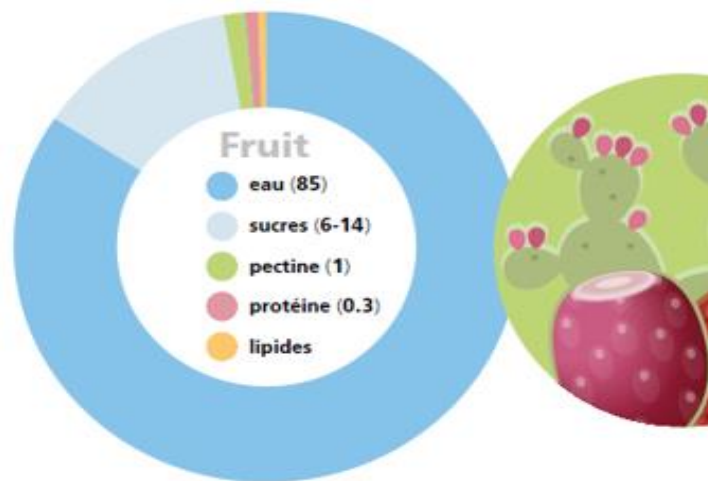


Figure 6: Composition chimique du figuier de barbarie (en % de matière fraîche) et constituant du fruit en % du poids frais

(El Kossori et al. 1998; Berat & Turker 2005, d'après Inglese, 2019)

La figue de Barbarie typique est une baie de forme ovale. La pulpe juteuse constitue 45 à 67 % du poids total du fruit (figure 7) et contient de nombreuses petites graines dures, variant de 100 à plus de 400 par fruit et constituent 2% à 10% du poids de la pulpe (Inglese, 2019).

Le péricarpe des fruits commercialement mûrs *d'Opuntia ficus-indica* représente 33% à 55% (figure 7) (Barbera et al., 1994 ; Inglese et al., 1995). La grande variabilité des pourcentages dépend du cultivar, des pratiques culturales, du nombre de graines fécondées et avortées, de la charge des fruits, la période d'éclaircissement, le climat et la saison de récolte (Sawaya et al., 1983). Le poids des fruits peut varier de 67 g à 216 g au meilleur stade de maturation, pour les mêmes raisons que celles mentionnées ci-dessus.

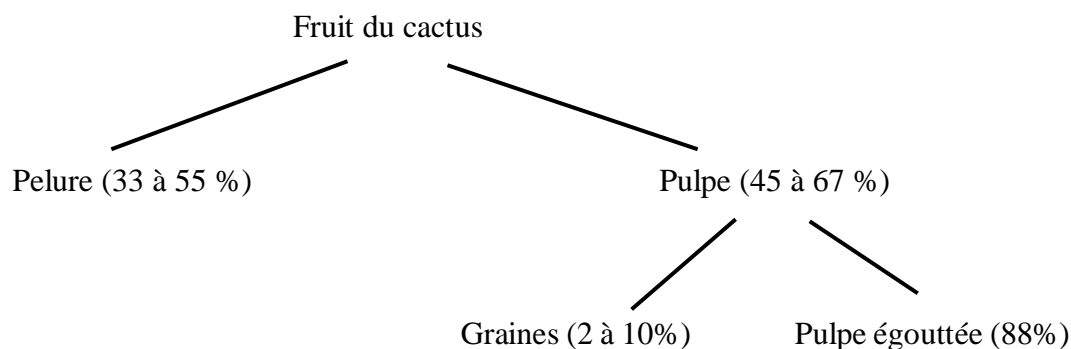


Figure 7: Fragmentation du fruit de cactus

(Barbera et al., 1994; Inglese et al., 1995; Sawaya et al., 1983)

5.2.1. Ecorce

La pelure du fruit du figuier de barbarie est constituée majoritairement de sucres (27,6 %MS) et de fibres (40,8 %MS) dont la cellulose constitue 71,4 % MS de la teneur totale des fibres. Elle contient aussi mais en moindre proportion, des cendres (7-12,1 % MS), des protéines (8,3-10 % MS) et des lipides (2,43 % MS) (tableau 6 et 7) (El Kossori et al., 1998; Sawaya et al., 1983). Le glucose est le sucre dominant dans les pelures de fruit de cactus (tableau 8) (El Kossori et al., 1998).

La pelure est riche en potassium avec une teneur de 2,35 à 55,20 mg/100g MS suivi du calcium avec des teneurs entre 5,64 et 17,95 mg/100g MS et du magnésium 8,80 mg/100g MS. le sodium, le fer, le phosphore et le zinc étant présent en faible quantité (tableau 9) (Sawaya et al., 1983; Feugang et al., 2006; Contreras et al., 2011).

La pelure donne une huile avec des quantités appréciables d'acides gras polyinsaturés (tableau 11), principalement l'acide linoléique. Le profil des acides gras de l'huile de pelure montre une dominance de l'acide linoléique (C18 :2) (32,3 g/100g d'acide gras) suivi de l'acide oléique (C18 :1) (24,1 g/100g d'acide gras) et de l'acide palmitique (C16 :0) (23,1 g/100g d'acide gras) (tableau 10) (Ramadan & Moersel, 2003).

La pelure du fruit est riche en vitamine E totale, α -tocophérol, β -tocophérol et γ -tocophérol (tableau 12) qui sont connues par leur activité antioxydant. Elle neutralise l'action agressive des radicaux libres sur l'organisme, et protège les membranes des cellules et les corps gras de l'oxydation (Ramadan & Mörsel, 2003).

5.2.2. Pulpe

La pulpe est la partie comestible du fruit, elle est composée principalement d'eau (84% à 90%) et de sucres (58,3 % MS) et est caractérisée par un pH élevé et une teneur faible en acidité, les valeurs de pH varient de 5 à 7 et les valeurs d'acidité varient de 0,05 % à 0,18 % acide citrique (Sawaya et al., 1983). Des études ont rapporté que la teneur en protéines est comprise entre 2,1 et 16 % MS (Askar & El Samahy, 1981; Chávez et al., 1995; Sawaya et al., 1983; Sepúlveda & Sáenz, 1990). El Kossori et al., (1998) rapporte une teneur en protéines de 5,13 % MS, cette teneur est plus basse que celle enregistrée chez les légumineuses mais comparable à celle des céréales. La teneur en sucres est de 58,4% MS (El Kossori et al., 1998), le glucose est le sucre le plus abondant alors que le fructose est le deuxième avec un rapport de 18 :1 (Kuti & Galloway, 1994) (tableau 6 et 8).

La littérature rapporte également que la pulpe du fruit du cactus est une bonne source de fibres avec des valeurs respectives en hémicellulose, cellulose, pectine et lignine de 15,5, 14,2, 70,3 et 0,01 % MS (El Kossori et al., 1998), ce qui donne au jus une sensation favorable en bouche et contribue à réduire les taux de sucre dans le sang et de cholestérol dans le plasma (Fernandez et al., 1992; Chávez et al., 1995; Trejo et al., 1996) (tableau 7).

La pulpe est aussi très riche en éléments minéraux (Cheftel et al., 1983), le potassium est présent à 161 mg/100g MS dépassant la concentration d'autres minéraux comme le calcium (27,6 mg/100g MS), le magnésium (27,7 mg/100g MS) et le phosphore (15,4 mg/100g MS), le sodium et le fer sont présent en quantité faible (Medina et al., 2007; Sawaya et al., 1983) (tableau 9). López, (1995) et Wills et al., (1986) rapportent que la pulpe de cactus se caractérise par une teneur élevée en potassium et calcium tandis que les autres minéraux se situent dans la fourchette normale pour les fruits.

La teneur totale en acides aminés (257,24 mg/100 g MS) est plus élevée que la moyenne des autres fruits (Piga, 2004); les principaux acides aminés sont la proline (46 mg/100g MS), la taurine (15,79 mg/100g MS), la glutamine (12,59 mg/100g MS) et la serine (6,34 mg/100g MS) (Sawaya et al., 1983) (tableau 10).

Les analyses chromatographiques des lipides totaux extraits de la pulpe des fruits de cactus montrent que l'acide le plus abondant est l'acide linoléique (C18 :2) (37 g/100g d'acide gras) suivi de l'acide palmitique (C16 :0) (34.4 mg/100g d'acide gras), de l'acide linoléique (C18 :3) (12,68 g/100g d'acide gras) et de l'acide oléique (C18 :1) (10,8g/100g d'acide gras) (tableau11) (Ramadan & Moersel, 2003).

La pulpe est riche en vitamine C avec des teneurs plus importantes que celles des autres fruits communs tels que la pomme, la banane et le raisin (tableau 12) (Sepúlveda & Sáenz, 1990; Sawaya et al., 1983).

5.2.3. Graine

Les graines du figuier de barbarie ont suscité ces dernières années beaucoup d'intérêt à l'instar des autres pépins en particulier ceux des raisins et les études se sont multipliées pour caractériser leurs constituants afin d'évaluer surtout leur valeur nutritive (Sawaya et al., 1983). Les graines constituent 2% à 10% du poids total du fruit et elles représentent environ 2 à 10% de la partie comestible des fruits, C'est la partie du fruit la plus riche en lipides 7-8,5 % MS. Elle est aussi riche en fibres (54,2 % MS) dont la cellulose présente 83,2 % MS de la teneur totale en fibres, en cendres (5,9 % MS), et en protéines (entre 6,77 et 8.5 % MS) mais présentent des teneurs faibles en sucres (1,59 % MS) dont le glucose représente 83,2 % MS, et en eau (entre 5 et 6 % MS) (El Kossori et al., 1998) (tableau 6, 7 et 8).

Les graines issues de fruits de cactus sont riches en minéraux avec une prédominance de potassium et de phosphore qui sont respectivement 163 et 152 mg/100 g. Il y a aussi une présence remarquable de grandes quantités, de magnésium (74,8 mg/100g), de sodium (67,6 mg/100g) et de calcium (16,2 mg/100g) (tableau 9) (El Kossori et al., 1998; Medina et al., 2007).

En revanche, dans la graine l'acide aminé majeur est l'acide glutamique avec une valeur de 21,68 g/100g MS suivie par l'acide asparginique 10,42 g/100g MS (tableau 10) (Feugang et al., 2006).

Cependant, l'attention des chercheurs s'est focalisée surtout sur les huiles contenues dans ces graines. Des études sur l'huile de la graine du figuier de barbarie ont montré qu'elle appartient à la catégorie des huiles « polyinsaturées » comme la plupart des huiles végétales. (Habibi, 2004). Par contre sa particularité réside dans sa richesse en matière insaponifiable (stéroïls et tocophérols) (Barbagallo & Spagna, 1999; Sawaya & Khan, 1982). Cette caractéristique pourrait être un bon atout pour son exploitation dans le domaine de la cosmétologie étant donné les effets bénéfiques de ces substances sur l'élasticité de la peau, le métabolisme cellulaire et la restauration de la structure cutanée. Ceci explique d'ailleurs la demande actuelle accrue de cette huile sur le marché. Néanmoins à l'exception de l'utilisation des huiles, aucune exploitation industrielle des graines n'est connue à ce jour. Le profil des acides gras (tableau 11) montre que

les acides gras essentiels (principalement l'acide linoléique) avec une teneur entre 53,5-70,29 g/100g d'acide gras forment un pourcentage significatif des acides gras insaturés de l'extrait d'huile de graines. Les acides gras polyinsaturés représentent environ 80% de tous les acides gras (Ennouri et al., 2005). Elle est composée de 88 % d'acides gras essentiels, majoritairement d'acide linoléique (C18 :2) et d'acide oléique (C18 :1) qui est comparable à celui de l'huile de tournesol, l'huile de pépins de raisins et de l'huile de sésame (Filip et al., 2011). A cet effet, les graines peuvent être exploitées dans la fabrication et l'extraction de certains produits alimentaires en tant que huile de table compte tenu de sa teneur élevée en acides gras insaturés. Par contre sa particularité réside dans sa richesse en matière insaponifiable (stéroïdes et tocophérols) (tableau 12), cette caractéristique pourrait être un bon atout pour son exploitation dans le domaine de la cosmétologie étant donné les effets bénéfiques de ces substances sur l'élasticité de la peau, le métabolisme cellulaire et la restauration de la structure cutanée (Habibi, 2004).

Tableau 6: Composition chimique des différentes fractions du fruit de cactus (El Kossori et al., 1998; Habibi, 2004; Sawaya et al., 1983; Askar & El Samahy, 1981; de Chávez et al., 1995; Sepúlveda & Sáenz, 1990).

Composant	Pulpe	Graine	Écorce
Eau %	84-90	5-6	--
Protéines %MS	2,1-16	11,8-12	8,3-10
Lipides %MS	0,97	6,77-8,5	2,43
Cendres %MS	5,8	1,3-5,9	7-12,1
Fibres %MS	20,5	54,2	40,8
Sucres %MS	58,3	1,59	27,6
pH	5-7	--	--
Acidité (% acide citrique)	0,05- 0,18	--	--

Tableau 7 : Répartition des teneurs en fibres dans les différentes parties du fruit de cactus en % MS (El Kossori et al., 1998).

Composant	Pulpe	Graine	Écorce
Hémicellulose	15,5	9,95	20,8
Cellulose	14,2	83,2	71,4
Pectines	70,3	6,69	7,71
Lignines	0,01	0,19	0,06

Tableau 8 : Répartition des teneurs en sucres dans les différentes parties du fruit de cactus (El Kossori et al., 1998).

Composition	Pulpe	Graine	Écorce
Saccharose % MS	15,5	9,95	20,8
Glucose % MS	14,2	83,2	71,4
Fructose % MS	70,3	6,69	7,71

Tableau 9: Répartition des teneurs en composés minéraux dans les différentes parties du fruit de cactus. En mg/100g MS (Sawaya et al., 1983; Feugang et al., 2006; Contreras-Padilla et al., 2011).

Elément	Pulpe	Graine	Écorce
Potassium	161	163	2,35-55,20
Calcium	27,6	16,2	5,64-17,95
Sodium	0,8	67,6	0,3-0,4
Magnésium	27,7	74,8	8,80
Fer	1,5	9,45	0,09
Phosphore	--	152	0,15-2,59
Zinc	--	1,45	0,08
Cuivre	--	0,32	--

Tableau 10: Répartition des teneurs en acides aminés dans les différentes parties du fruit de cactus en g/100g MS (El-Mostafa et al., 2014; Feugang et al., 2006; Sawaya et al., 1983).

Composant	Pulpe	Graine
Glutamine	12,59	trace
Valine	1,43	6,02
sérine	6,34	8,46
Lysine	0,63	6,79
Arginine	1,11	6,63
Thréonine	0,48	1,53
Histidine	1,64	3,11
Isoleucine	1,13	6,20
Phénylalanine	0,85	5,25
Asparagine	1,51	trace

Tableau 10 : Répartition des teneurs en acides aminés dans les différentes parties du fruit de cactus en g/100g MS (suite)

Composant	Pulpe	Graine
Méthionine	2,01	0,70
Leucine	0,75	9,94
Tyrosine	0,45	3,09
Alanine	3,17	4,75
Proline	46	trace
Taurine	15,79	trace
Glycine	trace	5,06
Acide glutamique	2,40	21,68
Acide asparaginique	trace	10,42

Tableau 11: Composition en acides gras dans les différentes parties du fruit de cactus (en g/100g d'acide gras) (Ramadan & Moersel, 2003; Ennouri et al., 2005; Ramadan & Mörsel, 2003).

Composant	Pulpe	Graine	Écorce
C 12 :0	--	--	0,71
C 14 :0	1,13	--	1,95
C 16 :0	34,4	9,32-20,1	23,1
C 16 :1	1,62	1,42-1,80	2,48
C 18 :0	2,37	2,72-3,11	2,67
C 18 :1	10,8	16,77-18,3	24,1
C 18 :2	37	53,5-70,29	32,3
C 18 :3	12,68	2,58	9,27
C 20 :0	--	--	--
C 22 :0	--	--	0,5
C 22 :1	--	--	--
C 24 :0	--	--	0,41

Tableau 12 : Distribution des teneurs en vitamines des différentes fractions du fruit de cactus (mg/100g de tissu) (Fernández-López et al., 2010 ; Ramadan & Moersel, 2003; Ramadan & Mörsel, 2003; Salim et al., 2009; Tesoriere et al., 2005).

Composant	Pulpe	Graine	Écorce
Vitamine K1	53,2	52,5	109
Vitamine C	34-40	--	--
Vitamine B1	--	--	--
Vitamine B2	--	--	--
Vitamine B3	--	--	--
α-tocophérol	84,9	56	1760
β-tocophérol	12,6	12	222
γ-tocophérol	7,9	33	174
σ-tocophérol	422	5	26
Vitamine E totale	527,4	106	2182

6. Importance économique, écologique et thérapeutique

L'importance du Figuier de Barbarie est liée aux nombreuses utilisations de l'espèce (tableau13) tant comme culture extensive qu'à l'état spontané (Barbera et al., 1988; Barrios, 1994). Les recherches scientifiques ont confirmé que les fruits et les cladodes de cactus peuvent être efficacement utilisés comme sources de nutriments et de produits phytochimiques (par exemple : les sucres, le mucilage, les fibres, les vitamines et les pigments) d'importance nutritionnelle et fonctionnelle. Les produits de cactus montrent des caractéristiques fonctionnelles prometteuses dues à leurs propriétés bénéfiques pour la santé (Inglese, 2019).

Le cactus est employé dans les domaines nutritionnels, de la santé et la cosmétiques sous différentes formes : thé, confiture, jus et huile extraite de graines de figues de Barbarie. Il est utilisé comme un remède pour les divers problèmes de santé dans différents pays : par exemple, dans la médecine traditionnelle subsaharienne, la fleur de cactus et les fruits sont donnés comme agents anti-ulcérogènes ou antidiarrhéiques (Inglese, 2019).

L'espèce *Opuntia ficus indica* est connue pour sa haute teneur en polyphénols présentant des propriétés anti-oxydantes et anti-inflammatoires (Butera et al., 2002; Kuti & Galloway, 1994).

Le figuier de barbarie est une plante à multiples usages, et une large gamme de produits peuvent en dériver, elle contient un grand nombre de molécules qui ont des intérêts multiples mis à

profit dans l'industrie, en alimentation, en cosmétologie et en dermopharmacie, parmi ces composés on retrouve, les coumarines, les alcaloïdes, les acides phénoliques, les tannins, les lignanes, les terpènes et les flavonoïdes (Bahorun, 1998).

6.1. Importance économique

6.1.1. Alimentation humaine

Il existe près de 200 espèces d'*Opuntia*, mais seuls les fruits d'une vingtaine d'espèces sont exploités. Les fruits sont connus par leurs teneurs élevées en sucre, en minéraux et en vitamines. Ils sont produits et vendus en été et en automne selon la précocité de la variété. Au Mexique, par exemple, ces fruits comestibles appelés « tuna », sont commercialisés à l'état frais ou transformé: séchés, congelés, sous forme de confit, de jus et d'alcool (Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 2012).

Les fruits du cactus sont généralement consommés frais, très rafraîchissants et nutritifs. Ils se caractérisent par rapport aux autres fruits par un pH relativement élevé ($\text{pH} \approx 5,6$). La totalité des sucres présents dans le fruit est constituée de glucose et de fructose dans un rapport de 18:1. Ce rapport est considéré comme une spécificité de la figue de barbarie si on le compare à celui des autres fruits (rapport de 1 :1 dans les oranges par exemple). La teneur totale en acides aminés libres (257 mg/100g) est largement supérieure à la teneur moyenne des autres fruits à l'exception des raisins de table et des agrumes qui contiennent une teneur identique (Askar & El Samahy, 1981; Stintzing et al., 2001).

Par contre, les raquettes sont peu utilisées dans la consommation humaine excepté les jeunes raquettes tendres (Nopalitos) qui sont consommés comme légumes depuis des siècles au Mexique et aux Etats Unis. Elles sont riches, en eau, en fibres alimentaires, en vitamines C et en calcium et leur valeur nutritive est proche de celle de la laitue et des épinards (Saénz et al., 2009; Arba et al., 2000; Barrios, 1990; Sáenz & Berger, 2006).

6.1.2. Alimentation animale

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, l'utilisation du figuier de barbarie comme plante fourragère n'est pas récente. Les premiers documents à ce propos, indiquent les Etats-Unis comme zone d'utilisation maximum et datent d'avant la Guerre Civile (1861-1865) (Griffiths, 1905). Le cactus présente l'avantage d'être une source d'eau abondante pour les animaux, en particulier pendant la saison sèche ; il est tolérant aux sols pauvres et produit un rendement élevé en biomasse avec une palatabilité acceptable (Russell & Felker, 1987). Il faut néanmoins

préciser que la ration alimentaire composée uniquement de raquettes d'Opuntia est déséquilibrée, faiblement nutritive, surtout pour ce qui concerne les protéines, même si elles sont riches en hydrates de carbone digestibles, en lipides et en vitamines (Santana, 1992). C'est la raison pour laquelle les tiges coupées en morceaux sont intégrées à d'autres aliments : le foin et le concentré ou le pâturage naturel (Monjauze & le Houerou, 1966).

6.1.3. Production de colorants et élevage de la cochenille

Le cactus est utilisé pour la production de deux colorants essentiellement :

- **Carmin ou rouge cochenille** : C'est un colorant naturel (E-120) de couleur rouge carmin (acide carminique). Actuellement il est de nouveau très recherché par les industries alimentaires et cosmétiques pour ses caractères biochimiques. Il est produit par l'élevage des cochenilles *Dactylopius coccuset* - *Dactylopius opuntiae* qui sont des insectes hôtes du cactus. Les cochenilles sont collectées sur le cactus et sont séchées à l'air libre pour obtenir un produit brut qui est appelé Grana à partir duquel on peut extraire 10 à 26% de carmin. Il a été très demandé sur le marché international au début du 19ème siècle, moment où l'élevage de la cochenille à carmin était pratiqué au Sud du Maroc par la colonisation espagnole. Il a disparu par la suite à cause des colorants synthétiques et il est actuellement de nouveau recherché sur le marché international à cause de ses qualités naturelles et biochimiques (Arba, 2009; Barrios, 1993).

- **Bétalaine** : le fruit de cactus de couleur rouge ou pourpre contient de la bétalaine, qui peut être utilisée principalement comme colorant d'aliments qui ne requièrent pas de traitement thermique tels que les glaces alimentaires, les yaourts, les friandises, les desserts, les sirops et les sauces. Ces colorants naturels n'ont pas un E-numéro ; ce qui permet au produit alimentaire coloré par ces substances naturelles de garder un label Bio. Ces colorants fournissent des substances supplémentaires nécessaires à l'augmentation de la valeur nutritionnelle du produit concerné. La bétalaine du jus de fruit de cactus peut préserver sa couleur à un pH situé entre 3 et 7, là où la majorité des anthocyanes communément utilisées perdent leur performance et se dégradent (Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 2012).

6.1.4. Production du biogaz et d'éthanol

Les sources d'énergie renouvelables peuvent contribuer à résoudre les problèmes énergétiques actuels et futurs. Parmi les sources d'énergie alternatives, la production de biogaz à partir de cultures énergétiques vertes et de déchets organiques. Certains pays, comme le Chili, cultivent le figuier de barbarie afin d'obtenir assez de biomasse pour produire de l'électricité d'une manière durable. Une source d'énergie renouvelable qui pourrait s'avérer une alternative en absence des ~~moins coûteuse que~~ les énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz) et beaucoup moins dangereuse pour le l'environnement (Inglese, 2019).

Tohá, (1999) indique que 3 kg de cladodes **séchés** produisent 1 m³ de biogaz, ce qui équivaut à la génération de 10 kWh. De plus, Baeza, (1995) indique que la valeur calorifique du biogaz de cactus est de 7 058 kcal.m⁻³ (elle varie entre 6 800 et 7 200 kcal.m⁻³) et le potentiel de biogaz d'*Opuntia* est équivalent à 0,360 m³/kg MS.

Gebrekidan et al., (2014) ont montré également que les pelures du fruit de figuier de barbarie associées au fumier de vache peuvent être utilisées efficacement dans la production du biogaz.

Les cladodes de cactus ont d'autres utilisations en bioénergie, telles que la production de biodiesel ou d'éthanol. La technologie pour la production d'éthanol est plus complexe que celle pour la production de biogaz ; elle s'adapte donc mieux à une plus grande échelle, étant donné le coût élevé de l'investissement, et elle permet des concentrations de plus de 98% d'éthanol. Pour la fermentation, des levures spécifiques sont nécessaires pour maximiser la production d'alcool. La concentration d'éthanol pendant la fermentation est de 8-12% (García de Cortázar et al., 1995), pour atteindre la concentration d'éthanol requise pour le carburant, il faut distiller.

Les fruits et les cladodes d'*Opuntia ficus-indica* sont utilisés pour la production de bioéthanol en utilisant différentes souches du genre *Saccharomyces* (Retamal et al., 1987a).

6.1.5. Industries ago-alimentaires

Avant de procéder à la transformation industrielle, il est primordial de comprendre la composition chimique et phytochimique ainsi que les propriétés technologiques et fonctionnelles du produit en question. Les fruits de cactus ont une courte durée de conservation (3 à 4 semaines), limitant ainsi le stockage à long terme et la distribution mondiale. Typiquement, le cactus se caractérise par une valeur élevée de pH (de 5,3 à 7,1) et une valeur très faible en acidité (de 0,05 à 0,18% d'équivalents d'acide citrique) ce qui compromet le stockage prolongé des fruits (Sepulveda & Saenz, 1990). Cependant, ce pH neutre expose

davantage le fruit à des altérations microbiologiques. Pour cette raison, quand les aliments -non acides- sont pasteurisés ou mis en conserve, à moins que le pH soit réduit (par addition d'acide citrique, par exemple), une température plus élevée est nécessaire pour réduire la quantité de microbes à des niveaux sûrs en comparaison avec le traitement d'aliments acides ($\text{pH} \leq 4,5$) tels que les oranges et les abricots. Les températures de traitements élevées (généralement $> 121^\circ\text{C}$) peuvent affectées négativement la qualité organoleptique de ces produits (Sáenz & Sepúlveda, 1999). Pour la fabrication des jus de figuier de barbarie, l'acidité est un problème potentiel : l'addition d'acides organiques, pour augmenter l'acidité, facilite les processus de chauffage mais peut modifier le goût, alors que les consommateurs préfèrent généralement les jus de figue de Barbarie avec l'acidité originale du fruit, similaire à celle du fruit frais (Sáenz & Sepúlveda, 1999).

Les expériences de congélation menées sur les figuiers de barbarie n'ont pas encore donné de bons résultats (Sáenz & Berger, 2006). Plusieurs études indiquent que les technologies de congélation pourraient donner de meilleurs résultats avec de la pulpe de figue de Barbarie à la place du fruit entier, coupé en deux ou en tranches. La décongélation - quel que soit le type de découpe (entière, moities ou tranches)- présente quelques problèmes, avec l'écoulement de l'excès de mucilage après la décongélation, donnant une apparence déplaisante. Cela se produit même quand les technologies de Surgélation Individuelle Rapide sont adoptées.

La figure 8 résume l'ensemble des transformations industrielles du figuier de barbarie : jus, confitures, confiseries, conserves en saumures, boissons et compléments alimentaires pour les cladodes. Jus, confitures, vinaigres, boissons, produits congelés et produits déshydratés pour le fruit. Huile et farine essentiellement pour la graine.

Prieto et al., (2007) ont mené une étude pour obtenir du vinaigre de type balsamique à partir des écotypes de couleur orange, violette et verte du jus de poire de cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). Après concentration et fermentation avec de la levure de vin (*Saccharomyces cerevisiae*), le «moût» résultant a été acétiifié avec des bactéries acétiques par une méthode statique et oxydante. Selon les paramètres analysés, les vinaigres provenant de la poire de cactus orange et violette étaient les plus acceptés.

Le vin est l'un des produits traditionnellement fabriqué au Mexique à partir de figuier de barbarie. Ce vin est ainsi appelé "Colonche", une boisson alcoolique douce bien apprécié pour sa saveur, obtenue par fermentation naturelle du jus de fruit de figuier de barbarie (Bolaños et al., 2013).

Cladodes	Fruits	Graines
<ul style="list-style-type: none"> • Jus • Confitures et gelés • Confiseries • Conserves en saumures • Boissons alcoolisées • Complément alimentaire fibres et farine 	<ul style="list-style-type: none"> • Jus et nectare • Confitures • Vinaigre • Boissons alcoolisées • Produits congelés • Produits déshydratés • Colorants • Confiserie 	<ul style="list-style-type: none"> • Huile • Farine

Figure 8: Schéma technologique de la transformation agroalimentaire de la figue de barbarie (Barrios, 1994; Saenz, 2000; Stintzing & Carle, 2005; Arba, 2009; Sáenz et al., 2013)

6.1.6. Extraction des pectines

Les pectines sont les principaux composants des polysaccharidiques présents à la fois dans les raquettes et les fruits d'*Opuntia ficus-indica* (Meyer & McLaughlin, 1981; Habibi, 2004). Dans ce contexte Habibi, (2004) a développé un procédé d'extractions des polysaccharides pectiques des pelures de fruits d'*Opuntia ficus-indica*. Les pectines sont extraites à chaud séquentiellement avec : l'eau, un agent chélatant du Ca_2^+ et de l'acide chlorhydrique. Dans un premier temps, la pelure du fruit d'*Opuntia ficus indica* est soumise à une extraction par l'eau à 60°C pendant deux cycles de 2 heures. Le résidu végétal insoluble est séparé du milieu (filtration et/ou centrifugation), puis l'extrait soluble obtenu est précipité par de l'éthanol et dialysé contre de l'eau distillée avant d'être lyophilisé pour donner une fraction de polysaccharide. Dans un second temps, le résidu végétal insoluble est traité par une solution d'EDTA 0,7% à 60°C pendant deux cycles de 2 heures. Chaque extraction est suivie d'une filtration et d'un lavage à chaude du résidu végétal insoluble. Les filtrats obtenus sont précipités par de l'éthanol et dialysés contre de l'eau distillée avant d'être lyophilisés pour donner une fraction de polysaccharide. Finalement, le résidu est traité par une solution d'HCl (0,05M), pendant deux cycles d'une heure à 80°C. Le résidu final insoluble est séparé du milieu (filtration

et/ou centrifugation), puis l'extrait soluble est précipité par de l'éthanol et dialysé contre de l'eau distillée avant d'être lyophilisé pour donner une fraction de polysaccharide.

6.2. Importance thérapeutique

Les cactus étaient utilisés pendant des milliers d'années par les civilisations anciennes pour soigner les maladies et guérir les plaies (Inglese, 2019). En médecine populaire, elles sont utilisées pour le traitement de la gastrite, de la fatigue, de la dyspnée et des maladies du foie suite à l'abus d'alcool (Stintzing & Carle, 2005).

Le cactus est connu aussi par ces propriétés anti-oxydantes dues à sa teneur en polyphénols, flavonoïdes, pigments (bétalains), la taurine et l'acide ascorbique (Martínez et al., 2011) qui réduisent le risque de cancer, de maladies cardiovasculaires et de maladies neuro dégénératives comme l'Alzheimer (Feugang et al., 2006).

En revanche, pour l'alimentation humaine, le cactus constitue une source de fibres, puisqu'elle apporte 4,30 g de fibres pour 100 g de fruit. Les fibres améliorent le transit intestinal et préviennent contre le cancer colorectal et les maladies cardiovasculaires (Hameed et al., 2014). Sa consommation à l'état frais apporte des quantités non négligeables en nutriments de base et en minéraux.

Au Maroc, les fruits sont connus qu'ils arrêtent les coliques et les diarrhées et provoquent une constipation opiniâtre chez les personnes qui en consomment beaucoup (Sijelmassi, 1996). En Australie et en Afrique du Sud, l'effet hypoglycémique des «nopalitos» est utilisé dans le traitement des diabètes non dépendants de l'insuline. Le mucilage isolé des raquettes permet de réduire le cholestérol total dans le sang (Barrios, 1993). En Sicile, le thé préparé par les fleurs d'*Opuntia ficus-indica* est utilisé comme traitement contre les maux des reins (Meyer & McLaughlin, 1981). Le mucilage isolé des raquettes permet de réduire aussi le cholestérol total dans le sang (Fernandez et al., 1990).

La figure 9 résume l'ensemble des propriétés médicinales et thérapeutiques reconnues du cactus.

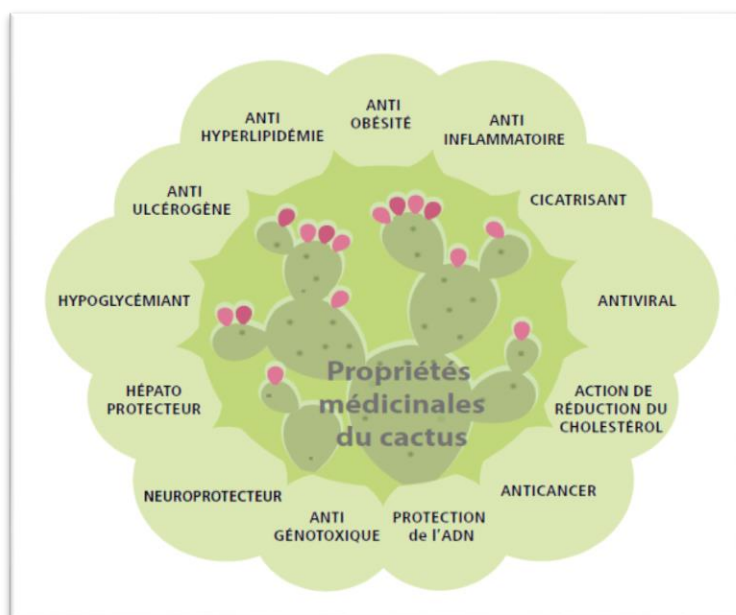


Figure 9: Propriétés médicinales et thérapeutiques du cactus (Inglese, 2019)

6.3. Importance écologique

6.3.1. Préservation des sols

Le contrôle de l'érosion est l'un des usages importants des figuiers de barbarie puisqu'ils poussent rapidement et ont de petites racines qui repoussent chaque année pendant la période des pluies à partir de la racine principale (Inglese, 2019).

Pendant les périodes sèches, les petites racines meurent, ajoutant ainsi de la matière organique au sol. Avec une teneur en matière organique augmentée, le sol absorbe plus facilement l'eau de pluie. Les *Opuntia* sont utilisés dans des programmes pour éviter l'érosion des sols et combattre la désertification. Ils sont très adaptables, poussent dans des sols sévèrement dégradés qui sont inadéquats pour d'autres cultures, peuvent survivre et se répandre dans des conditions de précipitations rares et irrégulières et de températures élevées et sont idéals pour répondre à l'augmentation du niveau de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique (Jacobo & Pérez-González, 2001; Inglese, 2019).

Cette plante constitue des haies vives qui permettent la fixation des terrains ravinés par les pluies et stabilisent les terres sablonneuses et sont infranchissables aux animaux sauvages. Elles nécessitent peu d'entretien tout en offrant la richesse de leurs fruits et de leurs raquettes. Néanmoins, il faut tenir compte du caractère invasif de cette plante (Habibi, 2004).

6.3.2. Traitements : Adsorption, coagulation et floculation

Sakr et al., (2015) ont étudié l'utilisation d'un adsorbant naturel biodégradable à base du cactus marocain (Sud du Maroc) dans un procédé physico-chimique d'adsorption, pour traiter des rejets colorés d'origine industrielle. Les essais ont été réalisés sur le Bleu de Méthylène (BM) qui est un colorant cationique, ils ont montrés une élimination remarquable dès les 10 premières minutes.

Abid et al., (2008) ont rapporté aussi que le traitement des rejets liquides chargés de cuivre, de zinc et de matière en suspension par un floculant biodégradable extrait de jus de figuier de barbarie semble donner des résultats satisfaisants. Le bio floculant a permis de réduire la turbidité de la solution en question en passant de 100 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) à moins de 2 NTU. Ils ont aussi testé l'efficacité de ce jus vis-à-vis des autres produits couramment utilisés dans le traitement des eaux usées.

Tableau 13: Les utilisations du figuier de barbarie (Inglese et al., 1995).

Aires commerciales	Usages spécifiques
Production alimentaire	Fruit, Napolitos, jus de fruit, extraction des huiles des graines
Production d'énergie	Alcool, biomasse fraîche
Aliment de bétail	Fourrage, déchets de fruits
Usage médical	Fleurs pour diurétiques, cladodes pour diabète, mucilages
Usage agronomique	Fixation du sol, clôture, brise-vent
Colorants	Bétalaines, acide carminique.

Conclusion

A travers cette revue bibliographique, il ressort que le cactus est une culture vivrière est fourragère adaptée aux environnements arides et semi-arides. Son utilisation répandue est attribuée essentiellement à sa résistance à la sécheresse, son acceptabilité culturelle, son efficacité dans l'alimentation animale et humaine et son accessibilité économique. Les fruits et les cladodes de cactus sont importants dans l'alimentation humaine et animale en raison de leur valeur nutritionnelle et de leur forte teneur en éléments nutritifs. La valeur nutritionnelle des fruits est proche à celle des autres fruits (pomme, poire, orange, abricot). Les jeunes cladodes sont riches en fibres et en minéraux, principalement en calcium, ce qui est important pour la consommation humaine. En plus de leur valeur nutritionnelle, les fruits et les cladodes de la poire de cactus ont également des propriétés médicinales, qui aident à prévenir ou à traiter différentes maladies.

Chapitre 2 : Données bibliographiques sur l'ensilage

Introduction

L'ensilage est l'un des principaux composants du régime alimentaire des animaux et constitue une source importante de nutriments, notamment d'énergie et de fibres digestibles (Queiroz et al., 2018). C'est une méthode de conservation d'une culture, d'un fourrage ou d'un sous-produit agricole ayant généralement plus de 50 % d'humidité, par laquelle les bactéries lactiques fermentent les sucres solubles en acides organiques, l'acide lactique principalement, dans des conditions anaérobies (Weinberg, 2008; Bolsen et al., 1996). En conséquence, le pH diminue, ce qui inhibe les anaérobies nuisibles, et le fourrage humide est ainsi préservé (McDonald et al., 1991). Par contre l'ensilage est un processus très complexe qui implique l'interaction de nombreux processus chimiques et microbiens différents (Hu et al., 2009).

Les principaux critères faisant d'une culture apte à ensiler sont : i) la teneur en matière sèche ; ii) la teneur en sucre ; et iii) le pouvoir tampon (résistance à l'acidification). A ces égards, le maïs est considéré comme la culture "presque parfaite", alors que la luzerne est la plus difficile à ensiler (Bolsen et al., 1996). Dans ce contexte, beaucoup d'études rapportent que le cactus répond parfaitement à ces critères et qu'il est facilement ensilable (Vasta et al., 2008; Abidi et al., 2009; Atti et al., 2006).

Dans notre étude nous avons choisi d'utiliser l'ensilage comme méthode de valorisation et de conservation des sous-produits du figuier de barbarie, c'est pourquoi il est important d'avoir une bonne compréhension des événements qui se produisent pendant la conservation de l'ensilage. Chaque phase a des caractéristiques distinctes qui doivent être contrôlées afin de maintenir la qualité de l'ensilage.

Ce chapitre décrit brièvement les aspects biochimiques, microbiologiques et technologiques de l'ensilage.

1. Définition et historique

1.1. Définition

Le mot "ensilage" vient du grec "siros" qui signifie une fosse ou un trou creusé dans le sol pour stocker le maïs (McDonald et al., 1991). L'ensilage est défini comme un produit acide, fermenté et stocké provenant d'une culture agricole (McDonald et al., 1991).

L'ensilage est le processus anaérobie de conservation des cultures humides par fermentation lactique. Dans les conditions optimales d'ensilage, les bactéries lactiques épiphytes fermentent principalement les hydrates de carbone solubles et produisent l'acide lactique qui acidifie la

culture et minimise l'activité des micro-organismes aérobies pour préserver les nutriments des fourrages (McDonald et al., 1991). L'objectif principal de l'ensilage est de préserver le fourrage avec une perte minimale de nutriments (Hurst, 1971).

Woolford (1984) a défini l'ensilage comme " le produit formé lorsque l'herbe ou toute autre matière d'une teneur en humidité suffisamment élevée, susceptible d'être altérée par des micro-organismes aérobies, est stocké en anaérobiose".

L'ensilage désigne tout à la fois (Paragon et al., 2004) :

- La technique de conservation des aliments par acidification anaérobie contrôlée ;
- Le produit fini, stabilisé grâce à un pH acide et variablement conditionné (silo tour, silo couloir, silo boudin ou balles enrubannées).

La réussite d'un ensilage repose sur deux éléments essentiels (Amyot, 2003):

- L'élimination rapide de l'oxygène responsable de la croissance des moisissures et des bactéries aérobies ;
- L'abaissement rapide du pH jusqu'à un niveau suffisamment bas (pH de stabilité anaérobie) pour empêcher le développement des bactéries butyriques. Dans ce cadre, l'Afssa (2004) recommande un pH final inférieur à 4,4 pour considérer que l'ensilage est de bonne qualité, Miranda-Romero et al., (2018) recommandent des valeurs entre 3,8 et 5, Cürek & Özen, (2004) quant à eux recommandent des valeurs inférieures à 4,8, alors que McDonald et al., (1991), Pettersson, (1988) et Yang et al., (2004) considèrent que les valeurs inférieures à 4,5 sont bonnes. Lorsque ce pH est atteint, l'activité microbienne est faible et l'ensilage est stable si le silo est étanche à l'air.

Les objectifs du stockage de l'ensilage sont de fournir un environnement permettant au fourrage frais de fermenter, d'assurer une bonne conservation jusqu'à un an avec une perte minimale de la valeur alimentaire, et de contribuer à un système d'alimentation efficace et sûr à la ferme (Wilkinson et al., 2003).

1.2. Historique

La fabrication de l'ensilage remonte à plus de 3000 ans (Schukking 1976; Woolford, 1984). Les anciens Égyptiens et Grecs stockaient les céréales et les fourrages entiers dans des silos. Des articles sur l'histoire de l'ensilage font référence à la fresque du musée de Naples, qui montre des céréales entières récoltées et chargées dans un petit silo en pierre (Wilkinson et al., 2003).

Kirstein, (1963) mentionne que des silos ont été trouvés dans les ruines de Carthage, indiquant que le fourrage y était ensilé vers 1200 Be. Schukking, (1976) note que les Teutons du premier siècle stockaient le fourrage vert dans des fosses creusées dans le sol, puis recouvraient les fosses d'un couvercle. Brassley, (1996) dans un examen historique détaillé de la fabrication de l'ensilage en Grande-Bretagne, a souligné le lien entre l'ensilage des cultures agricoles et la fabrication de la choucroute, une technique qui était pratiquée en Allemagne depuis des siècles avant le XIXe siècle. Le développement de l'ensilage s'est déplacé de l'Allemagne vers la France au cours de la seconde moitié du XIXe siècle, suite à la publication en France de lettres adressées à un journal allemand par un agriculteur de Stuttgart, Herr Reichlen, qui avait expérimenté l'ensilage de feuilles et de fanes de betteraves sucrières et de cultures entières dans des silos à tranchées longues et étroites (Wilkinson et al., 2003).

En 1883, le gouvernement britannique a lancé la première étude officielle sur l'ensilage. Les résultats de l'enquête, qui concernait 36 fermes, ont été publiés en 1884 (Jenkins, 1884). Les conclusions de l'enquête étaient que le maïs était la meilleure culture pour l'ensilage, que la valeur alimentaire de l'ensilage était similaire à celle du foin, mais que l'ensilage ne remplaçait pas complètement le foin. Le chimiste de la Société a fait un rapport sur l'analyse d'échantillons d'ensilage fabriqués dans les fermes participant à l'enquête (Voelcker, 1884). Il a conclu que le processus d'ensilage était un processus bactérien et a fait la distinction entre l'ensilage "doux", qui n'avait pas d'odeur forte, et l'ensilage "aigre" à forte odeur et qui contenait vraisemblablement de l'acide acétique et/ou de l'acide butyrique.

Au Royaume-Uni, l'enthousiasme pour l'ensilage s'est traduit par l'encouragement de l'adoption de la technologie de la part du gouvernement, des sociétés agricoles et des grands propriétaires terriens. Malheureusement, l'adoption de la fabrication d'ensilage au Royaume-Uni et ailleurs en Europe a subi un sérieux revers avec la publication du livre "Sweet Ensilage" (Fry, 1885). Bien que Fry, (1885) a reconnu l'importance d'avoir un silo étanche, il préconise aussi que toutes les cultures doivent atteindre une température d'au moins 50°C avant que le silo ne soit fermé. La recommandation de Fry, (1885) de retarder le scellement des silos jusqu'à ce que la récolte atteigne une température de 50°C ou plus a persisté dans certaines régions d'Europe jusqu'au début des années 1960. Moore, (1950) affirme qu'une température trop basse peut être un défaut pire qu'une température trop élevée, et qu'à des températures élevées (>50°C), "aucune fermentation indésirable n'est susceptible de se produire".

Lorsque des connaissances plus approfondies sur la biochimie et la microbiologie de l'ensilage ont été acquises, cette mauvaise pratique a été dépassée. Dans les années 1920, Virtanen de Finlande a développé l'acidification directe de l'ensilage d'herbe humide en utilisant un mélange d'acides chlorhydriques et sulfuriques (Weinberg, 2008). Ce procédé a permis de réduire les pertes de fermentation et la protéolyse dans ces ensilages (Weinberg, 2008).

Au 20^{ème} siècle, des silos tours et horizontaux ont été développés, ainsi que des feuilles de plastique pour l'étanchéité. La tendance récente est d'utiliser de grandes balles et des manchons en plastique pour stocker l'ensilage qui permettent une flexibilité dans le stockage et l'utilisation. Les machines qui comprennent les moissonneuses, les hachoirs et les déchargeurs d'ensilage ont été également développées (Weinberg, 2008). De nombreux additifs pour l'ensilage ont été introduits, tant chimiques que biologiques (inoculants bactériens et enzymes), qui améliorent la fermentation et la conservation de l'ensilage et, dans certains cas, améliorent également les performances des animaux (Weinberg, 2008).

La production d'ensilage en 2003 en Europe et en Amérique du Nord est estimée à 200 millions de tonnes de matière sèche, contre 300 millions de tonnes de foin. Les superficies estimées des cultures récoltées pour l'ensilage totalisent 43 millions d'hectares (Wilkinson et al., 2003).

2. Phases de l'ensilage

Pitt & Sniffen, (1985) ont subdivisé le processus d'ensilage en quatre phases principales de durée et d'intensité différentes, qui ne peuvent être séparées précisément les unes des autres (figure 10).

2.1. Phase 1: Phase initiale aérobie

Aux températures de récolte d'environ 20°C, cette phase est limitée à quelques heures et caractérisée par l'effet de l'oxygène atmosphérique qui diminue régulièrement (McDonald et al., 1991). La quantité d'oxygène piégée dans la matrice du fourrage entretient la respiration des plantes et des micro-organismes et s'accompagne d'une production de chaleur. D'autres enzymes végétales restent actives (McDonald et al., 1991). Les protéases initient la décomposition des protéines en acides aminés, et les hydrates de carbone augmentent la quantité d'hydrates de carbone solubles disponibles pour la fermentation. Outre ces activités associées aux plantes, tous les organismes aérobies obligatoires et facultatifs tels que les moisissures, les levures et certaines bactéries sont encore actifs (McDonald et al., 1991). Cependant, dans une

récolte d'ensilage finement hachée et bien compactée, et à condition que le silo soit scellé sans délai, cette phase aérobie peut être minimisée (McDonald et al., 1991).

2.2. Phase 2 : Phase de fermentation principale

Cette phase se poursuit pendant environ une semaine mais peut durer plus d'un mois, selon les propriétés de la culture et les conditions d'ensilage (Merry et al., 1997). Par définition, elle commence dès que la dernière trace d'oxygène a été épuisée (Merry et al., 1997). Au cours de ces premiers stades de la fermentation, les micro-organismes anaérobies facultatifs et obligatoires, tels que les entérobactéries, les clostridies, certains bacilles et les levures, peuvent théoriquement entrer en compétition avec la flore de bactéries lactiques pour les nutriments, qui sont de plus en plus libérés par les cellules et les tissus végétaux qui se dégradent (Merry et al., 1997). Les signes extérieurs de la fermentation sont la production de gaz de silo, d'effluents et le rétrécissement de la masse d'ensilage, particulièrement observé dans les fourrages à forte humidité (Merry et al., 1997). Les changements microbiens durant cette phase sont principalement la disparition des entérobactéries et le développement d'une population dominante de bactéries lactiques dans les ensilages fermentés avec succès (Merry et al., 1997). La vitesse de ce changement est étroitement corrélée à la vitesse de la baisse du pH et de la production d'acide lactique (Merry et al., 1997).

2.3. Phase 3 : Phase de stabilité

Avec la diminution de l'intensité du processus de fermentation, l'ensilage passe à la troisième phase. Seules les enzymes tolérantes aux acides continuent d'être actives, provoquant une lente hydrolyse acide des glucides de structure et de stockage (McDonald et al., 1991). Cela fournit un apport important et continu de glucides hydrosolubles, qui compense leur réduction inévitable pendant les périodes de stockage prolongées. De plus, les protéases peuvent mener à la conversion finale des composés complexes de l'azote en ammoniac (Pahlow et al., 2003). La population de bactéries lactiques subit généralement une réduction par rapport à leur nombre maximal d'environ 10^{10} CFU/g MF en raison de l'inhibition due au faible pH et aux produits de fermentation qu'ils produisent. Plusieurs espèces de levures très tolérantes à l'acide survivent à cette période dans un état presque inactif, ainsi que les bacilles et les clostridies, qui entrent en dormance sous forme d'endospores (Pahlow et al., 2003). Dans les ensilages contenant suffisamment de substrats fermentescibles, cette phase stable peut théoriquement être de n'importe quelle durée ; cependant, en pratique, elle ne durera généralement pas plus longtemps que la saison de récolte suivante (Pahlow et al., 2003).

2.4. Phase 4 : Période d'alimentation

Pendant la période d'alimentation, l'oxygène a libre accès à la face du silo et à l'ensilage situé à environ 1 m derrière la face (Honig, 1991), en quantité suffisante pour initier la croissance de microorganismes indésirables. Il s'agit notamment des levures et des spores ou conidies de certaines moisissures, qui sont le plus souvent responsables de l'apparition de l'instabilité aérobie, ainsi que des bactéries acétiques, ces dernières étant principalement présentes dans les ensilages de maïs et de céréales (Honig & Woolford, 1980). Ces micro-organismes commencent à se multiplier en présence d'air et contribuent à l'échauffement et à des modifications chimiques majeures de l'ensilage, indiquées par une réduction de l'acide lactique, une augmentation correspondante du pH et une diminution de la valeur nutritionnelle (Honig & Woolford, 1980). Dans la zone affectée de l'ensilage, ces pertes peuvent être du même ordre de grandeur (30-50 g de MS/kg) en 1 jour que celles qui se produiraient dans un silo hermétiquement fermé pendant plusieurs mois de stockage (Honig & Woolford, 1980).

Si ces phases sont considérées comme le cas normal, deux conditions peuvent compromettre de manière significative le succès du processus de conservation (Pahlow et al., 2003):

1. Un manque de glucides fermentescibles ou leur utilisation inefficace qui empêche une acidification suffisamment rapide ;
2. Une période de remplissage prolongée ou une fermeture tardive du silo entraîne généralement une forte population de levures. Si des substrats suffisants, tels que l'acide lactique et les sucres résiduels, sont encore disponibles, un nouvel accès à l'air (par exemple, lors de l'ouverture du silo) provoque généralement une multiplication immédiate de la microflore d'altération et des pertes aérobies correspondantes, comme mentionné ci-dessus au cours de la phase 4.

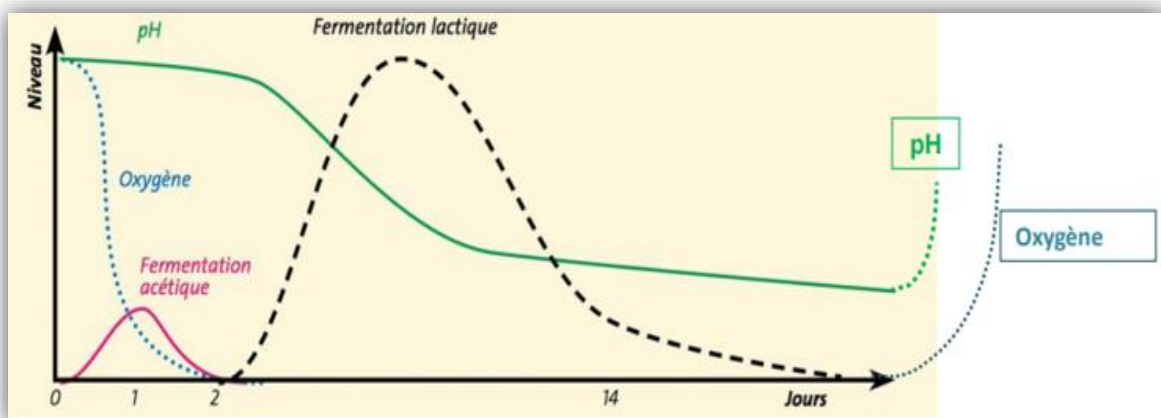


Figure 10: Les différentes étapes d'évolution d'un ensilage (Pitt & Sniffen, 1985)

3. Additifs d'ensilage

Depuis des décennies, les producteurs disposent d'une grande variété d'additifs d'ensilage pour faciliter la conservation du fourrage. Les additifs d'ensilage sont généralement classés en quatre catégories : les stimulants de la fermentation, les inhibiteurs de la fermentation, les inhibiteurs de détérioration aérobie, et nutriments et absorbants (McDonald et al., 1991; Kung et al., 2003). McDonald et al. (1991) et Kung et al. (2003) fournissent des analyses approfondies des additifs d'ensilage. Ces études couvrent à la fois les additifs qui sont actuellement utilisés ainsi que ceux dont l'usage a diminué. Les additifs d'ensilage peuvent avoir plus d'un mode d'action selon les quatre catégories citées ci-dessus. En effet, des additifs sont utilisés pour réduire les pertes de matière sèche et pour préserver les nutriments pendant ou après la fermentation (Jaster, 1994). Certaines raisons courantes d'utiliser des additifs pour l'ensilage sont énumérées ci-dessous (Kung et al., 2003):

- Inhiber la croissance des micro-organismes aérobies (en particulier ceux associés à l'instabilité aérobie, par exemple les levures assimilant le lactate, et à une mauvaise hygiène, par exemple *Listeria monocytogenes* ;
- Inhiber la croissance des organismes anaérobies indésirables (par exemple, les entérobactéries et les clostridies) ;
- Inhiber l'activité des protéases et des désaminases végétales et microbiennes ;
- Améliorer l'approvisionnement en substrats fermentescibles pour les bactéries lactiques ;
- Ajouter des micro-organismes bénéfiques pour dominer la fermentation ;
- Fournir ou libérer des nutriments pour stimuler la croissance des micro-organismes bénéfiques ;
- Modifier les conditions d'ensilage pour optimiser la fermentation (par exemple : ajout des absorbants) ;
- Former des produits finis bénéfiques qui stimulent la consommation et la productivité des animaux ;
- Améliorer la récupération des nutriments et de la matière sèche.

3.1. Inoculants bactériens

3.1.1. Bactéries lactiques homo-fermentaires

Les inoculants bactériens les plus anciens et les plus courants pour la fabrication de l'ensilage sont les bactéries lactiques homo-fermentaires. La plupart des bactéries de ce groupe sont reconnues taxonomiquement comme des espèces bactéries lactiques hétéro-fermentaires facultatives plutôt que des espèces homo-fermentaires obligatoires (Pahlow et al., 2003). Les ensilages traités avec une ou plusieurs de ces bactéries ont souvent un pH plus faible, des teneurs faibles en acide acétique, acide butyrique et en ammoniac, mais une teneur plus élevée en acide lactique et présentent une meilleure récupération de la matière sèche en comparaison avec les ensilages non traités (Muck & Kung, 1997). Oliveira et al. (2017) ont rapporté que les effets de ces inoculants dépendent du type de la culture, le pH a été réduit dans les ensilages de graminées, de luzerne et de légumineuses, mais pas dans les ensilages de maïs, de sorgho et de canne à sucre, la teneur en acide acétique a été réduite pour toutes les cultures (sauf la luzerne et les légumineuses), la récupération de la matière sèche était accrue de 2,8 % dans les ensilages d'herbe par rapport aux ensilages de maïs et de sorgho non traités et réduite de 2,4 % dans les ensilages de canne à sucre. Par contre, la réduction de l'acide butyrique et de l'ammoniac et l'augmentation de l'acide lactique n'ont pas été affectées par le type de fourrage.

Les inoculants de bactéries lactiques homo-fermentaires ou hétéro-fermentaires facultatifs peuvent entraîner une réduction de la durée de vie ou de la stabilité aérobie dans certains cas (Muck et al., 2018). Muck & Kung, (1997) ont signalé que les inoculants homo-fermentaires réduisaient la stabilité aérobie dans environ un tiers des études qu'ils ont résumées, cela se produisait davantage dans l'ensilage de maïs que dans l'ensilage de graminées ou de légumineuses. Oliveira et al., (2017) ont rapporté que la stabilité aérobie n'était pas affectée par l'inoculation ni par la culture. En effet, le nombre de levures était plus élevé dans les ensilages inoculés que dans les ensilages non traités. Les levures étant généralement à l'origine de la détérioration aérobie, un taux de levure plus élevé peut expliquer la réduction de la stabilité des ensilages inoculés avec des bactéries lactiques homo-fermentaires (Pahlow et al., 2003).

3.1.2. Bactéries Lactiques hétéro-fermentaires

Ces bactéries appartiennent à la famille des Lactobacillaceae et sont de genre *Lactobacillus*, *Oenococcus*, *Leuconostoc*, et *Weissella* (Hammes & Hertel, 2009). Le genre *Lactobacillus* est divisé en 4 groupes : le groupe *Lactobacillus buchneri*, le groupe *Lactobacillus Plantarum*, le groupe *Lactobacillus reuteri* et le groupe *Lactobacillus casei*. (Hammes & Hertel, 2009). Les

groupes *L. buchneri* et *L. reuteri* contiennent des hétérofermenteurs obligatoires, mais le premier a été la seule source de souches hétérofermentaires obligatoires étudiées comme inoculants potentiels pour l'ensilage. Le groupe *L. buchneri* comprend les espèces *L. buchneri*, *L. diolivorans*, *L. farraginis*, *L. hilgardii*, *L. kefiri*, *L. kisonensis*, *L. otakiensis*, *L. parabuchneri*, *L. parafarraginis*, *L. parakefiri*, *L. rapi*, *L. sunkii* (Hammes & Hertel, 2009; Sun et al., 2014), *L. ferintoschensis* (Hammes & Hertel, 2009), *L. senioris* (Feichtinger et al., 2016), *L. kunkeei*, *L. homohiochii*, *L. fructivorans*, *L. sanfranciscensis*, *L. lindneri*, *L. spicheri*, *L. namurensis*, *L. zymae*, *L. acidifarinae*, *L. hammesii*, et *L. brevis* (Ljungh & Wadstrom, 2009). Cependant, seules quelques espèces du groupe *L. buchneri* ont été évaluées pour leurs effets sur la fermentation de l'ensilage, dont principalement *L. buchneri* et beaucoup plus rarement *L. brevis*, *L. diolivorans*, *L. hilgardii*, *L. kefiri* et, récemment, *L. parafarraginis*. (Muck et al., 2018).

3.1.3. Autres inoculants

Plusieurs nouvelles approches d'inoculation ont été étudiées ces dernières années notamment *Streptococcus bovis*, des espèces de *Bacillus*, et des levures (Muck et al., 2018).

3.1.3.1. *Streptococcus bovis*

Parmi les nouveaux inoculants, *Streptococcus bovis* ressemble le plus aux souches de bactéries lactiques utilisées dans les inoculants (Muck et al., 2018). Il s'agit d'une espèce de bactéries lactiques que l'on trouve dans le rumen, cela en fait une souche de départ intéressante pour diminuer rapidement le pH au cours des premières étapes de l'ensilage (Jones et al., 2003). Comme *S. bovis* n'est pas aussi tolérant à un pH bas que les lactobacilles, sa population devrait diminuer après la fermentation de l'ensilage, réduisant la probabilité qu'il pénètre dans le rumen (Muck et al., 2018). Ferreira et al., (2013) ont comparé des échantillons d'herbe à éléphant traités à deux souches de *Streptococcus bovis*, traités à *Enterococcus faecium* et de l'herbe non traité, après 60 jours d'ensilage, les deux traitements à base de *S. bovis* ont réduit le pH et l'azote ammoniacal, ont produit une fermentation plus homo-fermentaire par rapport aux autres traitements et ont réduit les pertes gazeuses et les pertes d'effluents, ce qui a permis une meilleure récupération de la matière sèche par rapport aux échantillons non traités ou traités à *E. faecium*. Ainsi, les deux souches se sont révélées prometteuses en tant que souches inoculantes potentielles pour les graminées tropicales.

