



THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE DOCTORAT LMD EN SCIENCES AGRONOMIQUES
THÈME

*Valorisation sylvo-pastorale des aulnaies
glutineuses de la zone humide d'El Tarf
(cas de l'aulnaie de Ain Khia)*

Présentée Par : Mr LAADJAL Abdessatar

Devant le jury composé de :

Pr BOUTABIA Lamia	Présidente	Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf
Pr CHAKER-HOUD Kahina	Direct. thèse	Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf
Pr MEBIROUK-BOUDECHICHE Lamia	Co-direct. thèse	Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf
Pr KADI Si Ammar	Examineur	Univ. Mouloud Mammeri- Tizi Ouzou
Pr MERDACI Latifa	Examinatrice	Univ. Chadli Bendjedid- El Tarf
Dr DJAALAB Imène	Examinatrice	Univ. Frères Mentouri- Constantine
Dr SELMI Houcine	Membre invité	Istitut Sylvo-Pastoral de Tabarka, TUNISIE

≈ Année universitaire : 2024 – 2025 ≈

DEDICACES

À la mémoire de ma mère,

qui demeure à jamais dans mon cœur,
source d'amour, de courage et d'inspiration.

Que cette modeste contribution soit un témoignage de ma gratitude et de mon amour éternel.

À mon père,

pour son soutien sans faille, sa patience et ses encouragements constants.
Merci d'avoir cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

À mes frères et sœurs,

pour leur affection, leur complicité et leur présence rassurante.
Votre amour fraternel m'a donné la force d'avancer.

À mes amis proches,

merci pour vos paroles réconfortantes, vos conseils avisés,
et votre présence précieuse tout au long de ce parcours exigeant.

Abdessatar LAADJAL

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier vivement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à **Pr Chaker-Houd Kahina**, directrice de cette thèse, pour son encadrement attentif, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et sa disponibilité continue, même durant les périodes les plus exigeantes. Son engagement sans faille a grandement facilité l'aboutissement de ce travail. Je tiens également à remercier chaleureusement **Pr Mebirouk-Boudechiche Lamia**, co-directrice de thèse, pour son accompagnement constant, son expertise, et ses nombreuses suggestions constructives qui ont largement enrichi cette recherche.

Je dois également exprimer ma gratitude aux membres du jury : **Pr Boutabia Lamia**, **Pr Kadi Si Ammar**, **Pr Merdaci Latifa** et **Dr Djaalab Imène** en leur adressant mes vifs remerciements pour avoir accepté d'examiner ce travail.

C'est avec un grand honneur que je remercie l'ensemble du personnel de **l'Institut sylvo-pastoral de Tabarka, Tunisie** en particulier les membres du **laboratoire des ressources sylvopastorales** : **Mme Noujoud Arfaoui**, **Dr Sabri Jedidi** et **M Mondher Merouani**, pour leur disponibilité, leur accueil chaleureux et leur précieux soutien tout au long de cette étude. Mes remerciements s'adressent tout spécialement à **Dr Selmi Houcine**, directeur de l'Institut, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour son accompagnement constant tout au long de ce travail. J'adresse également mes vifs remerciements à **Dr Ameni Dhifallah**, **Dr Sana Hamrouni**, **Dr Housseem Semmari** et **Mme Mouna Amroussia** pour leur soutien, leur collaboration et leur esprit d'équipe qui ont grandement facilité le bon déroulement de cette recherche.

Je tiens également à remercier chaleureusement les laboratoires de recherche : **Laboratoire d'épidémio-surveillance, santé, productions et reproduction, expérimentation et thérapie cellulaire des animaux domestiques et sauvages** et **Laboratoire d'agriculture et fonctionnement des écosystèmes** pour leur accueil, ainsi que pour les moyens logistiques et scientifiques mis à ma disposition durant la réalisation de cette recherche.

Je remercie tout particulièrement **M Abdessalem Grira**, cadre forestier du Parc National d'El Kala, pour son accompagnement et son assistance précieuse lors des campagnes de prélèvement sur le terrain. Mes remerciements vont aussi à **M Mokhtar Joudi**, pour sa disponibilité lors

des sorties de prospection et les informations pertinentes qu'il a généreusement partagées sur les préférences alimentaires du bétail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements au **Dr Sammar Faouzi** pour ses précieux conseils et son aide inestimable dans le traitement statistique. Son expertise et sa disponibilité ont grandement contribué à la qualité de ce travail.