3.1.3.2. Levures

Les essais récents d'utilisation de la levure comme inoculant d'ensilage sont les plus inhabituels. Les levures, en particulier celles qui assimilent le lactate, sont les principaux initiateurs de l'altération aérobie (Pahlow et al., 2003). Cependant, certaines espèces de levures peuvent être bénéfiques comme inhibiteur des microorganismes nuisibles à l'ensilage (Muck et al., 2018). La souche J121, isolée à partir de blé à haute teneur en humidité, a montré une forte activité antifongique ainsi qu'une activité contre certaines bactéries gram-négatives (Schnürer & Jonsson, 2011). Elle se développe dans des conditions anaérobies si elle est alimentée en ergostérol (Schnürer & Jonsson, 2011). Elle a été testée principalement sur du blé à forte teneur en eau, à l'échelle laboratoire et sur le terrain (Olstorpe et al., 2010). Par exemple, dans l'orge à haute teneur en eau ensilé dans des silos à sacs après 5 mois de stockage, l'orge inoculée présentait un nombre de levures plus élevé que l'orge non traitée (plus de 100 fois), des comptes de moisissures plus faibles (4 % du non traité), et des niveaux faibles d'entérobactéries (Olstorpe et al., 2010). Le blé et l'orge inoculés ont été donnés en pâture à des poulets et des bovins de boucherie, respectivement. Aucun effet négatif sur la santé des animaux n'a été constaté (Schnürer & Jonsson, 2011). Même si cette souche de levure semble prometteuse, des problèmes réglementaires et autres ont constitué des obstacles à sa commercialisation (Muck et al., 2018).

En 2014, Savage et al., (2014) ont étudié les effets de deux souches de *Saccharomyces cerevisiae* et d'une espèce de levure non identifiée sur l'ensilage de maïs. Aucune des 3 souches n'a affecté la fermentation ou la stabilité aérobie par rapport au témoin non traité.

Néanmoins, le succès de la souche J121 de *Pichia anomala* suggère que certaines souches de levure peuvent être bénéfiques pour prévenir l'altération et l'inhibition du développement d'autres microorganismes nuisibles dans l'ensilage (Muck et al., 2018).

3.1.3.3. Espèces de Bacillus

Le *Bacillus subtilis* peut être une espèce prometteuse pour améliorer la stabilité aérobie par la production d'une bactériocine qui inhibe les levures et les moisissures (Pahlow et al., 2003). Lara et al., (2016) ont comparé trois traitements sur l'ensilage de maïs (non traité, traité à *B. subtilis* et traité à *B. subtilis* plus *L. plantarum*), après 96 jours d'ensilage, le nombre de levures était le plus bas dans le traitement à *Bacillus Subtilis*, alors que les comptes étaient similaires dans les deux autres traitements, la stabilité aérobie dans les ensilages de *B. subtilis* et les

traitements combinés étaient trois fois plus longs que les ensilages non traités, de plus, les deux traitements ont amélioré la digestibilité apparente in vitro de la matière organique de 50 g/kg.

3.2. Additifs chimiques

Les additifs chimiques utilisés sont les acides et les sels.

3.2.1. Additifs à base d'acide

Les acides sont les acides formique, sorbique, benzoïque, propionique, et acétique (Kung et al., 2003). L'acide formique peut provoquer une acidification directe et une suppression des bactéries indésirables, améliorant ainsi la conservation de l'ensilage (Muck et al., 2018). L'application d'additifs à base d'acide formique en mélange avec du formiate d'ammonium à raison de 3 à 6 L/t sur des ensilages d'herbe coupée ou flétrie provoque une baisse du pH par acidification directe, limite la fermentation des sucres hydrosolubles, réduit la concentration d'acide acétique et la protéolyse (Saarisalo et al., 2006; Conaghan et al., 2012 et Seppälä et al., 2016). En plus de ces effets, Lindqvist et al. (2012) ont mesuré une baisse des teneurs en acide lactique et d'éthanol lorsqu'un additif à base de d'acide formique/propionique était appliqué à raison de 5 L/t à un mélange de trèfle rouge et de graminées (85 :15), de lotier corniculé et de graminées (65 :35), à une teneur de 25/30 % en matière sèche.

L'acide Sorbique, benzoïque, propionique et acétique améliorent la stabilité aérobie de l'ensilage par l'inhibition directe des levures et des moisissures (Auerbach & Nadeau, 2020). L'acide sorbique peut également inhiber certaines bactéries, comme les clostridia (Woolford, 1975). La forme non dissociée des acides est inhibitrice pour les micro-organismes, car cette forme passe à travers les membranes cellulaires et libère les ions H⁺, acidifiant ainsi le cytoplasme (Muck et al., 2018).

L'acide sorbique est un inhibiteur des levures, des moisissures et des bactéries d'altération plus puissant que l'acide benzoïque (Muck et al., 2018). L'activité inhibitrice supérieure de l'acide sorbique est partiellement attribuable à sa constante de dissociation acide (4,75) plus élevée que celle de l'acide benzoïque (4,20), car les acides peuvent avoir des effets antimycosiques différents à un même pH en raison de différences dans l'activité spécifique des molécules (Horst Auerbach, 1996). Shao et al., (2007) ont documenté une meilleure fermentation de l'ivraie (*Lolium perenne*) avec une diminution des concentrations d'acides butyrique, acétique et propionique, d'éthanol et de l'ammoniac dans l'ensilage traité avec 0,1 % d'acide sorbique par rapport à l'ensilage non traité.

3.2.2. Additifs à base de sel

Les sels de formiate de calcium, de formiate de sodium, d'ammonium, le nitrite de sodium et l'hexaméthylène tétramine (hexamine) améliorent la fermentation de l'ensilage en supprimant les bactéries d'altération (Auerbach et al., 2012). Les sels benzoate de sodium, sorbate de potassium, le propionate d'ammonium, le propionate de calcium, propionate de sodium, et acétate de sodium inhibent les levures et les moisissures améliorant ainsi la stabilité aérobie (Auerbach et al., 2012). Pour obtenir un large spectre d'activité contre les bactéries d'altération et les champignons, les additifs commerciaux contiennent souvent des mélanges de ces ingrédients actifs à différentes concentrations.

Les additifs contenant du nitrite dans divers mélanges avec de l'hexamine, du benzoate, du sorbate, propionate ou formiate sont connus pour être efficaces contre l'activité des clostrides (Knický & Spörndly, 2009; Nadeau & Auerbach, 2014 et König et al., 2017). Les résultats de ces études ont montré une diminution du nombre de spores clostridiales et des concentrations d'acide butyrique et d'ammoniac.

Les ensilages traités avec des additifs contenant des nitrites avaient des concentrations d'acide lactique plus élevées (Knický & Spörndly, 2009 ; Auerbach et al., 2016). L'utilisation d'additifs contenant des nitrites dans des mélanges avec de l'hexamine, du formate/sorbate ou du formate/benzoate à raison de 3 L/t a permis de réduire la concentration d'amines biogènes à de faibles niveaux (2,0 à 2,6 g/kg de MS) et a également diminué les pertes de matière sèche (Auerbach et al., 2016).

3.3. Additifs enzymatiques

Divers additifs enzymatiques ont été ajoutés au fourrage lors de l'ensilage dans le but d'améliorer la fermentation et la valeur nutritive. La grande majorité de ces études ont appliqué un mélange de cellulases et d'hémicellulases afin d'augmenter la libération des glucides de la paroi cellulaire végétale, les rendant ainsi disponibles pour la fermentation. Les additifs enzymatiques sont presque toujours appliqués en combinaison avec des inoculants bactériens, ce qui rend difficile de faire la différence entre les réponses à l'ensilage par les bactéries et celles par les enzymes. Dans les études qui permettent de faire la distinction, l'addition d'enzymes fibrolytiques aux inoculants bactériens a eu un effet positif sur la qualité de l'ensilage, et a amélioré l'efficacité de l'alimentation des bovins (Zahiroddini et al., 2004).

Dans d'une autre étude, un mélange d'enzymes non défini a été ajoutés à un mélange complexe d'inoculants contenant *Pediococcus pentosaceus*, *Lactobacillus plantarum* et *Propionibacterium freudenreichii* pour traiter l'orge, l'inoculation a accéléré la baisse du pH mais n'a pas permis d'améliorer la performance de croissance des bœufs (Addah et al., 2016).

Lynch et al., (2015) ont ajouté la cellulase et la xylanase au fourrage de maïs avant de l'ensiler seul et en combinaison avec un inoculant d'ensilage produisant de l'acide férulique estérases (AFE). Les résultats ont montré un pH plus faible et un taux de sucre plus élevé dans les ensilages traités après 70 jours d'ensilage. Cependant, l'ensilage traité à l'enzyme présentait également une diminution de la récupération de la matière sèche et une augmentation du nombre de levures, sans amélioration de la valeur nutritive de l'ensilage. De même, l'ajout de ce mélange fibrolytique avec les AFE à la luzerne au moment de l'ensilage a eu des effets minimes sur l'ensilage et n'a pas amélioré sa valeur nutritive (Lynch et al., 2015).

3.4. Produits sucrés

L'ajout des produits sucrés, en particulier de mélasse, aux cultures fourragères au moment de l'ensilage a été largement pratiqué dans le passé. Sa popularité a ensuite été perdue au profit des acides organiques et inorganiques, en partie à cause des difficultés d'application (Kung et al., 2003). Cependant, il y a un regain d'intérêt pour l'utilisation de la mélasse comme additif sûr pour la conservation de l'ensilage, en particulier dans les zones tropicales où des quantités adéquates de sucres fermentables peuvent être limitées dans certaines cultures d'ensilage (Kung et al., 2003).

La mélasse est un sous-produit de l'industrie de la canne à sucre (*Saccharum officinarum L.*) et de la betterave sucrière (*Beta vulgaris L.*). Elle a une concentration en matière sèche d'environ 790 g/kg et un taux de sucre de 450 à 500 g/kg dont le saccharose est le principal composant (American Feed Industry Association, 1996). Le but de l'utilisation de la mélasse comme additif d'ensilage est de fournir une source relativement bon marché de glucides fermentables pour les bactéries lactiques. Castle & Watson, (1985) ont comparé l'application de la mélasses avec de l'acide formique (2 L/t) et ils ont conclu que le taux d'application de la mélasse, qui donnait une réponse de fermentation similaire à celle de l'acide formique était d'environ 20 L/t. Wilkinson & Stark, (1987) ont indiqué que dans des conditions d'ensilage difficiles au moins 1 % de sucre devrait être ajouté à la récolte, ce qui équivaut à 15 L de mélasse/t. Leibeinsperger & Pitt, (1988) ont utilisé un modèle de simulation d'ensilage informatique pour étudier l'effet de l'addition de la mélasse et de l'acide formique sur le déroulement de la fermentation et la qualité finale

de l'ensilage. Les résultats de cette étude ont montré que l'ensilage de luzerne nécessitait plus de mélasse supplémentaire que l'ensilage de l'ivraie (*Lolium perenne*). Lorsque la teneur en matière sèche et/ou le rapport entre la teneur initiale en sucres et le pouvoir tampon diminuent, le taux d'application de la mélasse doit être augmenté pour assurer une fermentation de type acide lactique. Lättemäe et al., (1996) ont signalé que la digestibilité de l'ensilage de trèfle rouge (*Trifolium pratense L.*) n'a pas augmenté jusqu'à ce que la mélasse soit appliquée à un taux de 100 L/t de poids frais.

Wilkinson, (1981) dans son analyse de 255 ensilages réalisés sans additifs, a révélé que les concentrations en sucres pouvaient à elles seules prédire la probabilité d'obtenir une bonne conservation. Lorsque les concentrations initiales de sucres étaient inférieures à 30 g/kg de poids frais, 31 % des ensilages étaient mal conservés, alors que 92 % des ensilages étaient de bonne qualité lorsque les teneurs en sucres étaient supérieures à 30 g/kg.

Bien que la mélasse ne fasse pas de distinction entre les microorganismes d'ensilage souhaitables et indésirables, les bactéries lactiques bénéficient davantage des sucres supplémentaires que les autres microorganismes car ces bactéries se développent plus rapidement et dominent l'ensilage (Muck et al., 2018). Weise, (1967) a montré que l'ajout de saccharose à l'ensilage d'herbe stimulait non seulement les bactéries lactiques mais aussi les clostridies et les levures. En général, l'ajout de sucre a entraîné une accélération de la croissance des bactéries lactiques, un développement plus rapide des conditions acides et l'élimination précoce des bactéries coliformes. Aucune différence n'a pu être détectée dans les populations de bactéries protéolytiques entre les ensilages traités et non traités (Weise, 1967). Les bactéries lactiques homo-fermentaires peuvent utiliser le saccharose aussi efficacement que ses composants, le glucose et le fructose, tandis que les bactéries hétéro-fermentaires peuvent convertir le fructose en un produit neutre, le mannitol, ce qui réduit le rendement en acide (Kung et al., 2003). Cependant, Anderson & Jackson, (1970) ont observé que l'ajout de mélasse à l'ensilage d'herbe diminuait le rapport fructose/glucose, ce qui entraînait une réduction du mannitol.

Abou-Raya et al., (1973) ont ajouté 30 g/kg de mélasse à un mélange de trèfle et de l'ivraie (*Lolium perenne*) au moment de l'ensilage dans deux expériences, et ont constaté que les ensilages traités à la mélasse présentaient une concentration d'acide lactique significativement plus élevée, un pH, et une concentration d'acide butyrique plus faibles que les ensilages non traités. Singh et al., (1985) ont montré que l'ajout de mélasse à un mélange de légumineuses et

de paille de blé (80:20) à raison de 10 % du poids frais abaissait le pH de l'ensilage, augmentait la production d'acide lactique et diminuait la formation d'acides gras volatils totaux. Des résultats similaires ont été rapportés par Umana et al., (1991) lorsque l'herbe coupé directement et flétri a été traité avec de la mélasse de canne à un taux de 5 %.

Haigh et al., (1996) ont rapporté que dans six études, l'ajout de la mélasse aux ensilages de graminées n'a pas affecté le pH de l'ensilage (4,55 contre 4,53) et la teneur en ammonium (99 contre 97 g/kg de N total), mais a eu tendance à réduire les pertes de matière sèche (112 contre 129 g kg⁻¹ de MS). Keady & Murphy, (1996) a passé en revue les ouvrages publiés sur la mélasse comme additif d'ensilage et a conclu que le traitement à la mélasse améliorait la conservation de l'ensilage, mais n'a pas modifié de façon significative la digestibilité de l'ensilage.

La mélasse s'est avérée être un additif efficace pour l'ensilage en termes de promotion de la fermentation lactique, de réduction du pH de l'ensilage, d'inhibition de la fermentation clostridienne et de la protéolyse, et de diminution générale des pertes de matière organique (McDonald et al., 1991). La mélasse est plus bénéfique lorsqu'elle est appliquée à des cultures fourragères à faible teneur en sucres (Muck et al., 2018).

3.5. Nutriment

Divers additifs d'azote non protéique (NPN), tels que l'ammoniac anhydre, l'urée, les mélanges de mélasse et d'ammoniac, ou de l'urée et des minéraux, ont été ajoutés aux fourrages au moment de l'ensilage pour augmenter la teneur en protéines brutes et pour améliorer la stabilité aérobie ou la durée de vie des cellules (Muck & Kung, 1997).

Les modes d'action de l'urée dans la conservation de l'ensilage sont pratiquement les mêmes que ceux de l'ammoniac. L'urée est constituée de deux groupes amines et d'un groupe carboxyle. Elle contient 460 g de N /kg, ce qui équivaut à 2820 g de protéines brutes par kg. Lorsqu'elle est ajoutée aux cultures fourragères, l'urée sera hydrolysée en ammoniac au cours du processus d'ensilage par des enzymes uréases (Muck et al., 2018).

Lessard et al., (1978) ont révélé que l'activité uréasique dans l'ensilage de maïs était capable d'hydrolyser 6 µmol d'urée /g MS/h, mais l'activité a diminué après 2 jours d'ensilage.

Pahlow, (1979) a attribué la bonne stabilité aérobie de l'ensilage de maïs traité à l'urée à son effet inhibiteur sur les levures. L'ammoniac libéré par l'urée tamponne le fourrage et ralentit ainsi la baisse du pH et par conséquent, prolonge la fermentation de l'ensilage (Ely, 1978).

L'urée peut également augmenter la synthèse microbienne des protéines (Johnson et al., 1982). Lessard et al., (1978) ont montré que l'ensilage de maïs traité à l'urée contenait plus de protéines vraies et d'acides aminés libres que l'ensilage non traité.

L'ajout de l'urée aux cultures fourragères augmente généralement le pH de l'ensilage, la production d'acide lactique et la teneur en NPN (Ely, 1978). Huber et al., (1968) ont appliqué 5 g/kg d'urée à l'ensilage de maïs à trois niveaux de matière sèche (300-440 g MS/kg). Les ensilages traités avaient une teneur en azote plus élevée, des niveaux plus élevés d'acide lactique et de l'ammonium, et des pertes de matière sèche plus élevées que l'ensilage non traité. Lessard et al., (1978) ont constaté que l'ajout d'urée à un taux de 6 g/kg au maïs augmentait le taux de la production d'acide lactique et d'acide acétique pendant le processus d'ensilage. Des résultats similaires ont été observés par Singh et al., (1993) lorsque l'ensilage de sorgho a été traité avec de l'urée à 0,6 %. Le traitement à l'urée a apparemment amélioré la stabilité aérobie de l'ensilage, sans qu'il y ait de signes sérieux de réchauffement ou de moisissure pendant toute la durée de l'engraissement. Singh et al., (1993) ont conclu que l'ajout d'urée n'a pas eu un effet marqué sur la digestibilité des nutriments des ensilages de sorgho. Cependant, Deschard et al., (1988) ont constaté que l'ensilage de blé traité à l'urée avait une digestibilité in vitro de la matière organique plus élevée que l'ensilage non traité (594 contre 678 g/kg).

3.6. Absorbants

Dans de nombreuses régions du monde, des conditions défavorables rendent le flétrissage des cultures fourragères difficile voire impossible. Les cultures à forte humidité sont sujettes à de mauvaises fermentations et à la perte de nutriments due à une production excessive d'effluents. Dans ce cadre l'AFSSA (2004) recommande une valeur de MS entre 30 et 35% pour réduire les effluents et pour une meilleure conservation des ensilages. L'excès d'effluents est également un contaminant potentiel des cours d'eau. Ainsi, diverses sources d'hydrates de carbone ont été mélangées aux fourrages comme absorbants pour augmenter la teneur en matière sèche et réduire la production d'effluents. Différents absorbants ont été testés, notamment paille de céréales (Offer & Al Rwidah, 1989), pulpe de betterave à sucre (Moseley & Ramanathan, 1989), des cubes de luzerne (Fransen & Strubi, 1998) et des céréales (Jones et al., 1990).

Jones & Jones, (1996) ont passé en revue la littérature sur l'utilisation des absorbants pour réduire les effluents de silo et améliorer la fermentation de l'ensilage. Ils ont conclu que l'utilisation de matériaux très fibreux (paille et papier) à cette fin n'avait que peu d'intérêt pratique car ils réduisaient la valeur nutritive de l'ensilage. L'inclusion de grains de céréales n'a

pas toujours été un succès et les difficultés pratiques, telles que le pré-roulage ou le broyage, ont découragé cette pratique. L'inclusion de pulpe de betterave sucrière était une bonne alternative et a eu des effets additifs possibles. Globalement, l'ajout d'absorbants est une pratique difficile en raison de l'augmentation de la main-d'œuvre et de la nécessité de bien répartir le matériau dans la masse d'ensilage (Kung et al., 2003).

4. Micro-organismes du processus d'ensilage

4.1. Bactéries lactiques

Les bactéries lactiques sont la microflore essentielle pour la fermentation spontanée de l'ensilage (Pahlow et al., 2003). En effet, aucun autre groupe ne varie en nombre sur une gamme aussi large, entre la limite de détection 10^1 et 10^5 UFC/g de matière fraîche sur la luzerne (*Medicago sativa L.*), 10^6 sur les graminées pérennes et 10^7 sur le maïs (*Zea mays L.*) et les sorghos (*Sorghum hieolor (L.) Moench*). Les valeurs maximales ne sont généralement trouvées qu'à un certain stade de maturité et généralement vers le milieu de la saison, par exemple sur la deuxième ou la troisième coupe de luzerne et d'herbe et sur les variétés précoces de maïs (Lindgren et al., 1985; Muck, 1989; Bolsen et al., 1988 et Lin, 1992).

La flore de bactéries lactiques est souvent séparée par les deux types fondamentaux de fermentation de l'hexose en acide lactique. Les deux peuvent se produire simultanément pendant l'ensilage. L'un des deux processus est appelé homo-fermentaire, qui donne principalement de l'acide lactique, et l'autre hétéro-fermentaire, où des produits supplémentaires tels que l'éthanol ou l'acétate sont formés (tableau 14). Il est évident qu'en termes de production d'acide et, dans une moindre mesure, de perte d'énergie, la première voie est plus efficace que la seconde. Si les pentoses tels que le xylose ou l'arabinose sont utilisés comme substrats, les produits formés par les deux types de fermentation sont identiques sans production de CO_2 (Woolford, 1984).

Groupe I. Bactéries lactiques homo-fermentaires obligatoires, qui fermentent les hexoses en acide lactique par la voie glycolitique. Et qui n'ont pas la capacité de fermenter les pentoses, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent pas la voie de la phosphogluconate/phosphocétolase.

Groupe II. Bactéries lactiques hétéro-fermentaires facultatives, qui utilisent la même voie pour les hexoses que le groupe I, et étant également capables de fermenter les pentoses car elles possèdent à la fois une aldolase et une phosphocétolase. C'est-à-dire qu'elles possèdent la voie de la phosphogluconate/phosphocétolase.

Groupe III. Bactéries lactiques hétéro-fermentaires obligatoires, ne possèdent pas la voie glycolytique et fermentent donc à la fois le glucose et les sucres pentoses par la voie de la phosphogluconate/phosphokétolase (Kandler, 1983; McDonald et al., 1991; Kandler, 1986; Donald et al., 1995 ; Daeschel et al., 1987).

Les voies dominantes utilisées par les bactéries lactiques sont la glycolyse d'Embden-Meyerhoff et la phosphogluconate/phosphocétolase, qui produisent du pyruvate et de l'acétyl phosphate (provenant de la phosphogluconate/phosphocétolase) comme produits finaux (Kandler, 1983). La majeure partie du pyruvate est réduite en lactate par le lactate déshydrogénase, tandis que le sort du phosphate d'acétyl dépend du substrat initial et de l'état redox. Si l'hexose est fermenté, l'acétyl phosphate est réduit en éthanol pour maintenir l'équilibre redox si aucun autre accepteur d'électrons n'est disponible. La fermentation des sucres pentoses, par contre, donne de l'acétate (Axelsson, 1998).

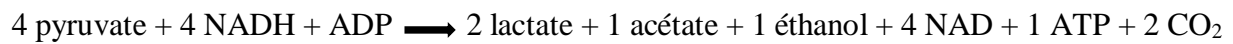
4.2. Entérobactéries

Les entérobactéries sont généralement le deuxième groupe bactérien le plus nombreux de la microflore épiphyte active dans le silo et donc le plus important dans leur compétition avec la flore de bactéries lactiques, produisant principalement de l'acide acétique (McDonald et al., 1991). Les entérobactéries sont également importantes dans la réduction du NO₃, ce qui entraîne la production de nitrites et d'oxydes d'azote (Rooke & Hatfield, 2003).

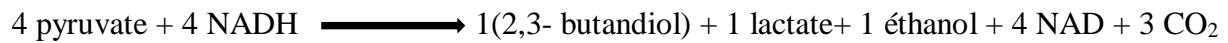
Les entérobactéries fermentent les hydrates de carbone par des voies dépendant de l'espèce et de l'environnement qui donnent généralement lieu à une large gamme de produits (Pahlow et al., 2003). Ces produits comprennent le lactate, l'acétate, l'éthanol, le formate et des composés à quatre carbones tels que l'acétoïne et le butanedioi (tableau 14) (Henderson, 1993). La série générale de réactions pour le métabolisme des sucres hexoses et du pyruvate présentée ci-dessous est utilisée par les entérobactéries (Rooke & Hatfield, 2003). Le lactate, cependant, est un produit final relativement mineur, et les entérobactéries ne sont donc pas souhaitables dans la fermentation de l'ensilage. Deux des stœchiométries globales les plus typiques de la fermentation des hydrates de carbone sont la fermentation acide décrite pour *Escherichia coli* et la fermentation neutre du glucose par des organismes tels que *Klebsiella spp* (Rooke & Hatfield, 2003).

Pour les conditions acides :





Dans le cas d'une fermentation neutre, divers équilibres sont possibles, donnant différents rapports de produits acides/neutres, dont l'un est donné ci-dessous :



Bien que les bactéries lactiques puissent réduire le NO_3 en NO_2 et le NO_2 en ammoniac et en protoxyde d'azote, les entérobactéries sont probablement responsables d'une grande partie de la réduction du NO_3 pendant l'ensilage (Spoelstra, 1987). L'inoculation du fourrage avec des entérobactéries augmente la réduction de NO_3 , et l'évolution dans le temps de l'utilisation de NO_3 dans l'ensilage suit le profil de la population des entérobactéries. Ainsi, la majorité de la réduction de NO_3 a lieu au cours des premiers stades de la fabrication de l'ensilage, lorsque les entérobactéries sont présentes. La réduction des nitrates peut produire des gaz toxiques d'oxyde nitreux et, dans certains cas, dans des pinces à ensilage bien scellées, les gaz d'oxyde nitreux peuvent se redissoudre sur les bords de la pince pour donner localement des concentrations extrêmement élevées d'acide nitrique avec des valeurs de pH d'environ 1 qui rendent l'ensilage dans ces zones brun et extrêmement corrosif (Rooke & Hatfield, 2003).

4.3. Clostridia

Les voies impliquées dans la production d'acide butyrique par les clostridies à partir d'hexoses ou de lactate sont mentionnées dans le tableau 14. Ces réactions sont typiques des clostridies saccharolytiques ou fermentant le sucre. Cette voie est bien sûr indésirable dans l'ensilage, car l'acide butyrique est un acide plus faible que l'acide lactique, et donc la conversion de l'acide lactique en acide butyrique n'est pas souhaitable (Notermans et al., 1979). En effet, l'acide butyrique n'est pas le seul produit possible de la fermentation du sucre par les clostridies ; l'acétate, l'éthanol, le propionate et le butanol peuvent également être produits (Rooke & Hatfield, 2003). En outre, les protéolytiques fermentent les acides aminés et donnent lieu à un large éventail de produits finaux (Rooke & Hatfield, 2003).

Par conséquent, les clostridies les plus courantes dans l'ensilage peuvent être divisées en trois groupes phénotypiquement pertinents : Groupe 1 : Clostridies protéolytiques, comprenant non seulement *C. sporogenes* et *C. bifermentans*, qui ont une capacité limitée à fermenter les glucides, mais aussi *C. sphenoides* et d'autres qui peuvent fermenter une variété de glucides. Groupe 2. Groupe *Clostridium butyricum* (comprenant également *C. beijerinckii* et *C.*

acetobutylicum). Groupe 3. *Clostridium tyrobutyricum*, qui se caractérise par sa capacité à fermenter un nombre limité de sucres et une fermentation vigoureuse de l'acide lactique à des valeurs de pH relativement basses. Cependant, des souches atypiques ont été signalées (Korhonen et al., 1977; Matteuzzi et al., 1977 et Bühler, 1985).

4.4. Levures et moisissures

Tous les champignons filamenteux se développent bien dans des conditions aérobies. Cependant, comme dans toutes les populations microbiennes mixtes, certaines espèces sont mieux adaptées que d'autres à des tensions réduites en oxygène, à un pH plus faible et à des concentrations plus élevées en CO₂ et en acides organiques (Rooke & Hatfield, 2003). Pelhate, (1977) a suggéré de diviser les moisissures en trois catégories écologiques : les espèces aérobies, tolérantes et microaérophiles (ou indifférentes). Ainsi, il est évident que l'environnement de l'ensilage sélectionnera un nombre limité d'espèces de moisissures tolérantes, telles que *Byssoschlamys nivea*, *Monascus ruber*, ou *Penicillium roqueforti*, qui par conséquent peuvent devenir dominantes pendant le stockage tant qu'au moins une trace d'oxygène est disponible (Rooke & Hatfield, 2003).

La voie de fermentation dominante chez les levures est la décarboxylation du pyruvate en acétaldéhyde et la réduction subséquente de l'acétaldéhyde en éthanol pour régénérer du NAD (tableau 1) (McDonald et al., 1991). Comme dans le cas des clostridies, d'autres produits finaux de la fermentation anaérobie sont possibles, notamment l'acétate et l'éthanol, le lactate, le propionate et les alcools supérieurs tels que le propanol et le butanol (Schlegel & Zaborosch, 1993). La production d'éthanol (tableau 14) n'est pas souhaitable car il y a perte de matière sèche sous forme de CO₂ et aucun acide n'est produit pendant la fermentation (McDonald et al., 1991). Contrairement aux bactéries étudiées jusqu'à présent, les levures possèdent une chaîne de transport d'électrons. Par conséquent, en présence d'oxygène, les substrats tels que les sucres et l'acide lactique sont complètement oxydés en CO₂ et en eau par la voie glycolytique et le cycle de l'acide tricarboxylique, avec une ATP considérablement accrue (Schlegel & Zaborosch, 1993). Le métabolisme aérobie est à l'origine de la détérioration de l'ensilage lorsqu'il est exposé à l'oxygène. L'utilisation du lactate par les levures augmente le pH et la température de l'ensilage et permet à une succession d'organismes aérobies de s'installer dans l'ensilage (Rooke & Hatfield, 2003).

Tableau 14: Efficacités d'acidification et de fermentation des principales voies de fermentation des bactéries d'ensilage (Woolford, 1984).

Micro-organisme	Voie de fermentation	Substrat	Produit	Récupération Energie (%)
BL	Homofermentative	Glucose	2 lactates	96,9
BL	Hétérofermentative	Glucose	1 lactate + 1 acétate	79,6
BL	Hétérofermentative	Glucose	1 lactate + 1 éthanol	97,2
Levures	-	Glucose	2 éthanols	97,4
Clostridia	-	Glucose	1 butyrate	77,9
Entérobactéries	-	2 Glucose	2 lactates + 1 acétate + 1 éthanol	88,9

4.5. Bactéries de l'acide propionique

L'acide propionique non dissocié étant un puissant inhibiteur des levures et des moisissures, l'utilisation de ces bactéries comme inoculants d'ensilage peut augmenter la stabilité aérobie des ensilages (Rooke & Hatfield, 2003). *Propionibacterium shermanii* a été testé en tant qu'additif, car cet organisme produit de l'acide propionique à partir de l'acide lactique. La production d'acide propionique est pénalisée par une acidification réduite de l'ensilage. La réaction stochémétrique est la suivante d'ensilage (Rauramaa et al., 1996) :



Des études sur l'utilisation des substrats par *Propionibacterium shermanii* (Lee et al., 1974) ont montré que ces bactéries préfèrent le lactate au glucose. Cela pourrait indiquer que dans les écosystèmes à forte concentration d'acide lactique (les ensilages), le lactate est la source de carbone la plus importante pour ces bactéries ce qui est accord avec les résultats de Woolford, (1975) qui a rapporté que *Propionibacterium spp.* pouvait fermenter le lactate en propionate dans des ensilages à faible pH, et que cette fermentation n'était pas influencée par la présence de sucres.

4.6. Autres bactéries

Les autres bactéries qui jouent un rôle variable pendant l'ensilage sont les bacilles, les bactéries de l'acide acétique et la listeria. Les bactéries de l'acide acétique sont des bactéries aérobies et nécessitent au moins une niche micro-aéroophile dans l'ensilage pour survivre (Rooke & Hatfield, 2003). Les *Listeria spp* métabolisent les sucres en CO₂ et en eau par la chaîne

respiratoire (Rooke & Hatfield, 2003). Ces bactéries sont importantes en tant qu'organismes pathogènes, particulièrement dans l'ensilage en grosses balles (Fenlon et al., 1989). Les bactéries acétiques ont été impliquées dans le déclenchement de la détérioration aérobie dans l'ensilage de comté, car elles peuvent utiliser l'acide lactique, l'acide acétique et l'éthanol à faible pH. L'éthanol est le substrat préféré des bactéries de l'acide acétique (Spoelstra et al., 1988). Le rôle des espèces de bacillus dans l'ensilage n'est pas bien établi, elles sont capables de fermenter les sucres et ont été signalés comme produisant une gamme de produits finaux allant de la production d'acides lactiques à la production d'acides gras (Woolford, 1977). De même, il a été suggéré que les bacilles peuvent être impliqués dans le déclenchement de la détérioration aérobie de certains ensilages, car ils possèdent toute la chaîne de transport des électrons et peuvent donc métaboliser l'acide lactique en aérobiose (Rooke & Hatfield, 2003).

Les bactéries d'importance mineure sont les bactéries de l'acide acétique et les bactéries de l'acide propionique. Les bactéries de l'acide acétique sont les plus importantes dans la détérioration aérobie de certains ensilages tels que l'ensilage de maïs (Spoelstra et al., 1988), tandis que les bactéries de l'acide propionique peuvent affecter les caractéristiques de fermentation et de stockage (Pahlow & Honig, 1994).

5. Stockage des ensilages

Les objectifs du stockage de l'ensilage sont de fournir un environnement permettant au fourrage frais de fermenter, de garantir une bonne conservation jusqu'à un an avec une perte minimale de la valeur alimentaire et de contribuer à un système d'alimentation efficace et sûr à la ferme (Savoie & Jofriet, 2003).

Ces objectifs peuvent être atteints de différentes manières. Le silo vertical ou tour est une structure cylindrique verticale qui peut être équipée pour une alimentation entièrement automatisée (Weinberg & Ashbell, 2003). C'est généralement la solution de stockage dont le coût d'investissement est le plus élevé. Le silo horizontal ou silo-couloir nécessite généralement moins d'investissements qu'un silo tour, en particulier lorsque de grands volumes d'aliments sont stockés (Savoie & Jofriet, 2003). D'autres systèmes de stockage à structure limitée nécessitent une mise de fonds initiale très faible. Le fourrage humide peut être mis en balles et emballé par un film plastique ; le fourrage haché peut être comprimé dans un tube plastique ou simplement empilé en tas sur une surface plane et recouvert de plastique (Savoie & Jofriet, 2003).

5.1. Silos

Les silos sont des installations dans lesquelles les cultures sont transformées en ensilage et sont stockées jusqu'à leur utilisation pour l'alimentation animale (Weinberg & Ashbell, 2003). Il existe différents types de silos, qui sont choisis en fonction des préférences de l'opérateur et des conditions d'alimentation. La capacité du silo doit être déterminée en fonction des besoins alimentaires (taille du troupeau et rations) et les dimensions doivent être calculées de manière à retirer quotidiennement une quantité suffisante d'ensilage de la face du silo afin de minimiser l'exposition de l'ensilage à l'air. Les types de silos les plus courants sont les silos-tour, les silos-couloir, et les grosses balles (McDonald et al., 1991; Weinberg & Ashbell, 2003).

5.1.1. Silo tour

Le silo tour est un conteneur cylindrique vertical qui peut être utilisé pour stocker divers aliments pour animaux (Savoie & Jofriet, 2003). Il nécessite une quantité minimale de matériaux structurels (acier et béton) pour résister à la pression horizontale du produit stocké. Le silo-tour est rempli en soufflant du fourrage ou des céréales à forte teneur en eau par un tuyau fixé à la paroi extérieure (figure 11) ; la récolte se tasse sous son propre poids (Conseil des Productions Végétales du Québec, 1989). Le silo est vidé soit par le haut, soit par le bas à l'aide d'un déchargeur approprié. Un silo-tour s'intègre bien aux systèmes de manutention mécanique des aliments pour animaux afin de minimiser la main-d'œuvre (Savoie & Jofriet, 2003).

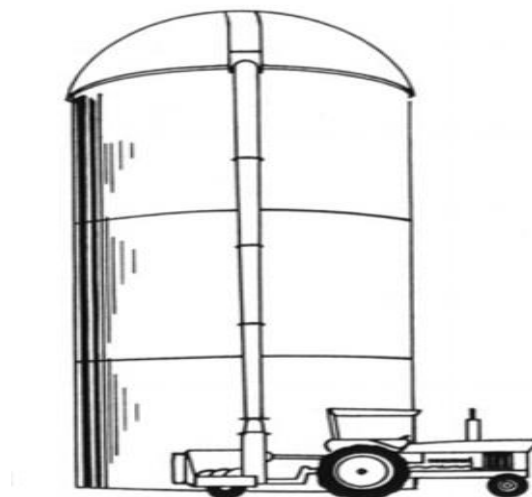


Figure 11: Silo tour

(Conseil des Productions Végétales du Québec, 1989)

5.1.2. Silo horizontal

Un silo horizontal, parfois appelé "silo couloir", est une zone pavée entourée sur deux ou trois côtés par des murs de soutènement quasi verticaux, généralement d'une hauteur de moins de 6 mètres (Savoie & Jofriet, 2003).

Le fourrage est déversé à l'intérieur de la zone murée et consolidé mécaniquement par un tracteur. Lorsque le silo est plein, la surface ouverte est recouverte d'un film plastique maintenu en place par des poids tels que des pneus usagés. Le silo-couloir est généralement déchargé le long d'une face verticale à l'aide d'un équipement adapté au déchargement. Certains exploitants autorisent l'auto-alimentation des animaux directement sur la face ouverte du silo (figure 12) (Savoie & Jofriet, 2003).

Les silos-couloirs sont moins coûteux à construire que les silos-tours. De plus, les zones d'alimentation sont généralement plus élevées que dans les silos-tours. Les silos couloirs exigent plus de travail au moment de l'alimentation, mais ils permettent de manipuler de grandes quantités d'aliments très rapidement (Conseil des Productions Végétales du Québec, 1989). Ils sont le système de stockage préféré de la plupart des grands parcs d'engraissement de bovins. Les ensilages les plus courants stockés dans les silos couloirs en Amérique du Nord sont le maïs à plante entière, l'orge à plante entière, le sorgho à plante entière et la luzerne. Certains exploitants de parcs d'engraissement les utilisent pour stocker les grains de maïs à forte teneur en eau. En Europe, l'ensilage d'herbe est généralement stocké dans des silos couloirs (Savoie & Jofriet, 2003).



Figure 12: Silo-couloir avec porte de tête pour permettre l'auto-alimentation

(Conseil des Productions Végétales du Québec, 1989)

5.2. Ensilage sous plastique sans structure

Le film plastique est utilisé pour protéger l'ensilage depuis plusieurs décennies. La première utilisation importante du film plastique pour l'ensilage a été associée aux silos-couloirs, où des murs en béton et un plancher protègent la plupart de la surface extérieure de l'ensilage et où seule la partie supérieure de l'ensilage est protégée par un film contre la pénétration de l'air (Savoie & Jofriet, 2003). Cependant, dans les années 1970, de nouveaux systèmes d'ensilage ont été proposés, dans lesquels le film plastique constituait la seule protection de la totalité de la surface extérieure de l'ensilage, sans aucun mur ou plancher construit. Ces systèmes d'ensilage sans structure étaient à l'origine considérés comme des systèmes d'urgence pour stocker les excédents de fourrage ou comme un complément aux systèmes de foin pendant les années d'abondance (Dubois, 1978 ; McLaughlin et al., 1978).

Avec l'amélioration des films plastiques et une meilleure gestion, les systèmes d'ensilage sans structure sont en fait devenus la principale méthode de conservation du fourrage dans un grand nombre d'exploitations. L'un des principaux avantages des systèmes d'ensilage sans structure est l'investissement minimal requis. Une adoption progressive est donc possible, contrairement aux silos tours ou couloirs, qui représentent un engagement à long terme, avec des coûts initiaux élevés (Savoie & Jofriet, 2003).

Les systèmes d'ensilage sous plastique sans structure peuvent être divisés en deux groupes en fonction du système de récolte : soit avec une ensileuse (c'est-à-dire un fourrage haché à écoulement libre), soit avec une presse à balles (c'est-à-dire non haché ou haché grossièrement et comprimé en balle) (Savoie & Jofriet, 2003).

Les manchons en plastique, appelés sacs pressés aux États-Unis, sont disponibles en plusieurs tailles de 1,8 à 3,6 m de diamètre et de 30, 60 et 90 m de longueur. Ils sont remplis par une ensacheuse portable. Ils peuvent également être partiellement remplis, mais doivent être fermés hermétiquement pour éviter le pompage de l'air par des bulles d'air (Savoie & Jofriet, 2003).

5.2.1. Ensilage en sac (silos boudins)

Une machine spécialisée (ensacheuse) reçoit le fourrage haché, pousse la récolte à travers un rotor et comprime les particules dans un sac en plastique qui se déplie (figure 13). Le sac est déposé sur le sol et l'ensacheuse recule lentement pendant le remplissage. Les sacs ont généralement un diamètre de 1,2 à 3,0 m, une longueur de 30 à 60 m et une épaisseur de 125mm. La densité de matière sèche des cultures varie en fonction de l'espèce, la maturité, l'humidité

et la pression du rotor, avec une fourchette typique de 150 à 250 kg MS/m³ (Savoie & Jofriet, 2003).

La présence d'air est généralement minimisée dans le sac tubulaire, favorisant ainsi des conditions anaérobies rapides pour une bonne fermentation de l'ensilage (Savoie et al., 2001). Le système d'ensilage en sac peut être utilisé pour conserver l'ensilage dans une gamme relativement large de taux d'humidité, entre 400 et 800 g/kg (Savoie et al., 2001). Nicholson et al. (1992) ont conservé de l'ensilage de luzerne en sac à 600 /730 g/kg d'humidité dans le climat relativement frais et humide de l'est du Canada, les ensilages ensachés ont été bien acceptés par les moutons (*Ovis aries*), bien qu'il y ait eu une certaine dégradation des protéines pendant le stockage (également observée dans l'ensilage en balles rondes) (Savoie et al., 2001).

Wallentine, (1993) a fait un rapport sur l'ensilage de luzerne dans les climats relativement secs de l'Utah et du Wyoming où la pluie peut occasionnellement causer des dommages. L'ensilage a considérablement réduit le risque climatique et a augmenté la valeur alimentaire pour les vaches laitières. Une teneur en eau de 650 g/kg a été considérée comme un bon compromis pour conserver une luzerne ensachée de haute qualité (Savoie & Jofriet, 2003). L'ensilage en sac nécessite plus de surface au sol que la plupart des autres systèmes de stockage, car les sacs ne peuvent pas être empilés (Savoie & Jofriet, 2003). Il se peut que les sacs doivent être séparés par une distance minimale nécessaire pour déplacer l'ensacheuse entre les rangées d'ensilage. L'ensilage haché dans les sacs doit être déchargé relativement rapidement en été pour éviter l'excès de pénétration d'air et le réchauffement de la face ouverte (Savoie & Jofriet, 2003).



Figure 13: Ensilage en sac (silo boudin)

Source : <https://eta-bergeron-sarl.monsite-orange.fr/silosboudinbag/index.html>

5.2.2. Ensilage en tas (silos-meules)

Les silos-meules (figure 14) sont formés d'un tas de fourrage haché, déposé en demi-cylindre et recouvert d'une toile de polyéthylène. Le fourrage est élevé jusqu'à 5 m de hauteur à l'aide d'un convoyeur ou d'un chargeur frontal (Savoie et al., 2001). Le sol peut être en béton pour un accès facile en toutes saisons. Cependant, le sol peut également être une zone herbeuse si la récupération de l'ensilage se fait dans des conditions hivernales très froides (en dessous de -10°C) ou dans des conditions très sèches (c'est-à-dire lorsque les roues du tracteur ne mélangent pas la boue avec l'ensilage) (Savoie & Jofriet, 2003). Un vieux film plastique est parfois utilisé pour recouvrir la surface du sol ; cependant, il y a peu d'avantages à le faire si la couverture est bien étanche à la jonction des côtés et du plancher. Les vieux films plastiques peuvent même causer des problèmes de contamination s'ils ne sont pas bien nettoyés avant leur réutilisation (Savoie & Jofriet, 2003). Pour obtenir une bonne étanchéité à la jonction deux méthodes sont utilisées : soit en poussant le film plastique d'un demi-mètre sous le tas, soit en chargeant du sable sur toute la longueur du film extérieur. Dans les quelques jours qui suivent la formation du tas, le fourrage se compacte naturellement (Savoie & Jofriet, 2003).



Figure 14: Ensilage en tas (silo-meules)

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ensilage>

5.3. Ensilage en grosses balles

Les premières tentatives de conservation de l'ensilage en grosses balles (figure 15) à forte teneur en humidité remontent à la fin des années 1970 et les premiers rapports publiés au début des années 1980 (Kjelgaard et al., 1981; Ganneau, 1981; Gaillard, 1982; Harrison, 1985). La technique a été considérée comme marginale pendant plusieurs années en raison de problèmes liés à l'emballage et aux systèmes d'alimentation précoces, ainsi qu'à la mauvaise qualité du polyéthylène qui causait des pertes importantes (Genest et al., 1990). La plupart de ces problèmes ont été résolus, et l'ensilage en grosses balles est pratiquement devenu une technique de conservation courante (Genest et al., 1990; Haigh et al., 1996). Un important problème non résolu de l'ensilage en grosses balles est la difficulté de recycler de grandes quantités de films plastiques usagés (Negra & Rogers, 1997). Cela risque de limiter le développement de l'ensilage en grosses balles en raison des réglementations environnementales et éventuellement du coût (Savoie & Jofriet, 2003).

L'ensilage en grosses balles ne devrait pas remplacer les silos-couloirs ou les silos-tours dans les grandes exploitations. Toutefois, l'ensilage en grosses balles s'est avéré être une bonne solution pour passer de la fenaison à l'ensilage dans les petites et moyennes exploitations, notamment dans les régions où les précipitations sont suffisamment abondantes pour causer des problèmes lors du flétrissement des champs (Savoie et al., 2001). L'ensilage en grosses balles présente également l'avantage d'utiliser la même machine de récolte pour le foin et l'ensilage (Savoie & Jofriet, 2003).

Comme pour toutes les formes d'ensilage, les balles humides doivent être scellées rapidement pour épuiser l'oxygène restant et lancer la fermentation (Savoie et al., 1996). À l'origine, le scellement était effectué manuellement en plaçant un grand sac en plastique sur chaque balle ronde. Aujourd'hui, des machines spécialisées (enrubanneuses) assurent l'étanchéité en appliquant un mince film plastique étirable autour de la balle (Savoie & Jofriet, 2003). L'ensilage en grosses balles est également différent de l'ensilage haché conventionnel, car les fibres longues non hachées libèrent les hydrates de carbone solubles plus lentement que les particules finement hachées. Par conséquent, il y a moins de surface brisée pour la multiplication des bactéries d'acide lactique au cours de la phase initiale d'ensilage (Savoie & Jofriet, 2003). Certains traitements mécaniques sévères tels que la macération peuvent compenser une coupe plus longue et peuvent effectivement fournir un taux de fermentation aussi rapide que celle observée avec un fourrage finement haché (Savoie et al., 1996; Charmley et al., 1997).



Figure 15: Ensilage en grosse balles

Source : <https://www.alamyimages.fr/pile-de-balles-d-ensilage-en-plastique-noir-cornwall-royaume-uni-john-gollop-image364268274.html>

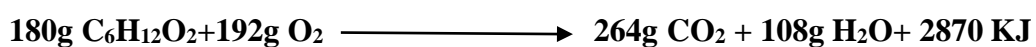
6. Pertes liées au stockage de l'ensilage

Les pertes liées au stockage de l'ensilage sont causées principalement par trois mécanismes : (i) l'infiltration d'air, (ii) la fermentation, et (iii) la production d'effluents (McGechan, 1990).

Le type de silo (tour, couloir, film plastique) et la gestion du stockage (taux de remplissage, délai avant scellement, entretien de l'étanchéité, etc affecteront le niveau de perte (Savoie & Jofriet, 2003). D'autres facteurs tels que le taux d'humidité, la longueur du hachage, l'espèce de la récolte, la maturité de la récolte et l'utilisation d'un additif peuvent également influencer le volume des pertes (Savoie & Jofriet, 2003). Au fur et à mesure que les pertes augmentent, la qualité de l'ensilage tend à diminuer car les fractions les plus nutritives (sucres solubles, protéines) sont généralement détériorées plus rapidement que les fractions moins nutritives (lignine, hémicellulose, cellulose) (Savoie & Jofriet, 2003).

6.1. Respiration

Les cellules végétales continuent à respirer après la coupe tant qu'il y a suffisamment de substrat (généralement des sucres hexoses), d'humidité et d'oxygène (McDonald et al., 1991). La respiration peut être représentée par l'équation suivante (Wood & Parker, 1971) :



La respiration est souvent mesurée en laboratoire par la concentration de CO₂ dans l'air (Ashbell et al., 1991). Chaque gramme de CO₂ mesuré correspond à 0,68 g d'hydrate de carbone (C₆ H₁₂ O₆) perdu par la plante qui respire.

Le taux maximal de respiration se produit à une température d'environ 25 à 30°C et à une teneur en humidité de 800 g/kg ; il se situe généralement entre 0,3 et 0,4 % de MS/h (Wolf & Carson, 1973; Honig & Woolford, 1980). Dans un silo non scellé, la respiration maximale se produit à la surface ouverte. L'oxygène pénètre lentement et provoque une oxydation supplémentaire dans la masse de fourrage. Une fois le silo scellé, l'Oxygène peut encore pénétrer à travers les parois, mais à un rythme beaucoup plus lent (Savoie & Jofriet, 2003).

6.2. Fermentation

La fermentation est un processus biochimique au cours duquel un substrat, généralement des sucres simples, est transformé en d'autres produits par des micro-organismes dans des conditions anaérobies. La fermentation de l'ensilage peut être décrite par plus de 20 réactions différentes selon le substrat et le micro-organisme (McDonald et al., 1991). Certaines de ces réactions sont présentées dans le tableau 15. Le taux d'humidité et la température affectent également les microorganismes et leur activité (McGechan, 1990; McDonald et al., 1991).

D'une part, certaines réactions de fermentation n'entraînent aucune perte de matière sèche (tableau 15). Le substrat est simplement transformé en un autre produit, généralement de l'acide lactique, avec la même matière sèche totale. Il y a cependant une légère perte de valeur énergétique, de l'ordre de 0,7%.

D'autre part, certaines réactions de fermentation entraînent une perte nette de matière organique (tableau 15), généralement en raison d'une conversion en CO₂.

Tableau 15: Réactions de fermentation de l'ensilage et pertes de matière sèche associées (McGechan, 1990; McDonald et al., 1991)

Réaction	Micro-organisme	Perte de MS (%)
Glucose \longrightarrow 2 ac. lactique	homolactique	0
Fructose \longrightarrow 2 ac. lactique	homolactique	0
Pentose \longrightarrow ac. lactique + ac. acétique	Homolactique/ hétéro lactique	0
Glucose \longrightarrow ac. lactique + éthanol + CO ₂	hétéro lactique	24,4
3 fructose + H ₂ O \longrightarrow ac. lactique + 2 mannitol + ac. acétique + CO ₂	hétéro lactique	7,9
2 fructose + glucose + H ₂ O \longrightarrow ac. Lactique + 2 mannitol + ac acétique + CO ₂	hétéro lactique	7,9
Citrate + H ₂ O \longrightarrow 2 ac. acétique + ac. formique + CO ₂	Homolactique/ hétéro lactique	21,0
2 citrate \longrightarrow 2 ac. acétique + ac. formique + CO ₂	Homolactique/ hétéro lactique	45,8
2 citrate + H ₂ O \longrightarrow 3 ac. acétique + ac lactique + 3CO ₂	Homolactique/ hétéro lactique	32,8
Citrate + 2H ₂ \longrightarrow ac. acétique + éthanol + ac. formique + CO ₂	Homolactique/ hétéro lactique	22,5
Malate \longrightarrow ac. lactique + CO ₂	Homolactique/ hétéro lactique	32,8
2 malate \longrightarrow acétone + 4 CO ₂ + 2 H ₂	Homolactique/ hétéro lactique	67,2
Malate + H ₂ O \longrightarrow ac. acétique + ac formique + CO ₂ + H ₂	Homolactique/ hétéro lactique	30,3
Malate + H ₂ \longrightarrow éthanol + ac. formique + CO ₂	Homolactique/ hétéro lactique	32,4
2 sérine \longrightarrow acétone + 2 CO ₂ + 2 NH ₃	Homolactique/ hétéro lactique	58,1
Arginine + H ₂ O \longrightarrow ornithine + CO ₂ + 2 NH ₃	Homolactique/ hétéro lactique	24,0
Glucose \longrightarrow 2 ethanol + 2 CO ₂	Levure	48,9
Fructose \longrightarrow 2 ethanol + 2 CO ₂	Levure	48,9
Glucose \longrightarrow ac. butyrique + 2 CO ₂ + 2H ₂	Clostridia	51,1
2 ac. lactique \longrightarrow ac. butyrique + 2 CO ₂ + 2H ₂	Clostridia	51,1

6.3. Effluents

Les effluents d'ensilage sont produits dans des conditions d'humidité et de pression excessive (McDonald et al., 1991). La quantité d'effluents dépend principalement de la teneur en eau de la récolte. D'autres facteurs qui influencent le flux d'effluents sont le type de silo, la longueur de coupe, l'utilisation d'additifs et les conditions météorologiques pendant la récolte (Savoie & Jofriet, 2003).

L'effluent d'ensilage est indésirable. Premièrement, il contient des éléments nutritifs solubles et peut représenter jusqu'à 10 % de perte de matière sèche dans des conditions très humides (c'est-à-dire une teneur en humidité supérieure à 850 g/kg) (Savoie & Jofriet, 2003). Deuxièmement, l'effluent a une Demande biochimique en oxygène (DBO) très élevée, de l'ordre de 40 000 à 90 000 mg O₂ /L (McDonald et al., 1991). En raison de cette DBO élevée et du pH faible, l'effluent d'ensilage est l'un des polluants agricoles les plus concentrés. L'effluent d'ensilage peut rapidement appauvrir l'eau douce en O₂ et tuer la vie aquatique s'il s'écoule dans un cours d'eau (Savoie & Jofriet, 2003).

Alors que les pertes aérobies et de fermentation sont le résultat de processus biochimiques, la perte d'effluents est un processus physique. La pression à l'intérieur du silo pousse le liquide hors de la culture humide (Savoie et al., 2001). Ce liquide est principalement composé d'eau, mais il transporte également des nutriments solubles, qui constituent la perte de matière sèche (Savoie & Jofriet, 2003). Lorsque la teneur en eau de l'ensilage est inférieure à 700 g/kg dans les silos horizontaux ou moins de 600 g/kg dans les grands silos-tours, il n'y a pratiquement pas d'effluent (Pitt & Parlange, 1987; Yao & Jofriet, 1991). Le problème des effluents n'existe donc que dans les conditions d'ensilage à forte humidité (McDonald et al., 1991). La solution simple pour éliminer les effluents d'ensilage est de flétrir l'herbe et la luzerne dans le champ assez longtemps pour ramener la teneur en humidité en dessous du point critique (McDonald et al., 1991). Dans le cas de l'ensilage de maïs, la récolte à un stade de maturité plus avancé coïncide généralement avec une teneur en humidité plus faible (Savoie & Jofriet, 2003).

Le problème des effluents s'est posé avec une acuité particulière dans le nord de l'Europe avec la promotion de l'ensilage d'herbe en coupe directe, à des taux d'humidité parfois supérieurs à 850 g/kg (Savoie & Jofriet, 2003). L'objectif de l'ensilage en coupe directe était d'éviter les pertes importantes au champ lors du flétrissement sous un climat humide et de préserver les éléments nutritifs à l'aide d'acide formique (Gordon, 1981). Cependant, la solution aux

problèmes d'effluents dans certains pays a été une législation stricte et de nouvelles méthodes de conception (Beard et al., 1989; Offer & Al Rwidah, 1989; Haigh et al., 1996). Les problèmes d'effluents en Amérique du Nord ont été signalés dans le cas d'ensilage de plantes entières immatures conditions fraîches et humides et avec des déchets de conserverie humides et très humides stockés comme aliments pour animaux (Graves & Vanderstappen, 1993; Wright, 1997).

Plusieurs études ont été publiées sur les effluents d'ensilage (Woolford, 1984; McDonald et al., 1991; Jones & Jones, 1995). La plupart des recherches ont porté sur le contrôle, la réduction ou le traitement des effluents (Galanos et al., 1995; Jones & Jones, 1996).

7. Qualité hygiénique de l'ensilage

7.1. Rôle des bactéries formant des endospores

Les effets négatifs des clostridies et des bacilles, notamment sur le processus d'ensilage, ont déjà été abordés. En effet, leur capacité à former des endospores permet à ces bactéries d'avoir une présence continue et indésirable plus tard dans les systèmes de production alimentaire (Pahlow et al., 2003). Ce stade de repos leur permet généralement de survivre à de longues périodes aux conditions environnementales défavorables (Pahlow et al., 2003). Plus importante encore est leur résistance considérable aux températures élevées, qui leur permet de persister à travers la plupart des technologies d'élimination courantes comme la pasteurisation ou l'ébullition. Des traitements spéciaux à des températures encore plus élevées (par exemple, dans un autoclave fonctionnant communément à une pression de vapeur de 100 kPa au-dessus de la pression atmosphérique) sont nécessaires pour tuer les endospores bactériennes de manière fiable (Pahlow et al., 2003).

En général, il est difficile d'éliminer complètement une grande population initiale de micro-organismes d'altération, cela a des conséquences directes sur le nombre de bactéries endosporées qui se développent pendant la conservation du fourrage. Il est toujours préférable de réduire leur nombre au minimum dès le début par un bon ensilage. Cela peut également inclure l'utilisation d'additifs appropriés, tels que des produits chimiques contenant du nitrate ou des inoculants pour les cultures plus facilement ensilables (Pahlow et al., 2003).

7.2. Bactéries pathogènes et toxines bactériennes

7.2.1. *Listeria*

Un nombre élevé de bactéries appartenant au genre *Listeria* a été détecté dans différents types d'ensilage. La présence de ces bactéries Gram positif dans l'ensilage a été associée à l'altération aérobie des couches de surface. L'espèce *Listeria monocytogenes* revêt une importance particulière car elle est un agent pathogène pour divers animaux et pour l'homme. Des incidences de listériose chez les moutons (*Ovis aries*) et les chèvres (*Capra hircus*) ont été associées à l'alimentation avec des ensilages contaminés par *Listeria monocytogenes* (Wiedmann et al., 1994; Vazquez-Boland et al., 1992). En outre, il est prouvé que l'ensilage de mauvaise qualité est l'une des principales sources de contamination du lait cru par *L. monocytogenes* (Sanaa et al., 1993). *Listeria monocytogenes* est fréquemment trouvée en faible quantité dans le sol et sur la végétation, et il a été suggéré que ces bactéries sont une partie normale de la microflore de l'herbe. On rapporte que les oiseaux agissent comme leurs vecteurs (Fenlon, 1986). Le degré d'anaérobiose et le pH sont les facteurs les plus importants qui déterminent la survie et la croissance de *Listeria* dans les ensilages. Les *Listeria monocytogenes* ajoutées à l'herbe au moment de l'ensilage meurent rapidement dans des conditions strictement anaérobies et à un pH inférieur à 4,4, mais à une tension d'oxygène de 5 ml/L, la survie est prolongée et la croissance est observée même à un pH aussi bas que 4,2. Des tensions d'oxygène plus élevées ont fortement encouragé la croissance de *L. monocytogenes* (Donald et al., 1995). Des niveaux de *Listeria monocytogenes* supérieurs à 1×10^6 UFC/g ont été détectés dans les couches superficielles d'ensilages d'herbe visiblement infestés de moisissures (Fenlon, 1986). Les ensilages en grosses balles semblent particulièrement susceptibles d'être contaminés par *Listeria*, ce qui a été attribué à la plus grande probabilité d'altération aérobie en surface de ces ensilages par rapport aux ensilages en bottes ou en silos, en raison du plus grand rapport surface/volume des balles (Fenlon et al., 1989).

7.2.2. *Clostridium*

Le botulisme est une infection ou intoxication par *Clostridium botulinum*. En ce qui concerne les espèces animales, les chevaux (*Equus caballus*) semblent être plus sensibles au botulisme que les ruminants. Son importance dans l'ensilage et en particulier pour les bovins (*Bos taurus*) a été examinée en profondeur par Kehler & Scholz, (1996). La plus grave épidémie de botulisme chez les ruminants a été signalée en Israël, où 1000 vaches sont mortes ou ont dû être abattues après avoir consommé du fumier de volaille insuffisamment chauffé, qui contenait

manifestement des carcasses contaminées. Dans les pays où l'utilisation de la litière de volaille pour l'alimentation des ruminants est strictement interdite, l'origine la plus probable du botulisme bovin est soit une intoxication directe par le pâturage préalablement fertilisés avec du fumier de volaille, soit l'ingestion d'ensilage préparé à partir d'une culture fertilisée.