À toutes celles et ceux, collègues, amis, chercheurs, techniciens, qui ont contribué de près ou de loin à cette aventure scientifique et humaine, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Résumé

Les espèces ligneuses constituent une ressource fourragère stratégique dans les systèmes sylvopastoraux méditerranéens, particulièrement durant les périodes de pénurie fourragère. Cette étude a pour but d'évaluer la valeur nutritionnelle de 13 espèces ligneuses (4 arbres, 4 arbustes et 5 lianes) consommées par les ruminants de race locale en extensif au niveau de l'aulnaie de Ain Khiair et cela en fonction des saisons durant l'année 2017-2018.

Les résultats révèlent que les teneurs en matière azotée totale (MAT) varient significativement entre les catégories taxonomiques. Les arbres et lianes présentent des teneurs supérieures aux arbustes, avec des valeurs remarquables pour *Clematis cirrhosa* (20,99 % MS), *Rubus ulmifolius* (16% MS) et *Fraxinus angustifolia* (15,6% MS). Par ailleurs, l'analyse des parois cellulaires révèle que des teneurs élevées en lignine, comme celles relevées pour *Alnus glutinosa* (23,91 % MS), *Phillyrea media* (24,15 % MS) et *Erica arborea* (26,49 % MS), constituent un frein à la digestibilité. En outre, l'étude de la digestibilité *in vitro* montre une forte variabilité entre espèces, le frêne *Fraxinus angustifolia* atteignant 72,39% MS, tandis que *Quercus canariensis* et *Quercus coccifera* présentent les valeurs les plus faibles (33-44%).

Les tanins condensés, inférieurs à 50 g/kg MS pour toutes les espèces étudiées, présentent néanmoins une activité biologique variable. L'ajout de polyéthylène glycol (PEG) a confirmé l'effet inhibiteur des tanins sur la fermentation ruminale, avec des augmentations de production de gaz allant jusqu'à 106,25% et cela pour *Erica arborea*. Ainsi, ces tanins jouent un rôle primordial dans l'atténuation des émissions de méthane. En effet, l'ajout du PEG, qui neutralise l'effet des tanins, confirme ce mécanisme en induisant des augmentations significatives de la production de méthane allant de 20% à 163% selon les espèces. Un résultat particulièrement prometteur concerne l'effet anti-méthanogène de *Clematis cirrhosa*, qui réduit la production de méthane sans compromettre la digestibilité, suggérant un mécanisme d'action spécifique sur la méthanogenèse plutôt qu'une inhibition générale de la fermentation ruminale.

La typologie issue l'analyse multivariée a permis d'identifier quatre groupes distincts d'espèces aux profils nutritionnels complémentaires. Elle offre une stratégie de gestion saisonnière adaptée. Les espèces du premier groupe (*Clematis cirrhosa*, *Rubus ulmifolius* et *Fraxinus angustifolia*) devraient être privilégiées en automne et au printemps pour leur haute valeur nutritive, particulièrement pour les ruminants à besoins élevés. En hiver, les espèces comme *Hedera helix* (groupe 2) et *Myrtus communis* (groupe 3) peuvent servir de fourrages complémentaires. Durant l'été, période critique en raison la raréfaction des ressources conventionnelles, une ration diversifiée avec *Smilas aspera*, *Alnus Glutinosa* et *Phillyrea media* (groupe 2) et *Rubia peregrina* (groupe 3) est recommandée pour maintenir un apport nutritionnel équilibré.

Cette étude met en évidence l'importance d'une approche intégrée dans la gestion des ressources fourragères ligneuses de l'aulnaie de Ain Khiair, alliant amélioration de la nutrition animale, préservation de la biodiversité et atténuation du changement climatique.

Mots clés :

Aulnaie de Ain Khiair ; ligneux fourragers ; valeur nutritionnelle ; saison ; systèmes sylvopastoraux

Abstract

Ligneous forage species represent a strategic forage resource in Mediterranean silvopastoral systems, particularly during periods of feed scarcity. This study aims to evaluate the nutritional value of 13 ligneous species (4 trees, 4 shrubs, and 5 lianas) consumed by local ruminants under extensive grazing in the Ain Khiair alder grove, across different seasons of the year 2017-2018.

Results revealed that crude protein (CP) content varied significantly among taxonomic categories. Trees and lianas showed higher CP levels compared to shrubs, with notably high values for *Clematis cirrhosa* (20.99 % dry matter (DM)), *Rubus ulmifolius* (16% DM), and *Fraxinus angustifolia* (15.6% DM). However, the analysis of cell wall components showed that high lignin content, as observed in *Alnus glutinosa* (23.91% DM), *Phillyrea media* (24.15% DM), and *Erica arborea* (26.49% DM), limited digestibility. In vitro digestibility exhibited strong interspecific variability, with *Fraxinus angustifolia* reaching 72.39% DM, while *Quercus canariensis* and *Quercus coccifera* recorded the lowest values (33–44%).

Condensed tannins, although below 50 g/kg DM for all species, displayed varying biological activities. The addition of polyethylene glycol (PEG) confirmed the inhibitory effect of tannins on ruminal fermentation, with gas production increases of up to 106.25% for *Erica arborea*. These tannins also play a key role in mitigating methane emissions. PEG, which neutralizes tannin effects, significantly increased methane production by 20% to 163%, depending on the species.

A promising finding is the specific anti-methanogenic effect of *Clematis cirrhosa*, which reduces methane emissions without compromising digestibility, suggesting a targeted action on methanogenesis pathways rather than generalized fermentation inhibition.

The multivariate analysis allowed the identification of four distinct groups of species with complementary nutritional profiles, offering a basis for seasonally adapted forage management strategies. Species in the first group (*Clematis cirrhosa*, *Rubus ulmifolius*, and *Fraxinus angustifolia*) should be prioritized in autumn and spring for their high nutritive value, especially for animals with elevated nutritional needs. In winter, species such as *Hedera helix* (group 2) and *Myrtus communis* (group 3) can be used as supplementary forage. During the summer - a critical period due to the scarcity of conventional feed - diversified rations including *Smilax aspera*, *Alnus glutinosa*, and *Phillyrea media* (group 2), as well as *Rubia peregrina* (group 3), are recommended to maintain a balanced nutritional intake.

This study highlights the importance of an integrated approach in the management of woody forage resources in the Ain Khiair alder forest, combining improvements in animal nutrition, biodiversity conservation, and climate change mitigation.

Keywords :

Ain Khiair alder grove ; Ligneous forage ; nutritional value ; season ; silvopastoral systems

ملخص

تمثل الموارد الشجرية الغابية مصدرًا علفيًا استراتيجيًا في النظم الرعوية الغابية بالمنطقة المتوسطية، خصوصًا خلال فترات نقص الموارد العلفية التقليدية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم القيمة الغذائية لثلاث عشرة نوعًا خشبيًا تنتمي إلى فئات مختلفة (أشجار، شجيرات، ومتسلقات)، وذلك عبر الفصول، لتحديد مدى ملاءمتها كأعلاف بديلة ومكملة للمجترات المحلية في غابة العود الأحمر بعين خيار، ولاية الطارف.

أظهرت النتائج أن محتوى المادة الأزوتية الكلية يختلف اختلافاً معنويًا بين الفئات التصنيفية، حيث سجلت الأشجار والمتسلقات نسبًا أعلى مقارنةً بالشجيرات. وقد تم رصد قيم مرتفعة على وجه الخصوص لدى *Clematis cirrhosa* (20.99%) من المادة الجافة، و *Rubus ulmifolius* (16%)، و *Fraxinus angustifolia* (15.6%).

أما تحليل مكونات الجدران الخلوية فقد بيّن أن ارتفاع نسبة اللجنين، كما لوحظ لدى *Alnus glutinosa* (23.91%) م.ج، *Phillyrea media* (24.15% م.ج)، و *Erica arborea* (26.49% م.ج)، يُعد من العوامل التي تعيق عملية الهضم لدى المجترات.

أظهرت نتائج الهضم في المختبر تباينًا كبيرًا بين الأنواع، حيث سجلت *Fraxinus angustifolia* أعلى نسبة هضم بلغت 72.39%، في حين سجلت *Quercus canariensis* و *Quercus coccifera* أدنى القيم (بين 33 و 44%).