Le risque de botulisme peut être illustré par la toxicité extrêmement élevée de sa toxine : 0,1 µg de botuline est mortelle pour l'homme si elle est ingérée. Un millième de cette dose suffirait en cas d'inhalation. Théoriquement, 1 g de botuline purifiée pourrait tuer 10 millions de personnes. Aujourd'hui, dans les fermes, les rations mixtes totales sont devenues la technique d'alimentation standard préférée. Ainsi, une petite quantité d'ensilage toxique peut être mélangée de manière homogène à d'autres aliments, et une dose létale peut donc potentiellement être diffusée à un plus grand nombre d'animaux. *Clostridium botulinum* peut se multiplier entre un pH de 5,3 et 6,5, une plage normale pour les fourrages en voie de détérioration. Avec un pH plus faible, une activité de l'eau de 0,985 ou plus est nécessaire pour soutenir la production de toxine. Dans les silos à pince non couverts, la toxine très soluble hautement soluble peut être lavée par les pluies depuis les couches supérieures d'altération vers les parties plus profondes du silo, contaminant ainsi un ensilage de qualité apparemment élevée. Les toxines sont stables entre pH 3,5 et 6,8, et restent donc dangereuses même pendant de longues périodes dans un ensilage acide où la croissance et la production de toxines ne se produiront pas (Notermans et al., 1979) Des spores et des toxines de *C. botulinum* ont également été signalées dans les couches extérieures de l'ensilage de grosses balles enveloppées (Ricketts et al., 1984; Wilson et al., 1995), dont le pH est généralement plus élevé que celui des ensilages à faible teneur en matière sèche.

7.2.3. Moisissures et mycotoxines

Comme nous l'avons déjà mentionné, de nombreuses moisissures présentes dans l'ensilage sont capables de produire une ou plusieurs mycotoxines (Escoula, 1977; Auerbach, 1996). Les mycotoxines peuvent entraîner divers problèmes chez les animaux, tels qu'une diminution de la consommation, une augmentation des avortements, des déséquilibres hormonaux et une suppression de la fonction immunitaire (Pahlow et al., 2003). Les espèces de moisissures mycotoxigènes les plus importantes sont *Penicillium roqueforti*, *Aspergillus fumigatus*, *Byssoschlamys nivea* et diverses espèces de *Fusarium*. *Penicillium roqueforti* produit les toxines roquefortine C, PR-toxine (Auerbach, 1996). L'une des raisons de la prédominance de cet organisme dans les ensilages est sa tolérance aux concentrations élevées de CO₂ (jusqu'à 800

ml/L) et d'acide acétique (jusqu'à 15 g/kg à pH 3,5) et sa capacité à se développer à des niveaux d'oxygène aussi bas que 1,4 ml/L (Lacey, 1989). L'incertitude demeure quant aux conditions nécessaires à la formation de mycotoxines dans l'ensilage. Aucune PR-toxine n'a pu être détectée dans 25 échantillons d'ensilage de maïs qui étaient fortement infestés par *P. roqueforti* (Nout et al., 1993). Une étude a montré que la PR-toxine est instable dans l'ensilage (Schricker et al., 1993). Cependant, ses métabolites pourraient également être toxiques (Oldenburg, 1991). La situation semble différente pour la roquefortine C. Cette mycotoxine a été détectée dans 24 des 111 échantillons d'ensilage présentant des moisissures (Armbruster, 1994). La patuline, acide pénicillique et acide mycophénolique ont été détecté comme l'espèce prédominante dans différents types d'ensilages (Amend, 1990; Pahlow et al., 2003 et Armbruster, 1994) ; Dans des ensilages de maïs visuellement moulés, Auerbach, (1996) a détecté une forte incidence de roquefortine. Il a trouvé une concentration moyenne de 16,2 mg/kg, et les concentrations augmentaient avec la teneur en matière sèche de l'ensilage, probablement en raison de la plus grande porosité et des échanges gazeux dans les ensilages plus secs.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des éléments bibliographiques essentiels relatifs à la technique d'ensilage. En premier temps nous avons donné la définition et l'historique de l'ensilage, puis nous avons décrit brièvement les phases par lesquelles passent un ensilage, ensuite nous avons rappelé les résultats cités dans la littérature concernant l'utilisation des additifs dans l'ensilage et les micro-organismes entrant dans le processus d'ensilage, après nous avons cité les différents modes de stockage des ensilages et les pertes liées à ce dernier, enfin nous avons cité les critères influençant la qualité hygiénique de l'ensilage.

Cette revue de bibliographie nous a permis de conclure que l'ensilage en plus qu'elle soit une méthode économique, permet de maintenir la qualité des cultures aussi proche que possible de celle des plantes fraîches et qu'elle est parfaitement adaptée pour la mise en valeur des rebuts de figuier de barbarie.

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

Introduction

Les essais réalisés dans le cadre de cette étude avaient trois objectifs principaux, le premier objectif a été l'évaluation qualitative et quantitative des composants chimiques, biochimiques et de la flore microbienne des rebuts des fruits du figuier de barbarie. Le deuxième objectif a été de vérifier l'efficacité de l'ensilage pour conserver ces résidus en vue de leur utilisation en alimentation animale, dans cette étude nous nous sommes intéressés à deux types de sous-produits qui sont les fruits et les pelures de cactus. Le troisième objectif a été d'améliorer la valeur nutritionnelle des résidus de cactus par, d'une part, l'ajout de plantes hautement riche en protéines qui sont la luzerne ou l'atriplex et aussi utiliser une deuxième méthode de conservation des aliments pour animaux qui est le séchage solaire. Et d'autre part, l'ajout de proportions croissantes de mélasse (0, 2, 4, 6, 8 et 10 % p/p) pour améliorer la fermentation.

Nous présentons la démarche suivie pour atteindre ces objectifs dans le schéma de la figure 16.

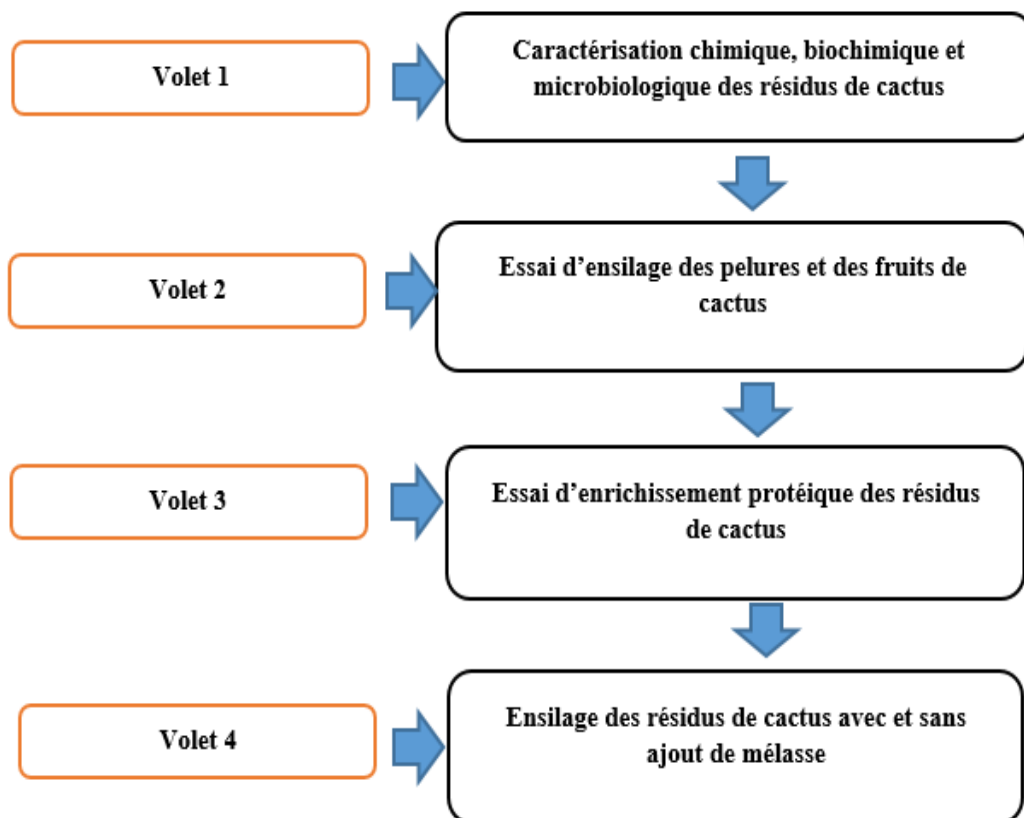


Figure 16: Schéma général de la démarche suivie

1. Collecte des échantillons

Les échantillons de figues de barbarie ont été collectés en fin de saison (au mois d'octobre), il s'agissait des fruits abandonnés après la récolte aux alentours de la ville de Béni Mellal (Maroc), distinguée en vert dans la figure 16. Ces échantillons ont été immédiatement stockés au froid (-4°C).

La zone d'étude, ville de Béni Mellal, se trouve à 498 m d'altitude, le climat est dit tempéré chaud. La température annuelle moyenne dans la région est de 17,3°C et les précipitations annuelles moyennes sont de 558 mm. Le mois de juillet étant le plus sec avec 10 mm de précipitations et 27,8°C en température moyenne. Une température moyenne de 7,8 °C et des précipitations de 63 mm font du mois de janvier le plus froid de l'année (figure 17) (HCP, 2017).

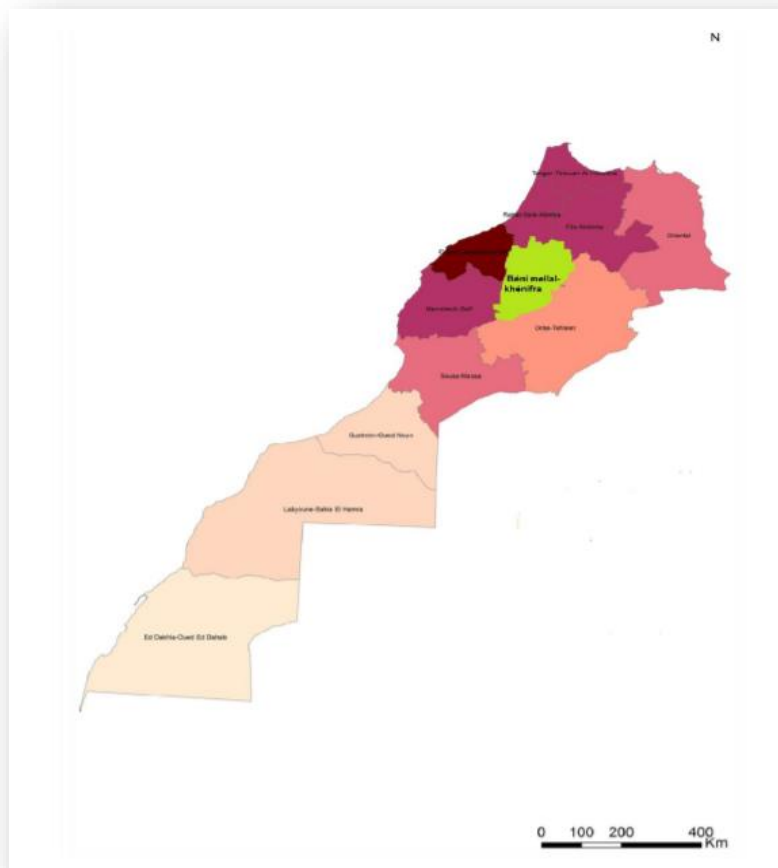


Figure 17: Localisation géographique de la zone d'étude

Source : (HCP, 2017)

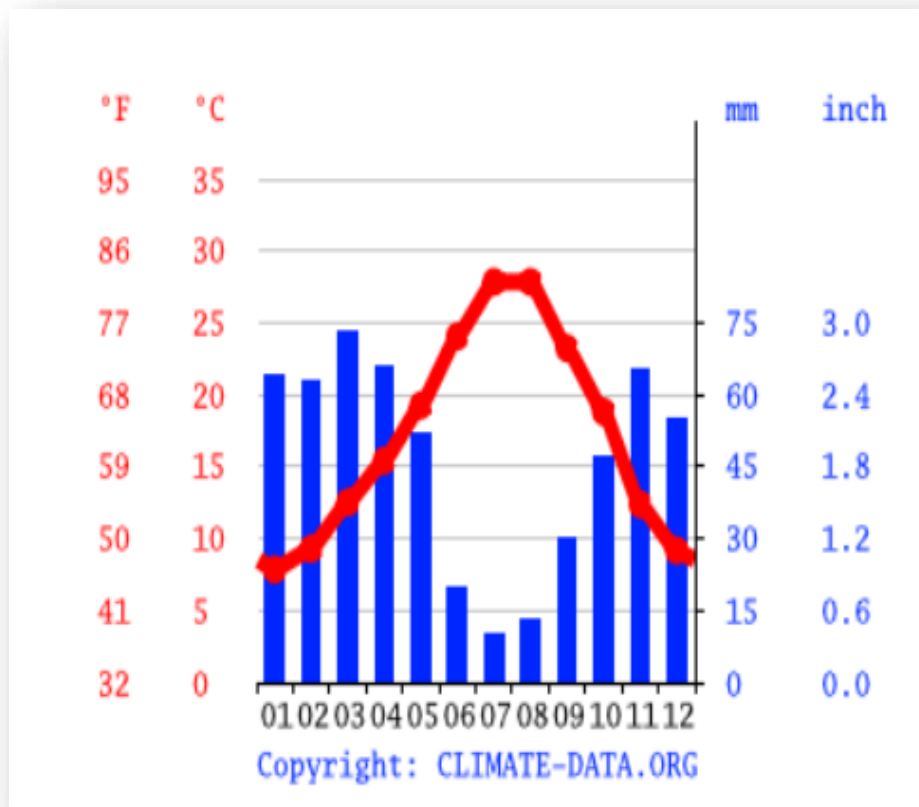


Figure 18: Données climatiques de la zone d'étude

Source : Climate-data.org

2. Déroulement des essais expérimentaux

Dans notre travail expérimental nous avons procédé de la façon suivante:

2.1. Caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des rebuts

L'objectif principal de cette section était d'évaluer la qualité nutritionnelle des fruits de cactus afin de pouvoir choisir la voie de valorisation appropriée. Pour ce faire, l'évaluation qualitative et quantitative des composants chimiques, biochimiques et de la flore microbiologique demeure une étape d'importance primordiale (figure 19). Dans cette optique, la première partie de l'étude expérimentale a été consacrée à la caractérisation chimique, biochimique des différentes fractions du fruit de cactus et la caractérisation microbiologique du fruit entier après broyage.

Avant de commencer les analyses, la peau a été tout d'abord retirée, et les graines séparées de la pulpe. Ces trois fractions, peau, graine et pulpe ont été séchées séparément jusqu'à poids

constant. Puis elles ont été soumises à une série d'analyses chimiques et biochimiques, à savoir : la teneur de la matière sèche, des cendres, des sucres, de la matière grasse, des fibres alimentaires dont NDF, ADF, ADL, cellulose et hémicellulose, des protéines et des éléments minéraux. Concernant les analyses microbiologiques, elles ont été réalisées sur le fruit frais entier après broyage et elles ont porté sur : le dénombrement de la FMAT, des levures, des moisissures, des coliformes totaux et des bactéries lactiques.

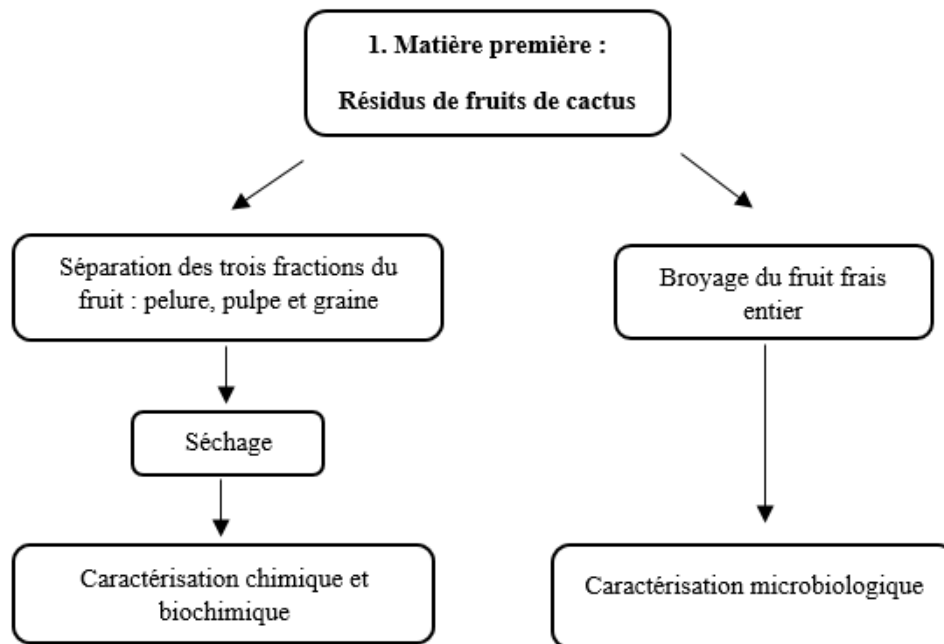


Figure 19: Déroulement de la caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des rebuts

2.2. Ensilage des pelures et des fruits du cactus

L'objectif de cette partie était de valoriser les résidus de cactus (fruits et pelures) par ensilage en association avec la paille et le son de blé. Pour ce faire, les fruits et les pelures du cactus ont été broyées séparément dans un broyeur en acier inoxydable, jusqu'à l'obtention d'une pâte très homogène. Le son et la paille de blé ont été aussi broyés dans le même broyeur (1mm). Le broyat du fruit ou de pelure a été ensuite mélangé au broyat de son et de paille de blé selon les proportions : 70% de cactus, 15% de son de blé et 15 % de paille de blé. Le son et la paille de blé ont été ajoutés dans l'objectif d'augmenter la teneur en matière sèche des mélanges. Deux types de mélanges ont été préparés, un mélange à base de fruits, de son et de paille de blé et un autre à base de pelures, de son et de paille de blé. Les mélanges ont été ensuite placés dans des sacs en plastique (1 kg / sac) ; les sacs ont été scellés, doublés et stockés pendant 30 jours à

température ambiante. Six sacs par traitements ont été préparés dont cinq ont été échantillonnés les jours 5, 10, 15, 20 et 25 pour la mesure du pH, des sucres et des protéines. Les mélanges frais et l'ensilage à 30 jours ont été soumis à une analyse complète, qui comprendra toutes les analyses biochimiques et microbiologiques (figure 20).

Les analyses chimiques et biochimiques réalisées ont été : la détermination de la teneur de la matière sèche, des cendres, des sucres, des fibres alimentaires dont NDF, ADF, ADL, cellulose et hémicellulose, des protéines et des éléments minéraux. L'étude cinétique a été réalisée à travers le suivi du pH, des sucres totaux, des sucres réducteurs et des protéines.

Les analyses microbiologiques ont porté sur : le dénombrement de la FMAT, des levures, des moisissures, des coliformes totaux et fécaux, des bactéries lactiques, *E.Coli*, Staphylocoque et Salmonella.

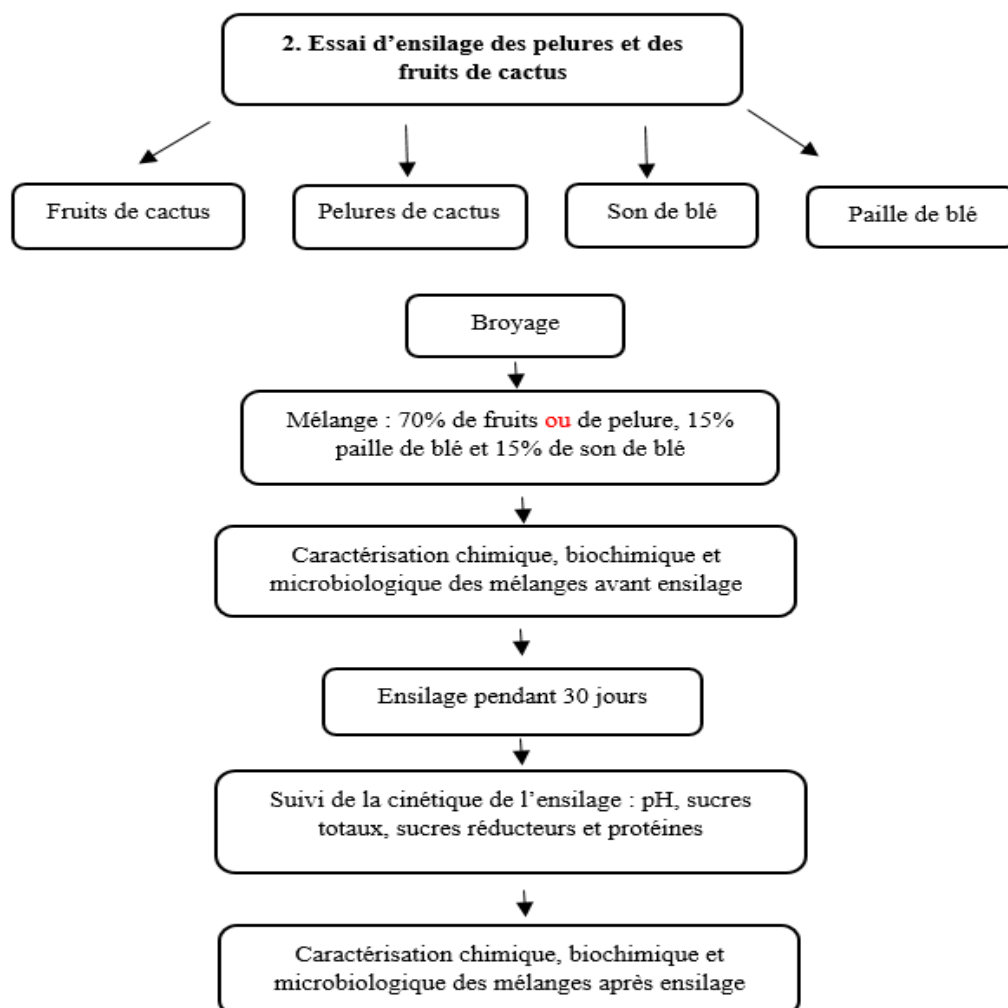


Figure 20: Ensilage des pelures et des fruits du cactus

2.3. Enrichissement protéique des résidus de figue de barbarie

Les plantes fourragères telles que l'atriplex et la luzerne constituent une bonne source d'azote. Le mélange de cactus et des plantes fourragères hautement riche en azote peut améliorer le statut nutritionnel et fournir un aliment de qualité, disponible pour la saison sèche.

Dans cette partie nous avons trois objectifs : valoriser les rebuts de fruits de cactus perdus en fin de saison et souvent non exploitées, explorer la possibilité d'enrichissement protéique de ces résidus avec deux sources d'azote (luzerne et atriplex) et comparer deux modes de conservation des aliments pour animaux, le séchage et l'ensilage.

Pour ce faire, les fruits de cactus ont été broyés en entier dans un broyeur en acier inoxydable jusqu'à l'obtention d'une pâte très homogène. Le son et la paille de blé ont été aussi broyés dans le même broyeur (1mm). La luzerne et l'atriplex ont été broyés à l'état frais dans le même broyeur. Trois mélanges ont été préparés séparément, un premier mélange à base de fruit de cactus, de son et de paille de blé, un deuxième à base de cactus, de son, de paille et de luzerne et un troisième à base de cactus, de son, de paille et d'atriplex. Les proportions des mélanges (en %) sont présentés dans le tableau 16:

Tableau 16: Proportions des mélanges M1, M2 et M3 en pourcentage (%)

	Cactus	Atriplex	Luzerne	Son de blé	Paille de blé
M₁	75	0	0	12,5	12,5
M₂	40	0	40	10	10
M₃	40	40	0	10	10

M₁ : mélange à base de cactus, paille et son de blé, M₂ : mélange à base de cactus, luzerne, paille et son de blé et M₃ : mélange à base de cactus, atriplex, son et paille de blé.

Les trois types de mélange ont été sujets à deux types de traitement, un ensilage et un séchage solaire.

Ensilage :

- Pour tous les essais cités avant, les mélanges ont été introduits dans des sacs en plastiques (1kg/sac), les sacs ont été pesés et scellés hermétiquement pour assurer l'anaérobiose, puis stockés à température ambiante pendant un mois avant ouverture. Les mélanges frais et d'ensilage ont été soumis à une analyse complète, qui comprendra toutes les analyses biochimiques et microbiologiques.

Séchage :

- Les trois types de mélanges obtenus ont été étalés sur un plastique pour les sécher sous le soleil. Les mélanges ont été remués de temps en temps pour favoriser et accélérer le séchage et

éviter la fermentation des sucres contenus dans le cactus. La durée nécessaire pour le dessèchement total était de 3 jours. Après séchage, les mélanges ont été conservés dans des sacs en plastique pour une analyse ultérieure (figure 21).

Les analyses chimiques et biochimiques réalisées ont été : la détermination de la teneur de la matière sèche, des cendres, des sucres, des fibres alimentaires dont NDF, ADF, ADL, cellulose et hémicellulose, des protéines et des éléments minéraux. Concernant les analyses microbiologiques, elles ont porté sur : le dénombrement de la FMAT, des levures, des moisissures, des coliformes totaux et fécaux, des bactéries lactiques, *E.Coli*, *Staphylocoque* et *Salmonella*.

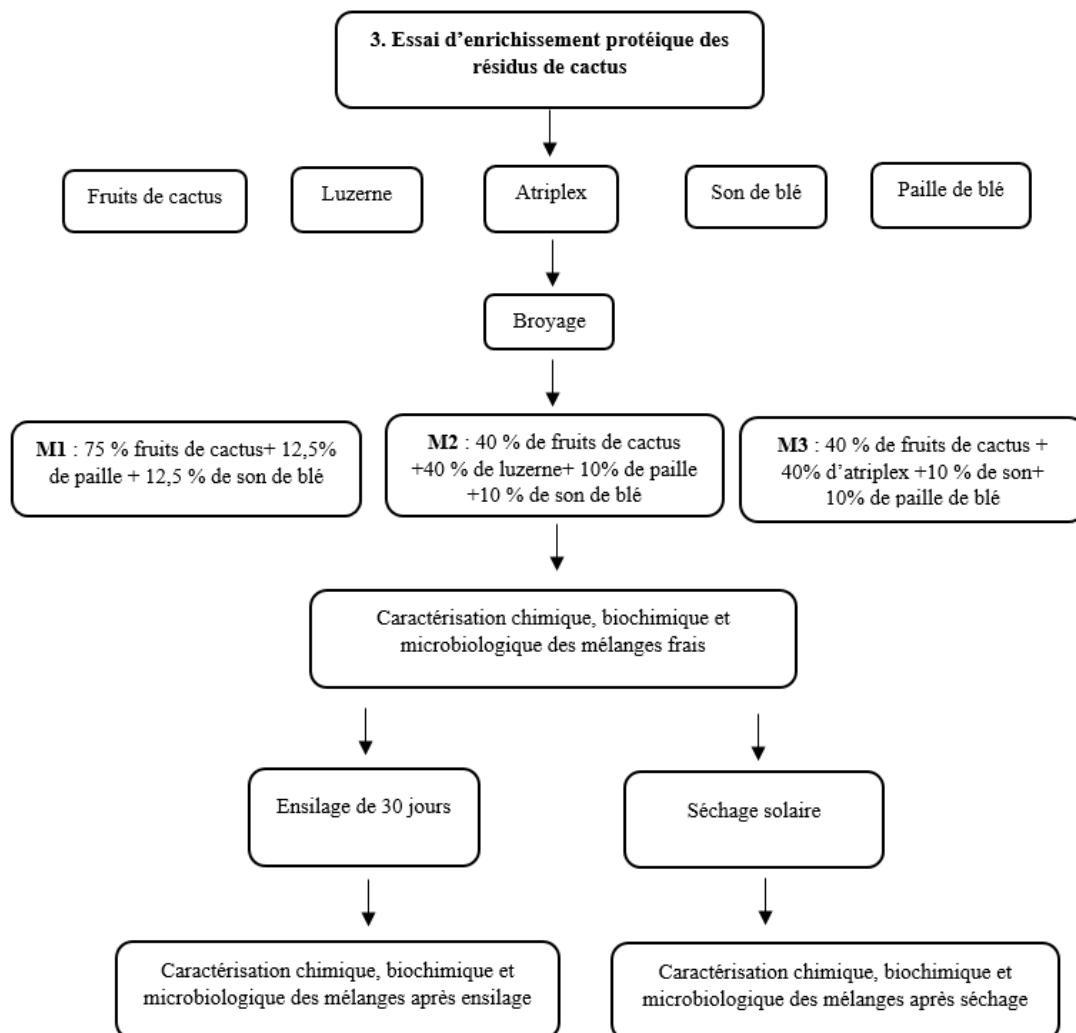


Figure 21: Enrichissement protéique des résidus de figue de barbarie

2.4. Ensilage des rejets de fruit de cactus avec et sans ajout de mélasse

L'objectif de cette partie était de réaliser un ensilage à base de fruits de cactus avec ajout de mélasse dans l'optique d'améliorer et d'accélérer le processus de fermentation et de mieux préserver l'ensilage.

La préparation de l'ensilage a été réalisée en broyant les fruits de cactus entiers. Le broyat obtenu a ensuite été ajouté à un mélange de paille et de son de blé qui ont pour rôle d'augmenter la teneur en matière sèche des mélanges, selon les proportions (75% de cactus, 12,5 % de paille et 12,5 % de son de blé). Le broyage a été fin afin de favoriser la compaction du mélange et d'évacuer le maximum d'air des sacs avant de les fermer.

Le mélange a été ensuite séparé en six portions afin de pouvoir ajouter de la mélasse à différents pourcentages. La mélasse a été alors ajoutée dans des pourcentages de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10% (p/p). Ensuite, les mélanges ont été placés dans des sacs en plastique (1 kg / sac) ; les sacs ont été scellés, doublés et stockés pendant 30 jours à température ambiante. Huit sacs par traitement ont été préparés, dont cinq ont été échantillonnés les jours 5, 10, 15, 20 et 25 pour la mesure du pH et l'analyse microbiologique. Les mélanges frais et d'ensilage à 30 jours ont été soumis à une analyse complète, qui comprendra toutes les analyses biochimiques et microbiologiques.

3 sacs de chaque traitement ont été ouverts et laissés au contact de l'air à température ambiante pendant une semaine pour réaliser le test de stabilité aérobie.

Les analyses chimiques et biochimiques réalisées ont été : la détermination de la teneur de la matière sèche, des cendres, des sucres, des fibres alimentaires dont NDF, ADF, ADL, cellulose et hémicellulose, des protéines et des éléments minéraux. Le suivi des paramètres fermentaires a porté sur le suivi du pH, le dénombrement de la FMAT, des levures, des moisissures, des coliformes totaux et fécaux, des bactéries lactiques, *E.Coli*, staphylocoque et Salmonella. Concernant le test de stabilité aérobie les paramètres suivis étaient : le pH, la température et le nombre de levures (figure 22).

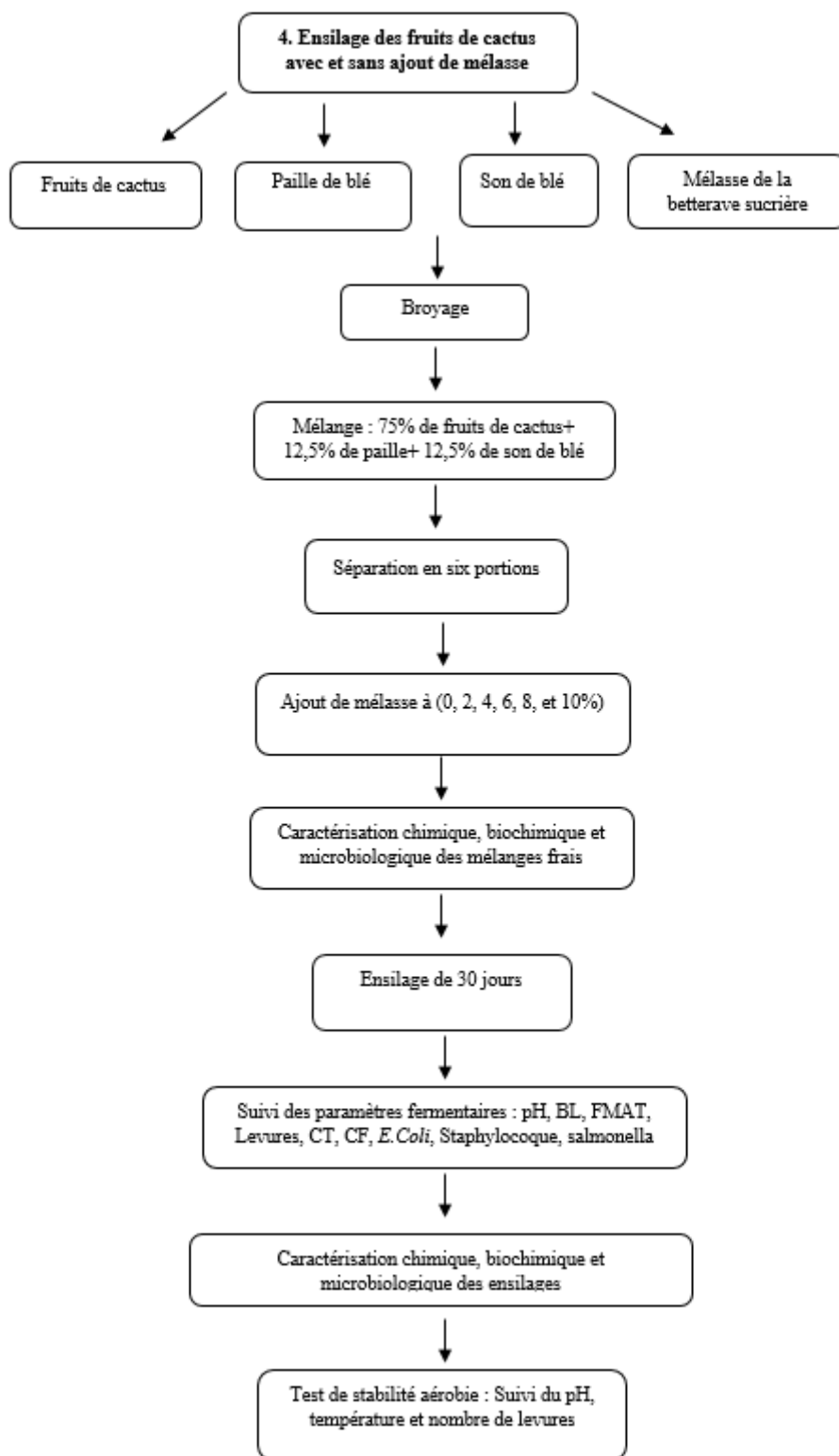


Figure 22: Ensilage des rejets de fruit de cactus avec et sans ajout de mélasse

3. Analyses physico-chimiques et microbiologiques

3.1. Analyses physico-chimiques

3.1.1. Matière sèche et Humidité

La matière sèche a été déterminée par étuvage des échantillons à une température de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ dans une étuve à la pression atmosphérique, jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La teneur en eau est égale à la perte de masse.

La détermination de la teneur en eau se fait par le calcul de la différence de poids avant et après la dessiccation selon la formule suivante :

$$\% \text{ MS} = (\text{P2} / \text{P1}) * 100$$

$$\% \text{ H} = 100 - \% \text{ MS}$$

Ou :

P1 : Poids de l'échantillon avant étuvage

P2 : Poids de l'échantillon après étuvage

MS : Matière sèche

H : Humidité

3.1.2. pH

Le pH a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre. 20 g de l'échantillon ont été mélangés dans un mélangeur avec 50 ml d'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une suspension fluide (Habibi, 2004).

3.1.3. Cendres brutes

Le dosage des cendres brutes a été réalisé par incinération à 500°C durant 3 heures selon les instructions de la norme AFNOR (1977).

La teneur en cendres brutes est exprimée en pourcentage selon la formule suivante :

$$\% \text{ CB} = (\text{P2} / \text{P1}) * 100$$

Avec :

P1 : poids de l'échantillon avant incinération

P2 : poids de l'échantillon résidu après incinération

CB : Cendres Brutes

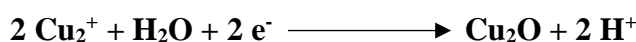
3.1.4. Sucres

3.1.4.1. Sucres réducteurs

Principe

Le dosage des sucres réducteurs a été réalisé par la méthode de Bertrand (Bertrand, 1906). Elle consiste à recueillir le précipité de l'oxyde cuivreux Cu_2O formé par réduction de la liqueur cupro-alkaline en présence des sucres réducteurs. Le dosage se fait par manganimétrie.

Les sucres directement réducteurs réduisent la liqueur cupro-alkaline selon la réaction suivante :



L'oxyde cuivreux formé est recueilli, lavé et titré. Il est ensuite dissout dans une solution sulfurique d'ions ferriques Fe^{3+} en excès, une partie de ces ions est réduite en ions ferreux Fe^{2+}

La quantité d'ions ferreux est proportionnelle à l'oxyde cuivreux présent, donc aux sucres aussi.

Les ions Fe^{2+} formés sont dosés par manganimétrie. La quantité de MnO_4^- utilisée pour le dosage correspond au sel ferreux formé, donc aux sucres réducteurs (glucose et fructose) exprimé en glucose.

Réactifs

- Solution de lactate de zinc à 30% (P/V) ;
- Solution d'hexacyanoferrate de potassium à 15% (P/V) ;
- Solution cuivrique ;
- Solution tartro-alkaline ;
- Solution ferrique ;
- Permanganate de potassium 0,1 N.

Mode opératoire

- Prendre 10 ml de l'extrait ;
- Ajouter 2 ml de solution d'hexacyanoferrate de potassium, mélanger ;

- Ajouter 2 ml de la solution d'acétate de zinc, mélanger et compléter au trait de jauge avec l'ED ;

- Laisser reposer 10 à 15 min et filtrer dans un récipient propre et sec.

Attention : si le filtrat n'est pas absolument limpide, filtrer à nouveau.

Précipitation de l'oxyde cuivreux

Dans une fiole conique de 150 ml, introduire successivement :

- 10 ml du filtrat ;

- 10ml d'ED ;

- 20 ml de solution cuivrique ;

- 20 ml de solution tartro-alcaline ;

- Agiter, porter à douce ébullition et maintenir celle-ci pendant 3 min exactement ;

- Laisser décanter en posant la fiole inclinée.

Lavage et dissolution de l'oxyde cuivreux

- Verser le liquide surnageant sur un filtre en verre fritté, en activant la filtration par aspiration, il faut prendre soin d'entraîner le moins possible de précipité et éviter de le laisser en contact de l'air ;

- Laver le précipité 3 fois avec 20 d'ED bouillie et refroidie, décanter et filtrer à chaque fois le liquide sur le filtre. Rejeter le filtrat ;

- Dissoudre ensuite le précipité d'oxyde cuivreux par une quantité suffisante de la solution ferrique (5 à 10 ml), filtrer la solution obtenue sur le même filtre, en ayant le soin de dissoudre complètement tout le précipité et de recueillir le filtrat dans une fiole conique propre.

Titration du sel ferreux formé

Titrer par une solution de permanganate de potassium 0,1N jusqu'à coloration rose pâle persistante (5 seconde environ).

Expression des résultats

$$m(\text{Cu}) = 5 * V(\text{MnO}_4^-) * C(\text{MnO}_4^-) * MM(\text{Cu})$$

Avec :

m (Cu) : masse de cuivre précipité

V (MnO₄⁻) : volume de MnO₄ utilisé pour titrer l'échantillon

C (MnO₄⁻) : concentration de la solution MnO₄ utilisé pour titrer l'échantillon

MM (Cu) : Masse molaire du cuivre

Une fois la masse de cuivre connue, On se reporte à la table de Bertrand (annexe 1), qui donne la relation entre la concentration de glucose et celle de précipité de cuivre formé.

3.1.4.2. Sucres totaux

La détermination des sucres totaux a été effectuée selon la méthode de Dubois et al., (1956) ou la méthode phénol acide sulfurique passant par trois étapes : Hydrolyse acide, filtration et lecture de l'absorbance. L'acide sulfurique concentré provoque, à chaud, le départ de plusieurs molécules d'eau à partir des oses. Cette déshydratation s'accompagne par la formation d'un hydroxy méthyl furfural (HMF) dans le cas d'hexoses et d'un furfural dans le cas des pentoses. Ces composés se condensent avec le phénol pour donner des complexes colorés (jaune-orangé). L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des oses. La densité optique est mesurée à 488 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Mode opératoire

- 0,5 ml d'une solution d'oses, sont rajoutés respectivement 0,5 ml de phénol à 5% et 3 ml d'acide sulfurique, ce dernier dégage une chaleur intense et donne une couleur jaune brune au mélange ;
- Agiter le milieu puis maintenir 5 minutes à 100 °C dans un bain-marie pour plus de reproductibilité. Après 30 minutes de refroidissement à l'obscurité, l'absorbance est mesurée à 485 nm.

Des gammes étalons sont réalisées avec des solutions de glucose entre 0 – 0,15 mg/ml.

3.1.5. Protéines

La teneur en azote total a été déterminée par la méthode de Kjeldahl, (1883) qui s'effectue en trois étapes : Minéralisation de la matière organique par l'acide sulfurique en présence d'un

catalyseur ; Distillation et Titration de l'ammoniac libéré. Le principe de cette méthode consiste à convertir l'azote en ammoniacque par une série de réactions chimiques qui incluent :

- **La digestion ou minéralisation** : qui consiste à transformer l'azote organique en azote minéral sous forme ammoniacal $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Ceci se fait par l'action oxydante de l'acide sulfurique bouillant sur la matière organique en présence d'un catalyseur (K_2SO_4 et CuSO_4) et la réduction de l'azote organique en ammoniac. Celui-ci est retenu dans le digestat acide sous forme sulfatée.



- **L'alcalinisation** : où l'ammoniacque du digestat est déplacé par une base forte (Na OH) que l'on ajoute en excès. L'ammoniacque est ensuite distillée et fixée dans un mélange d'acide borique et d'indicateur coloré (rouge de méthyle + vert de bromocrésol).

- **La titration** : Le mélange obtenu est ensuite titré par une solution d' HCl 0,1 N. Le contenu protéique est obtenu en multipliant la teneur en azote totale par un facteur de conversion égal à 6,25. Ce facteur présente le pourcentage d'azote total contenu dans les protéines.

$$\% \text{ Protéines} = [(V1 - V0) * C * 14 * 6,25] / P * 1000 * 100$$

Avec :

C : concentration de HCl utilisée pour le dosage (0,1N)

V1 : volume de HCl utilisé pour la titration de l'échantillon

V0 : volume de HCl utilisé pour la titration du blanc

P : poids de la prise d'essai

14 : poids moléculaire de l'azote

6,25 : facteur de conversion

3.1.6. Fibres (Van Soest et al., 1991)

3.1.6.1. Fibres au détergent neutre (NDF)

La méthode est basée sur la solubilisation par une solution neutre d'un agent tensioactif des hydrates de carbone y compris les pectines, la plupart des protéines, des lipides et des substances minérales solubles. Le contenu soluble est défini comme étant soluble dans les détergents neutres (NDS). Le résidu est constitué des composés fibreux des cellules végétales,

hémicellulose, cellulose, lignine, cutine, substances minérales insolubles et certaines protéines de la paroi cellulaire.

- Réactifs

- Solution de détergent neutre : Borate de sodium décahydrate, EDTA, Lauryl sulfate de sodium neutre, Ethoxyéthanol, Phosphate disodium anhydre, Eau distillée, n-octanol, Sulfite de sodium anhydre, acétone ;

- Verser le borate de sodium et l'EDTA dans un bécher et les dissoudre avec une partie de l'eau distillée en chauffant. Ajouter le lauryl sulfate et le 2 éthoxyéthanol ;

- Dissoudre à part le phosphate disodium dans une partie de l'eau distillée en chauffant jusqu'à solubilisation complète. Mélanger les deux solutions et l'eau distillée et vérifier le pH qui doit se situer entre 6,9 et 7,1.

- Procédure de dosage NDF

- Broyer les échantillons séchés à l'air et passer à travers un tamis de 1mm ;

- Peser dans un creuset 1g d'échantillon broyé avec une précision de 1 mg ;

- Ajouter 100 ml de solution de détergent neutre à température ambiante dans le creuset avec 0,5g de sulfite de sodium et quelques gouttes de n-octanol ;

- Chauffer à ébullition sous reflux pendant 60 min à partir du début de l'ébullition ;

- Filtrer et laver 3 fois avec de l'eau bouillante, puis 2 fois avec de l'acétone froid ;

- Sécher 8 heures à 105°C et laisser refroidir dans un dessiccateur ;

- Peser ;

- Calculer les fibres insolubles dans le détergent neutre.

$$\% \text{ NDF} = [(\text{poids du creuset} + \text{poids du résidu}) - (\text{poids du creuset}) / \text{poids de l'échantillon}] * 100$$

3.1.6.2. Fibres au détergent acide (ADF)

La méthode est basée sur la solubilisation par une solution acide d'un détergent tensioactif des hydrates de carbone solubles, des protéines, des lipides, de l'hémicellulose et des substances minérales.

Le résidu fibreux est constitué par la cellulose, la lignine, la cutine et par les substances minérales insolubles dans un environnement acide (silice) et est défini comme étant l'ADF. La différence entre le NDF et l'ADF est constituée essentiellement par l'hémicellulose.

- Réactifs

- Solution de détergent acide ;
- Bromure de cetyltriméthylammonium de qualité technique ;
- Acide sulfurique 1N, Dissoudre le tensioactif dans l'acide tout en remuant pour favoriser la dissolution ;
- N-octanol ;
- Acétone.

- Procédure pour le dosage ADF

- Broyer les échantillons séchés à l'air et passer à travers un tamis de 1mm ;
- Peser dans un creuset 1g d'échantillon broyé avec une précision de 1 mg ;
- Ajouter 100 ml de solution de détergent acide à température ambiante dans le creuset avec 0,5g de sulfite de sodium et quelques gouttes de n-octanol ;
- Chauffer à ébullition sous reflux pendant 60 min à partir du début de l'ébullition ;
- Filtrer et laver 3 fois avec de l'eau bouillante, puis 2 fois avec de l'acétone froid ;
- Sécher 8 heures à 105°C et laisser refroidir dans un dessiccateur ;
- Peser ;
- Calculer les fibres insolubles dans le détergent acide.

$$\% \text{ ADF} = [(\text{poids du creuset} + \text{poids du résidu}) - \text{poids du creuset} / \text{poids de l'échantillon}] * 100$$

3.1.6.3. Dosage de la lignine (ADL)

Cette méthode est basée sur la solubilisation de la cellulose à partir d'un échantillon prétraitée par une solution de détergent, par de l'acide sulfurique à 72%. Le résidu final contient la lignine et également la cutine (excrétée à l'extérieur des membranes des cellules végétales avec une structure lipidique complexe).

- Réactifs

Solvant pour la cellulose : acide sulfurique à 72% en poids (H₂SO₄, 24.00 N) d 1,634 (20°C).

- Dans un flacon gradué de 1 L, ajouter lentement 1200 g d'acide concentré (H₂SO₄, 98%, d 1,84) à 440ml d'eau distillée sous refroidissement ;

- Standardiser par titrage et ajouter de l'eau ou de l'acide concentré si nécessaire pour obtenir le titre exact.

- Procédure pour le dosage ADL

- Broyer les échantillons séchés à l'air et passer à travers un tamis de 1mm ;

- Peser dans un creuset 1g d'échantillon broyé avec une précision de 1 mg ;

- Ajouter 100 ml de solution de détergent acide à température ambiante dans le creuset avec 0,5g de sulfite de sodium et quelques gouttes de n-octanol ;

- Chauffer à ébullition sous reflux pendant 60 min à partir du début de l'ébullition ;

- Filtrer et laver 3 fois avec de l'eau bouillante, puis 2 fois avec de l'acétone froid.

Remarque

Il est possible de démarrer en utilisant le résidu du dosage des fibres avec le détergent acide ADF. Voir la méthode précédente.

- Ajouter environ 25 ml d'acide sulfurique à température ambiante (solvant pour la cellulose) et poursuivre l'extraction à froid pendant 3 heures, en mélangeant toutes les heures ;

- Filtrer et laver 3 fois avec de l'eau bouillante ou jusqu'à l'absence de réaction acide ;

- Sécher 8 heures à 105°C ;

- Peser ;

- Calculer la lignine insoluble dans le détergent acide.

$$\% \text{ ADL} = [(\text{poids du creuset} + \text{poids du résidu}) - \text{poids du creuset} / \text{poids de l'échantillon}] * 100$$

3.1.6.4. Hémicellulose

La formule pour le calcul de l'hémicellulose est :

$$\% \text{ Hémicellulose} = \% \text{ NDF} - \% \text{ ADF}$$

Avec :

NDF : Fibres au détergent neutre

ADF : Fibres au détergent acide

3.1.6.5. Cellulose

La formule pour le calcul de l'hémicellulose est :

$$\% \text{ Cellulose} = \% \text{ ADF} - \% \text{ ADL}$$

ADF : Fibres au détergent acide

ADL : Lignine

3.1.7. Matière grasse

Le taux de matière grasse est déterminé après extractions successives par un solvant non polaire qui est l'hexane. Les échantillons sont soumis à une extraction en continu pendant 5 heures (25 cycles) à l'aide d'un soxhlet. La masse de graisses extraites est déterminée par pesée après évaporation du solvant.

Le taux de la matière grasse est calculé par la formule suivante :

$$\% \text{ MG} = [(P1 - P2)/P3]*100$$

Avec :

P1 : poids du ballon après évaporation du solvant (tare du ballon + matière grasse)

P2 : poids du ballon vide

P3 : prise d'essai

MG : matière grasse

3.1.8. Eléments minéraux

Les éléments minéraux ont été dosés par spectroscopie d'absorption atomique. L'analyse se base sur l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental. Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnelle au nombre d'atomes d'élément absorbant, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments

dosés. Dans le cas de l'absorption, on envoie donc sur les atomes à doser un faisceau monochromatique d'intensité connue, de longueur d'onde caractéristique à l'élément à doser. La mesure de l'intensité transmise permet de déduire le nombre d'atomes absorbants présents dans la flamme. Cette détermination est basée sur la loi de Beer-Lambert.

$$ABS = \log_{10} I = \epsilon.l.c$$

Avec

ϵ : constante qui dépend de l'atome absorbant.

l : longueur de la flamme.

c : concentration de la solution en élément absorbant.

$\log_{10} I$ = l'absorbance ou densité optique

Le spectrophotomètre d'absorption atomique est muni de lampes à cathode creuse spécifiques de chacun des éléments à doser et réglé à une longueur d'onde optimale. Les résultats sont déterminés par comparaison des densités optiques des échantillons avec celles correspondant aux solutions étalons. Ces dernières sont préparées au moment de l'analyse.

3.2. Analyses microbiologiques

Les analyses microbiologiques ont pour objectif de faire le dénombrement des micro-organismes :

- d'intérêt hygiénique : FMAT, les coliformes fécaux et totaux ;
- d'intérêt technologique : les bactéries lactiques et les levures ;
- Potentiellement pathogène : les salmonelles, E.Coli, les staphylocoques et les moisissures.

Ces analyses ont été effectuées tout d'abord sur le fruit de cactus entier après broyage pour évaluer son biotope naturel, et puis sur l'ensilage pour évaluer sa qualité, et pour tracer le profil de développement bactérien pendant le processus de fermentation. Les résultats ont été exprimés comme unités formant colonies par gramme de MF (CFU/g).

Préparation de la solution mère

Une prise d'essai de 10 g d'échantillon frais est mélangée avec 90 ml d'eau physiologique stérile, le mélange est bien homogénéisé à l'aide d'un vortex, il servira de solution mère pour la préparation d'une série de dilutions pour les déterminations microbiologiques par la suite.

3.2.1. Bactéries lactiques

Le dénombrement des bactéries lactiques a été effectué sur le milieu Man Rogosa et Sharpe (MRS).

- Préparation du milieu de culture

- Mettre en suspension 70,3g du milieu déshydraté (BK089) dans 1 litre d'eau distillée ;
- Porter lentement le milieu à ébullition sous agitation constante et l'y maintenir pendant le temps nécessaire à sa dissolution complète ;
- Répartir en tube ou en flacons ;
- Stériliser à l'autoclave à 121°C pendant 15 minutes.

- Ensemencement

Avant de procéder à l'ensemencement, il faut refroidir le milieu de culture et le maintenir à 47°C.

- Transférer 1ml de la solution mère, préparée à base de l'échantillon à analyser et de l'eau physiologique, et ses dilutions décimales dans des boîtes de Pétri stériles ;
- Couler environ 15 ml du milieu de culture à 47 °C ;
- Homogénéiser parfaitement ;
- Laisser solidifier sur une surface froide ;
- Incuber les boîtes à 37°C pendant 72h.

- Lecture

Après incubation, seules les colonies rondes ou lenticulaires sont dénombrées.

3.2.2. Levures et moisissures

Le dénombrement des levures et des moisissures a été effectué sur le milieu agar de pomme de terre et dextrose (PDA).

- Préparation du milieu de culture

- Mettre en suspension 39g du milieu de culture dans 1 litre d'eau distillée ;
- Porter lentement à ébullition sous agitation jusqu'à dissolution complète du milieu ;
- Stériliser le milieu à l'autoclave à 121°C pendant 15 min.
-

- Ensemencement

- Couler 15 ml du milieu de culture dans des boîtes de Pétri stériles ;
- Laisser refroidir sur une surface froide ;
- Ajouter 1ml de la solution à analyser ;
- Incuber à 25°C pendant 5 jours.

- Lecture

Après 5 jours d'incubation, les colonies de levures et de moisissures ont été comptées, les colonies de levures sont rondes alors que les colonies de moisissures sont filamenteuses.

3.2.3. Flore mésophile aérobie totale

Le milieu utilisé pour le dénombrement de la FMAT est le milieu Plate Count Agar (PCA)

- Préparation du milieu

- Mettre en suspension 20,5g du milieu déshydraté (BK144) dans 1 litre d'eau distillée ;
- Porter à ébullition sous agitation, et laisser le temps nécessaire jusqu'à dissolution complète ;
- Stériliser à l'autoclave à 121°C pendant 15 min.

- Ensemencement

- Refroidir le milieu et maintenir à 47°C ;
- Transférer 1ml du mélange à analyser dans une boîte de Pétri stérile ;
- Couler environ 15 ml du milieu de culture ;
- Homogénéiser parfaitement ;
- Laisser solidifier sur une surface froide ;
- Incuber à 30°C pendant 72h.
-

3.2.4. Coliformes totaux et Fécaux

Le dénombrement des coliformes totaux et fécaux a été effectué sur gélose Desoxycholate Citrate Lactose (DCL).

- Préparation du milieu de culture

- Mettre en suspension 42,5 g de milieu déshydraté (BK065) dans 1 litre d'eau distillée ou déminéralisée ;
- Porter lentement le milieu à ébullition sous agitation constante et l'y maintenir durant le temps nécessaire à sa dissolution ;
- Ne pas autoclaver.

- Ensemencement

- Refroidir et maintenir le milieu à 44-47°C ;
- Transférer 1 ml de des dilutions décimales dans des boîtes de Pétri stériles ;
- Couler 12 ml de milieu ;
- Homogénéiser parfaitement ;
- Laisser solidifier sur une surface froide ;
- Couler à nouveau 4 ml de milieu, de façon à former une deuxième couche ;
- Laisser solidifier ;
- Incuber à 30°C pour les CT et à 44°C pour les CF pendant 24 heures.

Après incubation, seules les colonies rouges sont dénombrées.

3.2.5. Escherichia Coli

Les résultats positifs pour les coliformes totaux sont recherchés pour Escherichia coli. L'énumération des E.Coli a été déterminée sur milieu MacCONKEY (Oxoid).

- Préparation du milieu de culture

- Mettre en suspension 50,0 g de milieu déshydraté (BK050) dans 1 litre d'eau distillée ou déminéralisée ;
- Porter lentement le milieu à ébullition sous agitation constante et l'y maintenir durant le temps nécessaire à sa dissolution ;
- Répartir en tubes ou en flacons ;
- Stériliser à l'autoclave à 121°C pendant 15 minutes.

- Ensemencement

- Introduire à la pipette 1 ml d'un homogénat ou d'une dilution appropriée dans une boîte de Pétri stérile ;

- Ajoutez 15 ml du milieu refroidi à 45 50 °C ;
- mélanger doucement ;
- incuber à 44°C pendant 24 heures.

3.2.6. Staphylocoques

L'énumération a été réalisée sur milieu Baird Parker.

- Préparation du milieu de culture

- Mettre en suspension 54,9 g de milieu de base déshydraté (BK055) dans 900 ml d'eau distillée ou déminéralisée ;
- Porter à ébullition lentement, en agitant jusqu'à dissolution complète ;
- Répartir en flacons ;
- Stériliser à l'autoclave à 121°C pendant 15 minutes.

- Ensemencement

- Faire fondre le milieu de base pendant le minimum de temps nécessaire à sa reliquéfaction totale (s'il est préparé à l'avance) ;
- Refroidir et maintenir à 44-47°C ;
- Pour 120 ml de milieu de culture préparé, ajouter stérilement 6 mL de jaune d'œuf ;
- Agiter parfaitement, de façon à bien homogénéiser l'ensemble ;
- Transférer 1 ml de l'inoculum et de ses dilutions décimales dans des boîtes de Pétri stériles ;
- Couler 10 à 15 ml de milieu complet ;
- Homogénéiser parfaitement ;
- Laisser solidifier sur une surface froide ;
- Incuber à 37°C pendant 24 et 48 heures.
-

3.2.7. Salmonella

Le milieu de culture utilisé pour l'énumération des salmonelles était le milieu Salmonella-Shigella.

- Préparation du milieu de culture

- Homogénéiser la poudre contenue dans le flacon ;
- Mettre 56,7 grammes de milieu déshydraté dans un litre d'eau fraîchement distillée ;
- Chauffer lentement en agitant fréquemment, puis porter à ébullition jusqu'à dissolution complète ;
- Laisser refroidir à 45-50°C avant répartition ;
- Répartir en boîtes de Pétri ou en flacon ;
- Ne pas autoclaver.

- Ensemencement

- Ensemencer en stries à partir de l'échantillon à tester ;
- Incuber pendant 24-48 heures à 37°C.

Après 24 heures d'incubation, les colonies incolores, transparentes correspondent aux salmonelles.

3.3. Analyses statistiques

Toutes les analyses ont été réalisées au moins trois fois et les résultats sont présentés pour chaque échantillon sous forme de moyenne et d'écart-type. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel IBM SPSS V21. Le test ANOVA un facteur a été utilisé pour évaluer les différences entre les moyennes de chaque groupe.

Lorsque les mesures ont été effectuées sur le même échantillon à différents moments (avant et après ensilage), un modèle linéaire général (GLM) selon le modèle ANOVA à plan mixte a été utilisé. Les valeurs de $P < 0,05$ ont été considérées comme statistiquement significatif pour tous les tests statistiques.

La structure globale de la variabilité biochimique a été décrite par l'analyse en composantes principales (ACP) à l'aide du logiciel XLSTAT (2016).

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

- **Chapitre 1 : Caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des fruits du cactus**
 - **Chapitre 2 : Ensilage des pelures et des fruits de figuier de barbarie**
 - **Chapitre 3 : Enrichissement protéique des rebuts de figue de barbarie**
 - **Chapitre 4 : Ensilage des rejets de fruit cactus avec et sans ajout de mélasse**
-

**Chapitre 1 : Caractérisation chimique,
biochimique et microbiologique des rebuts de
cactus**

Introduction

Le premier chapitre de l'étude expérimentale porte sur l'étude des caractéristiques chimiques et biochimiques des différentes fractions du fruit de cactus (pelure, pulpe et graine) et des caractéristiques microbiologiques du fruit frais entier broyé. Pour présenter les résultats de ce chapitre nous commençons par une caractérisation chimique et biochimique de la pelure, de la pulpe et de la graine, ensuite nous effectuerons une caractérisation microbiologique du fruit entier après broyage, enfin nous réaliserons une comparaison des différentes fractions du fruit de cactus.

1. Composition chimique et biochimique de la pelure

La pelure du fruit mûr représente 33% à 55% du poids du fruit (Barbera et al., 1994 ; Inglese et al., 1995). Elle constitue le deuxième sous-produit généré par les diverses transformations industrielles de la figue de barbarie auquel il faudra s'intéresser (Habibi, 2004).

Les résultats obtenus (tableau 17) montrent que la pelure du fruit d'*Opuntia ficus indica* se caractérise par une forte teneur en eau (84,72%) et une faible valeur de matière sèche de 15,28%. Il est donc conseillé d'utiliser le cactus uniquement comme complément dans l'alimentation animale car il peut provoquer des diarrhées en raison du niveau d'eau associé (Arba, 2009). Elle a également une teneur élevée en sucres (31,19 % MS pour les sucres totaux et 23,63 % MS pour les sucres réducteurs) et en cendres (13,7 % MS). Les teneurs en fibres restent moyennes, elles sont respectivement de 11,72 ; 7,75 ; 1,25 ; 3,97 et 6,50 % MS pour les NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose, avec une forte teneur en cellulose qui atteint 60% et une faible teneur en lignine d'environ 10% de la fibre totale. Toutefois, sa teneur en protéines brutes reste faible (4,84 % MS) en comparaison avec d'autres sous-produits alimentaires tels que les tourteaux d'oléagineux (Chenost & Kayouli, 1997). Enfin, sa teneur en matières grasses est très faible (0,09 % MS).

En termes de composition minérale, les pelures sont riches en calcium (108,76 mg/100g), en potassium (25,97 mg/100g) et en magnésium (9,42 mg/100g).

Il ressort des résultats obtenus que les pelures de figues de barbarie sont principalement composées d'eau et de sucres, elles contiennent également, mais dans une moindre mesure des fibres et des protéines, ce qui est en accord avec les données fournies par Fadili, (2000).

Tableau 17: Composition chimique et biochimique de la pelure du cactus (n=12)

Paramètres	Rang	Moyenne	Ecart type
pH	6,78 – 6,88	6,83	0,02
Humidité %	83,25 – 86,50	84,80	1,18
MS %	13,5 – 16,75	15,20	1,18
Sucres totaux (% MS)	28,53 – 33,25	31,19	1,38
Sucres réducteurs (% MS)	21,82 – 27,15	23,63	1,46
Cendres (% MS)	12,9 – 16,05	13,70	0,9
MG (% MS)	0,028 – 0,131	0,09	0,028
Protéines brutes (% MS)	3,5 – 7,88	4,84	1,78
NDF (% MS)	9,7 – 15,97	11,72	0,91
ADF (% MS)	6,21 – 8,6	7,75	0,51
ADL (% MS)	0,95 – 1,56	1,25	0,16
Hémicellulose (% MS)	1,91 – 9,02	3,97	1,03
Cellulose (% MS)	4,93 – 7,45	6,50	0,54
Ca (mg/100g MF)	88,32 – 123,83	108,76	8,61
K (mg/100g MF)	21,04 – 31,55	25,97	2,34
Na (mg/100g MF)	0,97 – 1,79	1,4	0,21
Cu (mg/100g MF)	0,42 – 0,83	0,64	0,10
Mg (mg/100g MF)	7,26 – 10,99	9,42	0,80
Fe (mg/100g MF)	0,22 – 0,35	0,29	0,03

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, MG : matière grasse, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

2. Composition chimique et biochimique de la pulpe

La pulpe est la partie comestible du fruit, elle constitue 45 à 67 % du poids total du fruit et contient de nombreuses petites graines, variant de 100 à plus de 400 par fruit (Inglese, 2019).

Les résultats (tableau 18) montrent également que la pulpe du figuier de Barbarie est riche en sucres (42,17 % de MS pour les sucres totaux et 31,6 % de MS pour les sucres réducteurs) et aussi en éléments minéraux qui sont présents en quantités relativement importantes, notamment en potassium, calcium et magnésium, avec des valeurs respectives de 95,88 mg/100g, 12,73mg/100g et 18,60 mg/100g. Le fer et le cuivre existent à l'état de traces (1,51 mg/100g pour le fer et 0,43 mg/100g pour le cuivre), ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Stintzing et al., (2001) et Piga (2004).

Ces résultats ont également montré que la pulpe de figue de barbarie a un pH relativement élevé (environ 6,41) par rapport à celui d'autres fruits tels que l'orange, le citron et l'abricot. En effet, le pH de la pulpe est proche de la neutralité, la valeur mesurée est en accord avec les résultats

des travaux réalisés dans ce cadre (Sawaya et al., 1983; El Kossori et al., 1998; Inglese, 2019, Berat & Turker 2005). Ce pH neutre expose davantage ce type de fruit à des altérations microbiologiques.

Les résultats montrent une teneur moyenne en fibres qui est respectivement de 8,51 % MS ; 5,67 % MS, 1,45 % MS, 2,84 % MS et 4,22 % MS pour le NDF, l'ADF, l'ADF, la cellulose et l'hémicellulose, la même chose pour les protéines brutes 10,21 % MS.

Tableau 18: Composition chimique et biochimique de la pulpe du cactus (n=12)

Paramètres	Rang	Moyenne	Ecart type
pH	6,36 – 6,44	6,41	0,01
Humidité %	85,08 – 90,85	87,01	1,75
MS %	9,15 – 14,95	12,99	1,75
Sucres totaux (% MS)	39,43 – 45,29	42,17	1,04
Sucres réducteurs (% MS)	30,02 – 33,33	31,60	1,04
Cendres (% MS)	2,36 – 6,11	4,46	0,88
MG (% MS)	0,077 – 0,25	0,17	0,17
Protéines brutes (% MS)	9,63 – 10,5	10,21	0,43
NDF (% MS)	6,22 – 9,82	8,51	0,65
ADF (% MS)	4,38 – 7,67	5,67	0,74
ADL (% MS)	0,78 – 2,07	1,45	0,33
Hémicellulose (% MS)	1,39 – 5,21	2,84	0,88
Cellulose (% MS)	2,89 – 6,53	4,22	0,63
Ca (mg/100g MF)	9,81 – 15,42	12,73	1,52
K (mg/100g MF)	78,49 – 122,71	95,88	11,04
Na (mg/100g MF)	0,61 – 1,68	1,10	0,24
Cu (mg/100g MF)	0,30 – 0,56	0,43	0,06
Mg (mg/100g MF)	12,11 – 25,61	18,60	3,12
Fe (mg/100g MF)	0,08 – 0,18	1,51	0,03

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, MG : matière grasse, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

3. Composition chimique et biochimique de la graine

Les graines constituent 2% à 10% du poids total du fruit et elles représentent environ 15% de la partie comestible des fruits (Ramadan & Mörsel, 2003).

Les résultats d'analyses chimiques et biochimiques des graines sont présentés dans le tableau 19. La graine du fruit est une partie riche en matière grasse (8,91% de MS), ce qui justifie son utilisation dans l'extraction d'huile à usage alimentaire, pharmaceutique, médicale et cosmétique.

Cette partie du fruit apparaît également comme une fraction riche en fibres (78,18% MS pour la NDF, 62,99% MS pour l'ADF, 42,94% MS pour l'ADL, 15,20% MS pour la cellulose et 20,05% MS pour l'hémicellulose). Lorsque le fruit pelé entier est ingéré, la grande quantité de fibres insolubles dans la graine (El Kossori et al., 1998) est la principale source de fibres dans les fruits de cactus.

Elle est riche aussi en éléments minéraux avec une teneur importante en calcium, potassium, magnésium et sodium, soient respectivement 15,61 mg/100g, 114,89 mg/100g, 25,52 mg/100g, et 69,09 mg/100g. Le fer et le cuivre sont présents à l'état de traces (0,73mg/100g et 1,51mg/100g), ce qui est conforme aux résultats de Matthäus & Özcan, (2011).

La teneur en sucres totaux est relativement faible par rapport à celle des autres parties du fruit (8,18 % de sucres totaux et 6,26 % de sucres réducteurs).

La teneur moyenne en protéines est de 7,66 % de MS ce qui signifie que la graine de figue de barbarie peut constituer une source de protéines pour la consommation animale, ce qui est conforme aux résultats obtenus par Tlili et al., (2011).

Tableau 19: Composition chimique et biochimique de la graine du cactus (n=12)

Paramètres	Rang	Moyenne	Ecart type
Humidité%	12,45 – 17,07	14,6	1,46
MS %	82,93 – 87,55	85,4	1,46
Sucres totaux (%MS)	6,26 – 11,58	8,18	0,94
Sucres réducteurs (% MS)	5,19 – 7,34	6,26	0,54
Cendres (% MS)	1,55 – 2,43	1,99	1,99
MG (% MS)	6,24 – 11,42	8,91	1,29
Protéines Brutes (% MS)	7 – 7,88	7,66	0,39
NDF (% MS)	70,46 – 86,58	78,18	5,06
ADF (% MS)	53,75 -74,53	62,99	3,53
ADL (% MS)	39,05 – 51,34	42,94	2,7
Hémicellulose (% MS)	8,9 – 22,77	15,2	3,1
Cellulose (% MS)	2,41 – 30,84	20,05	4,26
Ca (mg/100g MF)	13,08 – 18,22	15,61	1,06
K (mg/100g MF)	89,16 – 136,02	114,89	11,46
Na (mg/100g MF)	57,14 – 87,24	69,09	6,49
Cu (mg/100g MF)	0,42 – 1,21	0,73	0,15
Mg (mg/100g MF)	17,37 – 32,41	25,52	3,51
Fe (mg/100g MF)	0,99 – 2,17	1,51	0,33

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, MG : matière grasse, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

4. Caractérisation microbiologique du fruit de cactus

Compte tenu de sa richesse en eau et en sucres ainsi que de son pH proche de la neutralité (6,84), le figuier de barbarie constitue une matrice idéale pour le développement des microorganismes, ce qui est prouvé par les résultats obtenus après analyse microbiologique (tableau 20). En effet, les résultats du dénombrement de la microflore endogène du figuier de barbarie montrent qu'il est fortement chargé en micro-organismes : Flore mésophile aérobie totale (37.10^8 UFC/g MF), levures (74.10^{14} UFC/g MF), champignons (3 UFC/g), bactéries lactiques (187.10^2 UFC/g MF) et coliformes (206.10^6 UFC/g MF).

Cette forte population de levures et de bactéries lactiques, présentes naturellement dans les figues de barbarie, montre que ces derniers constituent un substrat favorable à la croissance microbienne. On pourrait donc appliquer des traitements biologiques à ces résidus afin de les stabiliser ou d'améliorer leur valeur nutritionnelle.

La charge en coliformes des figues de barbarie est assez élevée. Le traitement biologique à appliquer à ces résidus doit être capable d'inhiber ces coliformes pour éviter tout risque d'intoxication des animaux.

Tableau 20: Caractérisation microbiologique des fruits de figue de barbarie

Log 10 UFC/g MF	Rang	Moyenne	Ecart type	UFC/g MF
FMAT	7,23 – 10,16	8,85	0,81	37.10^8
Levures	13,03 – 16,32	16,15	1,14	74.10^{14}
Champignons	-	0,47	-	3
Bactéries lactiques	2,61 – 4,91	3,83	0,55	187.10^2
Coliformes	6,34 – 9,09	6,95	0,68	206.10^6

UFC : Unité Formant Colonies, MF : Matière Fraiche, FMAT : Flore Mésophile Aérobie Totale

5. Comparaison des différentes fractions du fruit de cactus

5.1 Composition globale

L'analyse de la variance montre qu'il existe une différence significative entre les trois fractions de figue de barbarie ($P < 0,05$). Les composants les plus abondants dans la peau et la pulpe du figuier de barbarie sont les sucres, ils constituent plus de 40% MS de la pulpe et plus de 30% MS de la peau. Cette teneur peut constituer une bonne source d'énergie qui peut expliquer son utilisation potentielle dans l'alimentation animale. En effet, une étude menée en Ethiopie a montré que le remplacement de 50% de la paille de teff par du cactus augmentait le gain journalier moyen des agneaux de 23 à 53g par jour (Gebremariam et al., 2006). Salem et al.,

(2004) ont rapporté que le remplacement de l'orge par le cactus dans l'alimentation des agneaux augmentait le gain journalier moyen des agneaux de 108 à 119 g par jour.

La figure 23 montre que la peau, la pulpe et la graine contiennent des quantités significativement différentes ($P < 0,05$) de matière sèche, de cendres, de protéines brutes, de sucres réducteurs et de sucres totaux. En ce qui concerne la matière grasse, les contenus sont statistiquement identiques pour la peau et la pulpe, la graine étant la plus riche.

L'analyse en composante principale (ACP) (figure 24) montre que la peau est la plus riche en cendres, la pulpe est la plus riche en sucres réducteurs et totaux. La graine présente également la plus grande teneur de matière sèche et de matière grasse, ce qui permet de conclure qu'il s'agit d'une fraction non négligeable qui peut être utilisée comme source de fibres et d'éléments minéraux dans l'alimentation animale. La teneur en protéines est faible pour les trois fractions. Ce qui est également prouvé par El Kossori et al., (1998).

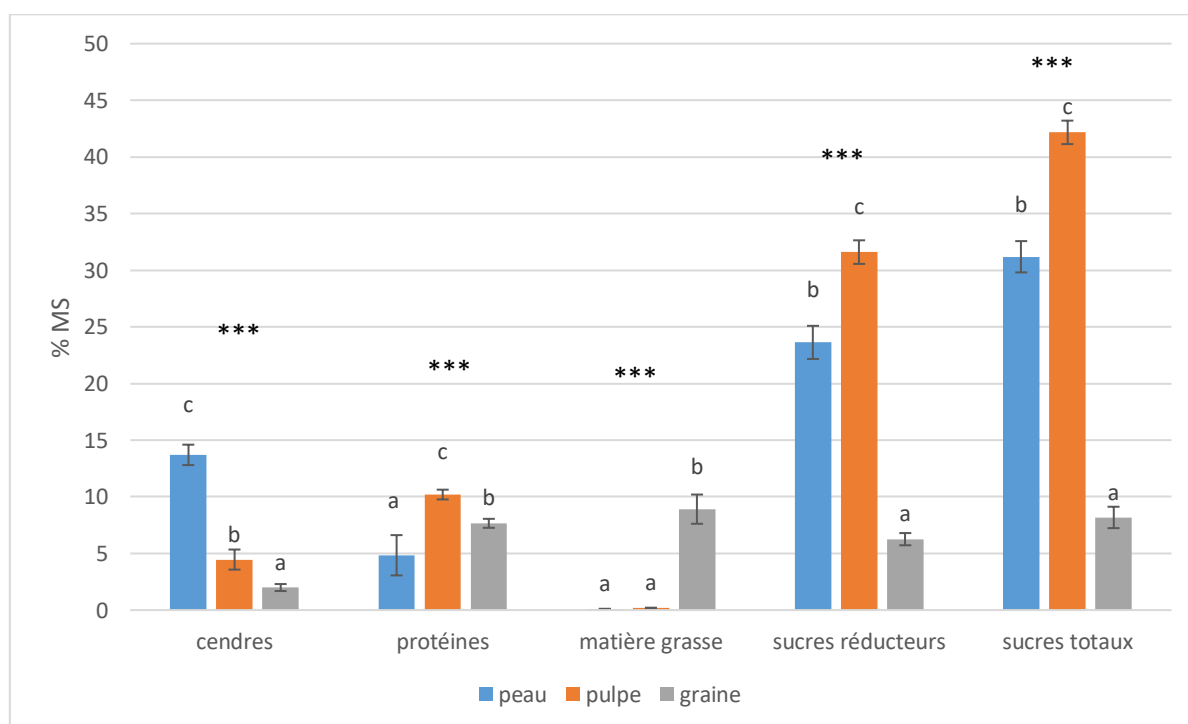


Figure 23: Teneur en cendres, protéines, matière grasse, sucres réducteurs et sucres totaux dans les différentes parties du fruit de cactus.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, *** différence très significative $P < 0,05$.

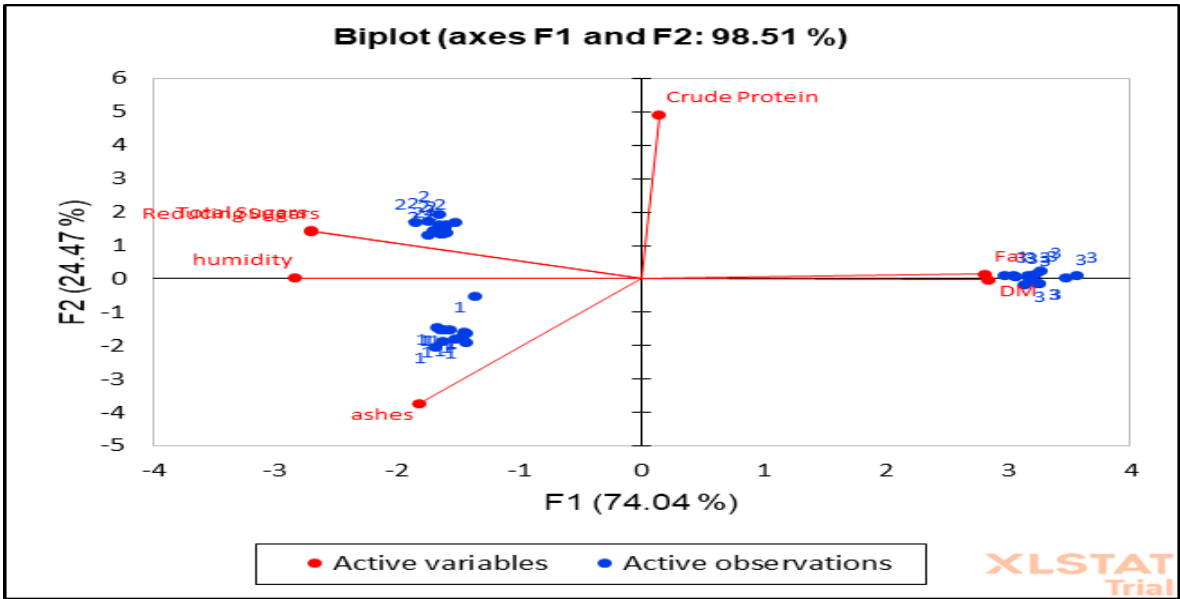


Figure 24: Représentation graphique des trois fractions de fruits dans le plan 1-2 d'une analyse en composantes principales basée sur la détermination biochimique (matière sèche, humidité, sucres réducteurs, sucres totaux, cendres et matière grasse).

Avec 1 : peau, 2 : pulpe et 3 : graine.

5.2 Teneur en fibres

Pour les fibres, la graine est la plus riche en NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose. Tandis que la pulpe et la peau ont des teneurs faibles et un niveau presque similaire de ces composants (figure 25 et 26).

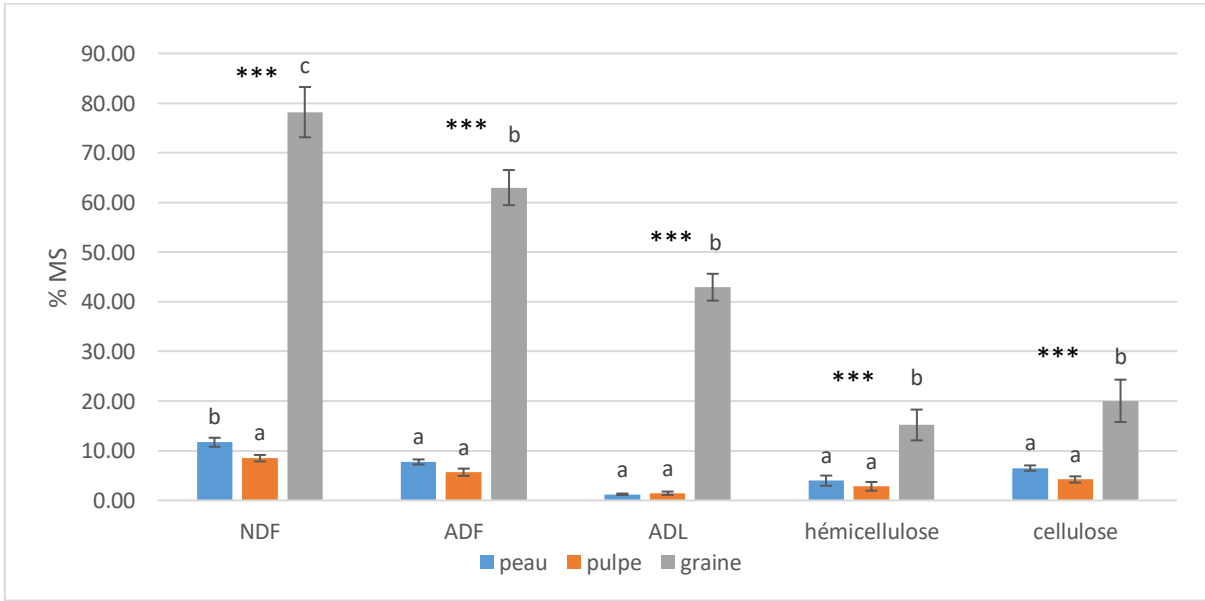


Figure 25: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les différentes parties du fruit de cactus.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, *** différence très significative P < 0,05.

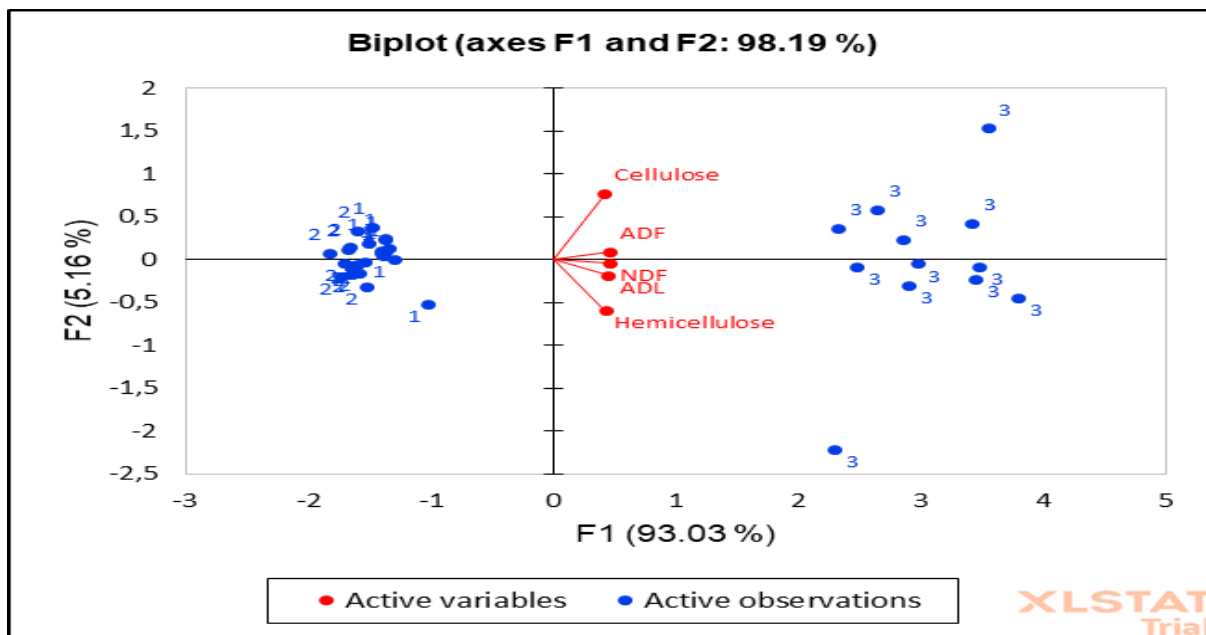


Figure 26: Représentation graphique des trois fractions du fruit dans le plan 1-2 d'une analyse en composantes principales effectuée à partir de la détermination des fibres (NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose).

Avec 1 : peau, 2 : pulpe et 3 : graine.

5.3 Teneur en éléments minéraux

En ce qui concerne les éléments minéraux, la pulpe est moins riche en éléments minéraux que les autres fractions, mais elle est plus riche en potassium et en magnésium que la peau. La peau du cactus est riche en calcium (figure 27), bien que McConn & Nakata, (2004) ont montré que sa biodisponibilité est faible en raison de sa présence sous forme d'oxalate de calcium, qui n'est pas absorbé. La peau est très riche en calcium, la graine en potassium, sodium et magnésium. Le fer et le cuivre sont présents à l'état de traces (figure 28).

Sawaya et al., (1983) et Matthäus & Özcan, (2011) ont étudié la composition des graines de cactus. Ils ont rapporté une teneur élevée en éléments minéraux dont le sodium (67,6 mg/100g), le potassium (163,0 mg/100g), ce qui est en accord avec les résultats trouvés et présentés dans la figure 22.

Les quantités de minéraux détectées dans les différentes fractions de figes de barbarie pourraient constituer un bon complément minéral pour les animaux.

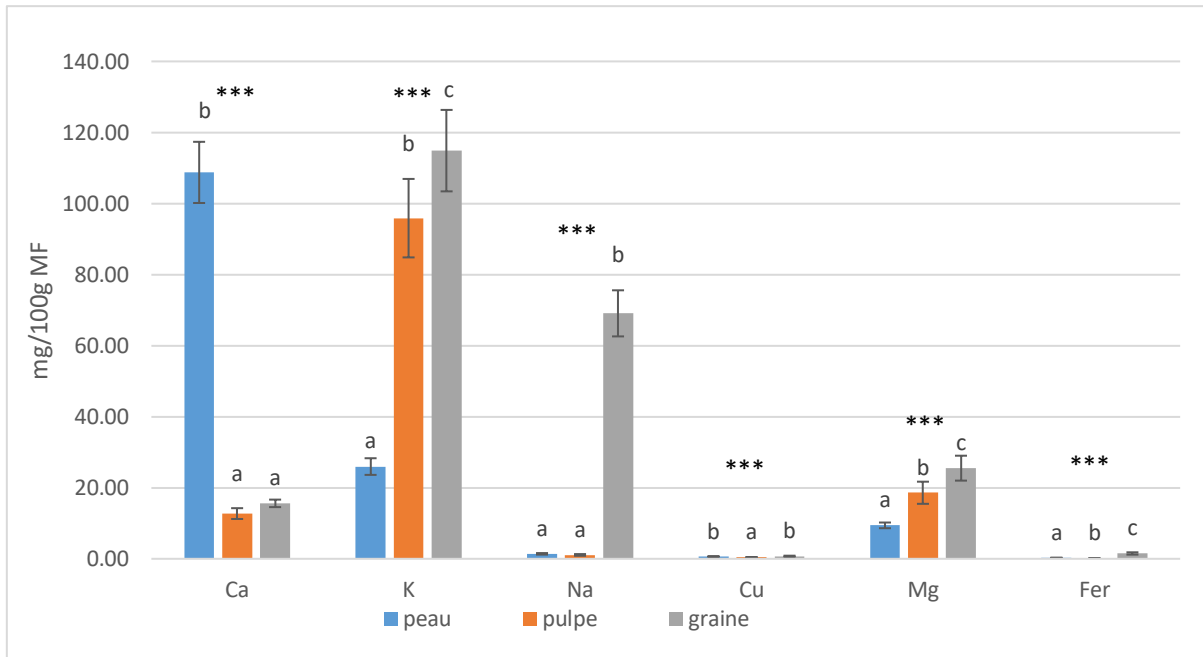


Figure 27: Teneur éléments minéraux Ca, K, Na, Cu, Mg et fer dans différentes parties du fruit du cactus.

(Les valeurs représentées par les colonnes ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %), *** différence très significative $P < 0,05$.

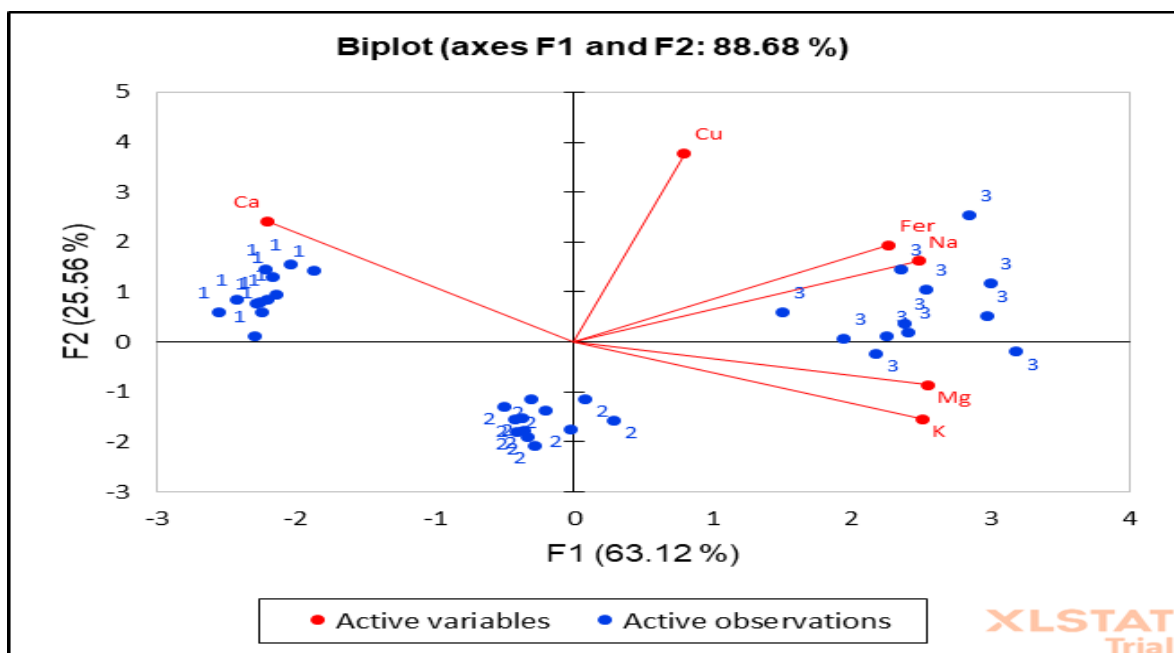


Figure 28: Représentation graphique des trois fractions du fruit dans le plan 1-2 d'une analyse en composantes principales effectuée à partir de la détermination des éléments minéraux (Ca, Cu, K, Mg et Fer).

Avec 1 : la peau, 2 : la pulpe et 3 : la graine.

Conclusion

À la lumière des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la peau des figues de barbarie a une faible teneur en protéines (4,84 %MS) et en matière grasse (0,09 %MS), une teneur moyenne en fibres (11,72 %MS), une teneur élevée en éléments minéraux (dans l'ordre calcium 108,76 mg/100g MF, potassium 25,97 mg/100g MF et magnésium 9,42 mg/100g MF) et en sucres (31,19 %MS). La pulpe est riche en sucres (42,17 % MS) et en éléments minéraux (dans l'ordre potassium 95,88 mg/100g MF, magnésium 18,60 mg/100g MF et calcium 12,73 mg/100g MF), elle a une teneur moyenne en fibres (8,51 %MS) et en protéines (10,21 % MS), une faible teneur en matière grasse (0,17 % MS). Quant aux graines, elles sont riches en matière grasse (8,91 % MS), en fibres (78,18 % MS) et en éléments minéraux (dans l'ordre potassium 114,89 mg/100g MF, sodium 69,09 mg/100g MF, magnésium 25,52 mg/100g MF et calcium 15,61 mg/100g MF), elles ont une teneur moyenne en protéines (7,66 % MS) et une faible teneur en sucres (8,18 % MS). Ainsi, les graines constituent une fraction non négligeable qui peut être utilisée comme source de fibres et d'éléments minéraux dans l'alimentation animale. De plus, les rebuts de fruit de cactus sont chargés en microorganismes utiles (bactéries lactiques : 187.10^2 UFC/g MF) mais aussi en micro-organismes pathogènes (coliformes : 206.10^6 UFC/g MF).

Les compositions des trois fractions (peau, pulpe et graine) varient mais restent complémentaires pour les utiliser en alimentation animale. Cependant cette richesse du fruit de cactus en nutriments, en eau et en micro-organismes l'expose fortement aux altérations microbiennes et par conséquent à la dégradation. Aussi, serait-il intéressant de mettre au point un procédé de stabilisation de ce produit, en l'occurrence la fermentation, afin de l'utiliser en alimentation animale.

Chapitre 2 : Ensilage des pelures et des fruits de figuier de barbarie

Introduction

L'objectif de ce chapitre était de valoriser les résidus de cactus, les fruits délaissés aux champs après collecte et les pelures générées par l'alimentation humaine et ramassées auprès des marchands ambulants, par ensilage en association avec la paille et le son de blé.

Pour présenter les résultats de cette étude nous commençons par une caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des mélanges initiaux, et des ensilages, puis une étude cinétique de l'ensilage, enfin une caractérisation microbiologique des mélanges initiaux et des produits de l'ensilage.

1. Composition chimique et biochimique des mélanges initiaux

Les mélanges utilisés dans les essais sont :

- **Mélange à base de fruits de cactus** : composé de 70% de fruits de cactus, 15% de son de blé et de 15% de paille de blé,

- **Mélange à base de pelures de cactus** : composé de 70% de pelures de cactus, 15% de son de blé et de 15% de paille de blé,

Les résultats d'analyse des mélanges initiaux, avant ensilage, montrent que leur composition est influencée tout d'abord par la nature de l'ingrédient de base (fruit ou écorce) et par l'ajout de paille et de son de blé (figure 29,30 et 31). La paille se caractérise par une teneur en fibres très élevée, avec un haut taux de lignification de la cellulose/hémicellulose, une teneur en sucres solubles et en protéines très faible (Kulikova et al., 1986). Cependant, la paille est un aliment qui présente un certain intérêt : elle stimule la mastication, ralentit également les fermentations, ce qui permet de lutter contre l'acidose du rumen lors d'administration de rations très riches en glucides fermentescibles (Kulikova et al., 1986). L'association du fruit de cactus avec des aliments fibreux (paille et son de blé) est un facteur déterminant pour le fonctionnement normal d'activités telles que la rumination et la sécrétion salivaire (Kulikova et al., 1986). Selon Todaro et al. (2020), l'ajout de paille aux ensilages de cactus peut garantir la préservation des glucides solubles et des protéines, ce qui est dû essentiellement à la réduction potentielle des pertes dues au lixiviat (effluents).

Les valeurs de matière sèche trouvées dans les deux types de mélanges sont statistiquement identiques ($P > 0,05$) (annexe 2) et sont similaires à celles recommandées par McDonald et al., (1991), qui rapportent des teneurs de MS entre 30 et 35% pour l'élaboration d'ensilages de

bonne qualité. Les valeurs du pH initial des deux mélanges sont aussi statistiquement identiques ($P > 0,05$). Selon McDonald et al. (1991), une teneur importante d'humidité et des niveaux faibles de glucides solubles, influencent le processus de fermentation en évitant la baisse rapide du pH et en favorisant par la suite l'apparition de fermentations secondaires indésirables. Ces conditions favorisent le développement des bactéries hétéro-fermentaires, ce qui va influencer négativement la baisse du pH du milieu (Borreani et al., 2018). En outre, cette forte activité de l'eau favorise le développement de bactéries du genre Clostridium, responsables de la réduction de la valeur nutritionnelle, ce qui entraîne la production d'un ensilage de mauvaise qualité, voire des pertes de nutriments, en raison de l'effluent produit en grande quantité (Wang et al., 2019).

Le mélange à base de fruits est plus riche en sucres ($P < 0,05$) (19,22 % MS pour les sucres totaux et 11,46 % MS pour les sucres réducteurs), en protéines ($P < 0,05$) (10,50 % MS) alors que celui à base de pelures est plus riche en cendres ($P < 0,05$) (11,17 % MS) (figure 29). La différence au niveau de la teneur en sucres et en protéines est directement liée aux caractéristiques nutritionnelles de la pulpe, dont la composition chimique indique une teneur plus élevée en sucres et en protéines par rapport à l'écorce de cactus (chapitre 1, tableau 2).

On remarque que les teneurs en fibres notamment les NDF sont plus importantes dans le premier mélange (fruits) ($P < 0,05$) ce qui peut être liées à la présence très élevée de graines, qui caractérise ce fruit, et qui contribue à augmenter son contenu en lignine (6,99 % MS pour le mélange à base de fruit et 4,26 % MS pour le mélange à base d'écorces) (figure 30).

En termes de composition minérale le mélange à base de fruits est plus riche en Fe, Mg et en K alors que celui à base de pelures est plus riche en calcium ($P < 0,05$). Les teneurs en Cu et en Na étaient statistiquement identiques pour les deux mélanges (figure 31). Ces résultats sont conformes aux résultats de Sawaya et al. (1983); Feugang et al. (2006) et Contreras-Padilla et al. (2011).

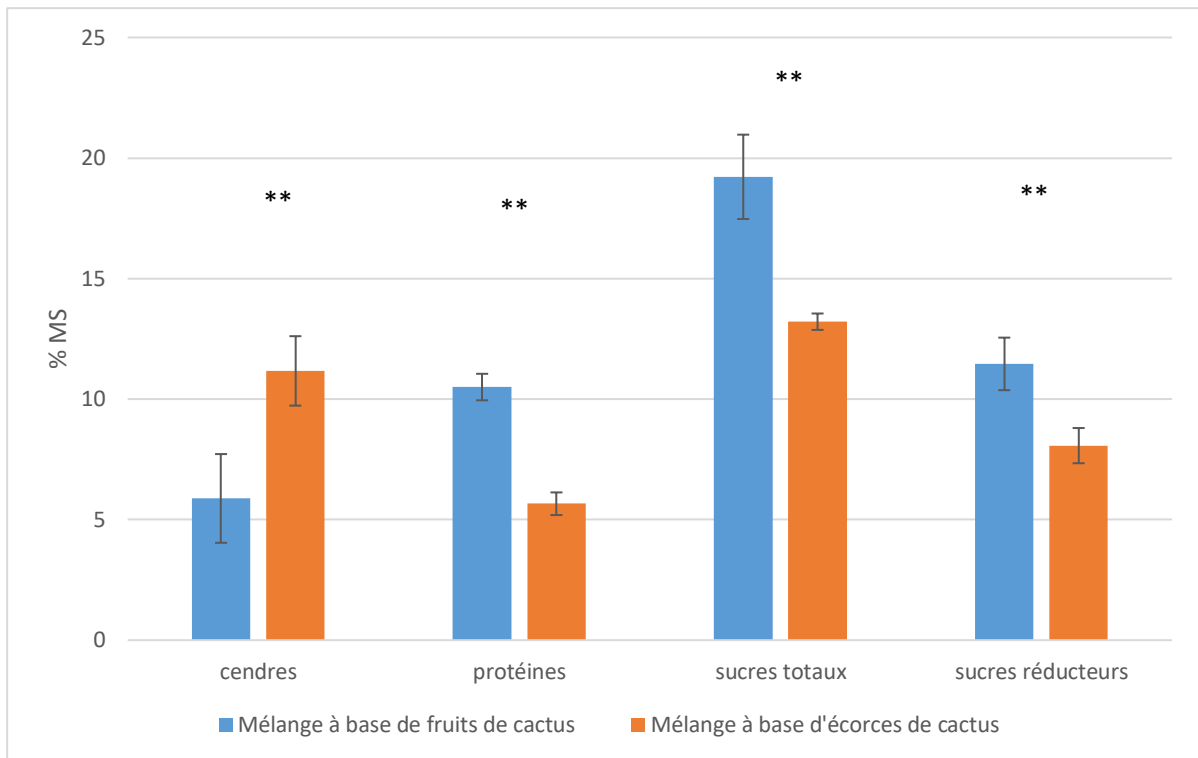


Figure 29: Teneur en cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs dans le mélange à base de fruits et le mélange à base d'écorces.

** différence significative à $P < 0,05$.

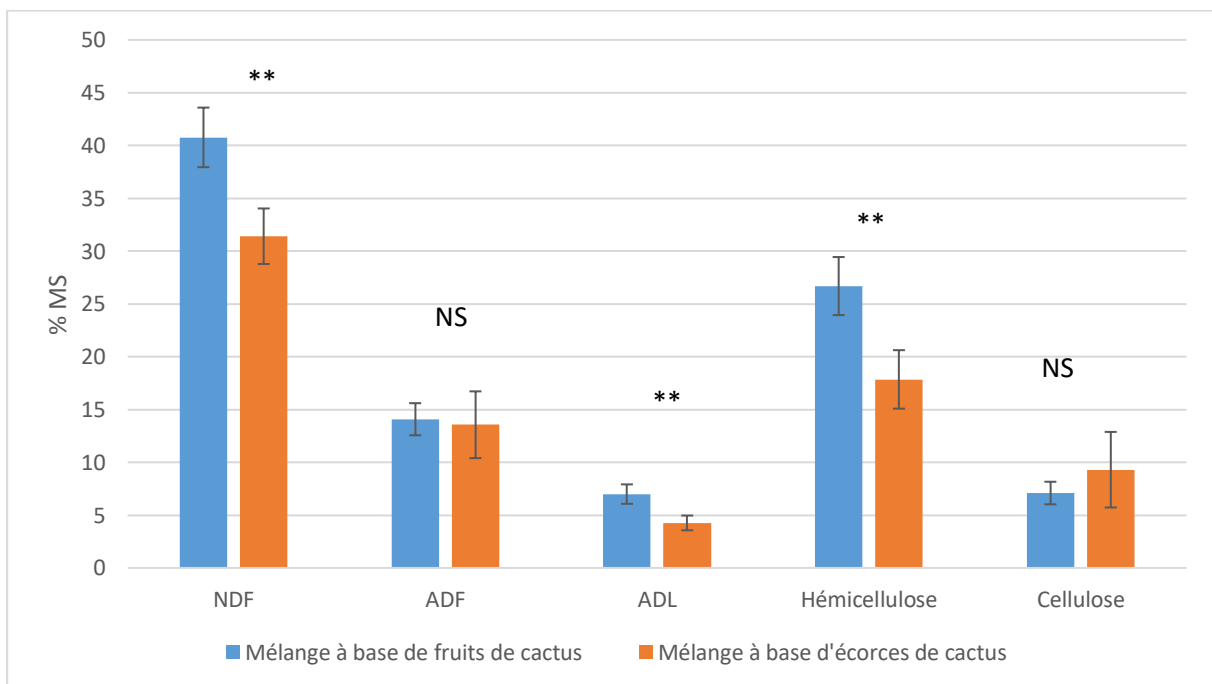


Figure 30: Teneur en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans le mélange à base de fruits et le mélange à base d'écorces.

** différence significative à $P < 0,05$, NS : Différence non significative.

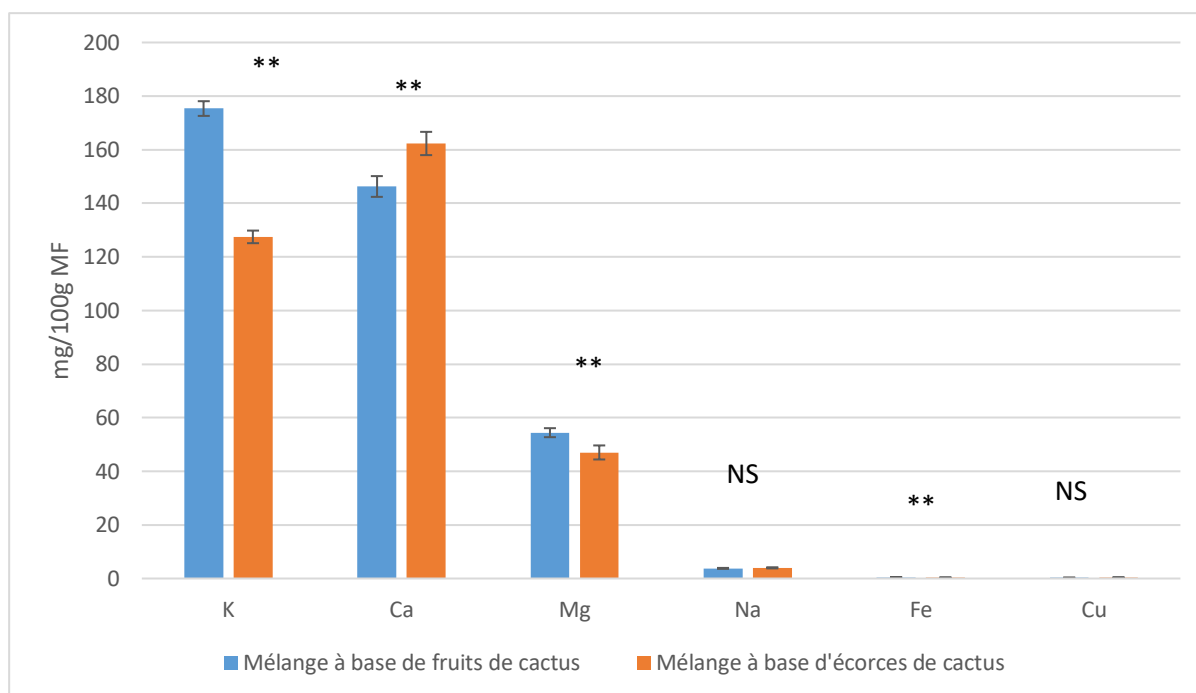


Figure 31: Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans le mélange à base de fruits et le mélange à base d'écorces.

** différence significative à $P < 0,05$, NS : Différence non significative.

2. Composition chimique et biochimique des mélanges après ensilage

Les caractéristiques des mélanges à base de fruits et de pelures après 30 jours d'ensilage sont présentées dans l'annexe 3. Les résultats indiquent que les deux ensilages ont atteint des pH de stabilité, passant de 6,35 à 4,21 pour l'ensilage des fruits et de 6,71 à 4,46 pour l'ensilage des pelures, mais l'ensilage des fruits a montré un pH significativement plus faible (4,21), ce qui indique une meilleure conservation. Cela peut s'expliquer par sa teneur initiale en sucre plus élevée. Les valeurs de pH de 3,8 à 5,0 dans les ensilages indiquent la prédominance des bactéries lactiques et, par conséquent, l'accumulation d'acides lactiques qui inhibe les micro-organismes indésirables et favorise le processus de conservation (Miranda-Romero et al., 2018).

On remarque aussi une légère augmentation de la teneur en matière sèche pour les deux ensilages soit des valeurs plus faibles en humidité (annexe 3). L'augmentation de la teneur en matière sèche est due essentiellement à la libération de liquides de fermentation (respiration, activité enzymatique, développement de micro-organismes). Les teneurs en matière sèche étaient similaires à celles de Salem & Nefzaoui, (2002).

Pendant le processus de fermentation, presque la moitié des protéines a été dégradée pour les deux ensilages. La teneur en protéines brutes est passée de 10,50 % MS à 5,54 % MS pour

l'ensilage des fruits et de 5,66 % MS à 1,73 % MS pour l'ensilage des écorces. Les valeurs obtenues par Cürek & Özen, (2004) et Pereira et al., (2021) pour les protéines brutes des ensilages ont été inférieures aux résultats que nous avons trouvés. Par ailleurs, les deux ensilages ont montré des valeurs inférieures aux recommandations indiquées par le NRC (2007), qui sont 13 % MS de protéines brutes pour un gain de 200g de poids par jours pour les agneaux.

On note également une diminution importante au niveau du taux des sucres (passant d'une valeur moyenne de 19,22 % MS à une valeur de 10,91 % MS pour les fruits et de 13,21 % MS à 7,69 % MS pour les écorces) (figure 32).

On note aussi une diminution des taux de cendres (passant de 5,88 % MS à 2,39 % MS pour l'ensilage des fruits et de 11,17 % MS à 3,96 % MS pour l'ensilage des écorces) en raison de leur solubilité dans l'eau et perte avec les effluents (figure 32). Les deux mélanges présentent des teneurs en éléments minéraux importantes ce qui va constituer un bon complément minéral pour les animaux. Les ensilages sont influencés par les teneurs initiales de fruits et d'écorces comme le montrent les résultats. L'ensilage à base d'écorces est plus riche en calcium (128,79 mg/100g MF contre 113,89 mg/100g MF dans l'ensilage de fruits). Alors que l'ensilage à base de fruits est plus riche en potassium (129,26 mg/100g MF contre 95,70 mg/100g MF dans l'ensilage d'écorces). Les teneurs en sodium et en magnésium étaient statistiquement identiques (pour le sodium les valeurs étaient de 2,12 mg/100g MF pour l'ensilage des fruits contre 2,38 mg/100g MF pour l'ensilage des écorces alors que pour le magnésium les valeurs étaient de 31,99 mg/100g MF pour l'ensilage des fruits et 28,11 mg/100g MF pour l'ensilage des écorces) (figure 34). Le fer et le cuivre existent à l'état de trace. Dans ce contexte Stintzing et al. (2001) et Piga, (2004) rapportent que le cactus est riche en calcium et en magnésium, le fer et le cuivre se trouvent dans la fourchette normale des autres fruits.

Au cours de l'ensilage, la plupart des composants ont présenté des modifications significatives. Dans l'ensemble, une augmentation des teneurs de fibres (figure 33), une baisse des teneurs en protéines (protéolyse) et des sucres due principalement à l'activité des micro-organismes notamment les bactéries lactiques responsables de la fermentation des sucres.

De plus, l'ensilage des fruits a montré de meilleurs paramètres nutritionnels (quantité plus importante de protéines brutes soit 5,54 % MS). La teneur en protéines brutes et en sucres était plus faible dans l'ensilage d'écorces.

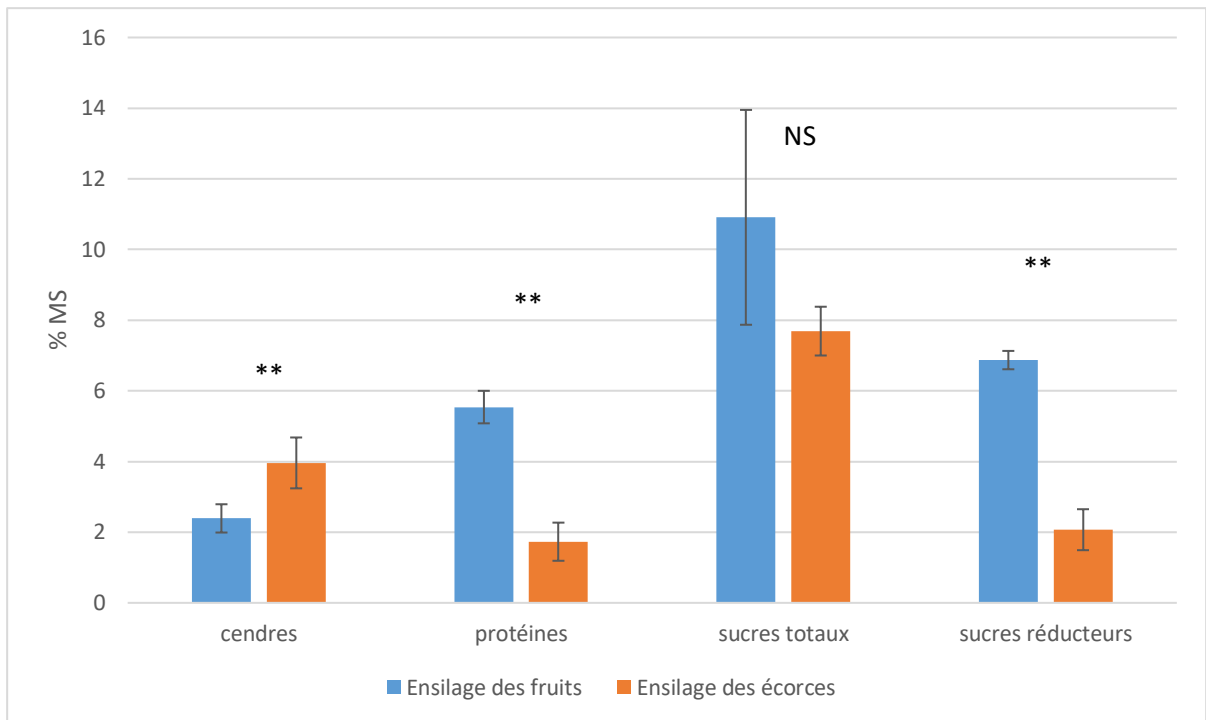


Figure 32: Teneur en cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs dans les deux ensilages.

** différence significative à $P < 0,05$, NS : Différence non significative.

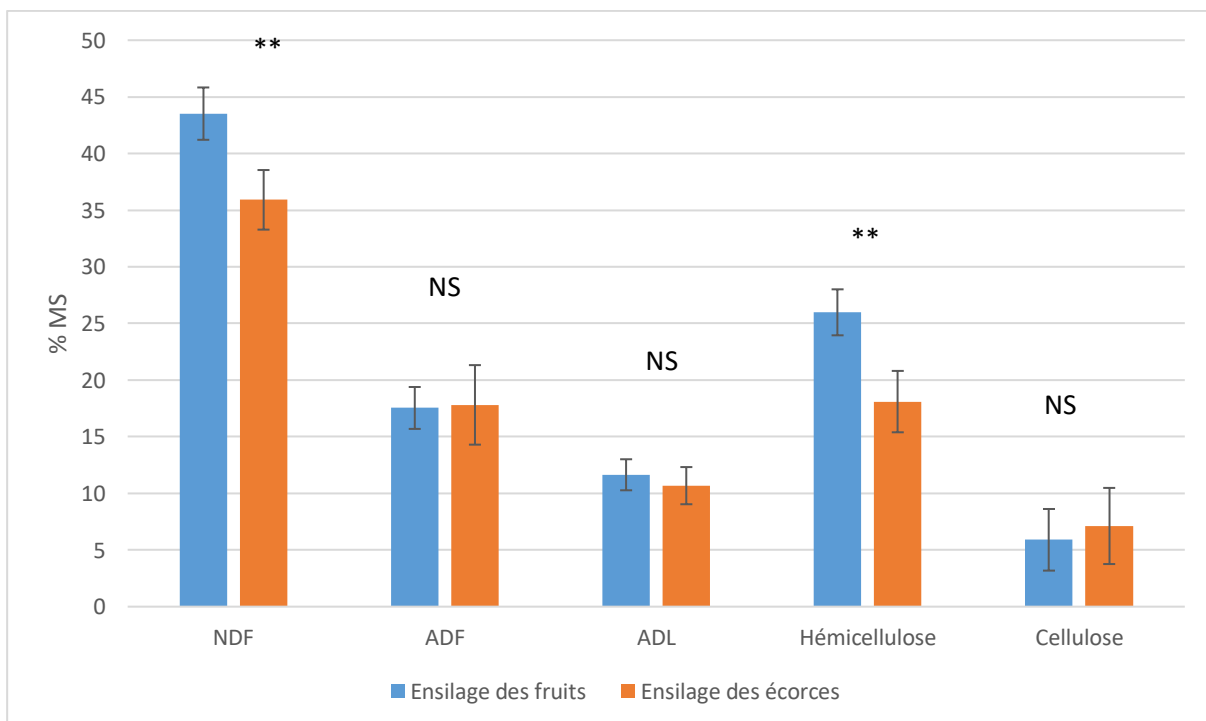


Figure 33: Teneur en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les deux ensilages.

** différence significative à $P < 0,05$, NS : Différence non significative.

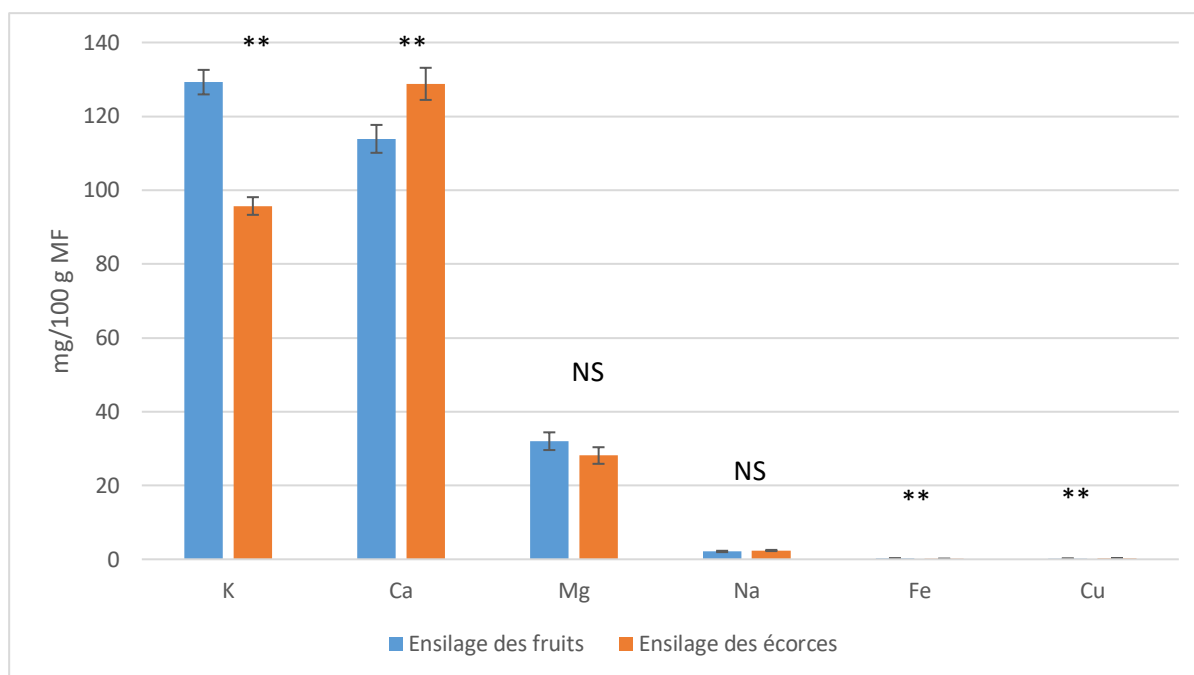


Figure 34: Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les deux ensilages.

** différence significative à $P < 0,05$, NS : Différence non significative.

3. Etude cinétique de l'ensilage

3.1 Evolution du pH au cours de l'ensilage

Les valeurs de pH sont souvent utilisées pour évaluer les qualités des ensilages. McDonald et al. (1991), Pettersson, (1988) et Yang et al. (2004) rapportent que des valeurs de pH inférieures à 4,5 sont considérées comme bonnes et que l'ensilage est bien conservé.

Dans les essais réalisés, le pH est passé de 6,35 à 4,55 pour l'ensilage à base de fruits et de 6,71 à 4,71 pour l'ensilage des écorces entre le premier et le cinquième jour de fermentation. Pour le reste de la période d'ensilage, la diminution du pH a été relativement lente, en effet le pH est passé de 4,55 à 4,21 pour l'ensilage à base de fruits et de 4,71 à 4,46 pour celui à base d'écorces entre le 5^{ème} et le 30^{ème} jour de fermentation (figure 35).

On remarque que l'ensilage à base de fruits a un pH final plus faible que celui de l'ensilage à base d'écorces, ce qui est en relation avec sa teneur initiale élevée en sucres. Ces derniers ont favorisé le développement des bactéries lactiques et ont induit une baisse importante du pH en comparaison avec l'ensilage à base d'écorces.

On peut conclure que les deux ensilages sont de bonne qualité et présentent une fermentation adéquate, puisqu'ils ont atteint des valeurs inférieures à 4,5 (McDonald et al. 1991, Pettersson, 1988, et Yang et al. 2004).

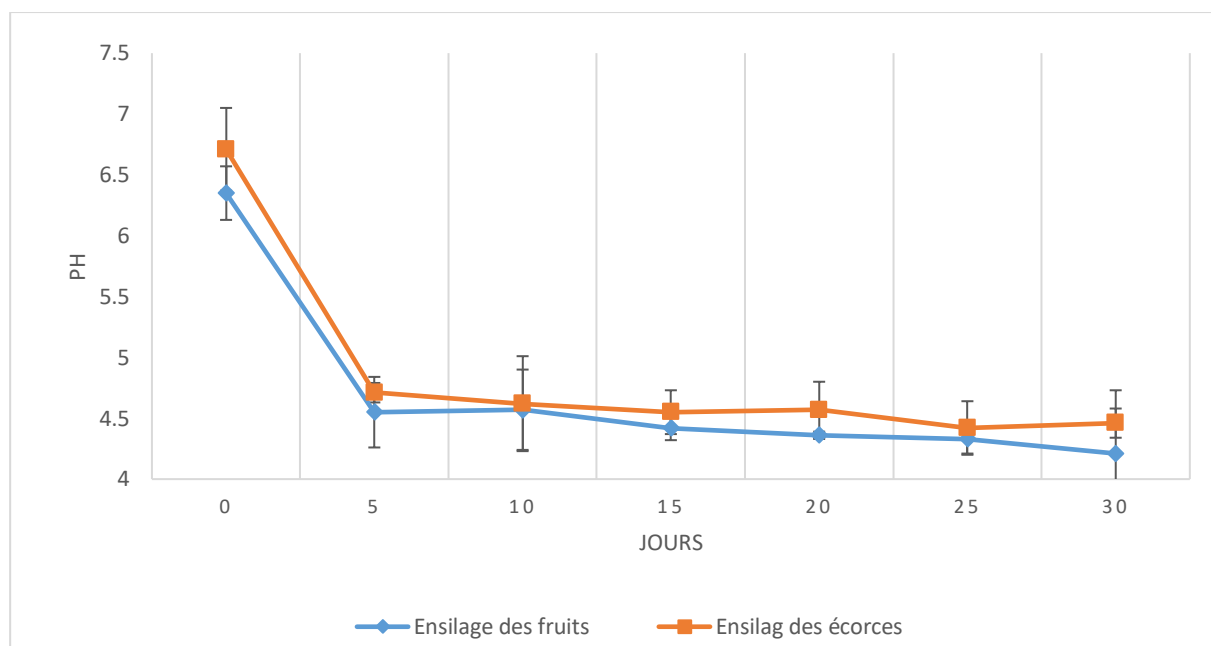


Figure 35: Evolution du pH pendant le processus d'ensilage.