ورغم أن تركيز التانينات المكثفة كان دون 50 غ/كغ من المادة الجافة لدى جميع الأنواع المدروسة، إلا أنها أظهرت نشاطًا بيولوجيًا متباينًا. فقد أكدت إضافة بولي إيثيلين جلايكول (PEG) التأثير المثبط لهذه المركبات على تخمير الكرش، حيث لوحظت زيادات في إنتاج الغاز بلغت 106.25% لدى *Erica arborea*. وبالتالي، تبرز هذه التانينات كمعامل فعالة في الحد من انبعاثات الميثان. وتؤكد إضافة الـ PEG، الذي يعمل على تحييد تأثير التانينات، هذه الآلية من خلال زيادات ملحوظة في إنتاج الميثان تراوحت بين 20% و 163% حسب الأنواع. ومن أبرز النتائج الواعدة، التأثير المضاد لتكوّن الميثان لدى *Clematis cirrhosa*، حيث لوحظ انخفاض في انبعاثات الميثان دون التأثير سلبيًا على قابلية الهضم، مما يشير إلى وجود آلية انتقائية تؤثر على الميثانوجينات دون تثبيط عام للتخمير الكرش.

مكنت التحاليل متعددة المتغيرات من تحديد أربعة مجموعات متميزة من الأنواع ذات خصائص غذائية متكاملة، بما يسمح بوضع استراتيجية لإدارة موسمية فعالة. يُوصى باستخدام أنواع المجموعة الأولى (*Clematis cirrhosa*)، *Rubus ulmifolius*، و *Fraxinus angustifolia* خلال فصلي الخريف والربيع، نظرًا لقيمتها الغذائية العالية، خصوصًا للحيوانات ذات الاحتياجات المرتفعة. أما في فصل الشتاء، فيمكن اعتماد أنواع مثل *Hedera helix* (المجموعة 2) و *Myrtus communis* (المجموعة 3) كأعلاف تكميلية. وخلال فصل الصيف، وهي فترة حرجة بسبب شح الموارد التقليدية، يوصى بتقديم تركيبة علفية متنوعة تشمل *Alnus glutinosa*، *Smilax aspera*، *Phillyrea media* (المجموعة 2)، و *Rubia peregrina* (المجموعة 3)، للحفاظ على توازن غذائي مناسب.

تؤكد هذه الدراسة على أهمية تبني نهج تكاملي في إدارة الموارد العلفية الخشبية في غابة العود الأحمر، يجمع بين تحسين تغذية المجترات، الحفاظ على التنوع البيولوجي، والمساهمة في التخفيف من آثار التغيرات المناخية.

الكلمات المفتاحية:

النباتات الخشبية العلفية؛ القيمة الغذائية؛ غابة العود الأحمر بعين خيار؛ الفصل؛ النظم الرعوية-الغابية.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
Résumé	iv
Abstract	v
ملخص.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvi
LISTE DES ABREVIATIONS	xviii
LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	xix
Introduction	1

PARTIE I : REVUE DE LITTERATURE

Chapitre I : Le sylvopastoralisme : un système agroforestier au service de l'élevage et de l'environnement	6
I.1. L'Agroforesterie.....	6
I.1.1. Définitions.....	6
I.1.2. Concepts et attributs.....	7
I.1.2.1. La productivité	8
I.1.2.2. La durabilité	8
I.1.2.3. L'adoptabilité ou l'acceptabilité.....	8
I.2. Les systèmes agroforestiers.....	8
I.3. Le Sylvopastoralisme.....	9
I.3.1. Définitions et concepts	9
I.3.2. Les systèmes sylvopastoraux.....	10
I.3.3. Distribution géographique	10
I.3.4. Les avantages des systèmes sylvopastoraux	13
I.4. Les arbres et les arbustes : une ressource fourragère de qualité pour les ruminants	14
I.4.1. Les ligneux fourragers comme aliment de bétail	14
I.4.2. Les modes d'utilisation des ligneux par le bétail	15
I.4.3. Composition nutritive des ligneux fourragers	15