3.2 Cinétique de dégradation des sucres au cours de l'ensilage

L'ensilage à base de fruits de cactus présentait des teneurs en sucres (totaux et réducteurs) plus élevées que celui à base d'écorces (figure 36 et 37). Cette différence est due essentiellement aux sucres contenus dans la pulpe de cactus. On remarque que les sucres ont été fortement dégradés au cours des cinq premiers jours pour les deux ensilages. Après cette diminution, la dégradation s'est poursuivie mais plus lentement pour le reste du temps d'ensilage (du 5^{ème} au 30^{ème} jour). Selon McDonald et al. (1991), les sucres facilement disponibles dans le milieu sont principalement consommés par la respiration des plantes et les bactéries aérobies. En effet, ils permettent aux bactéries lactiques de se développer rapidement et de produire l'acide lactique ce qui rend l'ensilage acide dans les premiers jours de fermentation (Driehuis et al., 2001). Ces conditions acides d'ensilage favorisent l'hydrolyse des sucres ce qui contribue d'avantage à la diminution de la teneur en sucres durant l'ensilage (Dewar et al. 1963 et Yang et al. 2017). Nos résultats sont conformes à d'autres études (Rooke & Kafilzadeh, 1994; Nishino & Uchida, 1999 et Shao et al., 2002) qui ont constaté le même phénomène de dégradation des sucres pendant les premiers jours d'ensilage.

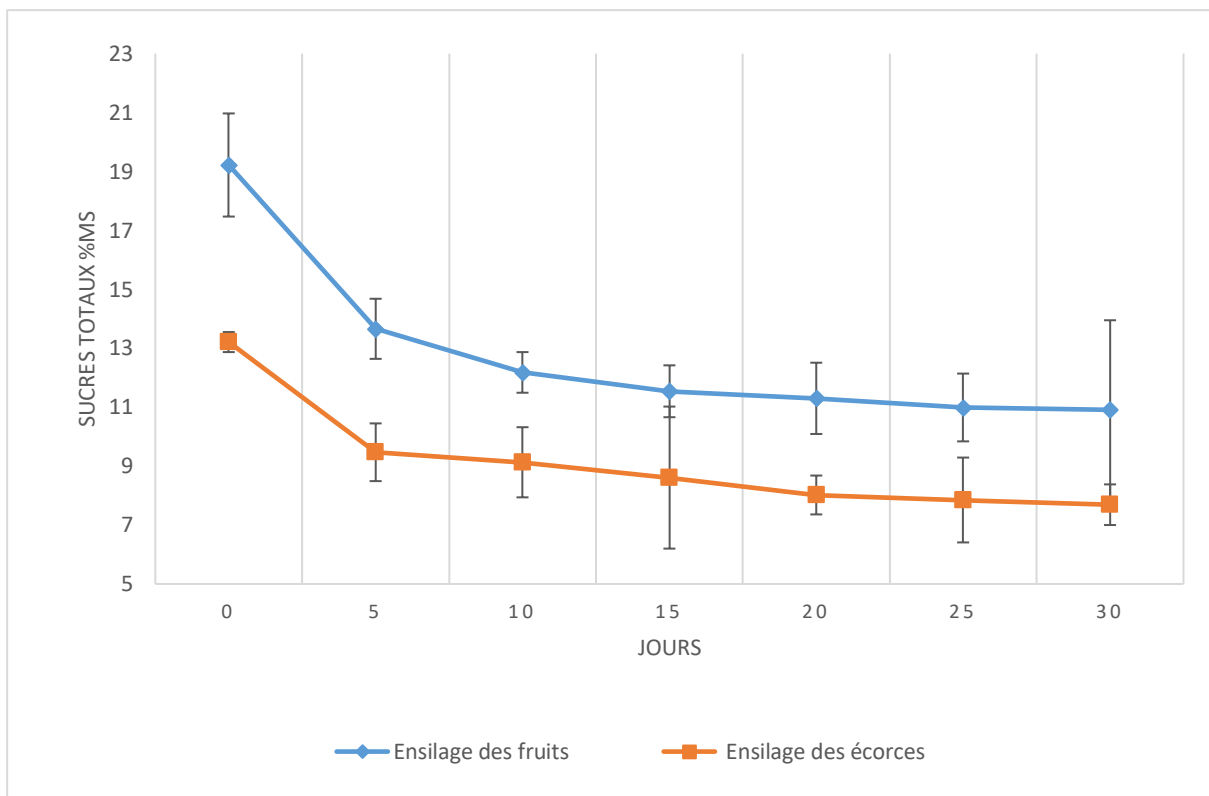


Figure 36: Evolution de la teneur en sucres totaux au cours de l'ensilage.

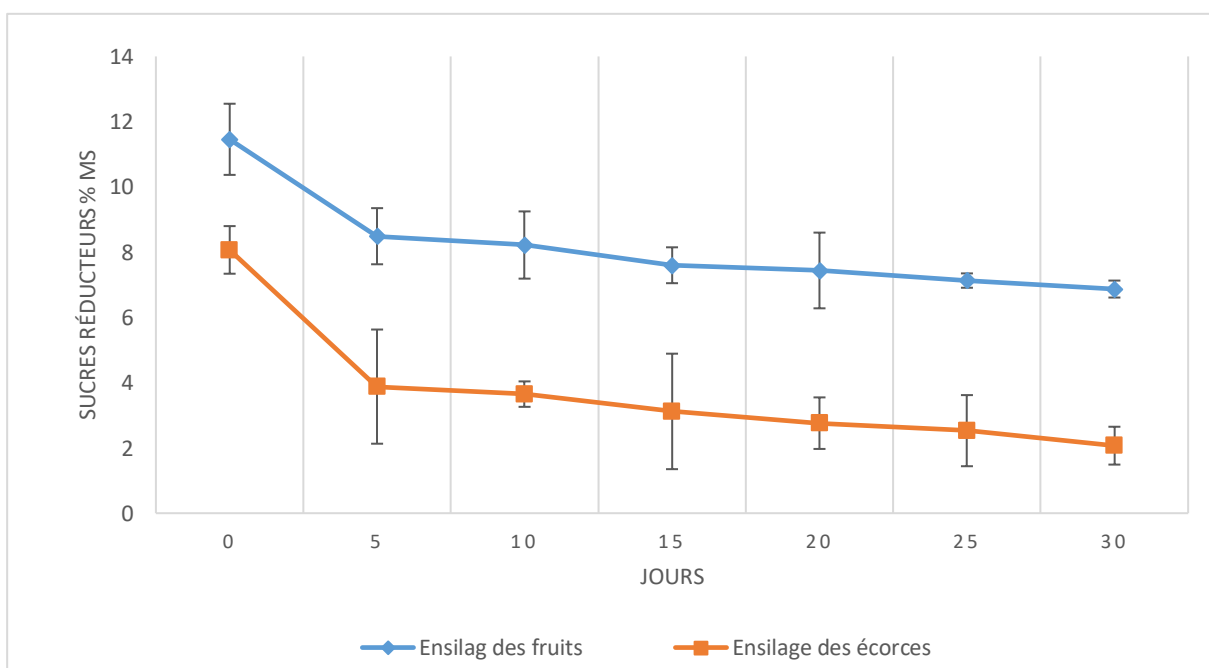


Figure 37: Evolution de la teneur en sucres réducteurs au cours de l'ensilage.

3. 3. Cinétique de dégradation des protéines au cours de l'ensilage

Lorsqu'une culture fourragère est ensilée, il se produit une hydrolyse importante des protéines, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en azote non protéique soluble dans l'ensilage (Ohshima & McDonald, 1978). L'efficacité de l'utilisation de l'azote par les ruminants nourris avec un ensilage à forte teneur en azote non protéique est faible (Wilkinson et al., 1976 et Buchanan-Smith & Yao, 1978). De plus, la production de grandes quantités d'azote non protéique affecte la fermentation puisque les acides aminés, les amines et l'ammoniac contrecarrent la chute rapide souhaitée du pH de l'ensilage (Voss, 1966).

On remarque une chute importante des taux de protéines dans les deux ensilages pendant les cinq premiers jours de fermentation (les valeurs ont passé de 10,50 % MS à 6,25 % MS pour l'ensilage à base de fruits et de 5,66 % MS à 2,50 % MS pour l'ensilage à base d'écorces). Après cinq jours d'ensilage, les dégradations de ces fractions sont devenues relativement lentes par rapport aux premiers jours. En effet, cette teneur est passée de 6,25 % MS à 5,54 % MS pour l'ensilage de fruits et de 2,50 % MS à 1,73 % MS pour l'ensilage des écorces, du 5^{ème} au 30^{ème} jour (figure 38). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Davies et al. (1998) et Carpintero et al. (1979) sur l'ensilage de l'herbe, et Vagnoni & Broderick, (1997) sur l'ensilage de la luzerne.

Dans ce contexte McDonald et al. (1991) rapportent que la protéolyse rapide commence sous l'action des protéases végétales et qu'après l'ensilage, la protéolyse se poursuit et la teneur en protéines peut chuter. Une étude avec des herbes exemptes de microbes (Kemble, 1956) a montré que la majeure partie de l'activité protéolytique initiale dans le processus d'ensilage est également due à des protéases végétales.

Cette évolution (figure 33) était similaire à celle de Muck, (1987) et Fairbairn et al., (1988), qui expliquent ce phénomène par la dégradation des peptides par les micro-organismes. D'autres chercheurs ont rapporté des résultats similaires en utilisant des plantes entières de maïs (Bergen et al., 1974) et d'herbe (McDonald & Edwards, 1976).

Les principaux produits résultant de la protéolyse pendant l'ensilage sont les acides aminés et l'ammoniac, leur proportion relative dépendant de l'importance de la dégradation ultérieure des acides aminés. La dégradation des acides aminés est principalement due à des actions microbiennes. Les bactéries lactiques ont généralement une capacité limitée à fermenter les acides aminés et il semble que seules la sérine et l'arginine soient fermentées (Sneath et al.,

1986). Kunji et al. (1996) ont constaté qu'une teneur plus élevée en acide lactique pouvait également être accompagnée d'une activité amino-peptidase plus élevée.

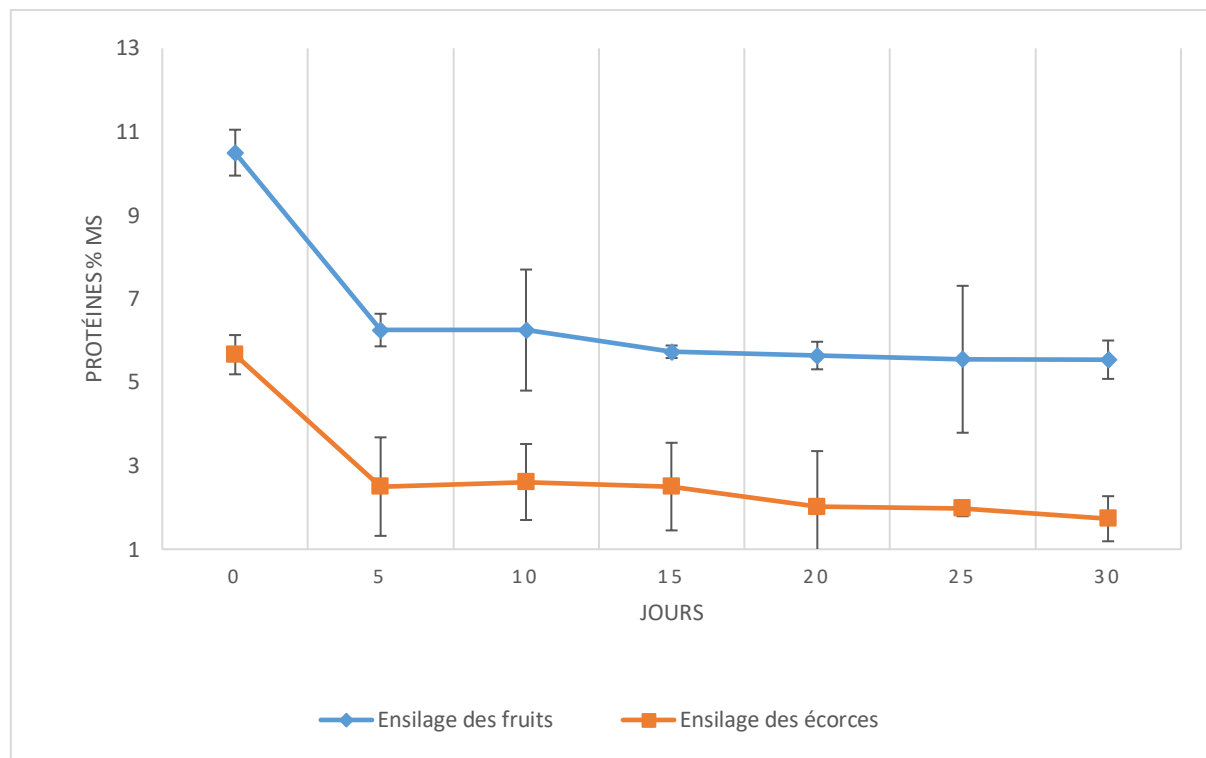


Figure 38: Evolution de la teneur en protéines brutes au cours de l'ensilage.

4. Caractérisation microbiologique des mélanges et des produits de l'ensilage

Les résultats de caractérisation microbiologique des mélanges initiaux et des ensilages sont présentés dans le tableau 21.

De point de vue microbiologique, les résultats ont montré une charge initiale importante en microorganismes pour les deux mélanges, en l'occurrence une charge moyenne de départ de bactéries lactiques (3,13 log UFC/g MF pour le mélange à base de fruits et 2,51 log UFC/g MF pour le mélange à base d'écorces) ce qui est bénéfique pour la réussite de l'ensilage. Notant bien que le mélange à base de fruit était plus chargé en bactéries lactiques en comparaison avec celui à base d'écorces ($P < 0,05$).

Les charges en levures, en flore mésophile aérobie totale (FMAT) et en coliformes totaux (CT) étaient également importantes soient respectivement, pour le mélange à base de fruits (10,90 log UFC/g MF, 5,91 log UFC/g MF et 6,39 log UFC/g MF) et pour le mélange à base d'écorces (10,78 log UFC/g MF, 6,72 log UFC/g MF et 7,16 log UFC/g MF).

Les deux mélanges sont dépourvus de microorganismes potentiellement pathogènes : les coliformes fécaux, les salmonelles, *E. coli* et les staphylococcus ce qui peut garantir la sécurité des animaux alimentés par cet ensilage.

Après ensilage, on remarque que le nombre de bactéries lactiques a augmenté, passant de 3,13 à 4,90 log UFC/g MF pour l'ensilage à base de fruits et de 2,51 log UFC/g MF à 4,42 log UFC/g MF pour l'ensilage à base d'écorces. Le nombre de bactéries lactiques est directement lié aux concentrations de sucres solubles présents dans le cactus, favorisant une augmentation de la teneur en acide lactique par rapport aux autres acides, provoquant une baisse du pH de la masse ensilée. L'acide lactique est le principal responsable de l'acidification du milieu parce qu'il est plus fort que les autres acides de l'ensilage. En effet, il a une constante de dissociation plus élevée que les autres acides (K_a de 3,86), ce qui lui permet de libérer une quantité importante d'ions hydrogène dans le milieu (Silva et al., 2017).

La diminution de la teneur en sucre et de la valeur du pH dans les mélanges à base d'écorces et de fruits pendant le processus d'ensilage semble être liée au développement des microorganismes actifs dans la fermentation du sucre. En effet cette relation a été confirmée par l'évolution des bactéries lactiques, responsables du processus de fermentation, qui ont augmenté leurs charges vers la fin de l'ensilage.

Le nombre de levure a été réduit à moitié après ensilage passant de 10,90 log UFC/g MF à 5,17 log UFC/g MF pour l'ensilage des fruits et de 10,78 log UFC/g MF à 5,62 log UFC/g MF pour l'ensilage des écorces. L'analyse statistique a montré que la charge en levures dans les deux mélanges était statistiquement égale ($P > 0,05$). Les levures se développent pendant les premiers jours d'ensilage ou elles consomment l'oxygène restant dans les mélanges. Après cette période, leurs nombre diminuent au cours de l'ensilage. Le nombre de coliformes et de FMAT a aussi diminué après ensilage.

Par ailleurs, il convient de noter qu'aucune prolifération d'*E. Coli*, de coliformes fécaux, de staphylocoques et de salmonelles n'a été détectée à la fin du processus d'ensilage.

Tableau 21: Caractérisation microbiologique des mélanges initiaux et des ensilages (n=4).

(log 10 UFC/g MF)	Charge initiale			Charge finale		
	Mélange à base de fruits	Mélange à base d'écorces	P	Ensilage à base de fruits	Ensilage à base d'écorces	P
FMAT	5,90	6,72	0,00	3,20	3,18	0,11
Levures	10,90	10,78	0,05	5,17	5,62	0,08
Champignons	0,30	0,47	-	0,47	0,47	-
Bactéries lactiques	3,13	2,51	0,00	4,90	4,42	0,26
Coliformes totaux	6,39	7,16	0,00	1,02	1,40	0,00
Coliformes fécaux	ABS	ABS	-	ABS	ABS	-
<i>E.Coli</i>	ABS	ABS	-	ABS	ABS	-
Staphylococcus	ABS	ABS	-	ABS	ABS	-
Salmonella	ABS	ABS	-	ABS	ABS	-

UFC : Unité Formant Colonie, MF : Matière Fraiche, FMAT : Flore Mésophile Aérobie Totale, ABS : Absence.

Conclusion

Ces résultats préliminaires ont permis de démontrer que l'ensilage est une technique de stockage appropriée pour préserver les caractéristiques nutritionnelles des sous-produits du figuier de barbarie, notamment les fruits gâchés et les pelures générées par l'alimentation humaine. En particulier, l'ajout de paille et de son de blé au cactus semble utile pour réduire l'humidité de ces produits.

Les résultats d'analyse des mélanges avant ensilage ont indiqué que leurs compositions ont été influencées par la nature de l'ingrédient de base (fruits ou écorces), le mélange à base de fruits était plus riche en sucres (totaux et réducteurs) alors que celui à base d'écorces était plus riche en cendres.

Après ensilage, les deux mélanges ont atteint des valeurs de pH final stables ($\text{pH} < 4,5$), mais le pH de l'ensilage à base de fruits (4,21) était plus faible que celui de l'ensilage à base d'écorces (4,46), ce qui est en relation avec la teneur initiale élevée en sucres des fruits. La plupart des composants ont présenté des modifications, notamment, une augmentation de la teneur en matière sèche et en fibres, une baisse des teneurs de sucres et de protéines, dans les deux mélanges. Par contre l'ensilage des fruits était plus riche en sucres et en protéines.

Les résultats d'analyses microbiologiques, après ensilage, ont indiqué une augmentation du nombre de bactéries lactiques bénéfiques pour l'ensilage et une diminution du nombre de levures, de coliformes et de FMAT dans les deux ensilages.

Sur la base de ces résultats, il s'est avéré que l'ensilage à base de fruits présente des valeurs nutritionnelles plus importantes par rapport à l'ensilage des écorces. Pourtant, on a remarqué que les deux ensilages ont perdu de leur valeur nutritive après fermentation ce qui implique la nécessité d'introduire des compléments alimentaires (mélasse, urée, minéraux, source de protéine...).

Chapitre 3 : Essai d'enrichissement protéique des rebuts de figue de barbarie

Introduction

Les travaux de ce chapitre avaient comme objectif d'associer aux rebuts de fruits de cactus la luzerne ou l'atriplex dans le but d'augmenter leurs teneurs en protéines avant de mener, d'une part un procédé d'ensilage et d'autre part un séchage solaire.

Pour présenter les résultats de cette étude nous commençons par l'analyse chimique et biochimique des ingrédients constituant les mélanges à savoir, les fruits de cactus, la luzerne et l'atriplex, ensuite les résultats d'analyse biochimique, chimique et microbiologique des mélanges initiaux, des mélanges après ensilage et des mélanges après séchage.

1. Caractérisation chimique et biochimique

1.1. Caractérisation chimique et biochimique des ingrédients

Avant de procéder à la réalisation des essais d'ensilage et de séchage, nous avons déterminé tout d'abord les compositions chimiques et biochimiques des ingrédients utilisés dans les essais (fruits de cactus, luzerne et atriplex) (annexe 4). Les résultats montrent que le cactus présente un pH plus élevé que la luzerne et l'atriplex (6,65 pour le cactus, 6,3 pour la luzerne et 6,33 pour l'atriplex), les valeurs de matière sèche sont statistiquement identiques ($P>0,05$).

L'atriplex est la plus riche en cendres avec une valeur de 12,97% MS. La teneur en protéines brutes la plus élevée a été enregistrée dans l'atriplex et la luzerne soit 23,19 %MS et 20,34 % MS respectivement, contre 11,98 % MS pour le cactus. La teneur en sucres totaux et en sucres réducteurs était plus importante dans le cactus soit 32,34 % MS pour les sucres totaux et 22,03 % MS pour les sucres réducteurs (figure 39). Alors que celles de l'atriplex et la luzerne ont été respectivement pour les sucres totaux 3,66 % MS et 4,21 % MS, et pour les sucres réducteurs 1,47 % MS et 1,91 % MS.

La teneur la plus faible en NDF a été enregistrée dans le cactus avec une teneur de 27,23 % MS, la luzerne et l'atriplex présentent des valeurs statistiquement identiques (39,44 % MS pour la luzerne et 38,73% MS pour l'atriplex). Les teneurs en hémicellulose sont statistiquement identiques pour les trois composés ($P>0,05$), soient 11,56 %MS, 14,92 %MS et 15,69 %MS respectivement pour le cactus, l'atriplex et la luzerne. La teneur moyenne en cellulose brute est plus importante pour l'atriplex (13,45 %MS), elle est plus faible que les valeurs rapportées par d'autres auteurs (Cibils, 1998; Saadani, 1988 ; Saadani & El Ghezal, 1989) (figure 40).

En ce qui concerne les éléments minéraux, les fruits de cactus étaient les plus riches en calcium (86,45 mg/100g pour le cactus, 18,34 mg/100g pour la luzerne et 13,67 mg/100g pour l'atriplex). L'atriplex étant la plus riche en sodium et en fer, et la plus pauvre en potassium et magnésium. Les valeurs de cuivre ne présentaient pas de différence significative entre les trois composés ($P > 0,05$) (figure 41).

Les fruits d'*Opuntia ficus-indica* contiennent de l'eau (80,15 %), des sucres (32,34 % MS), des protéines (11,98 % MS), des cendres (6,5 % MS) ce qui est en accord avec les résultats de Barrios, (1993) et El Kossori et al., (1998). Sur la base de ces résultats, il ressort que ces fruits sont riches en sucres, pauvres en protéines, et modéré en minéraux. Une caractéristique importante commune à la plupart des cactus est la teneur relativement élevée en Ca (86,45 mg/100g) (Nobel, 1983 ; De Kock, 1980 ; Hanselka & Paschal, 1990). La teneur en Mg d'*Opuntia ficus-indica* a été signalée comme étant élevée ce qui concorde avec les résultats de Retamal et al., (1987b).

L'atriplex et la luzerne sont comparables de point de vue nutritionnel, elles sont riches en protéines brutes et en éléments minéraux mais pauvres en sucres, ce qui est en accord avec les résultats de Salem et al., (2002). Ainsi, nous avons proposé dans ce chapitre d'associer dans les essais d'ensilage le cactus à l'atriplex et à la luzerne afin de mettre au point un aliment le plus complet pour les animaux. Dans ce cadre, Franclet et al., (1971) ont démontré la validité d'une ration composée d'*Opuntia ficus-indica*, d'*Atriplex halimus* et d'*Acacia ligulata*, son appétence et sa consommation par les animaux.

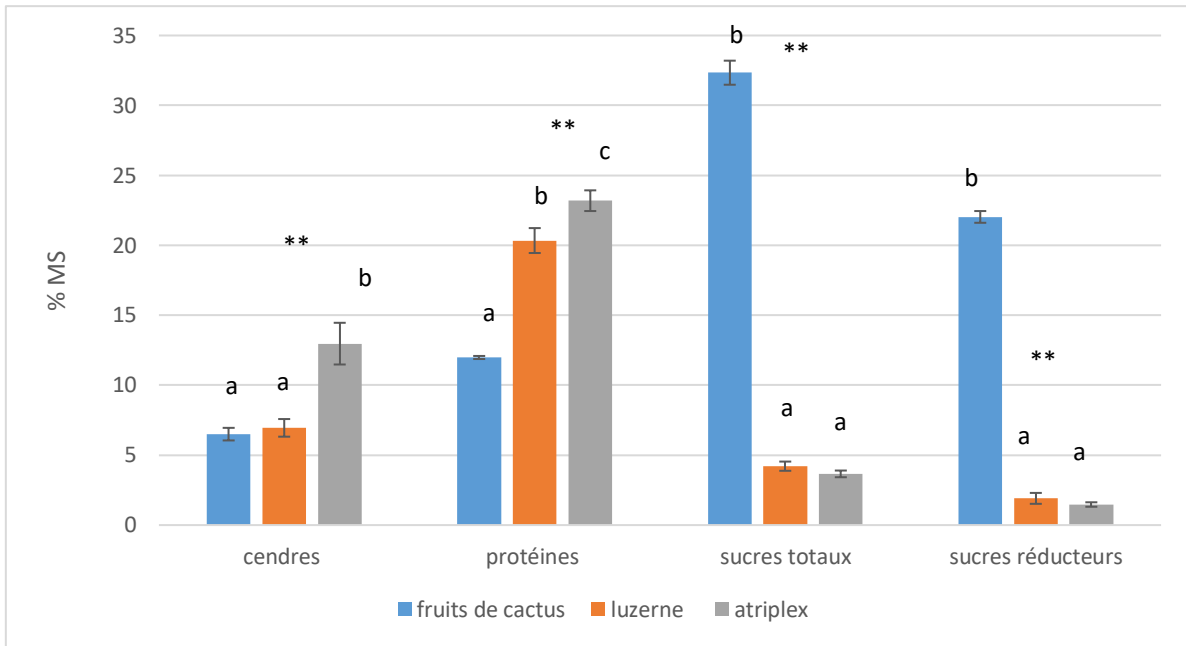


Figure 39: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les trois plantes.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

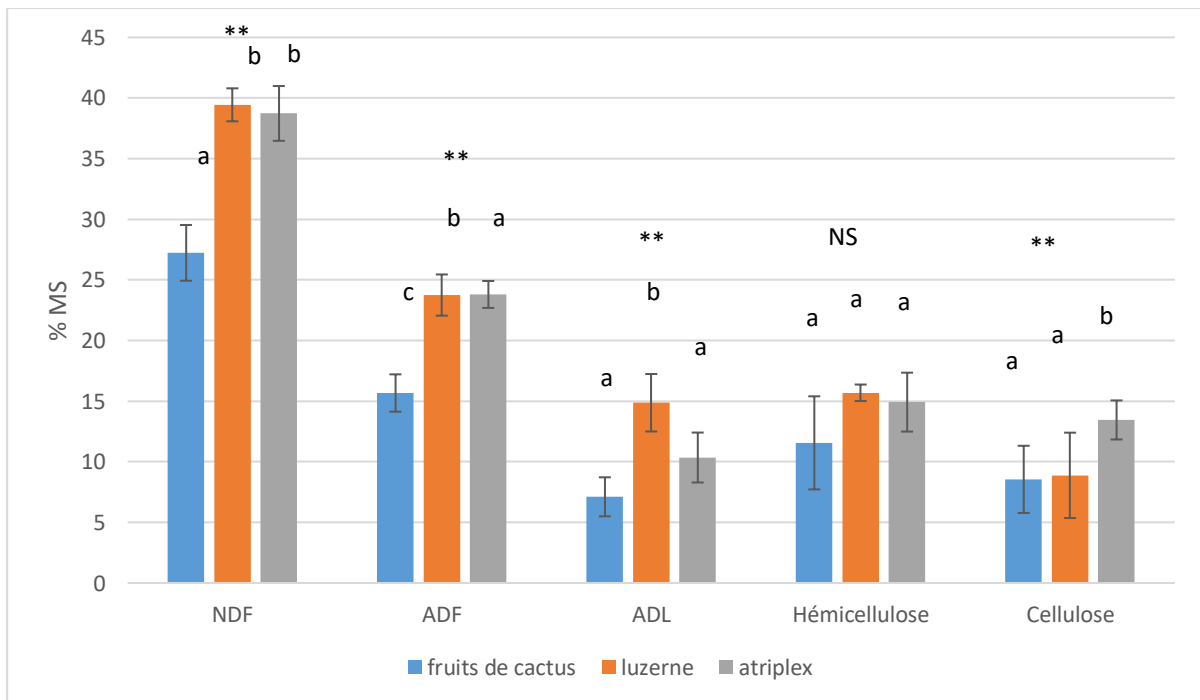


Figure 40 : Teneur en NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les trois plantes.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

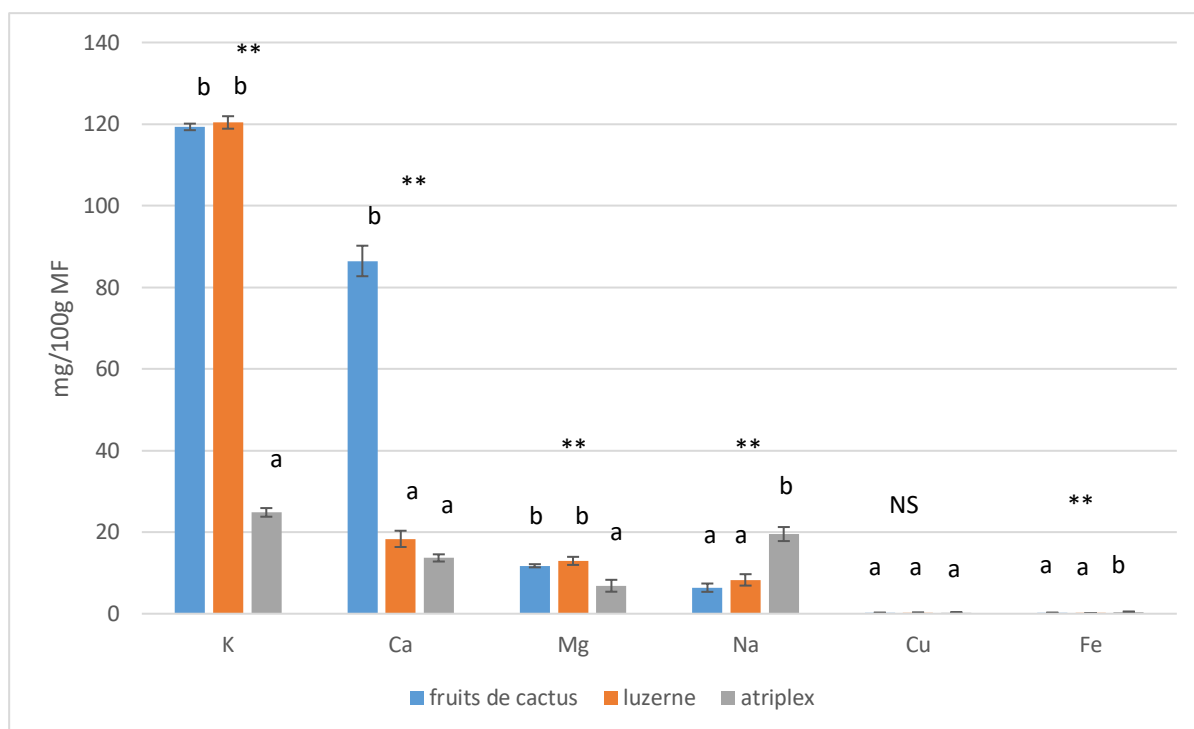


Figure 41 : Teneur en éléments minéraux Ca, K, Mg, Na, Cu et Fe dans les trois plantes.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

1.2. Caractérisation chimique et biochimique des mélanges initiaux

Les mélanges utilisés dans les essais sont :

- **M1** : composé de 75% de fruit de cactus, 12,5% de son de blé et de 12,5% de paille de blé,
- **M2** : composé de 40% de fruit de cactus, 40 % de luzerne, 10 % de son de blé et 10 % de paille de blé,
- **M3** : constitué de 40 % de fruit de cactus, 40% d'atriplex, 10% de son de blé et 10 % de paille de blé.

Les résultats d'analyses chimiques et biochimiques des mélanges avant ensilage (annexe 5) indiquent que le mélange M1 se caractérise par une forte teneur en sucres (19,14 % MS pour les sucres totaux et 6,33 % MS pour les sucres réducteurs), en NDF (45,48 % MS), en calcium (140,19 mg/100g MF) et en potassium (159,91 mg/100g MF), mais pauvre en protéines (10,63 % MS). Quant au mélange M2, il se caractérise par une forte teneur en protéines (16,35 % MS), une teneur moyenne en sucres (12,09 % MS pour les sucres totaux et 4,67 % MS pour les sucres réducteurs), en calcium (81,07 mg/100g MF) et en potassium (136,14 mg/100g MF). Enfin, le mélange M3 se caractérise par une teneur élevée en cendres brutes (9,18 %MS), en protéines (17,22 % MS) et en sodium (10,20 mg/100g MF), des teneurs moyennes en sucres (11,58 %MS

pour les sucres totaux et 4,22 %MS pour les sucres réducteurs), en calcium (42,52 mg/100g MF) et potassium (61,20 mg/100g MF).

Les valeurs de pH et de matière sèche sont statiquement identiques pour les trois mélanges ($P>0,05$). Les teneurs en NDF, ADF et cellulose sont plus importantes dans le mélange M1, alors que les ADF et hémicellulose sont statistiquement comparables dans les trois mélanges ($P>0,05$) (figure 43).

On remarque que l'ajout de l'atriplex et de la luzerne aux fruits de cactus a entraîné une réduction statistiquement significative ($P<0,05$) de la teneur en sucres, mais elle est restée assez suffisante dans les mélanges M2 et M3 pour assurer une bonne fermentation et la baisse rapide du pH de l'ensilage, ceci est dû à l'apport en sucre par le fruit de cactus. Par ailleurs, et vu la faible teneur en sucre dans le fourrage genre atriplex et luzerne, leur ensilage seul pose des problèmes (Gusha et al., 2015) (figure 42). En effet, l'atriplex et la luzerne ont une teneur plus élevée en protéines que le cactus. Ainsi, ces fractions nutritionnelles ont augmenté de manière significative ($P<0,05$) avec l'inclusion de l'atriplex et la luzerne dans les mélanges.

En termes de composition minérale, le mélange M1 est plus riche en calcium, potassium et magnésium alors que le mélange M3 est le plus riche en sodium, les valeurs de microéléments (Fe et Cu) sont comparables pour les trois mélanges (figure 44).

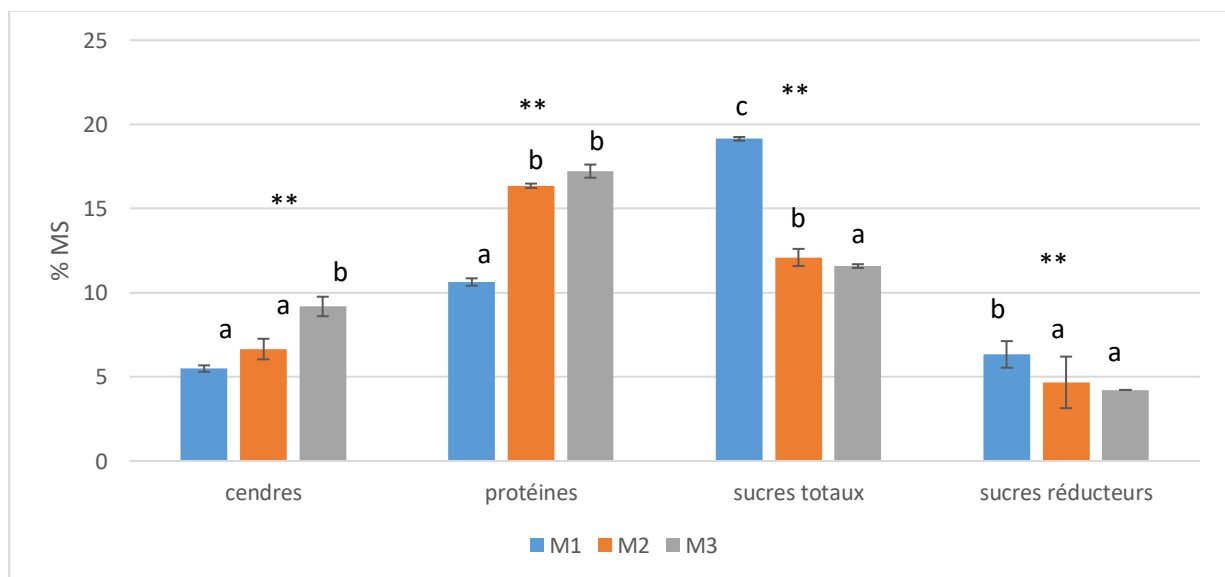


Figure 42: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les trois mélanges initiaux.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

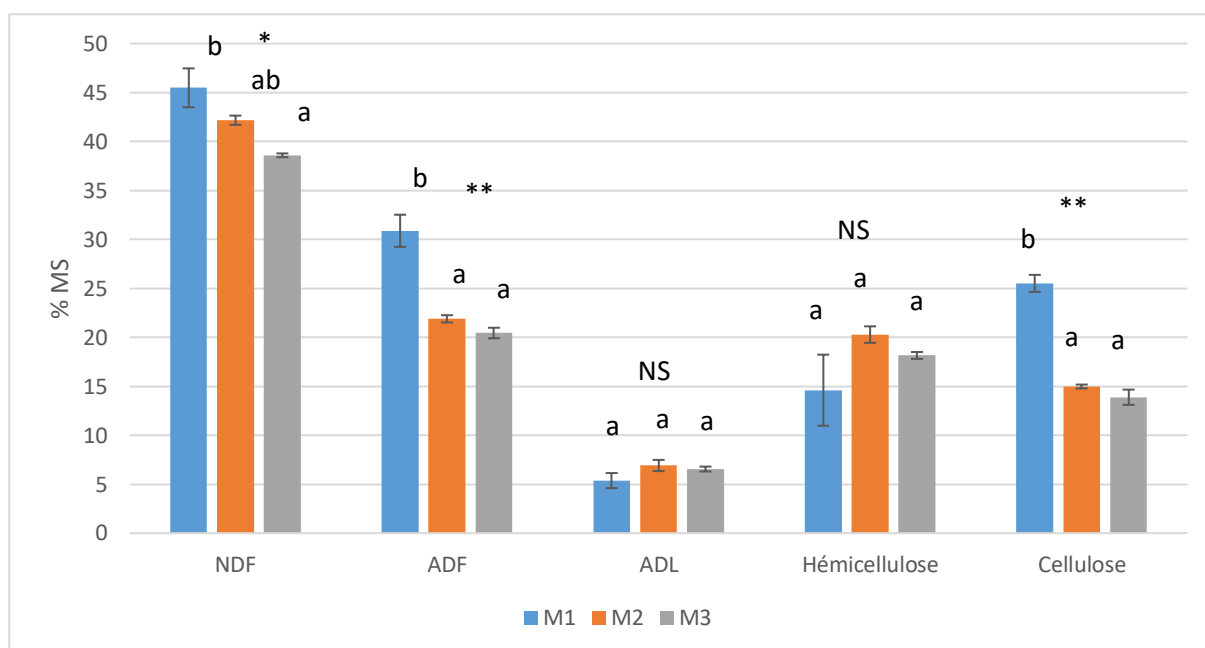


Figure 43: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les trois mélanges initiaux.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

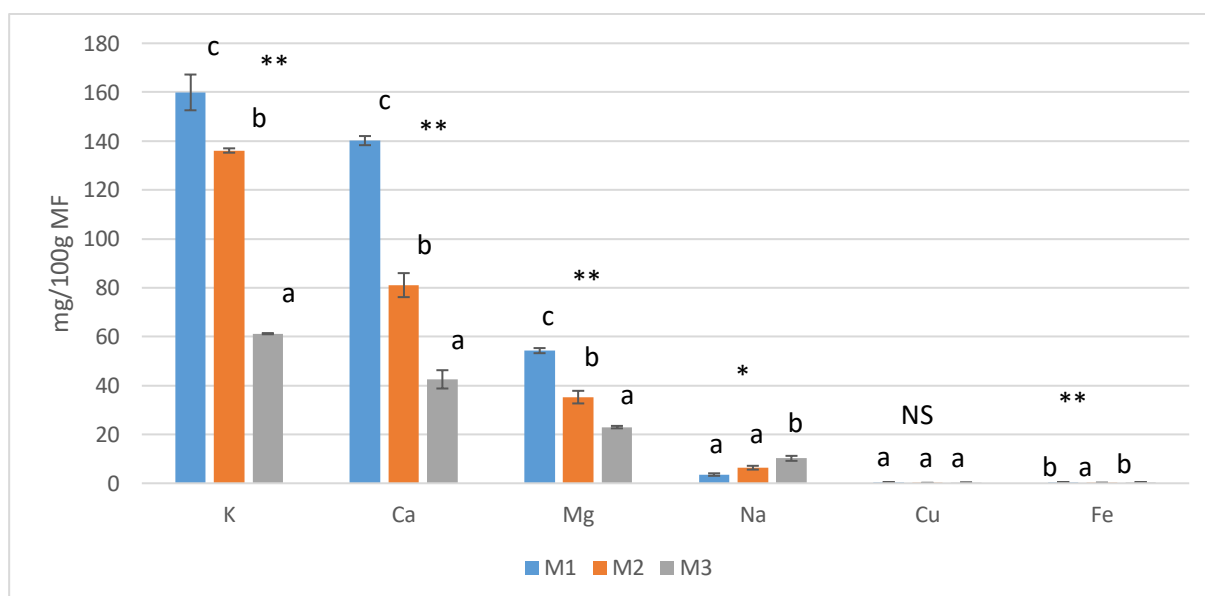


Figure 44: Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Cu et Fe dans les trois mélanges initiaux.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

1.3. Caractérisation chimique et biochimique des mélanges après ensilage

Les résultats d'analyses chimiques et biochimiques des mélanges après 30 jours d'ensilage sont présentés dans l'annexe 6. Les résultats indiquent que le processus d'ensilage a augmenté les teneurs de matière sèche dans les trois mélanges. La perte d'humidité peut être due à l'utilisation de l'eau dans les réactions liées à l'hydrolyse de polysaccharides ou de polypeptides, et aussi l'eau peut être perdu sous forme d'effluent d'ensilage, ce qui est conforme aux conclusions de McDonald et al., (1991) selon lesquelles, à la fin de l'ensilage, il y a toujours une légère perte d'humidité.

Le pH initial du mélange à base de fruits de cactus (M1) était de 6,28 puis a baissé jusqu'à 4,35 après 30 jours de fermentation (annexe 5 et annexe 6). Les autres mélanges ont vu leur pH baisser aussi après ensilage mais leur pH final est supérieur au pH du mélange M1 (4,55 pour M2 et 4,54 pour M3) ($P < 0,05$). L'ajout de la luzerne (M2) ou de l'atriplex (M3) dans l'ensilage de cactus a entraîné une augmentation du pH final, ce qui peut être justifié par la teneur faible en sucres puisque ce sont ces derniers qui favorisent la fermentation et contribuent à la baisse du pH.

Par ailleurs, le pH des ensilages était compris entre 4,35 et 4,55. Ces valeurs étaient inférieures au pH 4,8, considéré comme un bon indicateur de l'ensilage (McDonald et al., 2002; Cüreç & Özen, 2004). Dans ce cadre McDonald et al., 2002 ont rapporté que la luzerne est difficile à ensiler de manière satisfaisante, cela n'a pas été le cas dans cette étude ce qui pourrait être attribué à la haute teneur en sucres de cactus qui fermentent facilement. Nos résultats sont en accord avec les résultats trouvés par (Cüreç & Özen, 2004), qui a évalué les caractéristiques de fermentation de l'ensilage de cactus et d'une légumineuse et a observé une variation du pH final de 3,54 à 4,5.

Il y a eu aussi une diminution de la teneur en cendres qui peut être dû aux parties solubles qui sont perdu pendant le processus d'ensilage. On remarque que plus la valeur initiale est élevée plus la teneur finale est élevée aussi. Les valeurs de sodium de la luzerne et de l'atriplex étaient plus élevées que celles du cactus, ce qui se reflète dans la valeur minérale des ensilages (figure 47). La teneur élevée en Na dans l'ensilage devrait être un résultat positif, étant donné que le cactus est connu pour sa faible teneur en sodium et que l'ajout de la luzerne et d'atriplex a eu des effets complémentaires. Nous avons noté aussi une diminution des fibres NDF ce qui est en accord avec les résultats de Minson, (1990) (figure 46).

Les taux de sucres dans les mélanges sont un indice important par ce qu'ils sont inclus dans les régimes alimentaires des animaux en tant que source d'énergie alimentaire peu coûteuse et augmentent l'appétence des aliments. Les mélanges ensilés contiennent des sucres (7,06 % MS pour M1, 4,63 % MS pour M2 et 4,27 % MS pour M3) (figure 45) mais ces teneurs sont plus faibles que les teneurs initiales. Dans les trois mélanges plus de 50 % de la teneur en sucre a été dégradée. On remarque que plus la proportion de sucre initiale est élevée, plus la teneur restante est élevée. Lors de l'ensilage, les sucres ont été largement utilisés, ce qui est similaire aux résultats de Jaurena & Pichard, (2001).

Les protéines sont nécessaires dans l'alimentation pour fournir les acides aminés et de l'azote pour la synthèse d'acides aminés non essentiels et autres composés azotés par l'organisme de l'animal (Snow & Ghaly, 2007). Les protéines sont généralement la composante la plus importante et la plus coûteuse d'un régime alimentaire animal. Le mélange M1 avait une teneur de 4,54 % MS, alors que le mélange M2 et M3 les dépassent largement (12,66 % MS pour M2 et 12,96 % MS pour M3) (figure 45). Les résultats ont montré des diminutions des teneurs de protéines brutes dans tous les mélanges après ensilage ce qui est en accord avec les résultats de Moore & Kennedy, (1994). On a constaté que plus la teneur initial est élevée plus la teneur après ensilage reste élevée aussi. On remarque que l'ajout de l'atriplex ou de la luzerne a amélioré de manière significative la teneur en protéine dans les mélanges après ensilage. La teneur en protéines du mélange M2 et M3 est proche de la valeur obtenue par McDonald et al., 2002 (110 g/kg de MS) dans l'ensilage de maïs.

A l'issue de ces résultats analytiques, il s'avère que les ensilages M2 et M3 sont de qualité supérieure à celle de l'ensilage M1 réalisé à base de cactus. Cet ajout de d'atriplex ou de luzerne a permis d'améliorer la valeur nutritionnelle des mélanges M2 et M3.

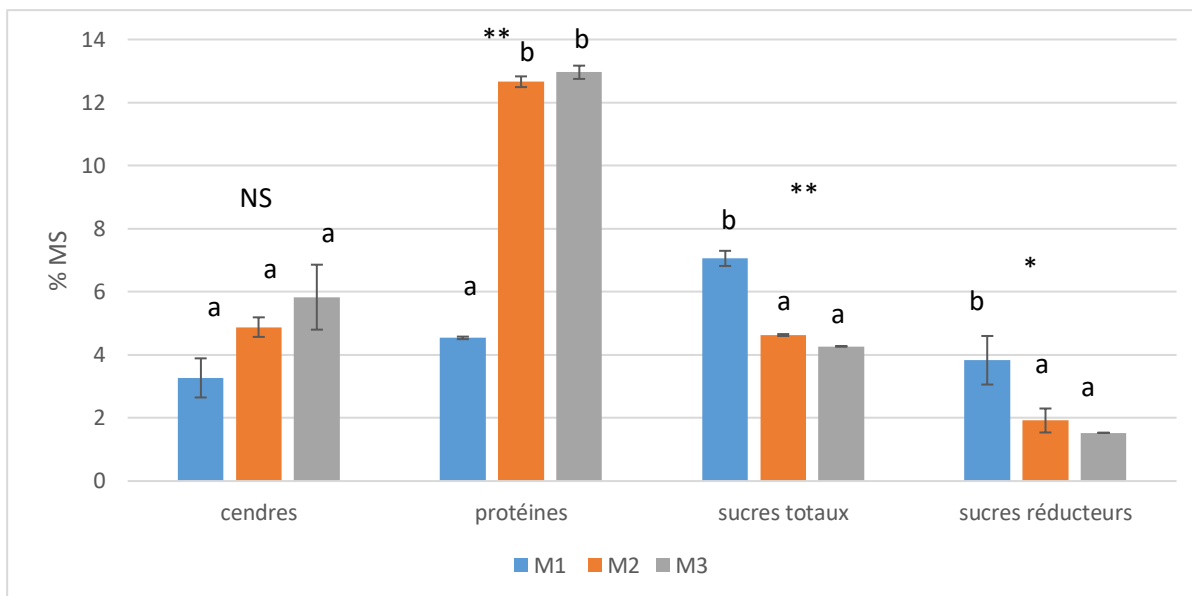


Figure 45: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les trois mélanges après ensilage.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

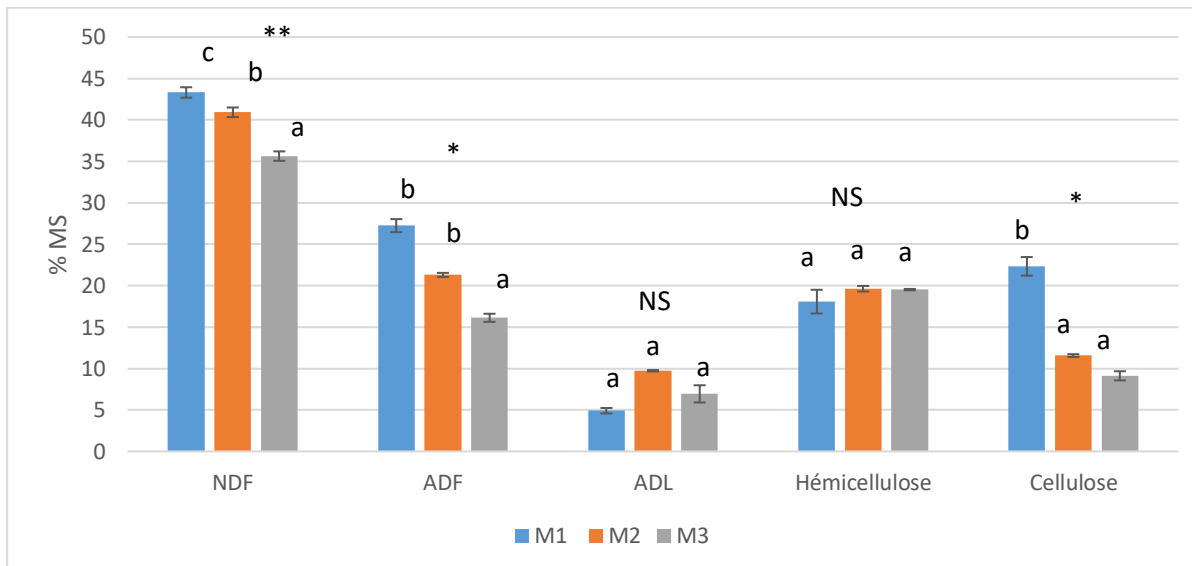


Figure 46: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les trois mélanges après ensilage.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

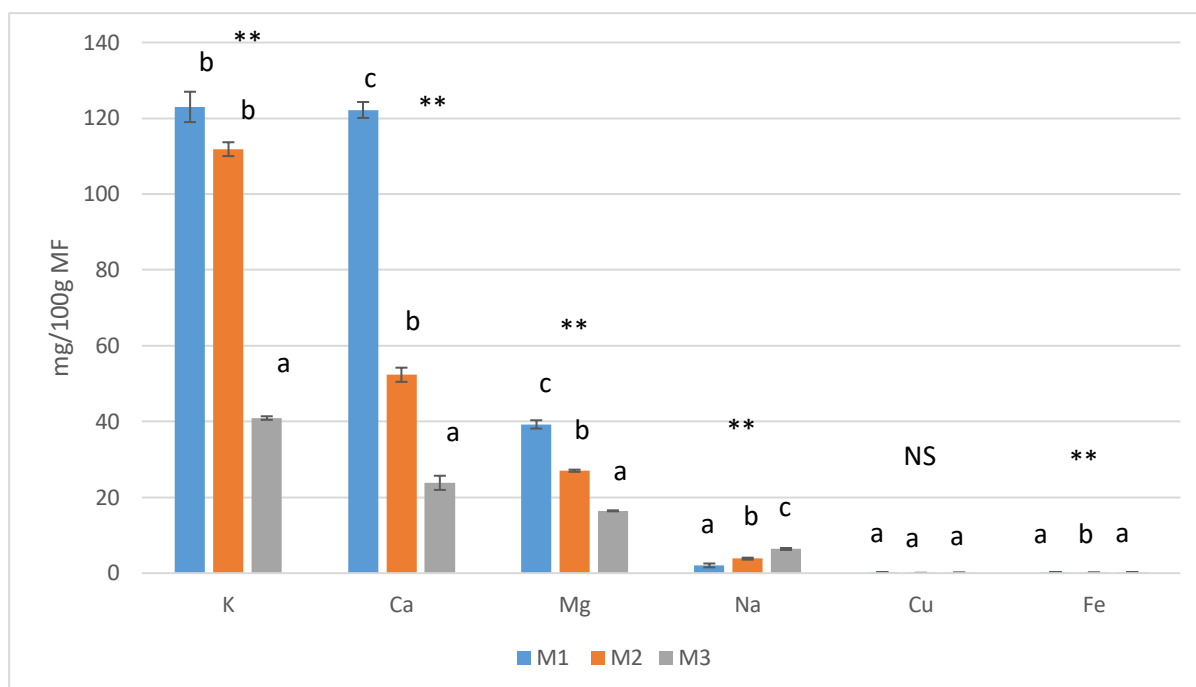


Figure 47 : Teneur en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Cu et Fe dans les trois mélanges après ensilage.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

1.4. Caractérisation chimique et biochimique des mélanges après séchage

Les résultats d'analyses des mélanges après séchage sont présentés dans l'annexe 7. On remarque que le processus de séchage a augmenté les teneurs de matière sèche dans les trois mélanges, passant de 34,18 % à 81,86% pour M1, de 33,54 % à 80,26 pour M2 et de 32,58% à 78,13 % pour M3, une partie importante d'eau a été évaporée sous l'action du soleil, ce qui permet de réduire l'activité d'eau et contribuer à une meilleur conservation de ces mélanges. Le pH est statistiquement identique pour les trois mélanges ($P > 0,05$). La teneur en cendres du mélange M3 est supérieure aux mélanges M1 et M2 ce qui peut être dû à la teneur élevée en cendre de l'atriplex (figure 48).

La teneur en protéines brutes est de 8,05 % MS pour M1, 14,96 % MS pour M2 et 15,36 % MS pour M3. Les mélanges M2 et M3 étant plus riche en protéines, cela est dû aux teneurs élevées en protéines de la luzerne et de l'atriplex. Les teneurs en protéines ont diminué après séchage pour les trois mélanges. Demarquilly et al., (1998) et Baumont et al., (2009) ont signalé le même

phénomène après séchage des légumineuses, ce phénomène peut être attribué à l'action des protéases végétales. Par contre, on remarque que le séchage préserve la quantité des protéines mieux que le processus d'ensilage, à condition qu'il n'y a pas de pluie. Dans ce contexte Demarquilly et al., (1998) rapportent que la perte des protéines peut se multiplier par deux quand il y a des pluies. La valeur en protéines est plus affectée par l'ensilage que par le séchage, ce qui est en accord avec les résultats de Baumont et al., (2009).

On remarque aussi que la dégradation des sucres était plus intense dans le cas de l'ensilage, les teneurs passent à 16,37 %MS pour M1, 10,56 % MS pour M2 et 9,16 % MS pour M3 après séchage et à 7,06 % MS pour M1, 4,63 % MS pour M2 et 4,27 %MS pour M3 après ensilage. Pour le séchage, cette diminution peut être due aux réactions de Maillard qui impliquent des groupements carbonyle d'un sucre et un groupement amine d'un acide aminé et aux réactions de caramélisation impliquant les sucres et l'eau (Labuza, 1975). Mais aussi à la respiration des plantes qui transforment les sucres en CO₂ et H₂O (Demarquilly et al., 1998).

Les valeurs des fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose des mélanges après séchage sont comparables aux valeurs des mélanges initiaux, ce qui indique que les fibres n'ont pas changé après séchage (figure 49).

Les mélanges séchés sont riches en éléments minéraux, mais ces valeurs sont plus faibles que celles contenues dans les mélanges frais. Dans ce cadre, Meschy et al., (2005) rapportent que le séchage réduit la teneur du fourrage en minéraux, les teneurs étaient inférieures en moyenne de 15 à 20% dans les foins par rapport au fourrage vert correspondant.

Ces mélanges sont riches en minéraux, M1 est le plus riche en calcium, potassium et magnésium, alors que le M3 est le plus riche sodium (figure 50). Les autres minéraux comme le cuivre et le fer sont à l'état de trace dans les trois mélanges. Ces mélanges séchés pourraient constituer des sources importantes de potassium, magnésium et de calcium pour les animaux. Le séchage a eu un effet sur la composition chimique et biochimique des trois mélanges. En effet, les teneurs de tous les composants ont diminué mais ce phénomène était moins accentué en comparaison avec l'ensilage.

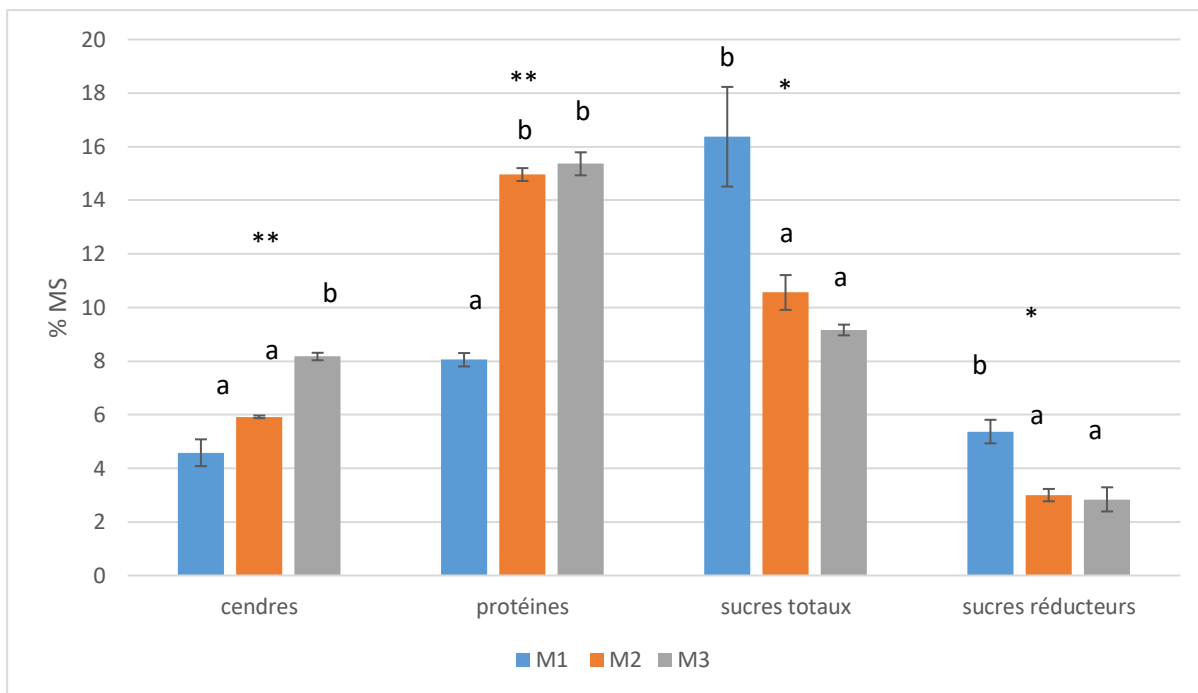


Figure 48: Teneur en cendres, protéines, sucres réducteurs et sucres totaux dans les mélanges après séchage.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

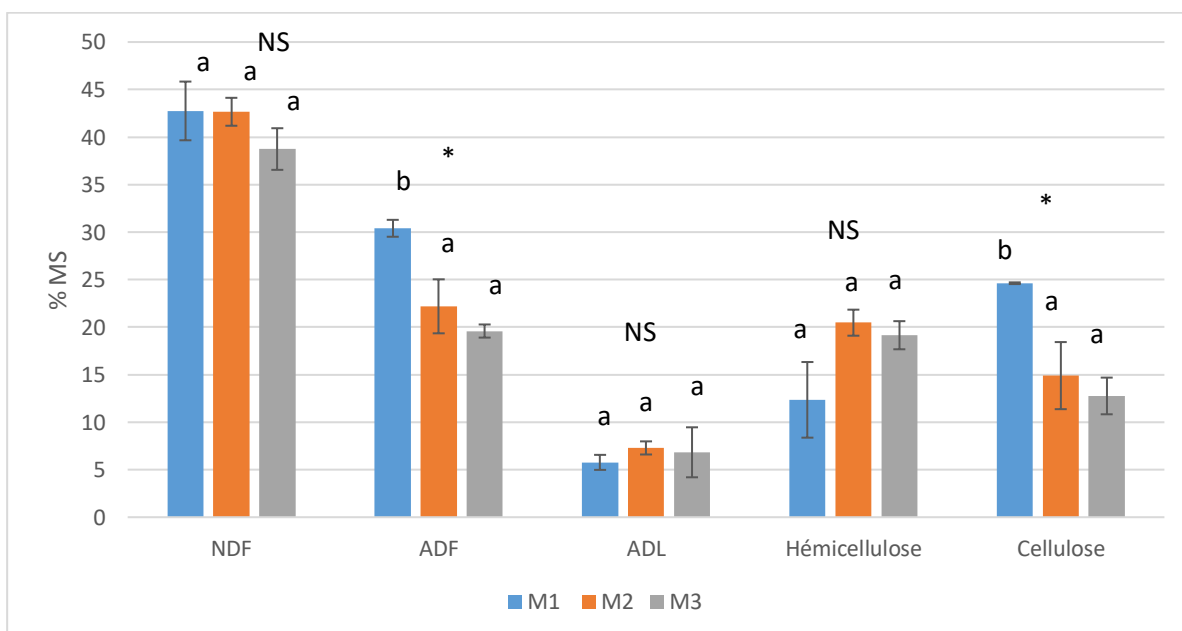


Figure 49: Teneur en NDF, ADF, ADL, Hémicellulose et Cellulose dans les mélanges après séchage.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

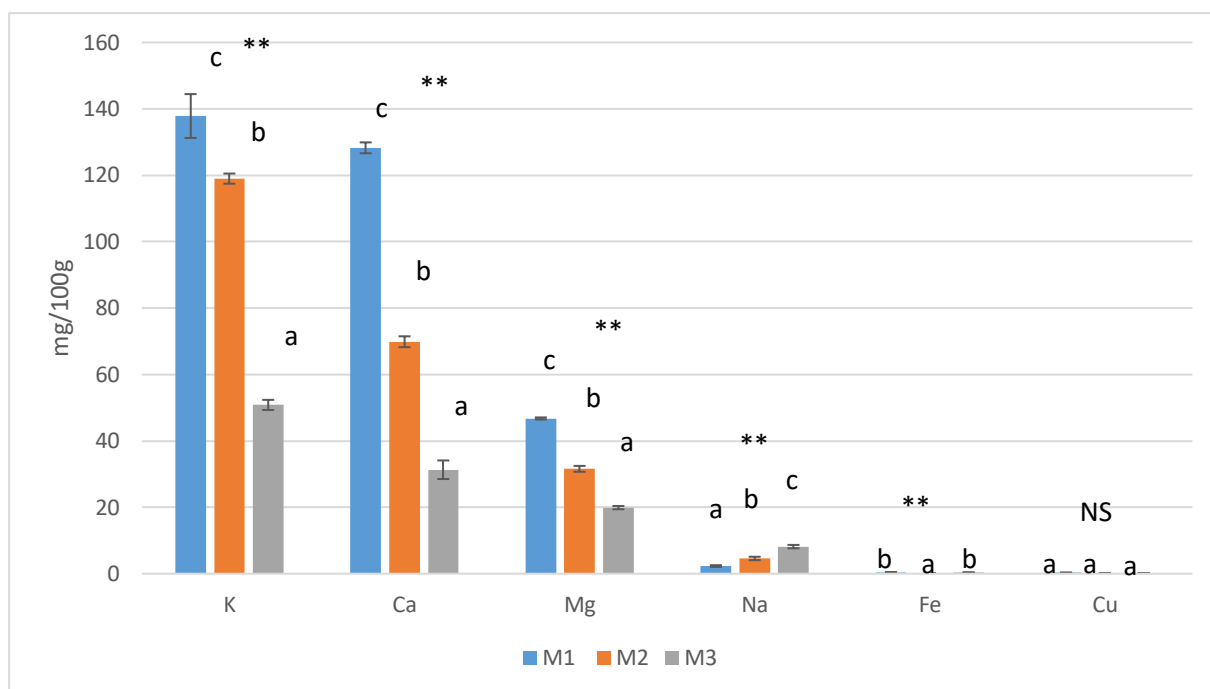


Figure 50 : Teneur en minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les mélanges après séchage.

Les valeurs présentées sur des colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas différentes significativement à un seuil de 5%, ** différence significative à $P < 0,05$, NS : Non Significatif.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

1.5. Effet du mode de conservation et de la nature des ingrédients des mélanges sur les différents composants.

Le tableau 22 montre les résultats de l'analyse ANOVA à mesures répétées en plan mixte des valeurs chimiques et biochimiques en appliquant le facteur mode de conservation (ensilage ou séchage), la nature des ingrédients des mélanges (M1, M2 et M3) et l'interaction entre les deux.

Le mélange M1 est constitué de 75% de fruit de cactus, 12,5% de son de blé et de 12,5% de paille de blé, le mélange M2 est composé de 40% de fruit de cactus, 40 % de luzerne, 10 % de son de blé et 10 % de paille de blé alors que le mélange M3 constitué de 40 % de fruit de cactus, 40% d'atriplex, 10% de son de blé et 10 % de paille de blé.

On a constaté que le mode de conservation a un effet significatif sur tous les paramètres mesurés sauf l'hémicellulose. La nature des ingrédients du mélange cactus, luzerne ou atriplex a un effet significatif sur la MS, les cendres, les protéines, les sucres, ADF, cellulose, hémicellulose, Ca, Fe, Mg, Na, K. alors que l'interaction entre les deux a eu un effet significatif sur les protéines, NDF, l'hémicellulose et le potassium.

Tableau 22: Effet moyen statistiquement significatif.

Caractéristiques	Mode de conservation	Nature des ingrédients	Interaction M*N
pH	**	NS	NS
MS	**	*	NS
Cendres	*	**	NS
Protéines	**	**	*
Sucres totaux	**	**	NS
Sucres réducteurs	**	**	NS
NDF	**	NS	*
ADF	*	**	NS
ADL	**	NS	NS
Cellulose	*	**	NS
Hémicellulose	NS	*	*
Ca	**	**	NS
Fe	**	**	NS
Mg	**	**	NS
Na	*	**	NS
K	**	**	*
Cu	**	NS	NS

*différence significative à $P < 0,05$, ** différence significative à $P < 0,01$, NS Non significatif.

2. Caractérisation microbiologique

2.1. Caractérisation microbiologique des mélanges initiaux

Les résultats des analyses microbiennes des mélanges frais sont présentés dans le tableau 23. Les résultats du dénombrement de la microflore endogène des trois mélanges montrent qu'ils sont fortement chargés en micro-organismes. Flore mésophile aérobie totale (7,97 log UFC/g MF pour M1, 7,12 log UFC/g MF pour le M2 et 7,26 log UFC/g MF pour M3), levures (10,74 log UFC/g MF pour M1, 9,50 log UFC/g MF pour M2 et 9,76 log UFC/g MF pour M3), bactéries lactiques (3,65 log UFC/g MF pour M1, 3,45 log UFC/g MF pour M2 et 3,08 UFC/g MF pour M3), coliformes totaux (3,35 log UFC/g MF pour M1, 3,02 log UFC/g MF pour M2 et 3,29 log UFC/g MF pour M3) et moisissures (0,74 log UFC/g MF pour M1, 0,54 log UFC/g MF pour M2, 0,48 log UFC/g MF pour M3). La forte population de micro-organismes présents naturellement dans ces mélanges, montre que ces derniers constituent un substrat favorable à la croissance microbienne vu leur pH proche de la neutralité, leur teneur élevée en eau et en sucres.

Tableau 23: Caractérisation microbiologique des mélanges initiaux (n=3).

Log UFC/g MF	M1	M2	M3	Valeur P
Log BL	3,65 ^a ± 0,1	3,45 ^a ± 0,4	3,08 ^a ± 0,09	0,361
Log levures	10,74 ^a ± 0,41	9,50 ^a ± 0,32	9,76 ^a ± 0,61	0,277
Log CT	3,35 ^a ± 0,55	3,02 ^a ± 0,05	3,29 ^a ± 0,29	0,800
Log FMAT	7,97 ^b ± 0,08	7,12 ^a ± 0,03	7,26 ^a ± 0,05	0,003
Log Moisissures	0,74 ± 0,04	0,54 ± 0,06	0,48 ± 0,00	0,012

BL : bactéries lactiques, CT : Coliformes totaux, FMAT : Flores Mésophiles Aérobie Total.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

2.2. Caractérisation microbiologique des mélanges après ensilage

Les résultats du dénombrement des micro-organismes sont présentés dans le tableau 24. On remarque que le processus d'ensilage a permis de réduire le nombre de levures (passant de 10,74 à 6,59 pour M1, de 9,50 à 6,02 pour M2 et de 9,76 à 6,24 pour M3), des coliformes (passant de 3,35 à 0 pour M1, 3,02 à 0 pour M2 et de 3,29 à 0 pour M3) et de la flore mésophile aérobie total (passant de 7,97 à 4,18 pour M1, de 7,12 à 4,01 pour M2, de 7,26 à 3,94 pour M3) dans les trois variantes. L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les trois mélanges. Les trois mélanges ont montré des valeurs statistiquement proches des bactéries lactiques, des levures, des FMAT et des moisissures ($P > 0,05$).

On remarque aussi la disparition des coliformes totaux après ensilage dans les trois mélanges. Dans ce contexte, Seale et al., (1986) ont signalé que la disparition des coliformes dans les ensilages de luzerne était associée à une baisse rapide du pH.

Après ensilage, le nombre de levure a été réduit de 38,64 % dans le M1, de 36,63 % dans le M2 et de 36,06 dans le M3. On remarque que malgré la réduction du pH dans les trois mélanges, la population de levures et de moisissures était présente dans tous les mélanges même après 30 jours d'ensilage, cela est dû principalement à leur capacité à se développer à pH faible (Muck, 2010) et au fait que ces derniers sont des aérobies facultatifs, ce qui a permis leur prolifération dans les premiers jours de l'ensilage en utilisant l'oxygène résiduel contenu dans le mélange (McDonald et al., 1991).

Les résultats montrent une croissance des bactéries lactiques et confirment la présence d'une quantité suffisante de sucres dans les trois mélanges. Moon et al., (1981) et Seale et al., (1986) rapportent que les bactéries lactiques se développent fortement au début de l'ensilage, mais leur

nombre a tendance à diminuer vers la fin du processus. En outre l'environnement d'ensilage, en particulier son pH, est probablement responsables de cette diminution du nombre de bactéries lactiques, car les bactéries lactiques épiphytes sont sensibles au pH et sont éliminées à mesure que la matière ensilée devient plus acide.

Dans la présente étude, la diminution du nombre de coliformes, de FMAT, de levures et de moisissures pendant la période d'ensilage est probablement due aux effets des acides organiques (Fehrmann & Müller, 1990 ; Lindgren et al., 1985 ; Pahlow, 1991).

Tableau 24: Caractérisation microbiologique des mélanges après ensilage (n=3).

Log UFC/g MF	M1	M2	M3	Valeur P
BL	5,74 ^a ± 0,57	4,69 ^a ± 0,06	4,43 ^a ± 0,37	0,186
Levures	6,59 ^a ± 0,53	6,02 ^a ± 0,19	6,24 ^a ± 0,07	0,536
CT	ABS	ABS	ABS	-
FMAT	4,18 ^a ± 0,13	4,01 ^a ± 0,03	3,94 ^a ± 0,06	0,267
Moisissures	0,65 ± 0,05	0,60 ± 0,00	0,69 ± 0,09	0,612

BL : bactéries lactiques, CT : Coliformes totaux, FMAT : Flores Mésophiles Aérobie Totale.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

2.3. Caractérisation microbiologique des mélanges après séchage

Les résultats du dénombrement des micro-organismes des mélanges séchés au soleil sont présentés dans le tableau 25. Les résultats obtenus sont statistiquement identiques pour les trois mélanges et au niveau de tous les paramètres mesurés.

Le séchage affecte la qualité microbiologique des produits. En effet, l'humidité des mélanges a été réduite après séchage, elle est passée de 65,82% à 18,14 % pour M1, de 66,46 % à 19,74 % pour M2 et de 67,42 % à 21,87 % pour M3. La déshydratation du produit réduit la quantité d'eau disponible nécessaire à la croissance des micro-organismes, entraînant leur inhibition.

L'analyse microbiologique a montré que le séchage a réduit de manière significative le nombre de bactéries lactiques, la flore mésophile totale, les coliformes, les levures et moisissures.

La flore mésophile a été réduite de 21,20 %, 16,01 et 15,28 % pour M1, M2 et M3 respectivement. Les levures ont diminué de seulement de 12,84 %, 6,52 % et 11,16 % pour M1, M2, M3 respectivement. Les moisissures ont aussi diminué de 12,16 % pour M1, alors que

leur nombre n'a pas changé dans M2 et M3. En fait, les moisissures pouvaient survivre à des activités de l'eau d'environ 0,7 (Labuza, 1968; Chang et al., 1974). Ainsi, la destruction totale de cette flore nécessite des échelles plus élevées de température.

La diminution de la population microbienne est la conséquence de dommages cellulaires à différents niveaux, tels que la paroi cellulaire et l'ADN (Coulibaly et al., 2011; Cutter, 2002). En effet, le séchage provoque des changements de l'état physique de la membrane lipidique (García, 2011) et d'importants changements de conformation des protéines induisant leur dénaturation et la perte de leur activité biologique (Strasser et al., 2009). L'élévation de la température favorise également les réactions chimiques conduisant à la formation de radicaux libres qui causent des dommages à la membrane cellulaire (García, 2011). Elle peut également affecter divers processus moléculaires tels que la réplication, la transcription et la synthèse des protéines, et induire un dysfonctionnement d'enzymes spécifiques conduisant à une perturbation de l'équilibre de la cellule (García, 2011).

En outre, il convient de noter qu'aucune prolifération d'*E.Coli*, de coliformes fécaux, de staphylocoques ou de salmonelles n'est détectée ni au niveau des mélanges initiaux, ensilés ou séchés.

Tableau 25 : Caractérisation microbiologique des mélanges après séchage (n=3)

Log UFC/g MF	M1	M2	M3	Valeur P
Log BL	1,78 ^a ± 0,46	1,40 ^a ± 0,33	1,95 ^a ± 0,13	0,370
Log levures	9,36 ^a ± 0,42	8,88 ^a ± 1,08	8,67 ^a ± 0,29	0,638
Log CT	2,37 ^a ± 0,36	2,54 ^a ± 0,19	2,52 ^a ± 0,30	0,829
Log FMAT	6,28 ^a ± 0,063	5,98 ^a ± 0,19	6,15 ^a ± 0,24	0,376
Log moisissures	0,65 ^a ± 0,05	0,54 ^a ± 0,06	0,48 ^a ± 0,00	0,157

BL : bactéries lactiques, CT : Coliformes totaux, FMAT : Flores Mésophiles Aérobie Totale.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

2.4. Effet du mode de conservation et la nature des ingrédients des mélanges sur le nombre des micro-organismes.

Le tableau 26 montre les résultats de l'analyse ANOVA à mesure répétées en plan mixte des valeurs microbiologiques en appliquant le facteur mode de conservation (ensilage ou séchage), la nature des ingrédients du mélange (M1, M2, M3) et l'interaction entre les deux.

Les résultats montrent que le mode de conservation a un effet très significatif sur le nombre de bactéries lactiques, levures, coliformes totaux et flore mésophile aérobie totale. La nature des ingrédients du mélange (cactus, luzerne ou atriplex) n'a pas eu d'effet sur les bactéries lactiques et les levures alors que l'interaction entre les deux a eu un effet sur le nombre de bactéries lactiques et de moisissures.

Tableau 26: Effet statistique moyen.

	Mode de conservation	Nature des ingrédients	Interaction M*T
BL	**	NS	**
Levures	**	NS	NS
CT	**	NS	NS
FMAT	**	NS	NS
Moisissures	**	*	*

BL : bactéries lactiques, CT : Coliformes totaux, FMAT : Flores Mésophiles Aérobie Totale.

*différence significative à $P < 0,05$, **différence significative à $P < 0,01$, NS Non significatif.

Conclusion

A la lumière des résultats obtenus, nous concluons que la luzerne et l'atriplex ont tous deux montré des valeurs comparables en éléments chimiques et biochimiques notamment les teneurs en protéines brutes. Les fruits de cactus sont riches en sucres et en minéraux mais pauvres en protéines. De ce fait les teneurs faibles en protéines des fruits de cactus peuvent être corrigé par l'association à l'atriplex ou à la luzerne.

L'inclusion de l'atriplex ou la luzerne dans l'ensilage de cactus a permis d'améliorer sa qualité nutritionnelle. Elles ont augmenté les niveaux de protéines, de cendres, NDF et ADF dans les ensilages. Ainsi ces deux fourrages, atriplex ou luzerne constitue un très bon complément aux fruits de cactus pour utilisation en alimentation animale.

Après ensilage l'ajout de luzerne (M2) ou d'atriplex (M3) a entraîné une augmentation du pH final des ensilages, en comparaison avec le mélange (M1), mais tous les mélanges ont présentés des valeurs satisfaisantes (entre 4,35 et 4,55), donc des ensilages stables.

Le séchage solaire a permis de mieux conserver la qualité nutritionnelle de tous les mélanges M1, M2 et M3 notamment les protéines (8,05 %MS ; 14,96 et 15,36 %MS pour M1, M2 et M3 respectivement), les sucres (16,37, 10,56 et 9,16 % MS pour M1, M2 et M3 respectivement), les cendres (4,58, 5,92 et 8,17 %MS pour M1, M2 et M3 respectivement) et les éléments minéraux.

La population en micro-organisme a été réduite dans les deux modes de conservation (le séchage solaire et l'ensilage). Par contre, l'ensilage a permis de mieux minimiser le nombre de levures, de champignons et de coliformes.

Le séchage est démontré comme une méthode de conservation permettant de bien conserver les caractéristiques nutritionnelles des mélanges. Par contre, le problème lié à ce mode de conservation est la contamination par les insectes, la poussière et la détérioration due à la pluie pendant le séchage.

La complémentation du cactus par l'atriplex dans l'alimentation des animaux constitue une alternative alimentaire intéressante vue l'augmentation des prix des matières premières formulant les aliments concentrés tel que la luzerne. Ce processus pourrait réduire le coût de l'alimentation par rapport à la supplémentation quotidienne en luzerne. Par conséquent, il pourrait être préférable d'utiliser l'atriplex pour améliorer le revenu des agriculteurs locaux surtout en période de sécheresse.

Chapitre 4 : Ensilage des rejets de fruit cactus avec et sans ajout de mélasse

Introduction

Ce chapitre porte sur l'évaluation des caractéristiques de l'ensilage des fruits de cactus avec et sans ajout de mélasse.

Pour présenter les résultats de cette étude, nous commençons tous d'abord par la caractérisation chimique et biochimique des composants des mélanges (cactus et mélasse), ensuite la caractérisation chimique et biochimique des mélanges initiaux et des ensilages, après nous présentons les résultats du suivi de fermentation au cours de l'ensilage et enfin les résultats du test de stabilité aérobie.

1. Caractéristiques des composants des mélanges

Rappelant que les mélanges utilisés dans ces essais étaient constitués de fruits de cactus broyés, de son de blé, de la paille respectivement dans les fractions suivantes (75% de cactus, 12,5 % de paille et 12,5 % de son de blé). A ces différents mélanges a été ajoutée la mélasse à différents pourcentages (0, 2, 4, 6, 8 et 10 % p/p).

La composition des fruits de cactus et de la mélasse utilisés dans la préparation des mélanges est rapportée dans le tableau 27. D'après les résultats trouvés, la mélasse contient principalement des sucres et des éléments minéraux ce qui est conforme aux niveaux rapportés par American Feed Industry Association, (1996). Les rebuts de cactus ont des teneurs élevées en sucre, en eau et en minéraux ; des teneurs moyennes en fibres, tandis que les teneurs en protéines et en matière sèche sont faibles.

Tableau 27 : Composition chimique et biochimique des composants des mélanges.

Caractéristiques	Cactus	Mélasse
pH	6,65 ± 0,10	6,00 ± 0,20
MS	19,85 ± 0,86	73,16 ± 0,15
Cendres (% MS)	6,5 ± 0,45	12,91 ± 1,08
Protéines (% MS)	11,98 ± 0,11	3,12 ± 0,26
Sucres (%MS)	32,34 ± 0,86	74,72 ± 1,02
NDF (%MS)	27,23 ± 2,30	0
ADF (%MS)	15,67 ± 1,54	0
ADL (%MS)	7,11 ± 1,61	0

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

Tableau 28 : Composition chimique et biochimique des composants des mélanges. (Suite)

Caractéristiques	Cactus	Mélasse
Hémicellulose (%_{MS})	11,56 ± 3,84	0
Cellulose (%_{MS})	8,55 ± 2,77	0
Ca (mg/100g_{MF})	86,45 ± 3,74	206,15 ± 1,33
Na (mg/100g_{MF})	6,38 ± 1,02	6,88 ± 0,98
Mg (mg/100g_{MF})	11,75 ± 0,39	111,61 ± 0,42
K (mg/100g_{MF})	119,31 ± 0,80	264,16 ± 1,36
Fe (mg/100g_{MF})	0,23 ± 0,02	1,22 ± 0,04
Cu (mg/100g_{MF})	0,23 ± 0,03	0,93 ± 0,02

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

2. Composition des mélanges initiaux

Les caractéristiques des mélanges initiaux sont présentées dans l'annexe 8. Le pH initial (5,39) des deux premiers traitements (0 et 2 % de mélasse) est différent de manière significative du pH des autres mélanges, l'ajout de la mélasse a augmenté les valeurs du pH, à cause de son propre pH élevé (pH = 6) (tableau 27 et annexe 8).

L'inclusion de la mélasse (à 2 , 4 , 6, 8 et 10 %) dans l'ensilage de cactus a entraîné une augmentation significative ($P < 0,05$) de MS qui est passé de 31,20 % dans le mélange sans mélasse à des valeurs variant de de 32,35 % à 37,72 %, corrélée avec la quantité de mélasse ajoutée. En effet cela peut être dû à la teneur élevée en matière sèche de la mélasse (MS = 73,16 %) (tableau 27 et annexe 8).

En ce qui concerne les sucres totaux et les sucres réducteurs, les teneurs ont augmenté avec l'ajout de la mélasse. La mélasse de par sa teneur élevée en sucres elle en va enrichir les mélanges (annexe 8), ce qui est confirmé par les résultats obtenus par Hinds et al., (1985); Lättemäe et al., (1996) et Shabsavan, (2009). Les protéines brutes ont diminué avec l'ajout de la mélasse, passant de 11,67 à 7,00 %, 5,83 %, 4,08 %, 4,67 % et 4,08 % MS respectivement pour les mélanges à 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 % de mélasse (figure 51), en raison de la faible teneur en protéines de la mélasse.

La proportion de fibres (NDF, ADF, ADL, cellulose et hémicellulose) dans les mélanges n'est pas influencée par l'ajout de la mélasse car celle-ci ne contient pas de fibres (figure 52). Ainsi,

les différences constatées dans la composition des fibres entre les mélanges dépendent de la composition initiale des ingrédients de départ (cactus, paille et son de blé).

L'ajout de la mélasse a augmenté significativement ($P < 0,05$) la teneur en éléments minéraux tels que Ca, Mg, Na, K, Fe, mais la teneur en Cu n'a pas été affectée ($P > 0,05$). Le mélange sans mélasse (0 %) était riche en calcium (151,25 mg/100 g MF), en potassium (173,30 mg/100 g MF) et en magnésium (53,50 mg/100 g MF). Le fer et le cuivre étaient présents à l'état de traces (soit respectivement 0,48 mg/100 g MF et 0,30 mg/100 g MF) (figure 53). Dans ce contexte, Stintzing et al., (2001) et Piga (2004) rapportent que le cactus est riche en magnésium et en calcium, alors que les niveaux de sodium, de potassium, de fer et de cuivre sont dans la gamme typique des fruits. Dans le mélange à 10% de mélasse, les concentrations en éléments minéraux étaient de 172,59 mg/100 g MF pour le calcium, 62,18 mg/100 g MF pour le magnésium, 5,20 mg/100 g MF pour le sodium, 193,20 mg/100 g MF pour le potassium et 0,70 mg/100 g MF pour le fer (figure 48). Ainsi, en plus d'être une source riche en hydrocarbures, la mélasse est également une source de minéraux.

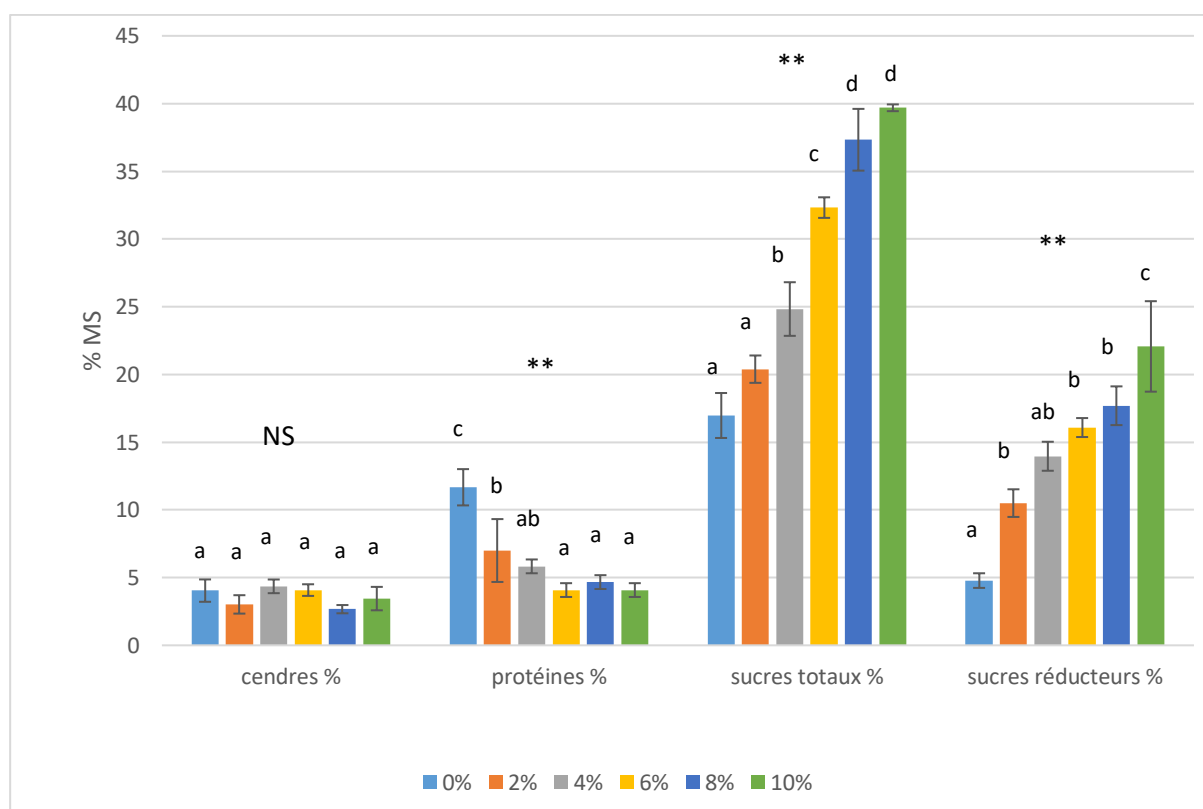


Figure 51: Teneur des mélanges initiaux en (cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs) dans les différents mélanges.

Les valeurs présentées sur les colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à un niveau de $P < 0,05$. NS : différence non significatif, ** différence significative à $P < 0,01$.

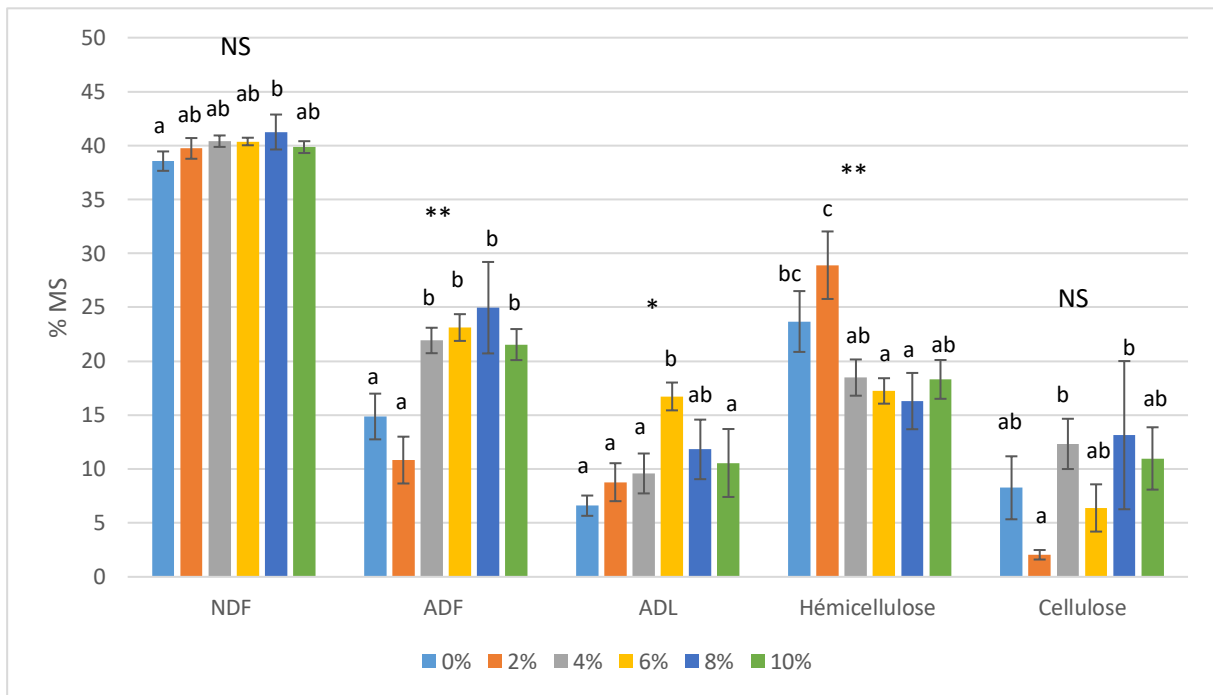


Figure 52: Teneur des mélanges initiaux en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les différents mélanges.

Les valeurs présentées sur les colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à un niveau de $P < 0,05$. NS : différence non significatif, ** différence significative à $P < 0,01$, * différence significative à $P < 0,05$.

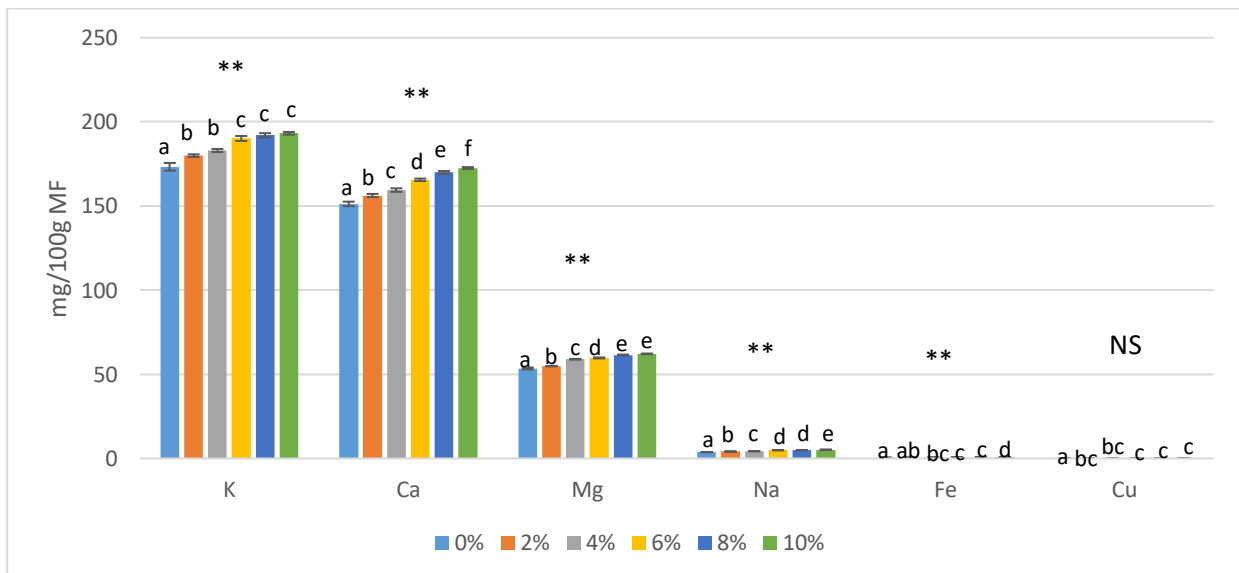


Figure 53 : Teneur des mélanges initiaux en éléments minéraux K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les différents mélanges.

Les valeurs présentées sur les colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à un niveau de $P < 0,05$. NS : différence non significatif, ** différence significative à $P < 0,01$, * différence significative à $P < 0,05$.

3. Composition des mélanges après ensilage

L'annexe 9 représente l'ensemble des résultats d'analyses biochimiques et chimiques des différents mélanges après ensilage. On remarque qu'il y avait une perte de poids pour tous les mélanges, les pertes ont été de 6,34 %, 6,36 %, 6,29 %, 6,65 %, 6,45% et 9,88 % respectivement pour les mélanges à 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de mélasse (annexe 9). Le traitement à 10 % a montré la plus grande perte de poids. L'analyse de la matière sèche a montré une augmentation de l'ordre de 1,92 %, 2,01 %, 3,06 %, 5,77 %, 7,77 % et 3,42 respectivement pour les mélanges à 0, 2, 4, 6, 8 et 10 % de mélasse. Ceci peut être expliqué par la perte de l'eau dans les effluents pendant l'ensilage. Ce résultat était conforme à celui de McDonald et al., (1991).

Une partie importante des cendres et d'éléments minéraux (K, Ca, Na, Mg, Fe et Cu) a également été perdue pendant la fabrication de l'ensilage pour tous les mélanges, ce qui peut s'expliquer par leur solubilité dans l'eau et leur perte dans les effluents d'ensilage (annexe 9, figure 56).

Le pH de tous les mélanges ensilés (0%, 2%,4%,6%,8% et 10%) était compris entre 4,3 et 4,6. Ce qui signifie que tous les mélanges avaient une bonne qualité d'ensilage (annexe 9), dans ce contexte, McDonald et al., (2002) rapporte qu'un pH compris entre 5 et 7, signifie une mauvaise conservation de l'ensilage. De nombreux chercheurs ont signalé l'utilisation réussie de la mélasse pour l'ensilage de fourrage (Wuisman et al. 2006 ; Shellito et al. 2006). Elle peut également être utilisée comme apport de saccharose pour la croissance des bactéries lactiques et la production d'acide lactique. L'acide lactique est généralement la principale raison de baisse de pH dans un ensilage de haute qualité. L'ajout de saccharose aux ensilages de légumineuses fourragères pourrait augmenter la production d'acide lactique, diminuer le pH et améliorer la stabilité aérobie pendant le stockage (Heinritz et al. 2012).

Dans les six mélanges, presque 50 % de la teneur en sucre a été dégradée pour tous les mélanges. On remarque que plus la proportion de sucre initiale est élevée, plus la teneur restante est élevée (figure 49). Lors de la fabrication de l'ensilage, les sucres ont été largement utilisés par les micro-organismes pour être transformés en acides (Jaurena et Pichard, 2001).

La teneur en protéines a diminué pour tous les mélanges après ensilage (figure 54). En effet, les diminutions ont été de 70%, 66,71%, 65%, 35,53, 74,94 et 78,43 % respectivement pour les mélanges à 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de mélasse. Ceci peut être expliqué par le phénomène de protéolyse. Nos résultats sont en accord avec Bilal (2009), Moore & Kennedy, (1994) et Ni et al., (2017) qui rapportent que l'ajout de mélasse aux ensilages diminue la teneur en protéines.

Cependant, d'autres chercheurs (Aksu et al., 2006; Kennedy, 1990; McDonald et al., 1991; Mokoboki et al., 2016) rapportent que cette teneur augmente avec l'ajout de la mélasse, tandis que Spoelstra et al., (1990) confirment que cette teneur n'est pas affectée par l'ajout de la mélasse.

Les valeurs de NDF sont importantes car elles sont liées à la capacité d'un animal à digérer le fourrage. Pendant l'ensilage, l'hémicellulose peut être hydrolysée et des types de bactéries lactiques peuvent fermenter les pentoses en acide lactique et acétique (McDonald et al., 2002). L'ajout de la mélasse avait un effet significatif sur les NDF, ADF, ADL, cellulose et hémicellulose. En effet la teneur en NDF a diminué après l'ensilage dans les traitements à 0, 2, 4 et 6 %. De plus, les teneurs en ADF et en ADL ont également diminué pour tous les traitements (figure 55). Cette diminution est probablement due à la dégradation des parois cellulaires par les enzymes végétales ou l'hydrolyse acide (McDonald et al., 1991; Baytok et al., 2005).

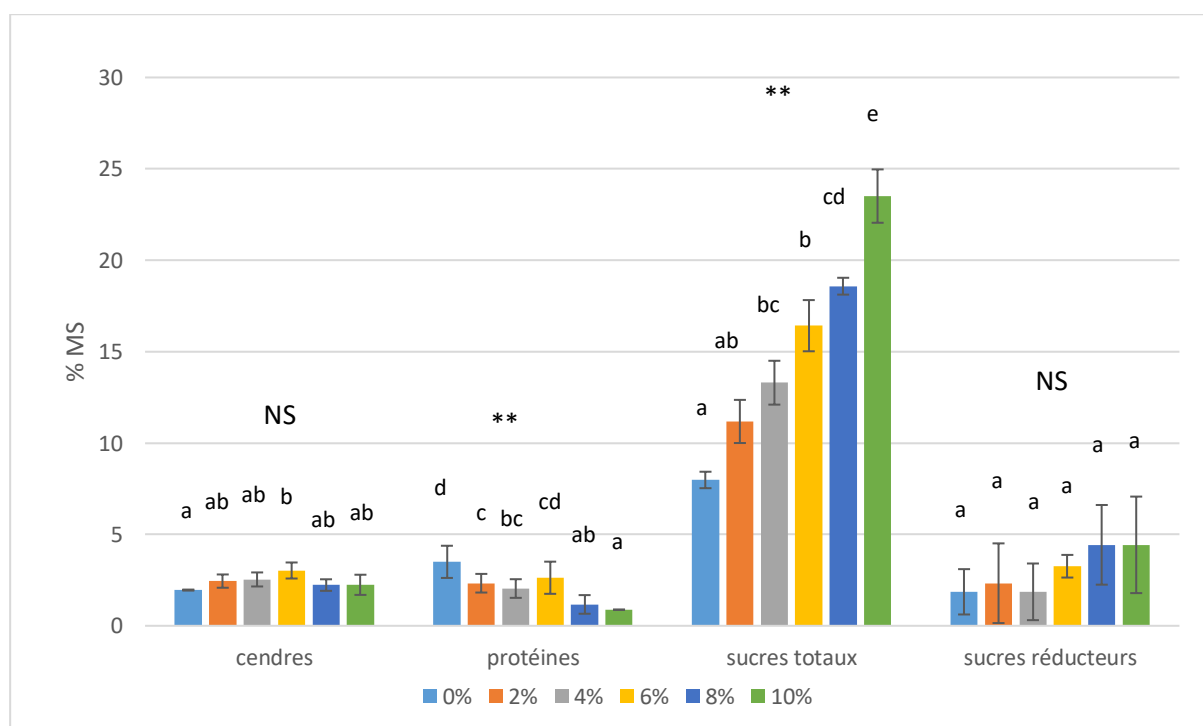


Figure 54 : Teneur en cendres, protéines, sucres totaux et sucres réducteurs dans les différents mélanges après ensilage.

Les valeurs présentées sur les colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à un niveau de $P < 0,05$. NS : différence non significatif, ** différence significative à $P < 0,01$, * différence significative à $P < 0,05$.

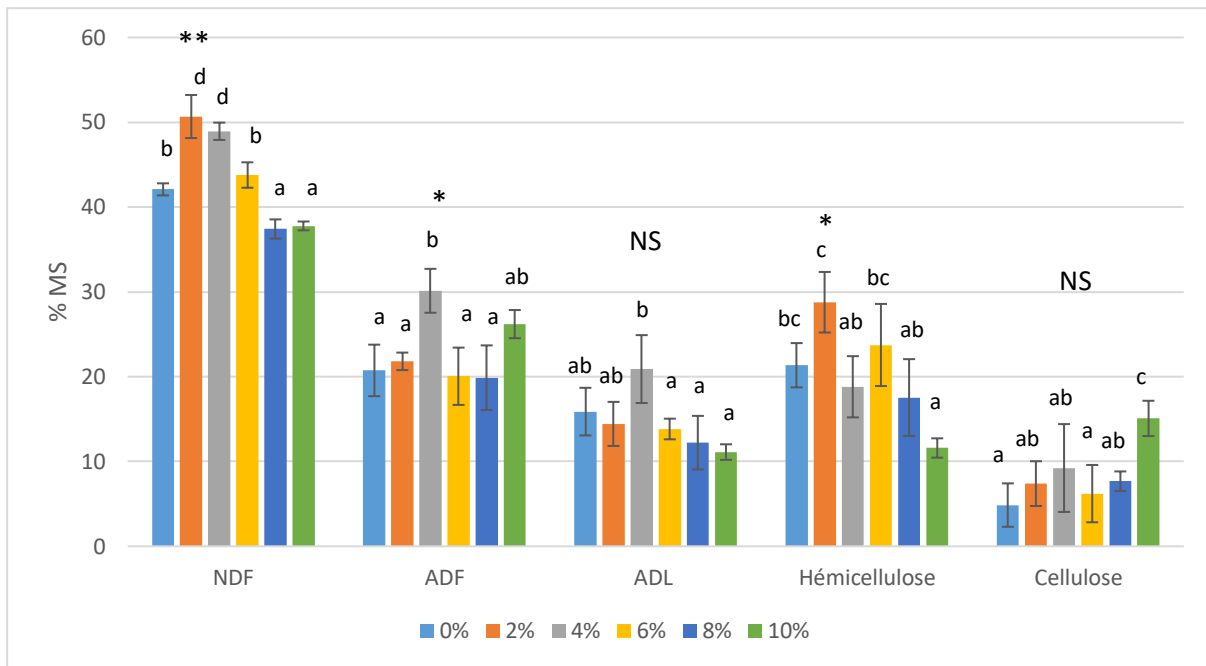


Figure 55: Teneur en fibres NDF, ADF, ADL, hémicellulose et cellulose dans les différents mélanges après ensilage.

Les valeurs présentées sur les colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à un niveau de $P < 0,05$. NS : différence non significatif, ** différence significative à $P < 0,01$, * différence significative à $P < 0,05$.

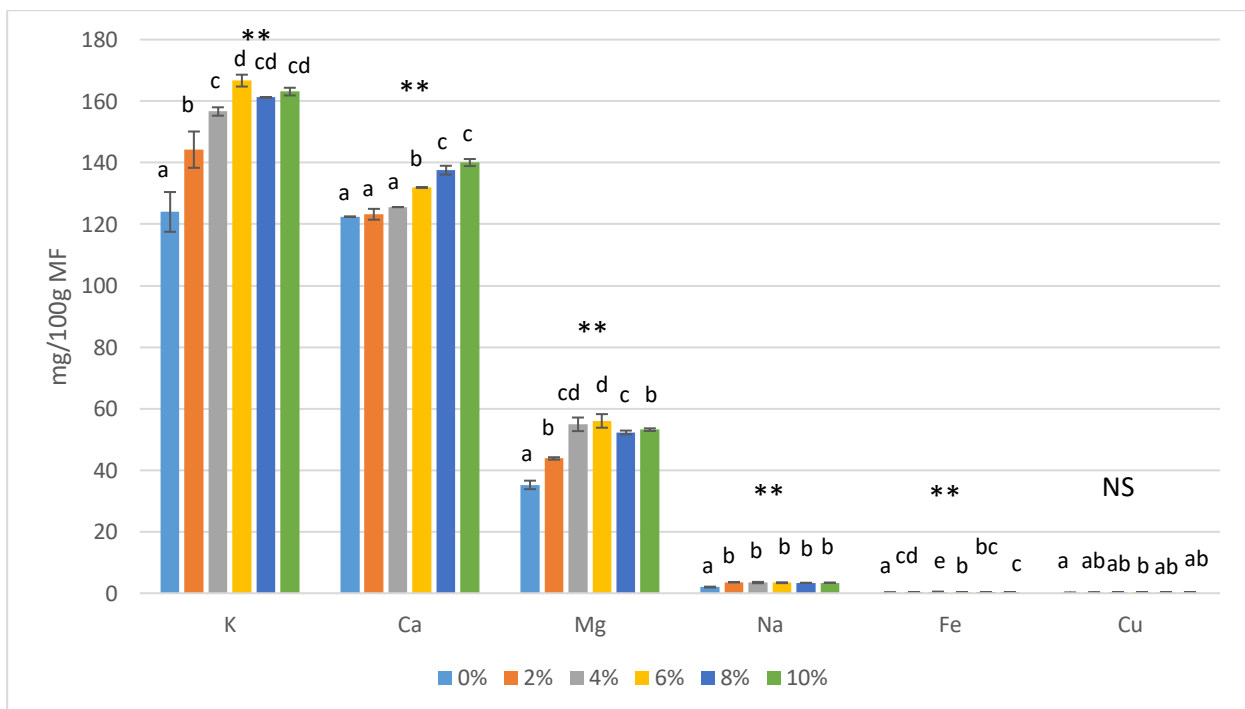


Figure 56: Teneur en éléments minéraux, K, Ca, Mg, Na, Fe et Cu dans les différents mélanges après ensilage.

Les valeurs présentées sur les colonnes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à un niveau de $P < 0,05$. NS : différence non significatif, ** différence significative à $P < 0,01$, * différence significative à $P < 0,05$.

4. Effet de la quantité de mélasse et de l'ensilage sur les différents composants.

Le tableau 28 rapporte les résultats de l'analyse ANOVA en plan mixte montrant l'effet de la quantité de mélasse ajoutée, de l'ensilage et l'interaction de ces deux derniers sur les différents composants du mélange.

On a constaté que l'ajout de la mélasse et l'ensilage ont eu un effet significatif sur la matière sèche, le pH, les protéines brutes, les sucres, les fibres NDF, ADF et ADL, et les éléments minéraux (Ca, Fe, Mg, Na, K, Cu). L'ajout de mélasse n'a pas affecté la teneur en cendres ($P > 0,05$), alors que l'ensilage n'a pas affecté les teneurs en cellulose et en hémicellulose ($P > 0,05$). L'interaction entre les deux facteurs n'a pas affecté le pH, la matière sèche, les cendres, les ADL, la cellulose et les fibres d'hémicellulose.

Tableau 29: Effet moyen statistiquement significatif.

	Niveau de mélasse	Ensilage	Interaction N*E
pH	**	**	NS
MS	*	*	NS
Cendres	NS	**	NS
Protéines	**	**	**
Sucres totaux	**	**	**
Sucres réducteurs	**	**	**
NDF	**	**	**
ADF	**	**	**
ADL	*	**	NS
Cellulose	*	NS	NS
Hémicellulose	**	NS	NS
Ca	**	**	**
Fe	**	**	**
mg	**	**	*
Na	**	**	**
K	**	**	*
Cu	**	**	NS

*significativement différent à $P < 0,05$, ** significativement différent à $P < 0,01$, NS Non Significatif.

5. Suivi de la fermentation au cours de l'ensilage

Les paramètres qui ont fait l'objet du suivi de la fermentation ont été le pH et la charge microbienne (flore mésophile aérobie totale, bactéries lactiques, coliformes et levures).

5.1. Evolution du pH

Le suivi du pH au cours de l'ensilage des six mélanges à base de cactus et de mélasse est illustré par la figure 57. Les résultats montrent une chute importante du pH dans les cinq premiers jours d'ensilage pour les mélanges à 0%, 2%, 4%, 6% et 8% de mélasse. En effet, les valeurs de pH sont passées de plus de 5,4 à des valeurs inférieures à 4,5. Tandis que le mélange à 10 % de mélasse n'a atteint cette valeur qu'au 15^{ème} jour d'ensilage.

La chute rapide du pH est désirée dans le processus d'ensilage. Elle est attribuée à la flore lactique présente naturellement dans le fruit de cactus, qui par la production de l'acide lactique diminue le pH et permet la stabilisation de l'ensilage.

À 30 jours de fermentation, trois valeurs de pH ont été observées : les ensilages avec des teneurs en mélasse de 0, 2 et 4 % avaient un pH de 4,3, les ensilages avec des teneurs en mélasse de 6 et 8 % avaient un pH proche de 4,5, et l'ensilage avec une teneur en mélasse de 10 % avait un pH proche de 4,6. Tous les ensilages, y compris le témoin (0%), semblaient être de bonne qualité, comme en témoignent la chute rapide du pH (figure 57) et le pH final faible.

Le pH est l'un des facteurs essentiels dans le contrôle et l'évaluation de la qualité de l'ensilage, les valeurs de pH inférieures à 4,5 permettent la stabilisation de l'ensilage (Pettersson, 1988). Yang et al., (2004) ont montré qu'une humidité élevée > 70 % et un pH > 4,5 favorisent la fermentation clostridiale.

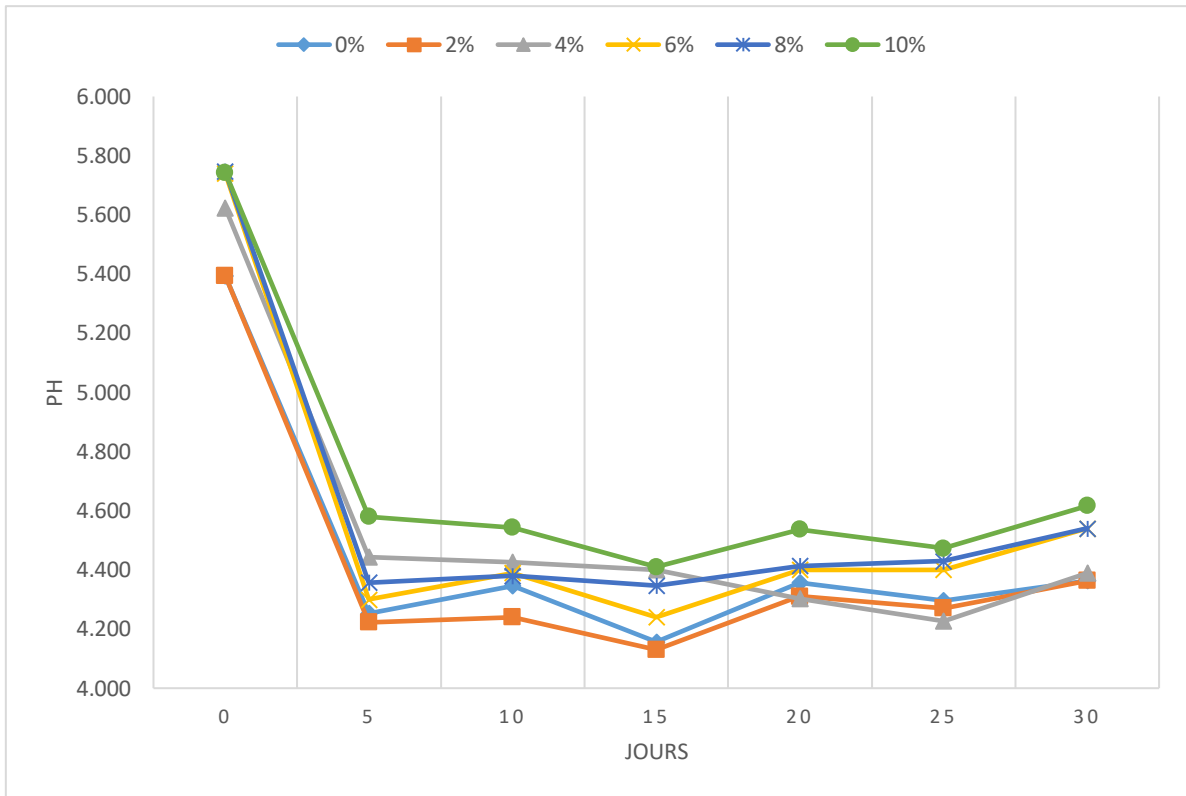


Figure 57: Evolution du pH pendant l'ensilage des mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.

5.2. Evolution de la croissance des bactéries lactiques

La figure 58 montre l'évolution de la flore lactique au cours de l'ensilage pour les six mélanges à base de fruit de cactus et de mélasse. Une augmentation du nombre de bactéries lactiques a été observée au cours des cinq premiers jours de fermentation pour tous les mélanges. Leur nombre est passé de 4 log UFC/g MF à 6,64 log UFC/g MF pour le mélange à 0% de mélasse et de 4,51 log UFC/g MF à 7,28 log UFC/g MF pour le mélange à 10% de mélasse.

Ce résultat est fortement corrélé avec la baisse du pH pendant cette période. On a observé une diminution du nombre de bactéries lactiques pour tous les mélanges du 6^{ème} au 15^{ème} jour de fermentation. Après le 15^{ème} jour, leur nombre est resté presque stable. Ceci montre bien que les conditions groupant les facteurs se rapportant aux souches (intrinsèques) et les facteurs d'environnement (extrinsèques) sont favorables à la culture des bactéries lactiques et celles-ci se trouvant naturellement dans les fruits de cactus et les autres composants des mélanges sont capables de mener une bonne fermentation et par conséquent assurer la stabilisation de l'ensilage.

Par ailleurs, on a constaté que plus la proportion de mélasse est élevée, plus la fermentation lactique est intense et plus le nombre de bactéries lactiques est élevé. Puisque le mélange à 10% de mélasse a enregistré le nombre le plus élevé de bactéries lactiques après 30 jours de fermentation avec une valeur de 4,92 Log UFC/g MF.

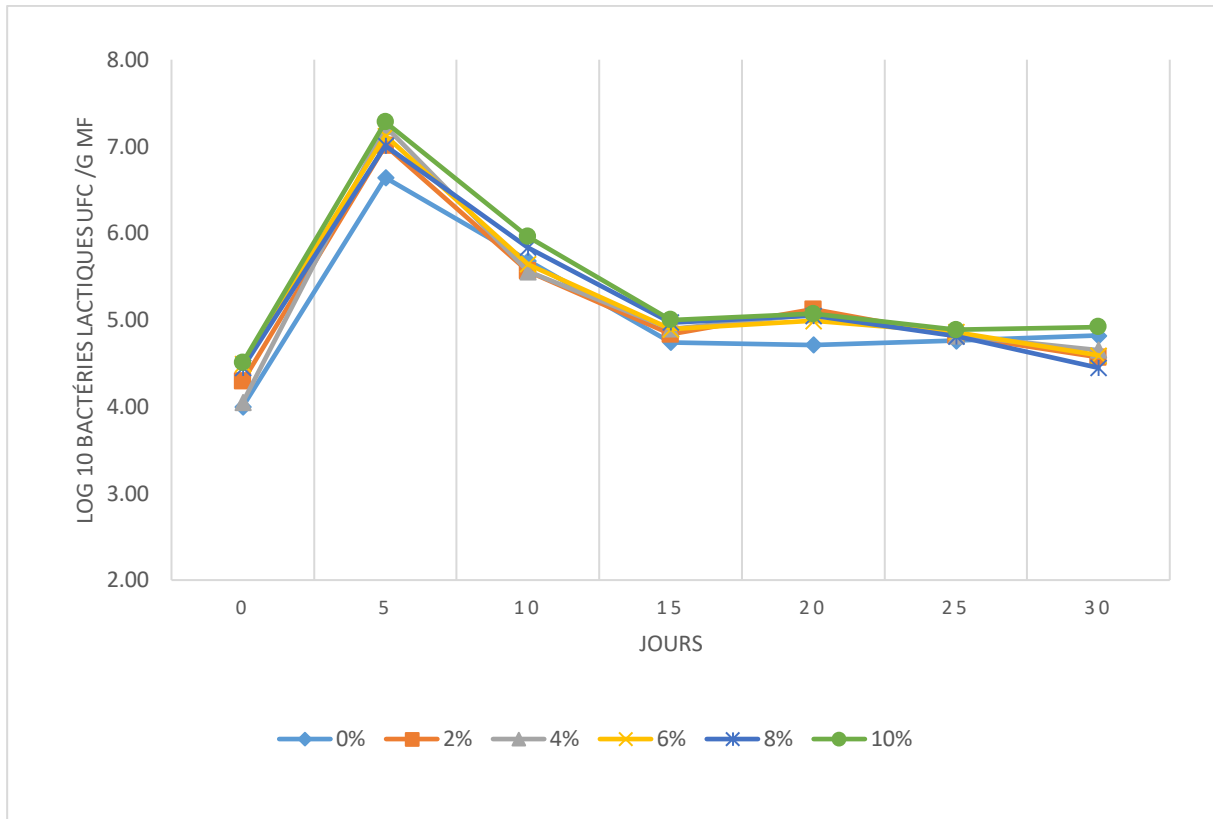


Figure 58: Cinétique de croissance des bactéries lactiques pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.

5.3. Evolution de la croissance des levures

Les levures se sont multipliées pendant les cinq premiers jours (figure 59). Pendant cette période, elles ont consommé l'oxygène résiduel dans le mélange. Ensuite, leur nombre a diminué en raison de la réduction du pH, passant de 11 à 6 log UFC/g MF pour tous les traitements. Après 15 jours d'ensilage, le nombre le plus faible de levures a été observé dans le traitement à 10%.

Cette présence assez importante de levures dans les mélanges après ensilage est très utile car elle permet l'enrichissement du fruit de cactus ensilé en biomasse probiotique très bénéfique dans l'alimentation animale.

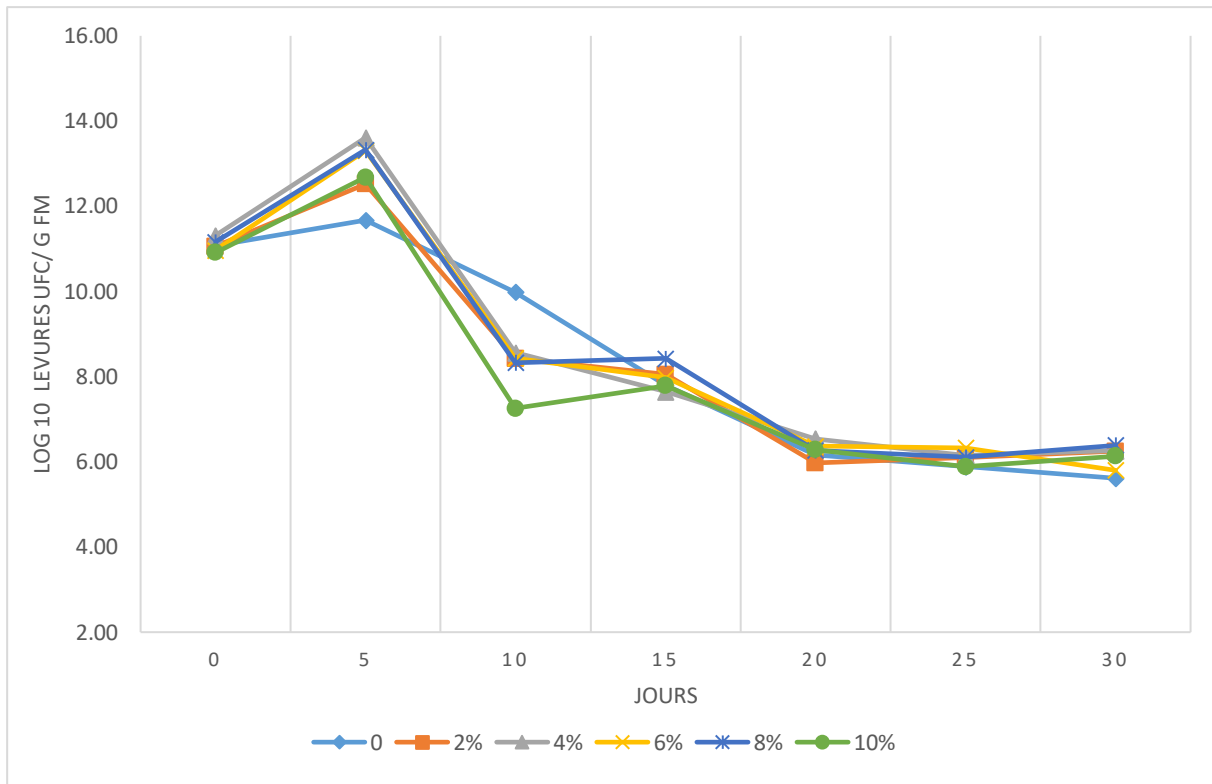


Figure 59: Cinétique de croissance des levures pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.