I.4.4. Facteurs antinutritionnels dans les ligneux fourragers.....	16
I.5. Le sylvopastoralisme : un système résilient au changement climatique.....	17
I.6. Méthanogenèse entérique et stratégies d'atténuation	18
I.6.1. Méthane et ruminants	18
I.6.2. Rappel sur la méthanogèse ruminale	19
I.6.3. Les stratégies adoptées pour l'atténuation du méthane entérique	20
I.6.4. Les tanins : une piste prometteuse pour l'atténuation du méthane entérique	20
I.6.4.1. Les tanins condensés.....	21
I.6.4.2. Les tanins hydrolysables	21
I.7. Le PolyEthylene Glycol (PEG) : une molécule pour inactiver l'effet antinutritionnel des tanins	22
Chapitre II : Situation des ressources fourragères en Algérie.....	24
II.1. Répartition générale des terres.....	24
II.1.1. Superficie agricole totale (SAT)	24
II.1.2. Terres alfatières	24
II.1.3. Terres forestières	25
II.1.4. Terres improductives.....	25
II.2. Les cultures fourragères : superficies et rendements.....	25
II.3. Le cheptel : structure et évolution	26
II.4. Bilan fourrager : un déficit chronique	27
II.4.1. Les besoins du cheptel.....	27
II.4.2. L'évaluation de l'offre fourragère	28
II.4.3. La balance fourragère.....	29
II.5. La places des arbres et arbustes fourragers dans le système d'alimentation des ruminants en Algérie.....	29
II.5.1. Les arbres et arbustes utilisés en Algérie	29
II.5.2. La valeur nutritive des arbres et arbustes utilisés en Algérie	33
PARTIE II : MATERIEL & METHODES	
I. Présentation de la région d'étude : Parc National d'El Kala (PNEK).....	38
I.1. Situation géographique et administrative	38

I.2. Milieu physique	38
I.2.1. Caractères géologiques	38
I.2.2. Caractères hydrologiques	39
I.2.3. Caractères climatiques	40
I.2.3.1. La température	40
I.2.3.2. La pluviométrie	41
I.2.3.3. L'humidité	41
I.2.3.4. Le vent	41
I.2.4. Caractères bioclimatiques	42
I.2.5. Richesses biologiques	42
I.2.5.1. Flore	42
I.2.5.2. Faune	43
I.3. Milieu socio-économique	43
I.3.1. Population	43
I.3.2. Agriculture	43
I.3.3. Élevage et pastoralisme.....	44
I.3.4. Pêche	44
II. Description du site d'étude : Aulnaie de Ain Khiair	45
II.1. Situation géographique.....	45
II.2. Caractéristiques écologiques générales	46
II.2.1. Types de sols.....	46
II.2.2. Richesse floristique.....	46
II.2.2.1. La strate arborée	46
II.2.2.2. La strate arbustive.....	47
II.2.2.3. La strate herbacée	47
II.2.3. Richesse faunistique	48
II.2.4. Menaces et tendances	48
II.2.4.1. Urbanisation.....	49
II.2.4.2. Pollution.....	49

II.2.4.3. Coupe illicite de bois	49
II.2.4.4. Surpâturage	49
II.2.4.5. Sècheresse et les incendies	50
III. Méthodologie de travail	50
III.1. Identification des ligneux fourragers	50
III.2. Échantillonnage	53
III.2. Détermination de la valeur nutritionnelle	54
III.2.1. Analyse de la composition chimique primaire	54
III.2.1. 1. La Matière sèche	54
III.2.1. 2. La Matière minérale	55
III.2.1.3. La Matière azotée totale	55
III.2.1.4. Les constituants pariétaux	55
III.2.2. Analyse de la composition chimique secondaire.....	56
III.2.2.1. Les Phénols Totaux.....	56
III.2.2.2. Les Tanins Totaux.....	56
III.2.2.3. Les Tanins Condensés	56
III.2.3. Etude de la digestibilité <i>in vitro</i>	56
III.2.3.1. Collecte du jus de rumen	56
III.2.3.2. Essai de digestibilité <i>in vitro</i>	57
III.2.3.3. Effet du PEG sur la production de gaz et de méthane.....	58
III.3. Traitement statistique.....	58

PARTIE III : RESULTATS & DISCUSSION

I. Détermination de la valeur nutritionnelle des espèces selon les catégories	61
I.1. Valeur nutritionnelle des arbustes.....	61
I.1.1. Composition chimique primaire	61
I.1.2. Composition en parois cellulaires	62
I.1.3. Composition en métabolites secondaires	64
I.1.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation	66
I.1.5. Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i>	67