5.4. Evolution de la croissance des coliformes

Les coliformes totaux ont été détectés dans les traitements à 0%, 2% et 4% mais ont disparu après 10 jours pour les traitements à 2% et 4% et après 15 jours pour le traitement sans mélasse (Figure 60). Leur réduction dans l'ensilage reflète de bonnes conditions d'ensilage (Pahlow et al., 2003).

Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que les sucres ont une grande capacité à lier les molécules d'eau, ce qui produit une pression osmotique élevée conduisant à la destruction des bactéries (Cappozzi et al. 2009).

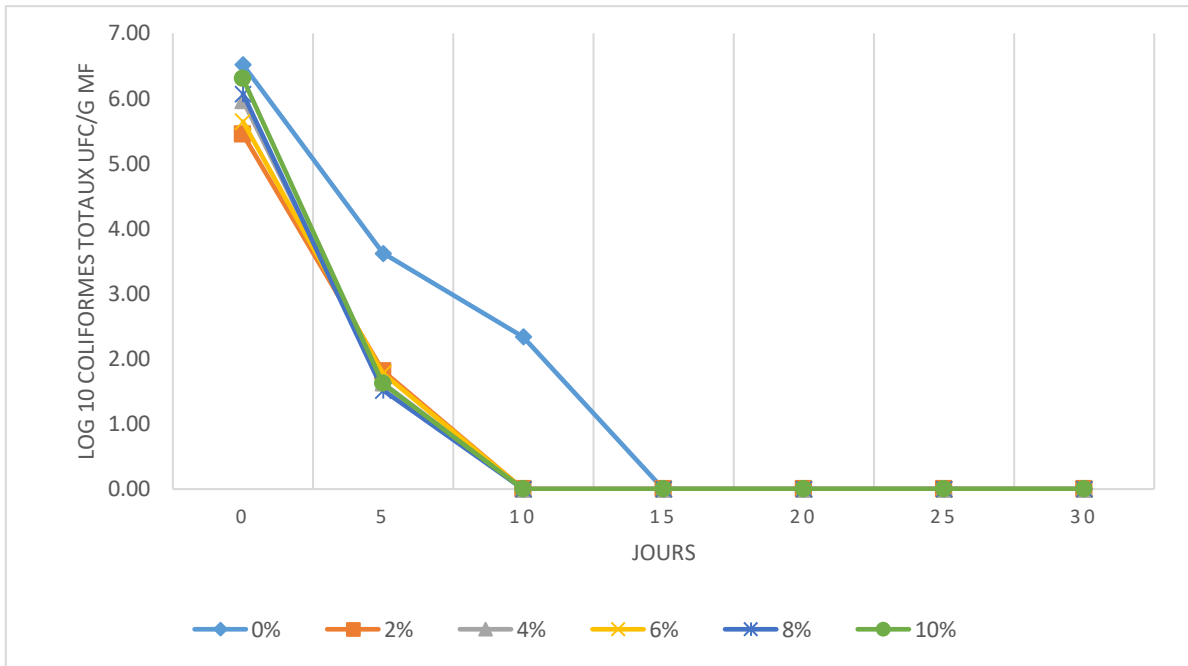


Figure 60: Cinétique de croissance des coliformes totaux pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.

5.5. Evolution de la croissance de la flore mésophile aérobie totale

Les bactéries mésophiles aérobies se sont moins multipliées, surtout dans le traitement à 10% de mélasse (figure 61). Leur nombre a diminué dans tous les traitements dans les 10 premiers jours d'ensilage.

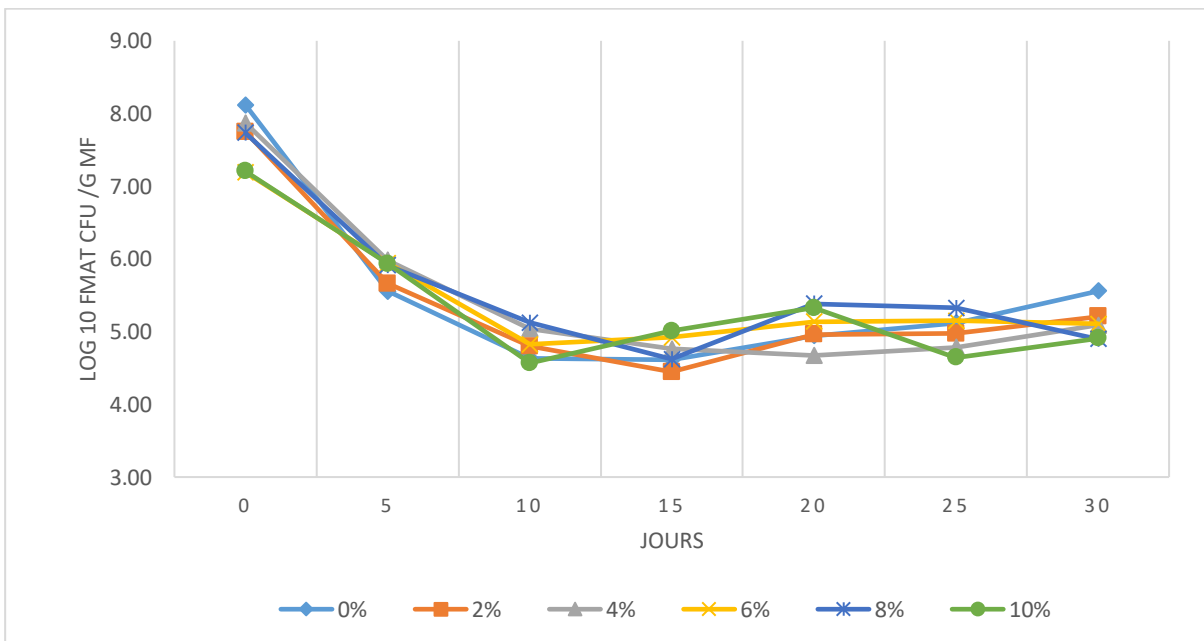


Figure 61: Cinétique de croissance de la flore mésophile aérobie totale pendant l'ensilage dans les mélanges à base de fruits de cactus avec différents pourcentages de mélasse.

En outre, il convient de noter qu'aucune unité formatrice de colonie d'E. Coli, de coliformes fécaux, de staphylocoques et de Salmonella n'a été décelé tout au long du processus d'ensilage.

6. Test de stabilité aérobie

La stabilité aérobie est une caractéristique importante de l'ensilage car celui-ci est exposé à l'air pendant le stockage et l'alimentation. L'étendue de la pénétration de l'air dans l'ensilage pendant le stockage dépend de son compactage et de la façon dont le silo est scellé (Muck et al., 2003).

6.1. Levures

Les principaux micro-organismes d'altération dans l'ensilage sont les levures aérobies (Pahlow et al., 2003) (figure 62), dont la croissance était importante après l'ouverture des sacs d'ensilage. Ces levures peuvent utiliser à la fois les sucres et l'acide lactique comme substrat. L'acide lactique et les sucres résiduels constituent la principale source d'énergie des micro-organismes impliqués dans l'altération de l'ensilage (McDonald et al. 1991). Les levures jouent un rôle majeur dans la détérioration aérobie de l'ensilage en utilisant le lactate (Woolford 1990). De plus, la numération des levures dans l'ensilage peut être utile car, un nombre élevé de levures dans l'ensilage est généralement associé à des concentrations élevées d'éthanol, et leur nombre est souvent inversement proportionnel à la stabilité aérobie de l'ensilage. Bien qu'elles soient relativement tolérantes à l'acide et qu'elles puissent utiliser le lactate présent dans l'ensilage lorsqu'elles sont exposées à l'air, elles participent principalement à la détérioration aérobie de l'ensilage, qui s'accompagne de modifications chimiques, d'une augmentation de la température et d'une perte de MS (Woolford 1990 ; Muck et Pitt 1993 ; Bolsen et coll. 1996).

Nous avons remarqué que les levures se sont fortement développées dans tous les ensilages après ouvertures des sacs et exposition à l'air, mais l'ensilage à 10% de mélasse a présenté les valeurs les plus importantes de levures en vue de la teneur en sucres associée.

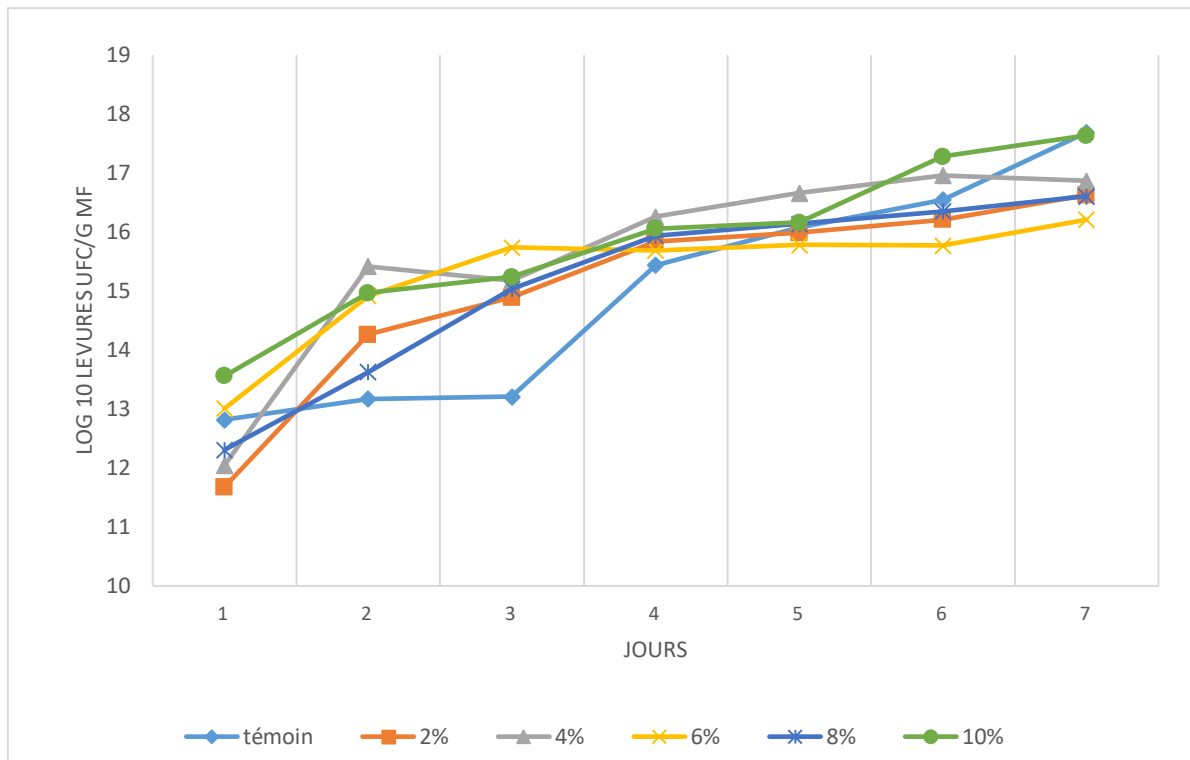


Figure 62: Développement des levures (log UFC/g MF) pendant le test de stabilité aérobie.

6.2. pH et Température

Le métabolisme de l'acide lactique et de l'acide acétique par les micro-organismes aérobies entraîne une augmentation du pH, ce qui est fortement corrélée à l'augmentation notée de la température (Figures 63 et 64).

Le pH du traitement à 10 % a augmenté plus rapidement que celui des autres traitements, tandis que la variante à 2 % présentait la valeur de pH la plus faible. Le pH et la température ont atteint des valeurs maximales pour tous les traitements à la fin de l'exposition aérobie, ce qui peut être dû à la diminution de la teneur en acide lactique avec le temps d'exposition aérobie.

Le pH et la température sont des indicateurs de la détérioration de l'ensilage car les levures consomment l'acide lactique pendant l'exposition aérobie, et l'ensilage devient favorable à la croissance d'autres microorganismes indésirables tels que les moisissures et les bactéries. Basso et al., (2012) et Hara & Ohyama, (1978) ont également signalé que la teneur en acide lactique diminuait à mesure que le pH augmentait si l'ensilage se détériorait.

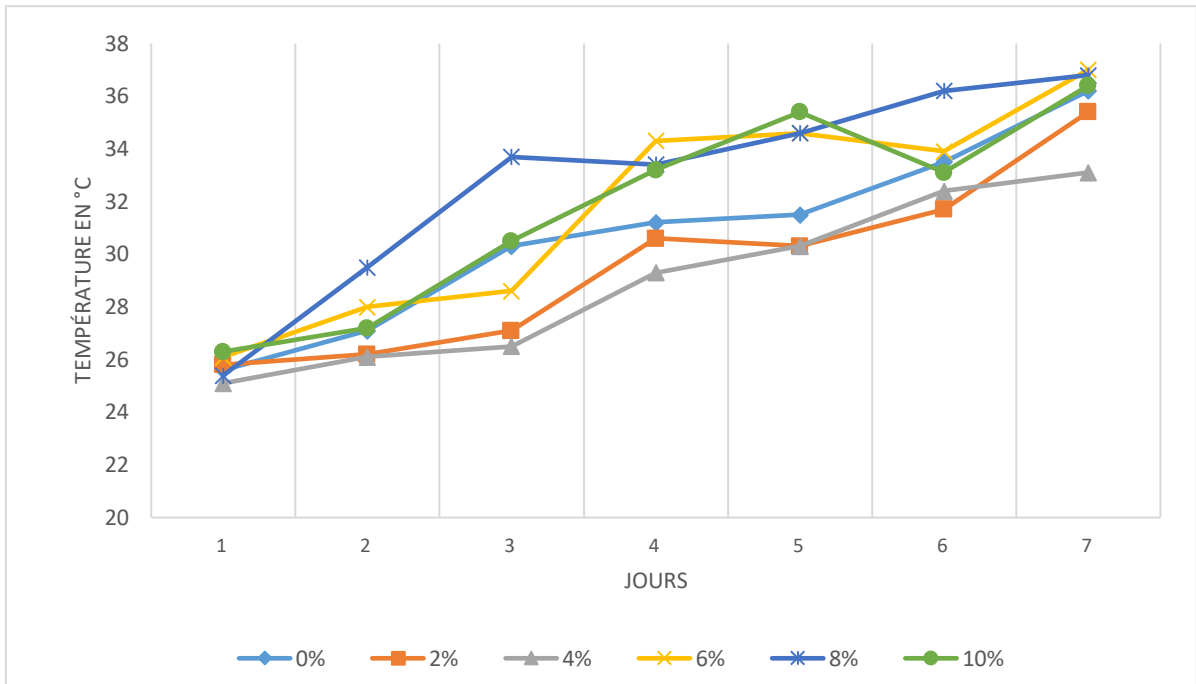


Figure 63: Evolution de la température pendant le test de stabilité aérobie.

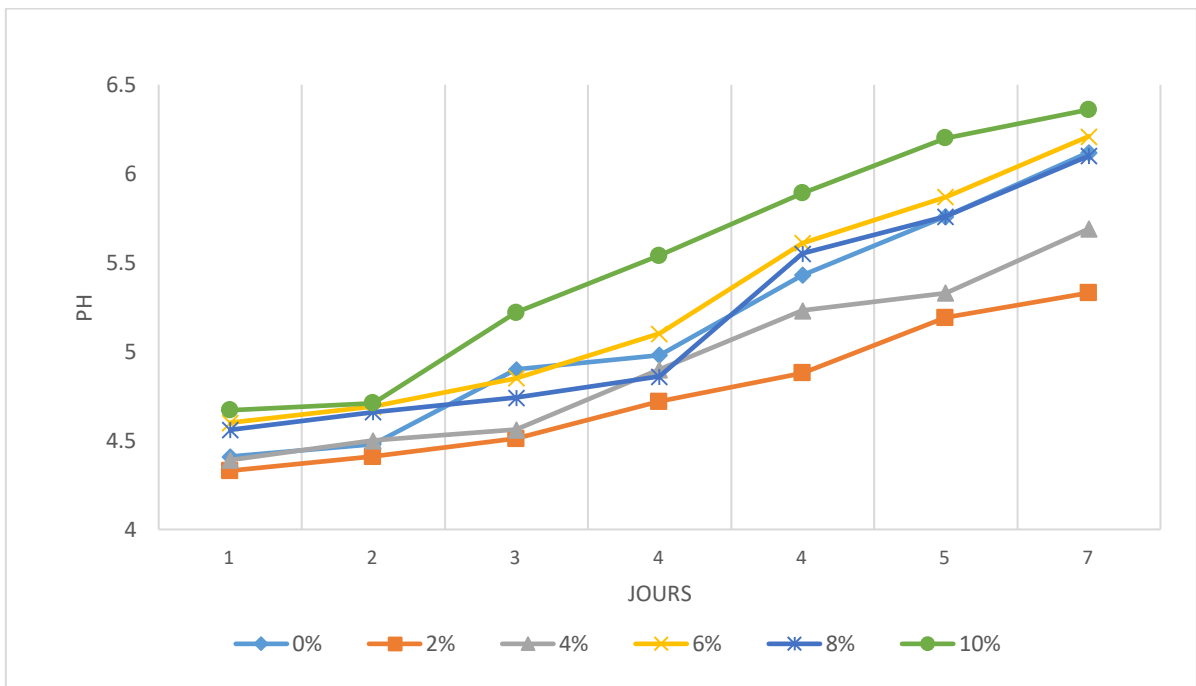


Figure 64: Evolution du pH pendant le test de stabilité aérobie.

Conclusion

Les niveaux d'inclusion de mélasse avaient un effet significatif sur les caractéristiques de l'ensilage. L'ajout de la mélasse a augmenté le niveau de sucre, de matière sèche, de pH et d'éléments minéraux dans les mélanges initiaux. Pendant l'ensilage, une grande partie des sucres et des protéines a été dégradée. L'ensilage de cactus à 10% de mélasse a eu une meilleure qualité de fermentation et la plus forte baisse de pH. De plus, l'ajout de la mélasse a favorisé le développement des bactéries lactiques ; la variante à 10% de mélasse en a enregistré le plus grand nombre. Les coliformes ont disparu après 10 jours d'ensilage. Lors de l'ouverture des ensilages, la contamination par les levures était très importante pour toutes les variantes et la variante à 10% de mélasse avait les valeurs de pH les plus élevées.

Par ailleurs, les mélanges de cactus peuvent être conservés par une méthode d'ensilage standard, avec ou sans additifs. L'additif mélasse améliore la fermentation, facilite le processus de conservation et limite les pertes d'ensilage. L'ensilage a permis d'améliorer les produits en réduisant la croissance des micro-organismes d'altération. Par contre, le taux de protéines reste très faible, ce qui nécessite un enrichissement par un autre moyen.

Conclusion générale

Le figuier de barbarie (*Opuntia ficus-indica*) est une espèce permanente ligneuse qui appartient à la famille des cactacées connue pour son utilisation alimentaire et fourragère très répandue au monde et au Maroc. Il présente de nombreuses potentialités écologiques, socio-économiques et industrielles. Cette étude avait comme objectif principal de déterminer les potentialités d'utilisation des rebuts et des résidus du figuier de barbarie dans la formulation d'aliments pour animaux, répondant aux exigences nutritionnelles et à la bonne qualité hygiénique.

Dans l'étude bibliographique nous avons présenté, la répartition du figuier de barbarie dans le monde et au Maroc, son importance dans les différents domaines, la composition chimique de la cladode et du fruit de cactus, utilisé dans l'alimentation animale et/ou humaine. Nous avons également passé en aperçu la méthode d'ensilage comme méthode de conservation des fourrages.

Cette revue bibliographique nous a permis de conclure que le figuier de barbarie constitue un exemple typique d'espèce parfaitement convenable pour la mise en valeur des zones arides et semi-arides du Maroc. Sa culture peut contribuer au développement agricole dans ces zones. Ces fruits présentent un intérêt nutritionnel important qui permet de les classer parmi les aliments riches en glucides, en fibres et en éléments minéraux.

La première partie de l'étude expérimentale a été consacrée à la caractérisation chimique, biochimique et microbiologique des différentes fractions du fruit de cactus (graine, pulpe et pelure) collectés dans la région de Béni Mellal en fin de saison (mois d'octobre). Les résultats obtenus ont montré que la pelure du fruit présentait des valeurs faibles en protéines (4,84%MS) et en matière grasse (0,09%MS), des teneurs moyennes en fibres et des teneurs élevées en éléments minéraux et en sucres (31,19%MS).

La pulpe était riche en sucres et en éléments minéraux, elle avait une teneur moyenne en fibres et en protéines (10,21%MS), une faible teneur en matière grasse (0,17%MS). Quant aux graines, elles étaient riches en matière grasse (8,91%MS), en fibres et en éléments minéraux, elles avaient une teneur moyenne en protéines (7,66%MS) et une faible teneur en sucres (8,18%MS). De plus, les rebuts de fruit de cactus étaient chargés en microorganismes utiles (bactéries lactiques) mais aussi en micro-organismes pathogènes (coliformes).

A la lumière des résultats de cette première partie des travaux, nous pouvons conclure que les pelures ainsi que les fruits entiers du cactus ont une teneur importante en eau et en sucres, une teneur moyenne en fibres et une faible teneur en protéines. De même, de par leur biotope naturel important et varié, ils présentent un milieu favorable pour le développement microbien. Il s'avère donc possible de traiter les pelures et les rebuts de fruits de cactus par des procédés de biotransformation tel que l'ensilage.

C'est dans ce sens que nous avons mené dans la deuxième partie de l'étude expérimentale des essais d'ensilage des pelures et des rebuts de fruits de cactus. Les pelures et les fruits de cactus ont été mélangé séparément avec de la paille et du son de blé après broyage, ces mélanges ont été mis en sacs en plastique d'un kg chacun, les sacs ont été fermés et stockés à température ambiante pendant 30 jours.

Les résultats obtenus nous ont permis de démontrer que la méthode de l'ensilage est une technique de stockage adapté à ce type de produit. En effet, aussi bien l'ensilage des pelures que celui de fruits de cactus ont présenté un pH final inférieur à 4,5, ce qui a permis leur stabilisation. L'ensilage des fruits a présenté des valeurs nutritionnelles plus importantes que l'ensilage des pelures, notamment, des teneurs en protéines, en sucres et quelques éléments minéraux plus élevé. Le pH final de l'ensilage des fruits était plus bas que celui de l'ensilage des pelures, ce qui reflète une meilleure conservation. Les paramètres microbiologiques ont indiqué que les ensilages de fruits et de pelures étaient bien conservés. Par contre, on a remarqué que les deux types d'ensilage ont perdu une partie de leur valeur nutritive, sous forme de composés hydrosolubles dans les eaux libérées par la plante au cours de la fermentation. Aussi est-il nécessaire d'introduire des compléments alimentaires tels que la mélasse, l'urée, les minéraux, source de protéine....

Parmi les critères nutritifs importants pris en considération dans l'alimentation animale c'est la teneur en protéines. Or le cactus, comme a été démontré en bibliographie et en travaux expérimentaux présente une teneur faible en protéines. En plus, une partie de ces protéines est perdue par hydrolyse et solubilisation dans les eaux au cours de la fermentation. Pour améliorer cette teneur en protéines nous avons mené d'une part des essais d'ensilage et d'autre part des essais de séchage solaire des rebuts de fruits de cactus après les avoir mélangé avec d'autres plantes (atriplex et luzerne) connues par leur teneur assez élevée en protéines.

Les résultats obtenus, nous ont permis de conclure que l'inclusion de l'atriplex (M3 : 40% de cactus + 40% d'atriplex + 10% de son de blé + 10% de paille de blé) ou la luzerne (M2 : 40% de luzerne +40% de cactus + 10% de paille de blé + 10% de son de blé) dans l'ensilage de cactus

a permis d'améliorer sa qualité nutritionnelle. Elles ont augmenté les niveaux de protéines, de cendres, NDF et ADF dans les ensilages. Ainsi ces deux fourrages, atriplex ou luzerne constitue un très bon complément aux fruits de cactus pour utilisation en alimentation animale. Après ensilage l'ajout de luzerne (M2) ou d'atriplex (M3) a entraîné une augmentation du pH final des ensilages, en comparaison avec le mélange (M1), mais tous les mélanges ont présentés des valeurs satisfaisantes (entre 4,35 et 4,55), donc des ensilages stables.

Le séchage solaire a permis de mieux conserver la qualité nutritionnelle de tous les mélanges M1, M2 et M3 notamment les protéines, les sucres, les cendres et les éléments minéraux.

La population de micro-organisme a été réduite dans les deux modes de conservation (le séchage solaire et l'ensilage). Par contre, l'ensilage a permis de mieux minimiser le nombre de levures, de champignons et de coliformes.

La préparation de l'ensilage a été réalisée en broyant les fruits de cactus entiers. Le broyat obtenu a ensuite été ajouté à un mélange de paille et de son de blé qui ont pour rôle d'augmenter la teneur en matière sèche des mélanges, selon les proportions (75% de cactus, 12,5 % de paille et 12,5 % de son de blé). Le broyage a été fin afin de favoriser la compaction du mélange et d'évacuer le maximum d'air des sacs avant de les fermer.

Le mélange a été ensuite séparé en six portions afin de pouvoir ajouter de la mélasse à différents pourcentages. La mélasse a été alors ajoutée dans des pourcentages de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10% (p/p). Ensuite, les mélanges ont été placés dans des sacs en plastique (1 kg / sac) ; les sacs ont été scellés, doublés et stockés pendant 30 jours à température ambiante. Huit sacs par traitement ont été préparés, dont cinq ont été échantillonnés les jours 5, 10, 15, 20 et 25 pour la mesure du pH et l'analyse microbiologique. Les mélanges frais et d'ensilage à 30 jours ont été soumis à une analyse complète, qui comprendra toutes les analyses biochimiques et microbiologiques.

3 sacs de chaque traitement ont été ouverts et laissés au contact de l'air à température ambiante pendant une semaine pour réaliser le test de stabilité aérobie.

Toujours dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'ensilage, nous avons mené dans la quatrième partie de l'étude expérimentale, une étude sur l'effet de l'ajout de niveaux croissants de mélasse aux rebuts de fruits de cactus sur les caractéristiques de l'ensilage. La préparation de l'ensilage a été réalisée en réalisant un mélange de fruits de cactus, de paille et de son de blé (75% de cactus, 12,5 % de paille et 12,5 % de son de blé). Ce mélange a été séparé en six portions et la mélasse a été alors ajoutée dans des pourcentages de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10% (p/p).

Ensuite, les mélanges ont été placés dans des sacs en plastique (1 kg / sac) ; les sacs ont été scellés, doublés et stockés pendant 30 jours à température ambiante.

D'après les résultats obtenus, on a constaté que l'ajout de la mélasse a augmenté le niveau de sucre, de matière sèche, de pH et d'éléments minéraux dans les mélanges initiaux. Pendant l'ensilage, une grande partie du sucre et des protéines a été dégradée. L'ensilage de cactus traité à 10% de mélasse a eu une meilleure qualité de fermentation et la plus forte baisse du pH. De plus, l'ajout de la mélasse a favorisé le développement des bactéries lactiques ; la variante à 10% de mélasse en a enregistré le plus grand nombre. Les coliformes ont disparu après 10 jours d'ensilage. Cependant, lors de l'ouverture des ensilages, la contamination par les levures était plus importante pour toutes les variantes. Mais, la variante à 10% de mélasse avait les valeurs de pH les plus élevées. Par ailleurs, L'additif mélasse améliore la fermentation, facilite le processus de conservation et limite les pertes d'ensilage. L'ensilage a permis d'améliorer la qualité des produits en réduisant la croissance des micro-organismes d'altération. Par contre, le taux de protéines reste très faible, ce qui nécessite un enrichissement par un autre moyen.

De par les résultats de la troisième et de la quatrième partie de cette étude expérimentale, nous concluons que pour améliorer la qualité nutritive et microbiologique de l'ensilage des fruits de cactus, il serait intéressant de le mélanger avec d'autres plantes riches en protéines telles que l'atriplex et la luzerne et d'y ajouter une quantité de mélasse de l'ordre de 6%.

Perspectives

Comme perspectives de nos travaux, des recherches complémentaires sont envisagées :

- Evaluer la stabilité des ensilages pendant leur stockage sur des durées plus longues (3, 6, 9 mois) ;
- Augmenter la taille des ensilages et évaluer leur stabilisation ;
- Envisager l'utilisation des micro-organismes à intérêt technologique dans le processus de l'ensilage tels que les bactéries lactiques ;
- Etudier les effets zootechniques des ensilages sur des animaux de choix tels les bovins, les ovins, les caprins ou autres.

Et enfin, la voie reste ouverte, à d'autres utilisations et possibilités , permettant ainsi d'élargir la gamme de valorisation des rejets de figuier de barbarie non seulement dans le monde agricole mais aussi dans les domaine de traitement des eaux, de production des gaz naturels comme le méthanol ou l'éthanol.

Références bibliographiques

- A.Araba, el al. (2009). Nouveaux aliments pour les ruminants à base de fruits de cactus. *Bulletin Mensuel*, 037, 77–80.
- Abdel-Hameed, E.-S. S., Nagaty, M. A., Salman, M. S., & Bazaid, S. A. (2014). Phytochemicals, nutritionals and antioxidant properties of two prickly pear cactus cultivars (*Opuntia ficus indica* Mill.) growing in Taif, KSA. *Food Chemistry*, 160, 31–38.
- Abid, A., Zouhri, A., & Ider, A. (2008). Utilisation d'un nouveau bio-floculant extrait du cactus marocain dans le traitement des rejets chargés de chrome (VI) par le procédé de coagulation floculation. *Revue Des Énergies Renouvelables*, 11(2), 251–257.
- Abidi, S., Ben Salem, H., Nefzaoui, A., Vasta, V., & Priolo, A. (2010). Silage composed of *Opuntia ficus-indica* f. *inermis* cladodes, olive cake and wheat bran as alternative feed for barbarine lamb. *VII International Congress on Cactus Pear and Cochineal 995*, 297–301.
- Abidi, S., Salem, H. Ben, Vasta, V., & Priolo, A. (2009). Supplementation with barley or spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cladodes on digestion, growth and intramuscular fatty acid composition in sheep and goats receiving oaten hay. *Small Ruminant Research*, 87(1–3), 9–16.
- Abou-Raya, A. K., Habit, R. M., Abdel-Malik, W. H., Makky, A. M., & Hathout, M. K. (1973). Effect of chopping and molasses addition on the nutritional qualities of trench silage prepared from first cut of clover-ryegrass mixture. *Agric. Res. Review*, 51, 41–60.
- Addah, W., Baah, J., & McAllister, T. A. (2016). Effects of an exogenous enzyme-containing inoculant on fermentation characteristics of barley silage and on growth performance of feedlot steers. *Canadian Journal of Animal Science*, 96(1), 1–10.
- Afssa. (2004). Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage, pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires. Imprimerie Bialec - Nancy, pp 112.
- Ait-Oubahou, A., & Bartali, H. (2015). des pertes en post-récolte de fruits et légumes au Maroc. *TERRE ET MER*.
- Aksu, T., Baytok, E., Karšli, M. A., & Muruz, H. (2006). Effects of formic acid, molasses and inoculant additives on corn silage composition, organic matter digestibility and microbial protein synthesis in sheep. *Small Ruminant Research*, 61(1), 29–33.
- Amend, R. (1990). *Anhäufung der Mykotoxine Patulin, Penicillinsäure, PR-Toxin und Mycophenolsäure durch Penicillien auf Maissilage und auf halbsynthetischem Medium*.
- Amyot, A. (2003). Les additifs pour le foin et l'ensilage : mode d'action et recommandations d'utilisation pour chaque type de produit. *Chemin Du Roy, Deschambault, GOA 1S0*, 1–23.
- Anderson, B. K., & Jackson, N. (1970). Conservation of wilted and unwilted grass ensiled in air-tight metal containers with and without the addition of molasses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 21(5), 235–241.
- Arba, M. (2009). Le cactus *Opuntia*, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture

- durable au Maroc. *Actes Du Symposium International AGDUMED-Durabilité Des Systèmes de Culture En Zone Méditerranéenne et Gestion Des Ressources En Eau et En Sol*, 14–16.
- Arba, M., Aich, E. L., Sarti, A., Belbahri, B., Boubkraoui, L. L., Ait Hammou, A., Zemmouri, A., & Sbaa, A. H. (2000). Valorisation du figuier de barbarie en élevage. *Bull Mens Inf Liaison PNTTA*, 68, 1–4.
- Arba, Mohamed. (2017). *Effets de la fertilisation NP et de l'irrigation à des périodes critiques sur le rendement et la qualité des fruits du figuier de Barbarie (Opuntia ficus-indica (L.) Mill.)*. Université de Liège, Liège, Belgique.
- Armbruster, G. (1994). *Futtermittelhygienische Untersuchungen von Silagen: Nachweis und Vorkommen des Mykotoxins Roquefortin*. na.
- Ashbell, G., Weinberg, Z. G., Azrieli, A., Hen, Y., & Horev, B. (1991). A simple system to study the aerobic determination of silages. *Canadian Agricultural Engineering*, 34, 171–175.
- Askar, A., & El Samahy, S. K. (1981). Chemical composition of prickly pear fruits [figs]. *Deutsche Lebensmittel Rundschau*.
- Atti, N., Mahouachi, M., & Rouissi, H. (2006). The effect of spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) supplementation on growth, carcass, meat quality and fatty acid composition of male goat kids. *Meat Science*, 73(2), 229–235.
- Auerbach, H., Nadeau, E., Weiss, K., & Theobald, P. (2016). Effects of sodium nitrite-containing additives on dry matter losses, fermentation pattern and biogenic amine formation in lucerne and cocksfoot silage. *Proceedings of the 17th International Conference on Forage Conservation, Horný Smokovec, Slovak Republic*, 27–29.
- Auerbach, H., Weiss, K., & Nadeau, E. (2012). Benefits of using silage additives. *Proc. 1 Int. Silage Summit, Leipzig, Saxony, Germany*. H. Auerbach, C. Lückstädt, and F. Weissbach, Ed. Anytime Publishing Services, Worthington, UK, 75–144.
- Auerbach, Horst. (1996). *Verfahrensgrundlagen zur Senkung des Risikos eines Befalls von Silagen mit Penicillium roqueforti und einer Kontamination mit Mykotoxinen dieses Schimmelpilzes*. FAL.
- Auerbach, Horst, & Nadeau, E. (2020). *Effects of chemical additives on whole-crop maize silage traits*.
- Ayadi, M. A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., & Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*, 30(1), 40–47.
- Baeza, F. (1995). Aprovechamiento del desecho del cultivo de cactáceas *Opuntia cacti* (tunales) para producción de biogás. *Santiago, Faculty of Physical Sciences and Mathematics, University of Chile (Civil Engineering Thesis)*, 132.
- Bahorun, T. (1998). Substances naturelles actives: la flore mauricienne, une source d'approvisionnement potentielle. *Second Annual Meeting of Agricultural Scientists*, 83.
- Barbagallo, R. N., & Spagna, G. (1999). Oil: Fatty acids determination from oil seeds of *Opuntia ficus-indica* L.(Miller). *Industria Alimentari*, 38, 815–817.
- Barbera, G, Carimi, F., Inglese, P., & Sajeve, M. (1988). Influence of timing of fruit and cladode

- removal on the reflowering and the time of ripening of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) fruits. *3rd National and 1st International Conference on Prickly Pear, Saltillo, Mexico*, 10–14.
- Barbera, G., Inglese, P., & La Mantia, T. (1994). Seed content and fruit characteristics in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Scientia Horticulturae*, 58(1–2), 161–165.
- Barbera, Giuseppe, Carimi, F., & Inglese, P. (1992). Past and present role of the Indian-fig prickly-pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, Cactaceae) in the agriculture of Sicily. *Economic Botany*, 46(1), 10–20.
- Basso, F. C., Bernardes, T. F., Roth, A. P. de T. P., Lodo, B. N., Berchielli, T. T., & Reis, R. A. (2012). Fermentation and aerobic stability of corn silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(7), 1789–1794.
- Batista, A. M., Mustafa, A. F., McAllister, T., Wang, Y., Soita, H., & McKinnon, J. J. (2003). Effects of variety on chemical composition, in situ nutrient disappearance and in vitro gas production of spineless cacti. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(5), 440–445.
- Baumont, R., Aufrere, J., & Meschy, F. (2009). La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Fourrages*, 198, 153–173.
- Baytok, E., Aksu, T., KARSLI, M. A., & Muruz, H. (2005). The effects of formic acid, molasses and inoculant as silage additives on corn silage composition and ruminal fermentation characteristics in sheep. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 29(2), 469–474.
- Beard, M., Beck, L., Clark, C. J., Merriman, R. J., & Palmer, D. J. (1989). Water pollution by silage effluent. *Silage Effluent and Its Control*, 1–8.
- BENDAOU, M. (2013). *Method for producing silage containing cactus and argan-tree by-products*. Google Patents.
- Berat, D., & Turker, N. (2005). Changes in physical properties and chemical composition of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) during maturation. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 7, 22–33.
- Bergen, W. G., Cash, E. H., & Henderson, H. E. (1974). Changes in nitrogenous compounds of the whole corn plant during ensiling and subsequent effects on dry matter intake by sheep. *Journal of Animal Science*, 39(3), 629–637.
- Bernard, M., Chapoutot, P., Chatelet, M., Gueroult, M., Jubert, M., Morel d'Arleux, F., Taccard, M., Mariani, M., & Tierny, M. (1991). Synthèse sur: la mélasse. *Comité Des Sous-Produits-RNED Bovins, Juillet: 19p*.
- Beyene, H. D., Haile, R. G., & Tigray, E. (2015). Agro-industrial use of cactus, a review. *Food Sci Qual Manag*, 39, 26–30.
- Bhira, O. (2012). *Potentialités thérapeutiques d'Opuntia ficus indica au Maroc et en Tunisie*.
- Bilal, M. Q. (2009). Effect of molasses and corn as silage additives on the characteristics of mott dwarf elephant grass silage at different fermentation periods. *Pakistan Veterinary Journal*, 29(1).
- Boke, N. H. (1980). Developmental morphology and anatomy in Cactaceae. *BioScience*, 30(9), 605–610.

- Bolsen, K. K., Ashbell, G., & Weinberg, Z. G. (1996). Silage fermentation and silage additives—Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 9(5), 483–494.
- Bolsen, K., Laytimi, A., Hart, R., Nuzback, L., Niroomand, F., Leipold, L., & Ilg, H. (1988). *Effect of commercial inoculants on fermentation of 1987 silage crops*.
- Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., & Muck, R. E. (2018). Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3952–3979.
- Brassley, P. (1996). Silage in Britain, 1880—1990: The Delayed Adoption of an Innovation. *The Agricultural History Review*, 63–87.
- Britton, N. L., & Rose, J. N. (1963). *The Cactaceae: descriptions and illustrations of plants of the cactus family* (Vol. 3). Courier Corporation.
- Buchanan-Smith, J. G., & Yao, Y. T. (1978). Non-protein nitrogen in corn silage: a partial characterization, its utilization in the rumen and effect upon digestibility and retention of nitrogen in lambs. *Canadian Journal of Animal Science*, 58(4), 681–690.
- Bühler, N. B. (1985). *Clostridien in Silage, Dung, Milch und Käse: Spätblähung im Käse*. ETH Zurich.
- Butera, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A. M., Kohen, R., & Livrea, M. A. (2002). Antioxidant activities of Sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(23), 6895–6901.
- Carpintero, C. M., Henderson, A. R., & McDonald, P. (1979). The effect of some pre-treatments on proteolysis during the ensiling of herbage. *Grass and Forage Science*, 34(4), 311–315.
- Casas, A., & Barbera, G. (2002). Mesoamerican domestication and diffusion. *Cacti: Biology and Uses*, 143, 62.
- Castle, M. E., & Watson, J. N. (1985). Silage and milk production: studies with molasses and formic acid as additives for grass silage. *Grass and Forage Science*, 40(1), 85–92.
- Chang, T. S., Dorn, D., & Zindel, H. C. (1974). Stability of poultry anaphage. *Poultry Science*, 53(6), 2221–2224.
- Charmley, E., Savoie, P., & McQueen, R. E. (1997). Influence of maceration at cutting on lactic acid bacteria populations, silage fermentation and voluntary intake and digestibility of precision-chopped lucerne silage. *Grass and Forage Science*, 52(1), 110–121.
- CHARROUF, Z., & GUILLAUME, D. (2007). Huile d’argan une production devenue adulte. *Les Technologies de Laboratoire*, 2(6).
- Cheftel, J. C., Cheftel, H., & Besancon, P. (1983). Introduction ala Biochimie et ala Technologie des Aliments. *Technique et Document Lavoisier, Paris*.
- Chenost, M., & Kayouli, C. (1997). Roughage utilization in warm climates. *FAO Animal Production and Health Paper*, 135.
- Cibils, A. F. (1998). *Plant-herbivore interactions in Atriplex: current state of knowledge*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Conaghan, P., O’Kiely, P., & O’Mara, F. P. (2012). Possibilities of increasing the residual

- water-soluble carbohydrate concentration and aerobic stability of low dry-matter perennial ryegrass silage through additive and cultivar use. *Grass and Forage Science*, 67(2), 177–198.
- Contreras-Padilla, M., Perez-Torrero, E., Hernández-Urbiola, M. I., Hernández-Quevedo, G., del Real, A., Rivera-Muñoz, E. M., & Rodríguez-García, M. E. (2011). Evaluation of oxalates and calcium in nopal pads (*Opuntia ficus-indica* var. redonda) at different maturity stages. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), 38–43.
- Coulibaly, I., Dubois-Dauphin, R., Danthine, S., Majad, L., Mejoub, T., Destain, J., Béra, F., Wathelet, J.-P., & Thonart, P. (2011). Techniques de séchage des starters lactiques et mécanismes affectant la viabilité cellulaire suite à la lyophilisation. *BASE*.
- Cürek, M., & Özen, N. (2004). Feed value of cactus and cactus silage. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 28(4), 633–639.
- Cutter, C. N. (2002). Microbial control by packaging: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(2), 151–161.
- Daeschel, M. A., Andersson, R. E., & Fleming, H. P. (1987). Microbial ecology of fermenting plant materials. *FEMS Microbiology Reviews*, 3(3), 357–367.
- Davies, D. R., Merry, R. J., Williams, A. P., Bakewell, E. L., Leemans, D. K., & Tweed, J. K. S. (1998). Proteolysis during ensilage of forages varying in soluble sugar content. *Journal of Dairy Science*, 81(2), 444–453.
- Davies, S.-J., Guroy, D., Hassaan, M. S., El-Ajnaf, S. M., & El-Haroun, E. (2020). Evaluation of co-fermented apple-pomace, molasses and formic acid generated sardine based fish silages as fishmeal substitutes in diets for juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) production. *Aquaculture*, 521, 735087.
- de Chávez, M. M., Chávez, A., Valles, V., & Roldán, J. A. (1995). The nopal: a plant of manifold qualities. In *Plants in Human Nutrition* (Vol. 77, pp. 109–134). Karger Publishers.
- de Jesus Ferreira, D., de Paula Lana, R., de Moura Zanine, A., Santos, E. M., Veloso, C. M., & Ribeiro, G. A. (2013). Silage fermentation and chemical composition of elephant grass inoculated with rumen strains of *Streptococcus bovis*. *Animal Feed Science and Technology*, 183(1–2), 22–28.
- De Kock, G. C. (1980). Drought resistant fodder shrub crops in South Africa. In *Browse in Africa. The current state of knowledge* (pp. 399–408). International Livestock Center for Africa, Ethiopia.
- De Kock, G. C. (2001). The use of *Opuntia* as a fodder source in arid areas of Southern Africa. *FAO Plant Production and Protection Paper (FAO)*.
- Defelice, M. S. (2004). Prickly Pear Cactus, *Opuntia* spp.—A Spine-Tingling Tale1. *Weed Technology*, 18(3), 869–877.
- Demarquilly, C., Dulphy, J. P., & Andrieu, J. P. (1998). Valeurs nutritive et alimentaire des fourrages selon les techniques de conservation : foin, ensilage, enrubannage. *Fourrages*, 155, 349–369.
- Deschard, G., Mason, V. C., & Tetlow, R. M. (1988). Treatment of whole-crop cereals with alkali. 4. Voluntary intake and growth in steers given wheat ensiled with sodium

- hydroxide, urea or ammonia. *Animal Feed Science and Technology*, 19(1–2), 55–66.
- Dewar, W. A., McDonald, P., & Whittenbury, R. (1963). The hydrolysis of grass hemicelluloses during ensilage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 14(6), 411–417.
- Donald, A. S., Fenlon, D. R., & Seddon, B. (1995). The relationship between ecophysiology, indigenous microflora and growth of *Listeria monocytogenes* in grass silage. *Journal of Applied Bacteriology*, 79(2), 141–148.
- Driehuis, F., Oude Elferink, S., & Van Wikselaar, P. G. (2001). Fermentation characteristics and aerobic stability of grass silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria. *Grass and Forage Science*, 56(4), 330–343.
- Dubeux Jr, J. C. B. (2016). Cactus: a crop for the dry areas. *Broad Hori*, 28, 1–4.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. t, & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356.
- Dubois, P. (1978). *Plastics in agriculture*. Applied Science Publishers Ltd.
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B., & Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), 14879–14901.
- El Kossori, R. L., Villaume, C., El Boustani, E., Sauvaire, Y., & Méjean, L. (1998). Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(3), 263–270.
- Ely, L. O. (1978). *The use of added feedstuffs in silage production*.
- Ennouri, M., Evelyne, B., Laurence, M., & Hamadi, A. (2005). Fatty acid composition and rheological behaviour of prickly pear seed oils. *Food Chemistry*, 93(3), 431–437.
- Escoula, L. (1977). *MOISSURES DES ENSILAGES ET CONSEQUENCES TOXICOLOGIQUES*.
- Fairbairn, R., Alli, I., & Baker, B. E. (1988). Proteolysis associated with the ensiling of chopped alfalfa. *Journal of Dairy Science*, 71(1), 152–158.
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2005). *Fertilizer use by crop in South Africa*. Food and Agriculture Organisation.
- Fehrmann, E., & Müller, T. (1990). Seasonal changes of epiphytic microorganisms on a grassland plot. *Wirtschaftseigene Futter*, 36(1), 66–78.
- Feichtinger, M., Mayrhofer, S., Kneifel, W., & Domig, K. J. (2016). Tetracycline resistance patterns of *Lactobacillus buchneri* group strains. *Journal of Food Protection*, 79(10), 1741–1747.
- Felker, P., Rodriguez, S. del C., Casoliba, R. M., Filippini, R., Medina, D., & Zapata, R. (2005). Comparison of *Opuntia ficus indica* varieties of Mexican and Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. *Journal of Arid Environments*, 60(3), 405–422.

- Fenlon, D. R. (1986). Growth of naturally occurring *Listeria* spp. in silage: a comparative study of laboratory and farm ensiled grass. *Grass and Forage Science*, 41(4), 375–378.
- Fenlon, D. R., Wilson, J., & Weddell, J. R. (1989). The relationship between spoilage and *Listeria monocytogenes* contamination in bagged and wrapped big bale silage. *Grass and Forage Science*, 44(1), 97–100.
- Fernández-López, J. A., Almela, L., Obón, J. M., & Castellar, R. (2010). Determination of antioxidant constituents in cactus pear fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(3), 253–259.
- Fernandez, M. L., Lin, E. C. K., Trejo, A., & McNamara, D. J. (1992). Prickly pear (*Opuntia* sp.) pectin reverses low density lipoprotein receptor suppression induced by a hypercholesterolemic diet in guinea pigs. *The Journal of Nutrition*, 122(12), 2330–2340.
- Fernandez, M. L., Trejo, A., & McNamara, D. J. (1990). Pectin isolated from prickly pear (*Opuntia* sp.) modifies low density lipoprotein metabolism in cholesterol-fed guinea pigs. *The Journal of Nutrition*, 120(11), 1283–1290.
- Feugang, J. M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F. C., & Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Front Biosci*, 11(1), 2574–2589.
- Filip, S., Hribar, J., & Vidrih, R. (2011). Influence of natural antioxidants on the formation of trans-fatty-acid isomers during heat treatment of sunflower oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(2), 224–230.
- Francllet, A., Houérou, H. N. L., Tunis, I. de reboisement de, Nations, F. and A. O. of the U., & Programme, U. N. D. (1971). *Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du nord: rapport préparé pour le Gouvernement de la Tunisie par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture agissant en qualité d'agence d'exécution du Programme des Nations Unies pour le dév.* Programme des Nations Unies pour le développement. <https://books.google.co.ma/books?id=C3aqzAEACAAJ>
- Fransen, S. C., & Strubi, F. J. (1998). Relationships among absorbents on the reduction of grass silage effluent and silage quality. *Journal of Dairy Science*, 81(10), 2633–2644.
- Gaillard, F. (1982). Round bale silage. (In French.) *Fourrages*, 91, 36–55.
- Galanos, E., Gray, K. R., Biddlestone, A. J., & Thayanithy, K. (1995). The aerobic treatment of silage effluent: effluent characterization and fermentation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(4), 271–279.
- Ganneau, M. (1981). Round bale silage of herbage crops: The French experience (In French.). *Bull. CEMAGREF*, 280, 19–21.
- García, A. H. (2011). Anhydrobiosis in bacteria: from physiology to applications. *Journal of Biosciences*, 36(5), 939–950.
- García de Cortázar, V., Varnero, M., MT Barbera, G., Inglese, P., Pimienta Barrios, E., & Arias Jiménez, E. de J. (1995). *Energy production. Agro-ecology cultivation and uses of cactus pear*. FAO, Roma (Italia).
- Gebrekidan, T., Egigu, M. C., & Muthuswamy, M. (2014). Efficiency of biogas production from cactus fruit peel co-digestion with cow dung. *Efficiency of Biogas Production from Cactus Fruit Peel Co-Digestion with Cow Dung*, 2(7), 916–923.

<http://www.journalijar.com>

- Gebremariam, T., Melaku, S., & Yami, A. (2006). Effect of different levels of cactus (*Opuntia ficus-indica*) inclusion on feed intake, digestibility and body weight gain in tef (*Eragrostis tef*) straw-based feeding of sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 131(1–2), 43–52.
- Genest, J., Amyot, A., Caron, R., Couture, J. N., Lachance, J., Poussier, S., Quevillon, M., Rony, D. D., & Savoie, P. (1990). Round bale silage. *French.) Ministere de l'agriculture, Des Pecheries et de l'alimentation Du Quebec, Quebec, Canada.*
- Gordon, F. J. (1981). The effect of wilting of herbage on silage composition and its feeding value for milk production. *Animal Science*, 32(2), 171–178.
- Graves, R. E., & Vanderstappen, P. J. (1993). Environmental problems with silage effluent. *Silage Production from Seed to Animal (NRAES-67). Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY.*
- Griffiths, D. (1905). The prickly pears and other cacti as fodder for livestock. *United State Department of Agriculture Bulletin*, 74.
- Gusha, J., Halimani, T. E., Ngongoni, N. T., & Ncube, S. (2015). Effect of feeding cactus-legume silages on nitrogen retention, digestibility and microbial protein synthesis in goats. *Animal Feed Science and Technology*, 206, 1–7.
- Habibi, Y. (2004a). *Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides pariétaux: caractérisation et modification chimique.* Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Habibi, Y. (2004b). *Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides* To cite this version : *FOURIER – GRENOBLE I.*
- Haigh, P. M., Chapple, D. G., & Powell, T. L. (1996). RESEARCH NOTE: Effect of silage additives on big-bale grass silage. *Grass and Forage Science*, 51(3), 318–323.
- Hammes, W. P., & Hertel, C. (2009). Genus I. *Lactobacillus* Beijerinck 1901, 212AL. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, 3, 465–490.
- Hamou, A. (2007). An overview on Medical and Cosmetic Uses of Cactus in Morocco. Cactusnet. Issue 11. *International Center for Agricultural Research in the Dry Areas/Universidad Nacional de Santiago Del Estero, Buenos Aires.*
- Hanselka, C. W., & Paschal, J. C. (1990). Prickly pear cactus: an important rangeland resource. *Prickly Pear Cactus: An Important Rangeland Resource.*, 141–143.
- Hara, S., & Ohyama, Y. (1978). Propionic acid application in preventing aerobic deterioration of silage, with reference to the relationship to moisture content and additive tolerant microorganisms. *Japanese Journal of Zootechnical Science (Japan).*
- Harrison, H. P. (1985). Preservation of large round bales at high moisture. *Transactions of the ASAE*, 28(3), 675–679.
- HCP. (2017). *Monographie Regionale Beni Mellal-Khenifra 2017* (pp. 1–235).
- Henderson, N. (1993). Silage additives. *Animal Feed Science and Technology*, 45(1), 35–56.
- Hinds, M. A., Bolsen, K. K., Brethour, J., Milliken, G., & Hoover, J. (1985). Effects of

- molasses/urea and bacterial inoculant additives on silage quality, dry matter recovery, and feeding value for cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 12(3), 205–214.
- Honig, H. (1991). Reducing losses during storage and unloading of silage. *Landbauforschung Voelkenrode. Sonderheft (Germany, FR)*.
- Honig, H., & Woolford, M. K. (1980). Changes in silage on exposure to air. *Occasional Symposium-British Grassland Society*.
- Hu, W., Schmidt, R. J., McDonell, E. E., Klingerman, C. M., & Kung Jr, L. (2009). The effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 or *Lactobacillus plantarum* MTD-1 on the fermentation and aerobic stability of corn silages ensiled at two dry matter contents. *Journal of Dairy Science*, 92(8), 3907–3914.
- Huber, J. T., Thomas, J. W., & Emery, R. S. (1968). Response of lactating cows fed urea-treated corn silage harvested at varying stages of maturity. *Journal of Dairy Science*, 51(11), 1806–1810.
- Hurst, W. (1971). Principles of silage making. *Silage Systems for the Seventies. Soils and Crops Branch, Ontario Department of Agriculture and Food. Ontario Silage Conference, Rexdale ON*.
- Inglese, P. B., Inglese, P., Pimienta Barrios, E., & Arias JimÚnez, E. de J. (1995). *Orchard planting and management. Agro-ecology cultivation and uses of cactus pear*. FAO, Roma (Italia).
- Inglese, P., Barbera, G., & La Mantia, T. (1995). Research strategies for the improvement of cactuspear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *Journal of Arid Environments*, 29(4), 455–468.
- Inglese, Paolo. (2019). *Ecologie, Culture Et utilisations du Figuier De Barbarie*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Jaster, E. (1994). Complex interactions from inoculants, enzymes explored. *Feedstuffs (USA)*.
- Jaurena, G., & Pichard, G. (2001). Contribution of storage and structural polysaccharides to the fermentation process and nutritive value of lucerne ensiled alone or mixed with cereal grains. *Animal Feed Science and Technology*, 92(3–4), 159–173.
- Jenkins, H. M. (1884). *Report on the practice of ensilage at home and abroad*. Royal Agricultural Society of England.
- Johnson, C., Huber, J. T., & Bergen, W. G. (1982). Influence of ammonia treatment and time of ensiling on proteolysis in corn silage. *Journal of Dairy Science*, 65(9), 1740–1747.
- Jones, D. I. H., & Jones, R. (1995). The effect of crop characteristics and ensiling methodology on grass silage effluent production. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 60(2), 73–81.
- Jones, D. I. H., Jones, R., & Moseley, G. (1990). Effect of incorporating rolled barley in autumn-cut ryegrass silage on effluent production, silage fermentation and cattle performance. *The Journal of Agricultural Science*, 115(3), 399–408.
- Jones, R., & Jones, D. I. H. (1996). The effect of in-silo effluent absorbents on effluent production and silage quality. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(3), 173–186.

- Kandler, O. (1986). Genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, 2, 1063–1065.
- Kandler, Otto. (1983). Carbohydrate metabolism in lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 49(3), 209–224.
- Keady, T. W. J., & Murphy, J. J. (1996). Effects of inoculant treatment on ryegrass silage fermentation, digestibility, rumen fermentation, intake and performance of lactating dairy cattle. *Grass and Forage Science*, 51(3), 232–241.
- Keeley, J. E. (1998). CAM photosynthesis in submerged aquatic plants. *The Botanical Review*, 64(2), 121–175.
- Kehler, W., & Scholz, H. (1996). Botulismus des Rindes. *ÜBERSICHTEN ZUR TIERERNAHRUNG*, 24, 83–91.
- Kemble, A. R. (1956). Studies on the nitrogen metabolism of the ensilage process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 7(2), 125–130.
- Kennedy, S. J. (1990). Comparison of the fermentation quality and nutritive value of sulphuric and formic acid-treated silages fed to beef cattle. *Grass and Forage Science*, 45(1), 17–28.
- Khatabi, O., Hanine, H., Elothmani, D., & Hasib, A. (2016). Extraction and determination of polyphenols and betalain pigments in the Moroccan Prickly pear fruits (*Opuntia ficus indica*). *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S278–S281.
- Kiesling, R. (1998). Origen, domesticación y distribución de *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 3.
- Kirstein, K. (1963). Historical survey of the ensiling of green fodder. *Das Wirtschaftseigene Futter*, 9, 54–65.
- Kjeldahl, J. (1883). A new method for the estimation of nitrogen in organic compounds. *Z. Anal. Chem*, 22(1), 366.
- Kjelgaard, W. L., Anderson, P. M., Wilson, L. L., Harpster, H. W., Levan, P. J., & Todd, R. F. (1981). Round bale silage. *ASAE Tech. Pap.*; (United States), 81(CONF-811221-).
- Kluge, M., & Ting, I. P. (2012). *Crassulacean acid metabolism: analysis of an ecological adaptation* (Vol. 30). Springer Science & Business Media.
- Knický, M., & Spörndly, R. (2009). Sodium benzoate, potassium sorbate and sodium nitrite as silage additives. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(15), 2659–2667.
- König, W., Lamminen, M., Weiss, K., Tuomivirta, T. T., Sanz Muñoz, S., Fritze, H., Elo, K., Puhakka, L., Vanhatalo, A., & Jaakkola, S. (2017). The effect of additives on the quality of white lupin–wheat silage assessed by fermentation pattern and qPCR quantification of clostridia. *Grass and Forage Science*, 72(4), 757–771.
- Korhonen, H., Ali-Yrkkö, S., & Hakkarainen, H. (1977). The Clostridium content of Finnish emmental cheese. *Finnish Journal of Dairy Science*.
- Kulikova, V. A., Avdonin, Y. A., Mchedlishvili, B. V., & Bukhter, A. I. (1986). Treatment of used motor oils by means of polymeric membranes. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 22(3), 154–156. <https://doi.org/10.1007/BF00726139>

- Kung Jr, L., Stokes, M. R., & Lin, C. J. (2003). Silage additives. *Silage Science and Technology*, 42, 305–360.
- Kunji, E. R. S., Mierau, I., Hagting, A., Poolman, B., & Konings, W. N. (1996). The proteolytic systems of lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 70(2), 187–221.
- Kuti, J. O., & Galloway, C. M. (1994). Sugar composition and Invertase activity in Prickly Pear fruit. *Journal of Food Science*, 59(2), 387–388.
- Labuza, Theodore P. (1975). Sorption phenomena in foods: theoretical and practical aspects. In *Theory, determination and control of physical properties of food materials* (pp. 197–219). Springer.
- Labuza, To P. (1968). Sorption phenomena in foods. *Food Technol.*, 22, 15–19.
- Lacey, J. (1989). Pre-and post-harvest ecology of fungi causing spoilage of foods and other stored products. *Journal of Applied Bacteriology*, 67, 11s-25s.
- Lara, E. C., Basso, F. C., de Assis, F. B., Souza, F. A., Berchielli, T. T., & Reis, R. A. (2016). Changes in the nutritive value and aerobic stability of corn silages inoculated with *Bacillus subtilis* alone or combined with *Lactobacillus plantarum*. *Animal Production Science*, 56(11), 1867–1874.
- Lättemäe, P., Ohlsson, C., & Lingvall, P. (1996). The combined effect of molasses and formic acid on quality of red-clover silage. *Swedish Journal of Agricultural Research (Sweden)*.
- Lazcano, C. A., Davies, F. T., Estrada-Luna, A. A., Duray, S. A., & Olalde-Portugal, V. (1999). Effect of auxin and wounding on adventitious root formation of prickly-pear cactus cladodes. *HortTechnology*, 9(1), 99–102.
- le Houerou, H. N. (2002). Cacti (*Opuntia* spp.) as a Fodder Crop for Marginal Lands in the Mediterranean Basin HN Le Houérou. *Proceedings of the Fourth International Congress on Cactus Pear and Cochineal: Hammamet, Tunisia, 22-28 October 2000*, 21.
- Le Houérou, H. N. (1996). The role of cacti (*Opuntiaspp.*) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*, 33(2), 135–159.
- Lee, I. H., Fredrickson, A. G., & Tsuchiya, H. M. (1974). Diauxic growth of *Propionibacterium shermanii*. *Applied Microbiology*, 28(5), 831–835.
- Leibeinsperger, R. Y., & Pitt, R. E. (1988). Modeling the effects of formic acid and molasses on ensilage. *Journal of Dairy Science*, 71(5), 1220–1231.
- Li, L., Yuan, Z., Sun, Y., Kong, X., Dong, P., & Zhang, J. (2017). A reused method for molasses-processed wastewater: Effect on silage quality and anaerobic digestion performance of *Pennisetum purpureum*. *Bioresource Technology*, 241, 1003–1011.
- Lin, C. (1992). *Epiphytic microflora on alfalfa and corn; lactic acid bacteria succession during the pre-ensiling and ensiling periods; and the effect of additives on microbial succession and silage fermentation*. Kansas State University.
- Lindgren, S., Pettersson, K., Jonsson, A., Lingvall, P., & Kaspersson, A. (1985). Silage inoculation: Selected strains, temperature, wilting and practical application. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 15(1), 9–18.
- Lindqvist, H., Nadeau, E., & Jensen, S. K. (2012). Alpha-tocopherol and β -carotene in legume–

- grass mixtures as influenced by wilting, ensiling and type of silage additive. *Grass and Forage Science*, 67(1), 119–128.
- Ljungh, A., & Wadstrom, T. (2009). *Lactobacillus molecular biology*. Caister Academic Press.
- López, A. D. (1995). Use of the fruits and stems of the prickly pear cactus (*Opuntia* spp.) into human food. *Food Science and Technology International*, 1(2–3), 65–74.
- Lynch, J. P., Baah, J., & Beauchemin, K. A. (2015). Conservation, fiber digestibility, and nutritive value of corn harvested at 2 cutting heights and ensiled with fibrolytic enzymes, either alone or with a ferulic acid esterase-producing inoculant. *Journal of Dairy Science*, 98(2), 1214–1224.
- Matteuzzi, D., Trovatelli, L. D., Biavati, B., & Zani, G. (1977). Clostridia from Grana cheese. *Journal of Applied Bacteriology*, 43(3), 375–382.
- Matthäus, B., & Özcan, M. M. (2011). Habitat effects on yield, fatty acid composition and tocopherol contents of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) seed oils. *Scientia Horticulturae*, 131, 95–98.
- McConn, M. M., & Nakata, P. A. (2004). Oxalate reduces calcium availability in the pads of the prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(5), 1371–1374.
- McDonald, P., & Edwards, R. A. (1976). The influence of conservation methods on digestion and utilization of forages by ruminants. *Proceedings of the Nutrition Society*, 35(2), 201–211.
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., & Morgan, C. A. (2002). *Animal nutrition 6th edition*. Longman scientific and technical Copublished in the USA. John Wiley and Sons
- McDonald, Peter, Henderson, A. R., & Heron, S. J. E. (1991). *The biochemistry of silage*. Chalcombe publications.
- McGechan, M. B. (1990). A review of losses arising during conservation of grass forage: Part 2, storage losses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 45, 1–30.
- McLaughlin, N. B., Wilson, D. B., & Bowden, D. M. (1978). Effect of a plastic cover on dry matter loss from a horizontal silo. *Canadian Agricultural Engineering*.
- Medina, E. M. D., Rodríguez, E. M. R., & Romero, C. D. (2007). Chemical characterization of *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica* fruits. *Food Chemistry*, 103(1), 38–45.
- Méndez-Gallegos, S. J., Gallegos-Vázquez, C., & Mondragón-Jacobo, C. (2013). Manejo de huertos comerciales de nopal tunero. Gallegos-Vázquez, C.; Méndez-Gallegos, SJ y Mondragón-Jacobo (Eds.). *Producción Sustentable de La Tuna. Colegio de Postgraduados y Fundación Produce San Luis Potosí, AC San Luis Potosí, México*, 97–114.
- Merry, R. J., Lowes, K. F., & Winters, A. L. (1997). Current and future approaches to biocontrol in silage. *Proceedings of the 8th International Symposium on Forage Conservation. Pohorelice, Czech Republic: Research Institute of Animal Nutrition*, 17–27.
- Meschy, F., Baumont, R., Dulphy, J. P., & Nozières, M.-O. (2005). Effet du mode de conservation sur la composition en éléments minéraux majeurs des fourrages. *12. Rencontres Recherches Ruminants*, 12(1), 116.

- Meyer, B. N., & McLaughlin, J. L. (1981). Economic uses of *Opuntia* [Prickly pears, medicinal uses]. *Cactus and Succulent Journal*.
- Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime. (2012). *Situation de l'agriculture Marocaine - N°10*.
- Minson, D. J. (1990). Forage in ruminant nutrition. Academic Press. *San Diego, CA*.
- Miranda-Romero, L. A., Vazquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., & Aranda-Osorio, G. (2018). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev*, 20, 196–215.
- Mokoboki, K., Sebola, N., & Matlabe, G. (2016). Effects of molasses levels and growing conditions on nutritive value and fermentation quality of *Opuntia cladodes* silage. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 28(3), 4488–4495.
- Mondragón-Jacobo, C., & Pérez-González, S. (2001). *Cactus (Opuntia spp.) as forage* (Vol. 169). Food & Agriculture Org.
- Monjauze, A., & le Houerou, H. N. (1966). *Le rôle des Opuntia dans l'économie agricole Nord Africaine*.
- Moon, N. J., Ely, L. O., & Sudweeks, E. M. (1981). Fermentation of wheat, corn, and alfalfa silages inoculated with *Lactobacillus acidophilus* and *Candida* sp. at ensiling. *Journal of Dairy Science*, 64(5), 807–813.
- MOORE, C. A., & Kennedy, S. J. (1994). The effect of sugar beet pulp-based silage additives on effluent production, fermentation, in-silo losses, silage intake and animal performance. *Grass and Forage Science*, 49(1), 54–64.
- Moseley, G., & Ramanathan, V. (1989). The effect of dry feed additives on the nutritive value of silage. *Grass and Forage Science*, 44(4), 391–397.
- Muck, R E. (1987). Dry matter level effects on alfalfa silage quality I. Nitrogen transformations. *Transactions of the ASAE*, 30(1), 7–14.
- Muck, R E. (1989). Initial bacterial numbers on lucerne prior to ensiling. *Grass and Forage Science*, 44(1), 19–25.
- Muck, R E, & Kung Jr, L. (1997). Effects of silage additives on ensiling. *Silage: Field to Feedbunk. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES), Ithaca, New York, USA*.
- Muck, R E, Moser, L. E., & Pitt, R. E. (2003). Postharvest factors affecting ensiling. *Silage Science and Technology*, 42, 251–304.
- Muck, R E, Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., & Kung Jr, L. (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3980–4000.
- Muck, Richard E. (2010). Silage microbiology and its control through additives. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 183–191.
- Mulas, M., D'hallewin, G., & Canu, D. (1992). Osservazioni sulla radicazione di cladodi di un anno di *Opuntia ficus-indica* Mill. *Rivista Di Frutticoltura e Di Ortofloricoltura*, 54(10), 67–70.

- Mulas, M., & Mulas, G. (2004). Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. *Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université Des Études de SASSAR.*
- Murillo Amador, B., & García, A. (2002). *El nopalcultivo forrajero sostenible para el noroeste de México.*
- Nadeau, E., & Auerbach, H. (2014). Effects of particle size and chemical additives on fermentation and aerobic stability of grass-clover silage. *Proc. 5th Nordic Feed Science Conference*, 10–11.
- Nasr, Y. (2013). Cactus pear in Jordan-Current status, potential and opportunities. *VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal 1067*, 299–303.
- Navarrete-Bolaños, J. L., Fato-Aldeco, E., Gutiérrez-Moreno, K., Botello-Álvarez, J. E., Jiménez-Islas, H., & Rico-Martínez, R. (2013). A strategy to design efficient fermentation processes for traditional beverages production: prickly pear wine. *Journal of Food Science*, 78(10), M1560–M1568.
- Nefzaoui, A., & Ben Salem, H. (2000). Cacti: efficient tool for rangeland rehabilitation, drought mitigation and to combat desertification. *IV International Congress on Cactus Pear and Cochineal 581*, 295–315.
- Nefzaoui, A., Salem, H. Ben, & Salem, L. Ben. (1995). Ewe-lambs feeding with cactus-based diets. Effect of the type of nitrogen supplement. *IVth International Symposium on the Nutrition of Herbivores-Satellite" Ruminant Use of Fodder Resources in Warm Climate Countries" Montpellier (France)*, 7–9.
- Nefzaoui, Ali, & Ben Salem, H. (2001). *Opuntia*: A strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the WANA region. *Cactus (Opuntia Species) as Forage. C. Mondragon and S. Perez (Eds.)*, 73–90.
- Nefzaoui, Ali, Louhaichi, M., & Ben Salem, H. (2014). Cactus as a tool to mitigate drought and to combat desertification. *Journal of Arid Land Studies*, 24(1), 121–124.
- Negra, C., & Rogers, G. F. (1997). Agricultural film disposal: issues and options. *Proceedings from the Silage: Field to Feedbunk North American Conference*, 162–172.
- Nerd, A., Karady, A., & Mizrahi, Y. (1991). Out-of-season prickly pear: fruit characteristics and effect of fertilization and short droughts on productivity. *HortScience*, 26(5), 527–529.
- Ni, K., Wang, F., Zhu, B., Yang, J., Zhou, G., Pan, Y. I., Tao, Y., & Zhong, J. (2017). Effects of lactic acid bacteria and molasses additives on the microbial community and fermentation quality of soybean silage. *Bioresource Technology*, 238, 706–715.
- Nicholson, J. W. G., Charmley, E., & Bush, R. S. (1992). Effect of moisture level on ensiling characteristics of alfalfa in big bales or chopped and compacted in plastic tubes. *Canadian Journal of Animal Science*, 72(2), 347–357.
- Nishino, N., & Uchida, S. (1999). Laboratory evaluation of previously fermented juice as a fermentation stimulant for lucerne silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(10), 1285–1288.
- Nobel, P. S. (1983). Nutrient levels in cacti—relation to nocturnal acid accumulation and growth. *American Journal of Botany*, 70(8), 1244–1253.

- Nobel, P. S. (1989). A nutrient index quantifying productivity of agaves and cacti. *Journal of Applied Ecology*, 635–645.
- Nobel, P. S. (2002). *Cacti: biology and uses*. Univ of California Press.
- Notermans, S., Kozaki, S., & Van Schothorst, M. (1979). Toxin production by *Clostridium botulinum* in grass. *Applied and Environmental Microbiology*, 38(5), 767–771.
- Nout, M. J. R., Bouwmeester, H. M., Haaksma, J., & Van Dijk, H. (1993). Fungal growth in silages of sugarbeet press pulp and maize. *The Journal of Agricultural Science*, 121(3), 323–326.
- Offer, N. W., & Al Rwidah, M. N. (1989). The use of absorbent materials to control effluent loss from grass silage: experiments with drum silos. *Research and Development in Agriculture*.
- Ohshima, M., & McDonald, P. (1978). A review of the changes in nitrogenous compounds of herbage during ensilage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 29(6), 497–505.
- Oldenburg, E. (1991). Mycotoxins in conserved forage. *Landbauforschung Voelkenrode. Sonderheft (Germany, FR)*.
- Oliveira, A. S., Weinberg, Z. G., Ogunade, I. M., Cervantes, A. A. P., Arriola, K. G., Jiang, Y., Kim, D., Li, X., Gonçalves, M. C. M., & Vyas, D. (2017). Meta-analysis of effects of inoculation with homofermentative and facultative heterofermentative lactic acid bacteria on silage fermentation, aerobic stability, and the performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100(6), 4587–4603.
- Olstorpe, M., Borling, J., Schnürer, J., & Passoth, V. (2010). *Pichia anomala* yeast improves feed hygiene during storage of moist crimped barley grain under Swedish farm conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 156(1–2), 47–56.
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R., & Anthony, S. (2009). Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0. *World Agroforestry Centre, Kenya*, 15.
- Pahlow, G. (1979). Influence of the addition of urea on the stability of maize silage after unloading. *Wirtschaftseigene Futter*.
- Pahlow, G. (1991). Role of microflora in forage conservation. *Landbauforschung Voelkenrode. Sonderheft (Germany, FR)*.
- Pahlow, G., & Honig, H. (1994). The role of microbial additives in the aerobic stability of silage. *Proceedings of the 15th General Meeting of EGF*, 149–152.
- Pahlow, Günter, Muck, R. E., Driehuis, F., Elferink, S. J. W. H. O., & Spoelstra, S. F. (2003). Microbiology of ensiling. *Silage Science and Technology*, 42, 31–93.
- Paragon, B. M., Andrieu, J.-P., Brunschwig, P., Gaillard, F., Griess, D., Heuchel, V., Piriou, B., & Weiss, P. (2004). Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires. *Afssa*, 2–112. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/054000085.pdf>
- Pelhate, J. (1977). Maize silage: incidence of moulds during conservation. *Folia Veterinaria Latina*, 7(1), 1–16.
- Pereira, G. A., Santos, E. M., de Oliveira, J. S., de Araújo, G. G. L., de Sá Paulino, R., Perazzo, A. F., de Farias Ramos, J. P., Neto, J. M. C., de Lima Cruz, G. F., & Leite, G. M. (2021).

- Intake, nutrient digestibility, nitrogen balance, and microbial protein synthesis in sheep fed spineless-cactus silage and fresh spineless cactus. *Small Ruminant Research*, 194, 106293.
- Pettersson, K. (1988). *Ensiling of forages. Factors affecting silage fermentation and quality*.
- Piga, A. (2004). Cactus pear: a fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 6, 9–22.
- Pimienta-Barrios, E. (1993). Vegetable cactus (*Opuntia*). *Pulses and Vegetables, Chapman & Hall, London, 1993*, 177–191.
- Pimienta-Barrios, E. (1994). Prickly pear (*Opuntia* spp.): a valuable fruit crop for the semi-arid lands of Mexico. *Journal of Arid Environments*, 28(1), 1–11.
- Pimienta Barrios, E. (1990). *El nopal tunero* (Issues 04; SB379. P8, P5.).
- Pitt, R. E., & Parlange, J.-Y. (1987). Effluent production from silage with application to tower silos. *Transactions of the ASAE*, 30(4), 1198–1206.
- Pitt, R., & Sniffen, C. (1985). Agriculture Engineering. Ext. Bull., Cornell University, 452.
- Prieto, C., Sáenz, C., Silva, P., & Loyola, E. (2007). Balsamic type vinegar from colored ecotypes of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *VI International Congress on Cactus Pear and Cochineal 811*, 123–126.
- Projet d'Accès aux Marchés pour les Produits, & Terroir, A. et du. (2015). *Guide de bonnes pratiques de plantation et de conduite technique du cactus en culture pluviale dans les zones arides*.
- Purser, D. B. (1981). Nutritional value of Mediterranean pastures. In *Grazing Animals* (pp. 159–180). Elsevier, Amsterdam.
- Queiroz, O. C. M., Ogunade, I. M., Weinberg, Z., & Adesogan, A. T. (2018). Silage review: Foodborne pathogens in silage and their mitigation by silage additives. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4132–4142.
- Ramadan, M. F., & Moersel, J.-T. (2003). Lipid profile of prickly pear pulp fractions. *J. Food Agric. Environ*, 1, 66–70.
- Ramadan, M. F., & Mörsel, J.-T. (2003). Oil cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.). *Food Chemistry*, 82(3), 339–345.
- Rauramaa, A., Tommila, A., Nousiainen, J., & Toivonen, V. (1996). The effect of *Lactobacillus rhamnosus* and *Propionibacterium freudenreichii* ssp. *shermanii* on chemical and microbial composition of prewilted silages. *Proceedings of the XIth International Silage Conference Held at the University of Wales, Aberystwyth 8th-11th September 1996/Edited by: DIH Jones et Al.*
- Raymond Lessard, J., Erfle, J. D., Sauer, F. D., & Mahadevan, S. (1978). Protein and free amino acid patterns in maize ensiled with or without urea. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 29(6), 506–512.
- Reijntjes, C., & Waters-Bayer, A. (1995). *Une agriculture pour demain: Introduction à une agriculture durable avec peu d'intrants externes*. Karthala Éditions.
- Retamal, N., Durán, J. M., & Fernández, J. (1987a). Ethanol production by fermentation of

- fruits and cladodes of prickly pear cactus [*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 40(3), 213–218.
- Retamal, N., Durán, J. M., & Fernández, J. (1987b). Seasonal variations of chemical composition in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) miller). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 38(4), 303–311.
- Ricketts, S. W., Greet, T. R. C., Glyn, P. J., Ginnett, C. D. R., McAllister, E. P., McCaig, J., Skinner, P. H., Webbon, P. M., Frape, D. L., & Smith, G. R. (1984). Thirteen cases of botulism in horses fed big bale silage. *Equine Veterinary Journal*, 16(6), 515–518.
- Rodrigues, A. M., Pitacas, F. I., Reis, C. M. G., & Blasco, M. (2016). Nutritional value of *Opuntia ficus-indica* cladodes from Portuguese ecotypes. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, 22, 40–45.
- Rodríguez-Felix, A., & Cantwell, M. (1988). Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*, 38(1), 83–93.
- Rooke, J A, & Kafilzadeh, F. (1994). The effect upon fermentation and nutritive value of silages produced after treatment by three different inoculants of lactic acid bacteria applied alone or in combination. *Grass and Forage Science*, 49(3), 324–333.
- Rooke, John A, & Hatfield, R. D. (2003). Biochemistry of ensiling. *Silage Science and Technology*, 42, 95–139.
- Rouissi, H., Mahouachi, M., & Atti, N. (2002). Effet de la complémentation énergétique sur les performances de la chevre locale au cours de la phase d'allaitement. *Annales de l'INRA*, 75, 223–239.
- Russell, C. E., & Felker, P. (1987). The prickly-pears (*Opuntia* spp., Cactaceae): a source of human and animal food in semiarid regions. *Economic Botany*, 41(3), 433–445.
- Russell, C., & Felker, P. (1987). Comparative cold-hardiness of *Opuntia* spp. and cvs grown for fruit, vegetable and fodder production. *Journal of Horticultural Science*, 62(4), 545–550.
- Saadani, Y. (1988). Production fourragere et comportement alimentaire des ovins et des caprins dans un parcours mixte a *Acacia cyanophylla*, *Atriplex nummularia* et *Medicago arborea* au Nord-Est Tunisien. *Mémoire de 3ème Cycle IAV Hassan II. Rabat*.
- Saadani, Y., & El Ghezal, A. (1989). Productivité et valeur nutritive comparée de *Acacia cyanophylla*, (Lindl), *Atriplex nummularia* (Lindl) et *Medicago arborea* (Lindl). *Actes Du Séminaire Maghrébin d'Agroforesterie. Tunisie: Jebel Oust*, 23–27.
- Saarisalo, E., Jalava, T., & Skyttä, E. (2006). Effect of lactic acid bacteria inoculants, formic acid, potassium sorbate and sodium benzoate on fermentation quality and aerobic stability of wilted grass silage. *Agricultural and Food Science*, 15(3), 185–199.
- Saenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*, 46(3), 209–225.
- Saézn, C., Tapia, S., Chávez, J., & Robert, P. (2009). Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 114(2), 616–622.
- Sáenz, C, & Sepúlveda, E. (1999). Physical, chemical and sensory characteristics of juices from

- pomegranate and purple cactus pear fruit. *Annals of the 22nd IFU Symposium*, 91–100.
- Sáenz, Carmen, & Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Sáenz, Carmen, Berger, H., Rodríguez-Félix, A., Galleti, L., Corrales García, J., & Sepúlveda, E. (2013). Agro-industrial utilization of cactus pear. *Food and Agriculture Organization, Rome. Available At.*
- Sakr, F., Sennaoui, A., Elouardi, M., Tamimi, M., & Assabbane, A. (2015). Étude de l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau à base de Cactus (Adsorption study of Methylene Blue on biomaterial using cactus). *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(2), 397–406.
- Salem, H. Ben, Abdouli, H., Nefzaoui, A., El-Mastouri, A., & Salem, L. Ben. (2005). Nutritive value, behaviour, and growth of Barbarine lambs fed on oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) and supplemented or not with barley grains or spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) pads. *Small Ruminant Research*, 59(2–3), 229–237.
- Salem, H. Ben, Atti, N., Priolo, A., & Nefzaoui, A. (2002). Polyethylene glycol in concentrate or feedblocks to deactivate condensed tannins in *Acacia cyanophylla* Lindl. foliage 1. Effects on intake, digestion and growth by Barbarine lambs. *Animal Science*, 75(1), 127–135.
- Salem, H. Ben, & Nefzaoui, A. (2003). Feed blocks as alternative supplements for sheep and goats. *Small Ruminant Research*, 49(3), 275–288.
- Salem, H. Ben, Nefzaoui, A., & Salem, L. Ben. (2002). Supplementation of *Acacia cyanophylla* Lindl. Foliage-based diets with barley or shrubs from arid areas (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis* and *Atriplex nummularia* L.) on growth and digestibility in lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 96(1–2), 15–30.
- Salem, H. Ben, Nefzaoui, A., & Salem, L. Ben. (2004). Spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) as alternative supplements for growing Barbarine lambs given straw-based diets. *Small Ruminant Research*, 51(1), 65–73.
- Salim, N., Abdelwaheb, C., Rabah, C., & Ahcene, B. (2009). Chemical composition of *Opuntia ficus-indica* (L.) fruit. *African Journal of Biotechnology*, 8(8).
- Sanaa, M., Poutrel, B., Menard, J. L., & Serieys, F. (1993). Risk factors associated with contamination of raw milk by *Listeria monocytogenes* in dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 76(10), 2891–2898.
- Santana, O. P. (1992). Tunas forrajeras (*Opuntia ficus-indica* y *Nopalea cochenillifera*) en el Nordeste brasileno: una revision. *Actas Del 2º Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla. Santiago, Chile*, 22–25.
- Savage, R. M., Windle, M. C., Johanningsmeier, S. D., & Kung Jr, L. (2014). The effects of strains of yeasts or *Lactobacillus buchneri* 40788 on the fermentation, production of volatile organic compounds (VOCs) and aerobic stability of corn silage. *J. Dairy Sci*, 97, 537–538.
- Savoie, P, Tremblay, D., Charmley, E., & Thériault, R. (1996). Round bale ensilage of intensively conditioned forage. *Canadian Agricultural Engineering*, 38(4), 257–263.

- Savoie, Philippe, Amyot, A., Lacroix, M., & Thériault, R. (2001). Ensilages et environnement. *Le 25 Février 2000*.
- Savoie, Philippe, & Jofriet, J. C. (2003). Silage storage. *Silage Science and Technology*, 42, 405–467.
- Sawaya, W. N., & Khan, P. (1982). Chemical characterization of prickly pear seed oil, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Food Science*, 47(6), 2060–2061.
- Sawaya, W. N., Khatchadourian, H. A., Safi, W. M., & Al-Muhammad, H. M. (1983). Chemical characterization of prickly pear pulp, *Opuntia ficus-indica*, and the manufacturing of prickly pear jam. *International Journal of Food Science & Technology*, 18(2), 183–193.
- Scheinvar, L. (1995). Taxonomy of utilized *Opuntias*. *FAO Plant Production and Protection Paper (FAO)*.
- Schlegel, H. G., & Zaborosch, C. (1993). *General microbiology*. Cambridge university press.
- Schnürer, J., & Jonsson, A. (2011). *Pichia anomala* J121: a 30-year overnight near success biopreservation story. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 99(1), 5–12.
- Schricker, M., Binder, S., & Bauer, J. (1993). Zum Vorkommen und zur Stabilität von PR-Toxin in Silage. 15. *Mykotoxin Workshop. 17-19 May 1993*.
- Schukking, S. (1976). The history of silage making. *Stikstof Dutch Nitrogen Fertilizer Review*.
- Seale, D. R., Henderson, A. R., Pettersson, K. O., & Lowe, J. F. (1986). The effect of addition of sugar and inoculation with two commercial inoculants on the fermentation of lucerne silage in laboratory silos. *Grass and Forage Science*, 41(1), 61–70.
- Seppälä, A., Heikkilä, T., Mäki, M., & Rinne, M. (2016). Effects of additives on the fermentation and aerobic stability of grass silages and total mixed rations. *Grass and Forage Science*, 71(3), 458–471.
- Sepúlveda, E., & Saenz, C. (1990). Note. Chemical and physical characteristics of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) pulp. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (Spain)*.
- Sepúlveda, E., & Sáenz, C. (1990). Chemical and physical characteristics of prickly pear (*Opuntia-Ficus-Indica*) Pulp. In *Revista de Agroquímica y tecnología de alimentos* (Vol. 30, Issue 4, pp. 551–555). INST AGROQUIMICA TECH ALIMEN JAIME ROIG 11, 46010 VALENCIA, SPAIN.
- Shahsavan, A. (2009). *A study on the effects of enzymes and molasses on the nutritional value of reed silage in Sistan silos*. MA thesis of animal feed.
- Shao, T., Ohba, N., Shimojo, M., & Masuda, Y. (2002). Dynamics of early fermentation of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) silage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 15(11), 1606–1610.
- Shao, T., Zhanga, L., Shimojo, M., & Masuda, Y. (2007). Fermentation quality of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) silages treated with encapsulated-glucose, glucose, sorbic acid and pre-fermented juices. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 20(11), 1699–1704.
- Sijelmassi, A. (1996). *Les plantes médicinales du Maroc*. Editions Le Fennec.
- Singh, A. P., Verma, N. C., & Rekib, A. (1993). Evaluation of the sorghum stovers as fresh as

- well as silage. *Indian Journal of Animal Sciences*, 63(7), 767–773.
- Singh, R., Kamra, D. N., & Jakhmola, R. C. (1985). Ensiling of leguminous green forages in combination with different dry roughages and molasses. *Animal Feed Science and Technology*, 12(2), 133–139.
- Sneath, P. H. A., Mair, N. S., Sharpe, M. E., & Holt, J. G. (1986). *Bergey's manual of systematic bacteriology. Volume 2*. Williams & Wilkins.
- Snow, A., & Ghaly, A. E. (2007). A comparative assessment of the characteristics of saturated wetland soil and a well drained forest soil. *Am. J. Agric. Biol. Sci*, 2, 159–167.
- Spoelstra, S. F. (1987). Degradation of nitrate by enterobacteria during silage fermentation of grass. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences*, 35(1), 43–54.
- Spoelstra, S. F., Courtin, M. G., & Van Beers, J. A. C. (1988). Acetic acid bacteria can initiate aerobic deterioration of whole crop maize silage. *The Journal of Agricultural Science*, 111(1), 127–132.
- Spoelstra, S. F., Steg, A., & Beuvinck, J. M. W. (1990). Application of cell wall degrading enzymes to grass silage. *Agricultural Biotechnology in Focus in the Netherlands/JJ Dekkers, HC van Der Plas & DH Vuijk (Eds.)*.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49(2), 175–194.
- Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2001). Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *European Food Research and Technology*, 212(4), 396–407.
- Strasser, S., Neureiter, M., Geppl, M., Braun, R., & Danner, H. (2009). Influence of lyophilization, fluidized bed drying, addition of protectants, and storage on the viability of lactic acid bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 107(1), 167–177.
- Sudzuki Hills, F. (1995). Anatomy and morphology. *FAO Plant Production and Protection Paper (FAO)*.
- Sumaya-Martínez, M. T., Cruz-Jaime, S., Madrigal-Santillán, E., García-Paredes, J. D., Cariño-Cortés, R., Cruz-Cansino, N., Valadez-Vega, C., Martínez-Cardenas, L., & Alanís-García, E. (2011). Betalain, acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(10), 6452–6468.
- Sun, Z., Yu, J., Dan, T., Zhang, W., & Zhang, H. (2014). Phylogenesis and evolution of lactic acid bacteria. In *Lactic acid bacteria* (pp. 1–101). Springer.
- Targa, M. G., Leguizamón, G., Coronel de Renolfi, M., & Ochoa, M. J. (2010). Economic feasibility of scozzolatura in traditional and improved orchards of cactus pear in Santiago del Estero, Argentina. *VII International Congress on Cactus Pear and Cochineal 995*, 189–200.
- Tegegne, F., Kijora, C., & Peters, K. J. (2007). Study on the optimal level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source of water. *Small Ruminant Research*, 72(2–3), 157–164.
- Tesoriere, L., Fazzari, M., Allegra, M., & Livrea, M. A. (2005). Biothiols, taurine, and lipid-soluble antioxidants in the edible pulp of Sicilian cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits and changes of bioactive juice components upon industrial processing. *Journal of*

Agricultural and Food Chemistry, 53(20), 7851–7855.

- Tlili, N., Bargougui, A., Elfalleh, W., Triki, S., & Nasri, N. (2011). Phenolic compounds, protein, lipid content and fatty acids compositions of cactus seeds. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(18), 4519–4524.
- Todaro, M., Alabiso, M., Di Grigoli, A., Scatassa, M. L., Cardamone, C., Mancuso, I., Mazza, F., & Bonanno, A. (2020). Prickly Pear By-Product in the Feeding of Livestock Ruminants: Preliminary Investigation. *Animals*, 10(6), 949.
- Tohá, J. (1999). La tuna como fuente de energía. *Revista Bioplanet. Santiago, Chile*.
- Trejo-González, A., Gabriel-Ortiz, G., Puebla-Pérez, A. M., Huízar-Contreras, M. D., del Rosario Munguía-Mazariegos, M., Mejía-Arreguín, S., & Calva, E. (1996). A purified extract from prickly pear cactus (*Opuntia fuliginosa*) controls experimentally induced diabetes in rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 55(1), 27–33.
- Umana, R., Staples, C. R., Bates, D. B., Wilcox, C. J., & Mahanna, W. C. (1991). Effects of a microbial inoculant and (or) sugarcane molasses on the fermentation, aerobic stability, and digestibility of bermudagrass ensiled at two moisture contents. *Journal of Animal Science*, 69(11), 4588–4601.
- Vagnoni, D. B., & Broderick, G. A. (1997). Effects of supplementation of energy or ruminally undegraded protein to lactating cows fed alfalfa hay or silage. *Journal of Dairy Science*, 80(8), 1703–1712.
- Valente, L. M. M., da Paixão, D., Do Nascimento, A. C., dos Santos, P. F. P., Scheinvar, L. A., Moura, M. R. L., Tinoco, L. W., Gomes, L. N. F., & da Silva, J. F. M. (2010). Antiradical activity, nutritional potential and flavonoids of the cladodes of *Opuntia monacantha* (Cactaceae). *Food Chemistry*, 123(4), 1127–1131.
- Van Soest, P. J. van, Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597.
- Vasta, V., Abidi, S., Ben Salem, H., Nezfauoi, A., & Priolo, A. (2008). Effects of the supplementation of olive cake and cactus pad silage on sheep intramuscular fatty acid composition. *Options Mediterraneanens, Series A*, 78, 341–344.
- Vazquez-Boland, J. A., Dominguez, L., Blanco, M., Rocourt, J., Fernández-Garayzábal, J. F., Gutiérrez, C. B., Tascón, R.-I., & Rodríguez-Ferri, E. F. (1992). Epidemiologic investigation of a silage-associated epizootic of ovine listeric encephalitis, using a new *Listeria*-selective enumeration medium and phage typing. *American Journal of Veterinary Research*, 53(3), 368–371.
- Voelcker, A. (1884). On the chemistry of ensilage. *JR Agric. Soc. Engl.*, 2, 20–482.
- Voss, N. (1966). Amines and ammonia as products of protein decomposition in silage. *Proceedings of 10th International Grassl Congress, Helsinki, Finland*, 540–546.
- Wallentine, M. V. (1993). Silage storage systems in the arid west. *Silage Production from Seed to Animal*, 124–133.
- Wang, C., He, L., Xing, Y., Zhou, W., Yang, F., Chen, X., & Zhang, Q. (2019). Fermentation quality and microbial community of alfalfa and stylo silage mixed with *Moringa oleifera* leaves. *Bioresource Technology*, 284, 240–247.

- Weinberg, Z G, & Ashbell, G. (2003). Engineering aspects of ensiling. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2–3), 181–188.
- Weinberg, Zwi G. (2008). Preservation of forage crops by solid-state lactic acid fermentation-ensiling. In *Current developments in solid-state fermentation* (pp. 443–467). Springer.
- Weise, F. (1967). The action of feed quality sugar as a safety additive for grass silage. *Landwirt. Forsch*, 20, 171–184.
- Wiedmann, M., Czajka, J., Bsat, N., Bodis, M., Smith, M. C., Divers, T. J., & Batt, C. A. (1994). Diagnosis and epidemiological association of *Listeria monocytogenes* strains in two outbreaks of listerial encephalitis in small ruminants. *Journal of Clinical Microbiology*, 32(4), 991–996.
- Wilkinson, J M. (1981). Interrelationships between pattern of fermentation during ensilage and initial crop composition. *Proc. 14th Inter. Grassl. Congr.*, 1981.
- Wilkinson, J M, Bolsen, K. K., & Lin, C. J. (2003). History of silage. *Silage Science and Technology*, 42, 1–30.
- Wilkinson, John Michael, & Stark, B. A. (1987). *Silage in Western Europe. A survey of 17 countries*. Chalcombe Publications.
- Wills, R. B. H., Lim, J. S. K., & Greenfield, H. (1986). Composition of Australian foods. 31. Tropical and sub-tropical fruit. *Food Technology in Australia*.
- Wilson, R. B., Boley, M. T., & Corwin, B. (1995). Presumptive botulism in cattle associated with plastic-packaged hay. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 7(1), 167–169.
- Wolf, D. D., & Carson, E. W. (1973). Respiration during Drying of Alfalfa Herbage 1. *Crop Science*, 13(6), 660–662.
- Wood, J. G. M., & Parker, J. (1971). Respiration during the drying of hay. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3), 179–191.
- Woolford, M K. (1975). The significance of *Propionibacterium* species and *Micrococcus lactilyticus* to the ensiling process. *Journal of Applied Bacteriology*, 39(3), 301–306.
- Woolford, M K. (1977). Studies on the significance of three *Bacillus* species to the ensiling process. *Journal of Applied Bacteriology*, 43(3), 447–452.
- Woolford, Michael K. (1975). Microbiological screening of food preservatives, cold sterilants and specific antimicrobial agents as potential silage additives. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 26(2), 229–237.
- Woolford, Michael K. (1984). *The silage fermentation*. Marcel Dekker, Inc.
- Wright, P. (1997). Silage leachate control. *Silage: Field to Feedbunk (NRAES-99)*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY.
- Yang, C.-M., Huang, S.-C., Chang, T., Cheng, Y.-H., & Chang, C.-T. (2004). Fermentation acids, aerobic fungal growth, and intake of napiergrass ensiled with nonfiber carbohydrates. *Journal of Dairy Science*, 87(3), 630–636.
- Yao, Z., & Jofriet, J. C. (1991). Simulation of liquid pressures in farm tower silos. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 50, 35–50.
- Zahiroddini, H., Baah, J., Absalom, W., & McAllister, T. A. (2004). Effect of an inoculant and

hydrolytic enzymes on fermentation and nutritive value of whole crop barley silage. *Animal Feed Science and Technology*, 117(3–4), 317–330.

Zhao, J., Dong, Z., Li, J., Chen, L., Bai, Y., Jia, Y., & Shao, T. (2019). Evaluation of *Lactobacillus plantarum* MTD1 and waste molasses as fermentation modifier to increase silage quality and reduce ruminal greenhouse gas emissions of rice straw. *Science of the Total Environment*, 688, 143–152.

Site internet:

<https://eta-bergeron-sarl.monsite-orange.fr/silosboudinbag/index.html>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Ensilage>

<https://www.alamyimages.fr/pile-de-balles-d-ensilage-en-plastique-noir-cornwall-royaume-uni-john-gollop-image364268274.html>

<https://fr.climate-data.org/>

Annexes

Annexe 1 : Table de Bertrand

sucre en mg	cuivre en mg	sucre en mg	cuivre en mg	sucre en mg	cuivre en mg
10	20,6	40	77,7	70	129,2
11	22,6	41	79,5	71	130,8
12	24,6	42	81,2	72	132,4
13	26,5	43	83,0	73	134,0
14	28,5	44	84,8	74	135,6
15	30,5	45	86,5	75	137,2
16	32,5	46	88,3	76	138,9
17	34,5	47	90,1	77	140,5
18	36,4	48	91,9	78	142,5
19	38,4	49	93,6	79	143,7
20	40,4	50	95,4	80	145,3
21	42,3	51	97,1	81	146,9
22	44,2	52	98,8	82	148,5
23	46,1	53	100,6	83	150,0
24	48,0	54	102,5	84	151,6
25	49,8	55	104,0	85	153,2
26	51,7	56	105,7	86	154,8
27	53,6	57	107,4	87	156,4
28	55,5	58	109,2	88	157,9
29	57,4	59	110,9	89	159,5
30	59,3	60	112,6	90	161,1
31	61,1	61	114,3	91	162,6
32	63,0	62	115,9	92	164,2
33	64,8	63	117,6	93	165,7
34	66,7	64	119,2	94	167,3
35	68,5	65	120,9	95	168,8
36	70,3	66	122,6	96	170,3
37	72,2	67	124,2	97	171,9
38	74,0	68	125,9	98	173,4
39	75,0	69	127,5	99	175,0
				100	176,5

Annexe 2: Composition chimique et biochimique des fruits gâchés, des écorces de fruits et des mélanges initiaux.

Paramètres	Fruits	Mélange à base de fruits (70 % fruits + 15 % paille + 15 % son de blé)	Écorces	Mélange à base d'écorces (70% écorces + 15 % paille + 15 % son de blé)	P
pH	6,65 ± 0,10	6,35 ± 0,22	6,83 ± 0,02	6,71 ± 0,34	0,132
MS	19,85 ± 0,86	30,38 ± 5,13	15,20 ± 1,18	32,19 ± 0,76	0,511
Cendres (% MS)	6,5 ± 0,45	5,88 ± 1,84	13,70 ± 0,9	11,17 ± 1,44	0,004
Protéines (% MS)	11,98 ± 0,11	10,50 ± 0,55	4,84 ± 1,78	5,66 ± 0,47	0,000
Sucres totaux (% MS)	32,34 ± 0,86	19,22 ± 1,75	31,19 ± 1,38	13,21 ± 0,34	0,001
Sucres réducteurs (% MS)	26,12 ± 0,63	11,46 ± 1,09	23,63 ± 1,46	8,07 ± 0,73	0,002
NDF (% MS)	27,23 ± 2,30	40,77 ± 2,82	11,72 ± 0,91	31,41 ± 2,63	0,003
ADF (% MS)	15,67 ± 1,54	14,08 ± 1,52	7,75 ± 0,51	13,56 ± 3,16	0,776
ADL (% MS)	7,11 ± 1,61	6,99 ± 0,92	1,25 ± 0,16	4,26 ± 0,70	0,003
Hémicellulose (% MS)	11,56 ± 3,84	26,69 ± 2,75	3,97 ± 1,03	17,85 ± 2,77	0,004
Cellulose (% MS)	8,55 ± 2,77	7,09 ± 1,07	6,50 ± 0,54	9,30 ± 3,58	0,283
Ca (mg/100g MF)	86,45 ± 3,74	146,27 ± 3,87	108,76 ± 8,61	162,31 ± 4,34	0,001
Na (mg/100g MF)	6,38 ± 1,2	0,44 ± 0,02	1,4 ± 0,21	0,33 ± 0,05	0,006
Mg (mg/100g MF)	11,75 ± 0,39	54,41 ± 1,68	9,42 ± 0,80	47,03 ± 2,62	0,003
K (mg/100g MF)	119,31 ± 0,80	175,35 ± 2,74	25,97 ± 2,34	127,47 ± 2,35	0,000
Fe (mg/100g MF)	0,23 ± 0,02	3,77 ± 0,18	0,29 ± 0,10	3,98 ± 0,21	0,171
Cu (mg/100g MF)	0,23 ± 0,03	0,29 ± 0,06	0,64 ± 0,03	0,35 ± 0,05	0,200

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

Annexe 3: Composition chimique et biochimique des ensilages de fruits et d'écorces.

	Ensilage des fruits	Ensilage des écorces	P
pH	4,21 ± 0,52	4,46 ± 0,12	0,008
MS %	32,06 ± 1,14	33,14 ± 0,72	0,161
Cendres % MS	2,39 ± 0,40	3,96 ± 0,72	0,009
Protéines % MS	5,54 ± 0,46	1,73 ± 0,54	0,000
Sucres totaux % MS	10,91 ± 3,04	7,69 ± 0,69	0,084
Sucres réducteurs % MS	6,87 ± 0,26	2,07 ± 0,58	0,000
NDF % MS	43,52 ± 2,31	35,91 ± 2,63	0,005
ADF % MS	17,54 ± 1,85	17,81 ± 3,51	0,897
ADL % MS	11,64 ± 1,37	10,68 ± 1,64	0,403
Hémicellulose % MS	25,98 ± 2,03	18,10 ± 2,71	0,004
Cellulose % MS	5,90 ± 2,92	7,12 ± 3,36	0,601
Ca (mg/100g MF)	113,89 ± 3,78	128,79 ± 4,35	0,002
Fe (mg/100g MF)	0,20 ± 0,01	0,14 ± 0,02	0,004
Mg (mg/100g MF)	31,99 ± 2,40	28,11 ± 2,25	0,057
K (mg/100g MF)	129,26 ± 3,32	95,70 ± 2,39	0,000
Na (mg/100g MF)	2,12 ± 0,18	2,38 ± 0,16	0,071
Cu (mg/100g MF)	0,17 ± 0,02	0,22 ± 0,01	0,001

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

Annexe 4 : Composition chimique et biochimique des fruits de cactus, luzerne et atriplex.

Caractéristiques	Fruits de cactus	luzerne	atriplex	P
pH	6,65 ^b ± 0,1	6,3 ^a ± 0,05	6,33 ^a ± 0,09	0,003
MS %	19,85 ^a ± 0,86	19,83 ^a ± 1,25	21,5 ^a ± 0,67	0,177
Cendres % MS	6,5 ^a ± 0,45	6,95 ^a ± 0,63	12,97 ^b ± 1,49	0,000
Protéines % MS	11,98 ^a ± 0,11	20,34 ^b ± 0,89	23,19 ^c ± 0,74	0,000
Sucres totaux % MS	32,34 ^b ± 0,86	4,21 ^a ± 0,33	3,66 ^a ± 0,24	0,000
Sucres réducteurs % MS	22,03 ^b ± 0,42	1,91 ^a ± 0,39	1,47 ^a ± 0,16	0,000
NDF % MS	27,23 ^a ± 2,30	39,44 ^b ± 1,36	38,73 ^b ± 2,26	0,000
ADF % MS	15,67 ^b ± 1,54	23,75 ^c ± 1,7	23,80 ^a ± 1,11	0,000
ADL % MS	7,11 ^a ± 1,61	14,87 ^b ± 2,37	10,35 ^a ± 2,06	0,010
Hémicellulose % MS	11,56 ^a ± 3,84	15,69 ^a ± 0,68	14,92 ^a ± 2,43	0,135
Cellulose % MS	8,55 ^a ± 2,77	8,88 ^a ± 3,52	13,45 ^b ± 1,61	0,000
Ca (mg/100g MF)	86,45 ^b ± 3,74	18,34 ^a ± 1,99	13,67 ^a ± 0,88	0,000
Fe (mg/100g MF)	0,23 ^a ± 0,025	0,16 ^a ± 0,01	0,45 ^b ± 0,10	0,002
Mg (mg/100g MF)	11,75 ^b ± 0,39	12,95 ^b ± 0,99	6,85 ^a ± 1,46	0,000
K (mg/100g MF)	119,31 ^b ± 0,80	120,40 ^b ± 1,53	24,83 ^a ± 1,06	0,000
Na (mg/100g MF)	6,378 ^a ± 1,02	8,29 ^a ± 1,40	19,52 ^b ± 1,72	0,000
Cu (mg/100g MF)	0,23 ^a ± 0,03	0,25 ^a ± 0,02	0,29 ^a ± 0,04	0,176

Les valeurs d'une même ligne avec des lettres différentes sont statistiquement différentes.

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

Annexe 5: Composition chimique et biochimique des mélanges M1, M2 et M3 avant ensilage.

Caractéristiques	M1	M2	M3	P
pH	6,28 ^a ± 0,03	6,20 ^a ± 0,04	6,25 ^a ± 0,08	0,610
MS %	34,18 ^a ± 1,31	33,54 ^a ± 1,07	32,58 ^a ± 1,43	0,150
Cendres % MS	5,49 ^a ± 0,19	6,65 ^a ± 0,61	9,18 ^b ± 0,58	0,029
Protéines % MS	10,63 ^a ± 0,22	16,35 ^b ± 0,13	17,22 ^b ± 0,39	0,000
Sucres totaux % MS	19,14 ^c ± 0,11	12,09 ^b ± 0,51	11,58 ^a ± 0,11	0,027
Sucres réducteurs % MS	6,33 ^b ± 0,79	4,67 ^a ± 1,53	4,22 ^a ± 0,00	0,001
NDF % MS	45,48 ^b ± 1,99	42,17 ^{ab} ± 0,47	38,59 ^a ± 0,19	0,059
ADF % MS	30,88 ^b ± 1,64	21,89 ^a ± 0,37	20,44 ^a ± 0,54	0,010
ADL % MS	5,37 ^a ± 0,77	6,91 ^a ± 0,57	6,55 ^a ± 0,25	0,281
Hémicellulose % MS	14,6 ^a ± 3,63	20,28 ^a ± 0,84	18,15 ^a ± 0,35	0,311
Cellulose % MS	25,51 ^b ± 0,87	14,98 ^a ± 0,2	13,88 ^a ± 0,78	0,002
Ca (mg/100g MF)	140,19 ^c ± 1,87	81,07 ^b ± 4,91	42,52 ^a ± 3,74	0,001
Fe (mg/100g MF)	0,45 ^b ± 0,02	0,20 ^a ± 0,01	0,40 ^b ± 0,02	0,002
Mg (mg/100g MF)	54,27 ^c ± 1,04	35,25 ^b ± 2,58	22,98 ^a ± 0,50	0,002
K (mg/100g MF)	159,91 ^c ± 7,31	136,14 ^b ± 0,88	61,20 ^a ± 0,24	0,001
Na (mg/100g MF)	3,57 ^a ± 0,51	6,38 ^a ± 0,77	10,20 ^b ± 1,02	0,022
Cu (mg/100g MF)	0,37 ^a ± 0,07	0,16 ^a ± 0,02	0,26 ^a ± 0,04	0,116

Les valeurs d'une même ligne avec des lettres différentes sont statistiquement différentes

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide. M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

Annexe 6: Composition chimique et biochimique des mélanges M1, M2 et M3 après ensilage.

Caractéristiques	M1	M2	M3	P
pH	4,35 ^a ± 0,02	4,55 ^b ± 0,03	4,54 ^b ± 0,02	0,008
MS %	36,21 ^a ± 1,92	35,43 ^a ± 0,44	35,20 ^a ± 1,13	0,108
Cendres % MS	3,27 ^a ± 0,62	4,88 ^a ± 0,31	5,83 ^a ± 1,03	0,175
Protéines % MS	4,54 ^a ± 0,04	12,66 ^b ± 0,17	12,96 ^b ± 0,21	0,000
Sucres totaux % MS	7,06 ^b ± 0,24	4,63 ^a ± 0,03	4,27 ^a ± 0,01	0,001
Sucres réducteurs % MS	3,83 ^b ± 0,77	1,92 ^a ± 0,38	1,53 ^a ± 0,00	0,007
NDF % MS	43,31 ^c ± 0,63	40,92 ^b ± 0,58	35,63 ^a ± 0,57	0,003
ADF % MS	27,24 ^b ± 0,79	21,29 ^b ± 0,25	16,12 ^a ± 0,49	0,019
ADL % MS	4,91 ^a ± 0,33	9,73 ^a ± 0,08	6,94 ^a ± 1,04	0,068
Hémicellulose % MS	18,07 ^a ± 1,43	19,63 ^a ± 0,33	19,52 ^a ± 0,08	0,691
Cellulose % MS	22,33 ^b ± 1,12	11,56 ^a ± 0,17	9,118 ^a ± 0,55	0,048
Ca (mg/100g MF)	122,20 ^c ± 2,10	52,34 ^b ± 1,87	23,83 ^a ± 1,87	0,000
Fe (mg/100g MF)	0,27 ^b ± 0,02	0,14 ^a ± 0,00	0,27 ^b ± 0,04	0,007
Mg (mg/100g MF)	39,24 ^c ± 1,09	27,02 ^b ± 0,29	16,44 ^a ± 0,13	0,000
K (mg/100g MF)	123,00 ^b ± 4,01	111,85 ^b ± 1,83	40,92 ^a ± 0,47	0,000
Na (mg/100g MF)	2,04 ^a ± 0,51	3,83 ^b ± 0,26	6,38 ^c ± 0,26	0,008
Cu (mg/100g MF)	0,23 ^b ± 0,05	0,07 ^{ab} ± 0,03	0,13 ^a ± 0,01	0,097

Les valeurs d'une même ligne avec des lettres différentes sont statistiquement différentes

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide. M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé

Annexe 7: Composition chimique et biochimique des mélanges M1, M2 et M3 après séchage.

Caractéristiques	M1	M2	M3	P
pH	6,05 ^a ± 0,09	5,91 ^a ± 0,03	6,12 ^a ± 0,01	0,152
MS %	81,86 ^b ± 0,91	80,26 ^{ab} ± 2,64	78,13 ^a ± 2,99	0,062
Cendres % MS	4,58 ^a ± 0,50	5,92 ^a ± 0,05	8,17 ^b ± 0,14	0,008
Protéines % MS	8,05 ^a ± 0,25	14,96 ^b ± 0,24	15,36 ^b ± 0,43	0,000
Sucres totaux % MS	16,37 ^b ± 1,86	10,56 ^a ± 0,65	9,16 ^a ± 0,20	0,016
Sucres réducteurs % MS	5,37 ^b ± 0,44	3,00 ^a ± 0,23	2,84 ^a ± 0,45	0,012
NDF % MS	42,75 ^a ± 3,09	42,66 ^a ± 1,47	38,74 ^a ± 2,17	0,291
ADF % MS	30,40 ^b ± 0,89	22,19 ^a ± 2,84	19,59 ^a ± 0,69	0,018
ADL % MS	5,77 ^a ± 0,79	7,29 ^a ± 0,69	6,83 ^a ± 2,63	0,674
Hémicellulose % MS	12,35 ^a ± 3,98	20,47 ^a ± 1,37	19,15 ^a ± 1,48	0,095
Cellulose % MS	24,62 ^b ± 0,09	14,9 ^a ± 3,53	12,76 ^a ± 1,93	0,028
Ca (mg/100g MF)	128,27 ^c ± 1,64	69,86 ^b ± 1,64	31,31 ^a ± 2,80	0,000
Fe (mg/100g MF)	0,36 ^b ± 0,01	0,15 ^a ± 0,01	0,33 ^b ± 0,02	0,003
Mg (mg/100g MF)	46,75 ^c ± 0,32	31,59 ^b ± 0,88	19,90 ^a ± 0,50	0,000
K (mg/100g MF)	137,85 ^c ± 6,6	118,99 ^b ± 1,53	50,83 ^a ± 1,53	0,001
Na (mg/100g MF)	2,30 ^a ± 0,26	4,59 ^b ± 0,51	8,16 ^c ± 0,51	0,006
Cu (mg/100g MF)	0,30 ^a ± 0,06	0,11 ^a ± 0,01	0,19 ^a ± 0,01	0,072

Les valeurs d'une même ligne avec des lettres différentes sont statistiquement différentes.

MS : matière sèche, MS : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

Avec : M1 : Cactus + paille de blé + son de blé, M2 : cactus + luzerne + paille de blé + son de blé, M3 : cactus + atriplex + paille de blé + son de blé.

Annexe 8: Composition chimique et biochimique des mélanges initiaux à 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de mélasse.

Caractéristiques	0%	2%	4%	6%	8%	10%	P
pH	5,39 ^a ± 0,095	5,39 ^a ± 0,132	5,62 ^b ± 0,115	5,74 ^b ± 0,049	5,74 ^b ± 0,131	5,74 ^b ± 0,130	0,021
MS (%)	31,20 ^a ± 1,868	32,35 ^a ± 1,77	33,92 ^{ab} ± 2,66	34,46 ^{ab} ± 2,72	34,61 ^{ab} ± 0,69	37,72 ^b ± 1,35	0,012
Cendres (%MS)	4,039 ^a ± 0,825	3,021 ^a ± 0,680	4,356 ^a ± 0,505	4,079 ^a ± 0,429	2,670 ^a ± 0,304	3,451 ^a ± 0,865	0,204
Protéines (%MS)	11,67 ^c ± 1,34	7,00 ^b ± 2,32	5,83 ^{ab} ± 0,51	4,08 ^a ± 0,51	4,67 ^a ± 0,51	4,08 ^a ± 0,51	0,000
Sucres totaux (%MS)	16,97 ^a ± 1,66	20,39 ^a ± 1,01	24,83 ^b ± 10,98	32,32 ^c ± 0,76	37,33 ^d ± 2,28	39,69 ^d ± 0,25	0,000
Sucres réducteurs (%MS)	4,78 ^a ± 0,54	10,50 ^b ± 1,02	13,96 ^{ab} ± 1,07	16,08 ^b ± 0,70	17,69 ^b ± 1,43	22,07 ^c ± 3,34	0,000
NDF (%MS)	42,09 ^b ± 0,71	50,68 ^d ± 2,54	48,94 ^d ± 1,02	43,78 ^b ± 1,50	37,42 ^a ± 1,13	37,78 ^a ± 0,52	0,000
ADF (%MS)	20,74 ^a ± 3,04	21,81 ^a ± 1,03	30,13 ^b ± 2,59	20,05 ^a ± 3,38	19,88 ^a ± 3,81	26,20 ^{ab} ± 1,66	0,032
ADL (%MS)	15,88 ^a ± 2,81	14,43 ^a ± 2,60	20,90 ^a ± 4,00	13,83 ^a ± 1,22	12,22 ^a ± 3,16	11,11 ^a ± 0,92	0,064
Hémicellulose (%MS)	21,35 ^{bc} ± 2,61	28,87 ^c ± 3,57	18,81 ^{ab} ± 3,61	23,74 ^{bc} ± 4,84	17,54 ^{ab} ± 4,53	11,59 ^a ± 1,14	0,016
Cellulose (%MS)	4,86 ^a ± 2,56	7,39 ^a ± 2,64	9,23 ^a ± 5,18	6,21 ^a ± 3,38	7,67 ^a ± 1,16	15,08 ^a ± 2,08	0,124
Ca (mg/100 g MF)	151,25 ^a ± 1,35	156,54 ^b ± 0,93	159,50 ^c ± 1,04	165,58 ^d ± 0,73	169,94 ^e ± 0,83	172,59 ^f ± 0,52	0,000
Fe (mg/100 g MF)	0,48 ^a ± 0,02	0,53 ^{ab} ± 0,01	0,56 ^{bc} ± 0,05	0,59 ^c ± 0,01	0,60 ^c ± 0,00	0,70 ^d ± 0,05	0,000
Mg (mg/100 g MF)	53,50 ^a ± 0,57	54,88 ^b ± 0,11	58,94 ^c ± 0,22	59,72 ^d ± 0,32	61,47 ^e ± 0,25	62,18 ^e ± 0,20	0,000
K (mg/100 g MF)	173,30 ^a ± 2,27	179,93 ^b ± 0,79	182,99 ^b ± 0,91	190,14 ^c ± 1,47	192,01 ^c ± 1,25	193,20 ^c ± 0,79	0,000
Na (mg/100 g MF)	3,76 ^a ± 0,06	4,10 ^b ± 0,03	4,32 ^c ± 0,04	4,91 ^d ± 0,04	4,98 ^d ± 0,05	5,20 ^e ± 0,08	0,000
Cu (mg/100 g MF)	0,30 ^a ± 0,06	0,36 ^a ± 0,02	0,39 ^a ± 0,02	0,40 ^a ± 0,03	0,42 ^a ± 0,04	0,42 ^a ± 0,05	0,094

Les valeurs d'une même ligne avec des lettres différentes sont statistiquement différentes.

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.

Annexe 9: Composition chimique et biochimique des ensilages à 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de mélasse.

Caractéristiques	0%	2%	4%	6%	8%	10%	P
pH	4,36 ^b ± 0,05	4,36 ^a ± 0,02	4,39 ^b ± 0,01	4,54 ^c ± 0,02	4,54 ^c ± 0,02	4,61 ^d ± 0,015	0,000
MS (%)	31,80 ^a ± 2,17	33,00 ^{ab} ± 1,06	34,96 ^{ab} ± 0,41	36,57 ^{bc} ± 1,81	37,30 ^{bc} ± 2,12	39,22 ^c ± 0,18	0,011
Cendres (% MS)	1,95 ^a ± 0,03	2,44 ^{ab} ± 0,36	2,53 ^{ab} ± 0,38	3,02 ^b ± 0,44	2,22 ^{ab} ± 0,32	2,24 ^{ab} ± 0,55	0,244
Protéines (% MS)	3,50 ^d ± 0,88	2,33 ^c ± 0,51	2,04 ^{bc} ± 0,51	2,63 ^{cd} ± 0,88	1,17 ^{ab} ± 0,51	0,88 ^a ± 0,00	0,002
Sucres totaux (% MS)	7,980 ^a ± 0,45	11,18 ^{ab} ± 1,18	13,30 ^{bc} ± 1,20	16,42 ^b ± 1,40	18,58 ^{cd} ± 0,46	23,51 ^e ± 1,46	0,000
Sucres réducteurs (% MS)	1,86 ^a ± 1,24	2,33 ^a ± 2,18	1,86 ^a ± 1,55	3,26 ^a ± 0,62	4,43 ^a ± 2,18	4,43 ^a ± 2,64	0,66
NDF (% MS)	38,55 ^a ± 0,90	39,73 ^a ± 0,96	40,40 ^a ± 0,53	40,37 ^a ± 0,35	41,25 ^a ± 1,62	39,85 ^a ± 0,55	0,222
ADF (% MS)	14,87 ^a ± 2,12	10,83 ^a ± 2,17	21,92 ^b ± 1,18	23,12 ^b ± 1,24	24,96 ^b ± 4,24	21,54 ^b ± 1,44	0,001
ADL (% MS)	6,60 ^a ± 0,94	8,78 ^a ± 1,76	9,59 ^a ± 1,85	16,73 ^b ± 1,29	11,82 ^{ab} ± 2,76	10,56 ^a ± 3,15	0,021
Hemicellulose (% MS)	23,68 ^{bc} ± 2,82	28,90 ^c ± 3,13	18,48 ^{ab} ± 1,68	17,24 ^a ± 1,18	16,30 ^a ± 2,61	18,31 ^{ab} ± 1,80	0,003
Cellulose (% MS)	8,26 ^a ± 2,92	2,05 ^a ± 0,44	12,33 ^a ± 2,33	6,39 ^a ± 2,19	13,14 ^a ± 6,87	10,98 ^a ± 2,89	0,129
Perte de poids (%)	6,34 ^a ± 5,9	6,36 ^a ± 3,91	6,29 ^a ± 2,35	6,65 ^a ± 1,96	6,45 ^a ± 6,30	9,88 ^b ± 3,80	0,016
Ca (mg/100 g MF)	122,43 ^a ± 1,56	123,21 ^a ± 1,77	125,55 ^a ± 0,52	131,93 ^b ± 0,73	137,54 ^c ± 1,45	140,03 ^c ± 1,14	0,000
Fe (mg/100 g MF)	0,22 ^a ± 0,010	0,36 ^{cd} ± 0,013	0,47 ^e ± 0,014	0,30 ^b ± 0,013	0,33 ^{bc} ± 0,014	0,38 ^c ± 0,010	0,000
Mg (mg/100 g MF)	35,22 ^a ± 1,38	43,83 ^b ± 0,39	54,92 ^{cd} ± 2,21	56,03 ^d ± 2,21	52,28 ^c ± 0,60	53,18 ^b ± 0,43	0,000
Na (mg/100 g MF)	2,00 ^a ± 0,14	3,58 ^b ± 0,08	3,47 ^b ± 0,22	3,42 ^b ± 0,14	3,37 ^b ± 0,02	3,41 ^b ± 0,06	0,000
K (mg/100 g MF)	123,98 ^a ± 6,46	144,22 ^b ± 5,90	156,63 ^c ± 1,36	166,67 ^d ± 1,93	161,22 ^{cd} ± 1,70	163,10 ^{cd} ± 1,25	0,000
Cu (mg/100 g MF)	0,17 ^a ± 0,02	0,22 ^a ± 0,03	0,30 ^a ± 0,05	0,35 ^a ± 0,05	0,26 ^a ± 0,02	0,25 ^a ± 0,12	0,217

Les valeurs d'une même ligne avec des lettres différentes sont statistiquement différentes.

MS : matière sèche, MF : matière fraîche, NDF : fibre de détergent neutre, ADF : fibre détergent acide, ADL : lignine détergent acide.