I.1.6. Effet du PEG sur la production de gaz.....	68
I.1.7. Effet du PEG sur la production de méthane.....	69
I.2. Valeur nutritionnelle des arbres	72
I.2.1. Composition chimique primaire	72
I.2.2. Composition en Parois cellulaires.....	73
I.2.3. Composition en Métabolites secondaires.....	75
I.2.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation	77
I.2.5. Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i>	78
I.2.6. Effet du PEG sur la production de gaz.....	80
I.2.7. Effet du PEG sur la production de méthane.....	81
I.3. Valeur nutritionnelle des lianes	83
I.3.1. Composition chimique primaire	83
I.3.2. Composition en parois cellulaires	84
I.3.3. Composition en métabolites secondaires	86
I.3.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation	87
I.3.5. Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i>	89
I.3.6. Effet de PEG sur la production de gaz.....	91
I.3.7. Effet de PEG sur la production de méthane	92
II. Détermination de la valeur nutritionnelle des espèces toutes catégories confondues	94
II.1. Composition chimique primaire	94
II.2. Composition en parois cellulaires	97
II.3. Composition en métabolites secondaires.....	100
II.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation.....	103
II.5. Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i>	107
II.6. L'effet du PEG sur la production de gaz.....	110
II.7. L'effet du PEG sur la production de Méthane	113
III. Typologie des espèces ligneuses étudiées	117
III.1. Analyse Factorielle Multiple (AFM)	117
III.1.1. Validation de l'AFM	117

III.1.1.1. Inspection des coefficients de corrélation canoniques	117
III.1.1.2. Examen de la structure des valeurs propres	117
III.1.2. Représentation des groupes de variables.....	118
III.1.3. Représentation des variables quantitatives.....	120
III.1.4. Représentation des variables qualitatives supplémentaires.....	122
III.1.5. Représentation des individus.....	123
III.1.5.1. Représentation par catégorie taxonomique	123
III.1.5.2. Représentation par saison.....	125
III.2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)	127
III.2.1. Détermination et validation du nombre optimal de clusters	127
III.2.2. Caractérisation des clusters issus de la CHA	128
III.2.2.1. Relation entre les dimensions à la partition des classes	129
III.2.2.3. Description des classes par les axes	130
III.2.2.4. Relation entre la partition et les variables quantitatives.....	130
III.2.2.5. Relation entre la partition et les variables qualitatives supplémentaires.	131
III.2.2.6. Profilage des clusters.....	132
III.2.2.7. Les individus parangons des clusters	136
III.2.2.8. Les individus spécifiques des clusters.....	137
IV Discussion	140
IV.1. Valeur nutritionnelle des espèces selon les catégories	140
IV.1.1. Valeur nutritionnelle des arbustes	140
IV.1.2. Valeur nutritionnelle des arbres	143
IV.1.3. Valeur nutritionnelle des lianes.....	147
IV.2. Valeur nutritionnelle des espèces toutes catégories confondues.....	150
IV.3. Typologie des espèces ligneuses étudiées	155
IV.4. Implications de la typologie dans la gestion sylvopastorale de l'aulnaie de Ain Khia	160
Conclusion et perspectives.....	161
Références bibliographiques	165
Annexes	

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma descriptif de la méthanogenèse ruminale	19
Figure 2 : Répartition générale des terres.....	25
Figure 3 : Structure du cheptel	27
Figure 4 : Estimation des besoins du cheptel national en UF de 2000 à 2013	28
Figure 5 : Estimation des besoins du cheptel et de l'offre fourragère en UF durant la Période allant de 2000 à 2013	28
Figure 6 : Déficit national en UF durant la période allant de 2000 à 2013	29
Figure 7 : Localisation géographique du Parc National d'El Kala	39
Figure 8 : Rose des vents.....	42
Figure 9 : Localisation géographique de l'aulnaie de Ain Khiair	45
Figure 10 : Principales formations naturelles de l'aulnaie de Ain Khiair	46
Figure 11 : Boxplots des paramètres de la composition chimique des Arbustes.....	62
Figure 12 : Boxplots de la composition en parois cellulaires des Arbustes	63
Figure 13 : Boxplots de la composition en métabolites secondaires des Arbustes	65
Figure 14 : Boxplots des paramètres de cinétique de fermentation des Arbustes	67
Figure 15 : Boxplots des paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des Arbustes.....	68
Figure 16 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de gaz des Arbustes	70
Figure 17 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de méthane des Arbustes	71
Figure 18 : Boxplots des paramètres de la composition chimique des Arbres.....	73
Figure 19 : Boxplots de la composition en parois cellulaires des Arbres.....	75
Figure 20 : Boxplots de la composition en métabolites secondaires des Arbres.....	76
Figure 21 : Boxplots des paramètres de cinétique de fermentation des Arbres	78
Figure 22 : Boxplots des paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des Arbres	79
Figure 23 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de gaz des Arbustes	80
Figure 24 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de méthane des Arbres	80
Figure 25 : Boxplots des paramètres de la composition chimique des Lianes.....	84
Figure 26 : Boxplots de la composition en parois cellulaires des Lianes.....	85
Figure 27 : Boxplots de la composition en métabolites secondaires des Lianes.....	87
Figure 28 : Boxplots des paramètres de cinétique de fermentation des Lianes	89
Figure 29 : Boxplots des paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des Lianes	90
Figure 30 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de gaz des Lianes	92
Figure 31: Boxplots de l'effet du PEG sur la production CH ₄ des Lianes	93

Figure 32 : Coefficients estimés des effets fixes des paramètres de la composition chimique primaire des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction.....	96
Figure 33 : Coefficients estimés des effets aléatoires des paramètres de la composition chimique primaires des espèces selon les saisons	97
Figure 34 : Coefficients estimés des effets fixes des fractions pariétales des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction	99
Figure 35: Coefficients estimés des effets aléatoires des fractions pariétales des espèces ligneuses selon les saisons.....	100
Figure 36 : Coefficients estimés des effets fixes des métabolites secondaires des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction	102
Figure 37 : Coefficients estimés des effets aléatoires des métabolites secondaires des espèces ligneuses selon les saisons.....	103
Figure 38 : Coefficients estimés des effets fixes des paramètres cinétiques de fermentation des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction.....	105
Figure 39 : Coefficients estimés des effets aléatoires des paramètres cinétiques de fermentation des espèces ligneuses selon les saisons.....	106
Figure 40 : Coefficients estimés des effets fixes des paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction.....	109
Figure 41 : Coefficients estimés des effets aléatoires des paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des espèces ligneuses selon les saisons	110
Figure 42 : Coefficients estimés des effets fixes de l'effet du PEG sur la production de gaz des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction.....	112
Figure 43 : Coefficients estimés des effets aléatoires de l'effet du PEG sur la production de gaz des espèces ligneuses selon les saisons	113
Figure 44 : Coefficients estimés des effets fixes de l'effet du PEG sur la production de Méthane des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction	115
Figure 45 : Coefficients estimés des effets aléatoires de l'effet du PEG sur la production de Méthane des espèces ligneuses selon les saisons	116
Figure 46 : Diagramme des valeurs propres de l'AFM.....	118
Figure 47 : Représentation des groupes de variables sur le plan factoriel de l'AFM	119
Figure 48 : Cercle de corrélation des variables quantitatives issu de l'AFM	121
Figure 49 : Représentation des points partiels des modalités supplémentaires sur le plan factoriel de l'AFM.....	122

Figure 50 : représentation des individus sur le plan factoriel de l'AFM selon la catégorie taxonomique	124
Figure 51 : Représentation des individus sur le plan factoriel de l'AFM selon la saison	125
Figure 52 : Dendrogramme illustrant les groupements des espèces ligneuses.....	128
Figure 53 : Les quatre classes issues de la classification hiérarchique	129
Figure 54 : Caractérisation des classes selon les profils des espèces ligneuses	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Différentes définitions de l'agroforesterie.....	6
Tableau 2 : Les systèmes agroforestiers	9
Tableau 3 : Les principaux types de systèmes sylvopastoraux des pays du Nord d'Afrique...	11
Tableau 4 : Liste actualisée des arbres et arbustes utilisées en alimentation des ruminants en Algérie.....	31
Tableau 5 : Températures moyennes mensuelles (1988-2018) du PNEK	40
Tableau 6 : Précipitations moyennes mensuelles (1988-2018) du PNEK.....	41
Tableau 7 : Humidités moyennes mensuelles (1988-2018) du PNEK	41
Tableau 8 : Caractérisation des différentes stations de l'aulnaie.....	51
Tableau 9 : Abondance du feuillage des différentes espèces ligneuses durant les quatre saisons	51
Tableau 10 : Appétences des différentes espèces ligneuses pour les ruminants.....	53
Tableau 11 : Composition chimique primaire des Arbustes étudiés selon la saison	61
Tableau 12 : Composition en parois cellulaires des Arbustes étudiés selon les saisons	63
Tableau 13 : Composition en métabolites secondaires des Arbustes étudiés selon les saisons	65
Tableau 14 : Paramètres de cinétique de fermentation des Arbustes étudiés selon les saisons	66
Tableau 15 : Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des Arbustes étudiés selon les saisons	68
Tableau 16 : L'effet du PEG sur la production du gaz des Arbustes étudiés selon les saisons	69
Tableau 17 : L'effet du PEG sur la production de CH ₄ des Arbustes étudiés selon les saisons	71
Tableau 18 : Composition chimique primaire des Arbres étudiés selon les saisons	72
Tableau 19 : Composition en parois cellulaires des Arbres étudiés selon les saisons.....	74
Tableau 20 : Composition en métabolites secondaires des Arbres étudiés selon les saisons...	76
Tableau 21 : Paramètres de cinétique de fermentation des Arbres étudiés selon les saisons ...	77
Tableau 22 : Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des Arbres étudiés selon les saisons	79
Tableau 23 : L'effet du PEG sur la production du gaz des Arbres étudiés selon les saisons....	80
Tableau 24 : L'effet du PEG sur la production de méthane des Arbres étudiés selon les saisons	81
Tableau 25 : Composition chimique primaire des Lianes étudiées selon la saison	83
Tableau 26 : Composition en parois cellulaires des Lianes étudiées selon les saisons	85
Tableau 27 : Composition en métabolites secondaires des Lianes étudiées selon les saisons .	86
Tableau 28 : Paramètres de cinétique de fermentation des Lianes étudiées selon les saisons .	88

Tableau 29 : Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des Lianes étudiées selon les saisons.....	90
Tableau 30 : L'effet du PEG sur la production du gaz des Lianes étudiées selon les saisons..	91
Tableau 31 : L'effet du PEG sur la production de CH ₄ des Lianes étudiées selon les saisons	93
Tableau 32 : Composition chimique primaire des espèces ligneuses étudiées.....	95
Tableau 33 : Composition en parois cellulaires des ligneux étudiés.....	98
Tableau 34 : Composition en métabolites secondaires des ligneux étudiés	101
Tableau 35 : Paramètres de cinétique de fermentation des ligneux étudiés	104
Tableau 36 : Paramètres de digestibilité <i>in vitro</i> des ligneux étudiés.....	108
Tableau 37 : L'effet du PEG sur la production du gaz des ligneux étudiés.....	111
Tableau 38 : L'effet du PEG sur la production de méthane des ligneux étudiés.....	114
Tableau 39 : Coefficients de corrélation canonique des groupes de variables	117
Tableau 40 : Indices de silhouette pour la validation des clusters.....	127
Tableau 41 : Intensité de liaison entre les dimensions et la partition des classes.....	129
Tableau 42 : Positions des classes par rapport aux dimensions factorielles.....	130
Tableau 43 : Contribution des variables quantitatives à la partition des classes.....	131
Tableau 44 : Lien entre les variables qualitatives supplémentaires et la partition des classes	132
Tableau 45 : Description de la classe 1 par les variables quantitatives	133
Tableau 46 : Description de la classe 2 par les variables quantitatives	134
Tableau 47 : Description de la classe 3 par les variables quantitatives	135
Tableau 48 : Description de la classe 4 par les variables quantitatives	135
Tableau 49 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 1.....	136
Tableau 50 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 2.....	136
Tableau 51 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 3.....	137
Tableau 52 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 4.....	137
Tableau 53 : Contributions des individus spécifiques au cluster 1.....	138
Tableau 54 : Contributions des individus spécifiques au cluster 2.....	138
Tableau 55 : Contributions des individus spécifiques au cluster 3.....	139
Tableau 56 : Contributions des individus spécifiques au cluster 4.....	139

LISTE DES ABREVIATIONS

ABT	Activité Biologique des Tanins
ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADF	Acid Detergent Fiber
ADL	Acid Detergent Lignin
AFM	Analyse Factorielle multiple
AGV	Acides Gras Volatils
ANOVA	Analyse de la Variance
CB	Cellulose Brute
CHA	Classification Hiérarchique Ascendante
CO ₂	Dioxyde de carbone
COVID-19	COronaVirus Disease 2019
DGF	Direction Générale des Forêts
DSA	Direction des Services Agricoles
EM	Energie Métabolisable
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à Effet de Serre
H ₂	Gaz d'Hydrogène
ha	hectare
ICRAF	Centre International de la Recherche en Agroforesterie
Lg	Coefficient de Lien général
MADR	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
MAT	Matière Azotée Totale
MM	Matière Minérale
MO	Matière Organique
MS	Matière Séche
NDF	Neutral Detergent Fiber
NO ₂	Disoxyde d'azote
PDI	Protéines Digestibles dans l'Intestin
PEG	Poly Ethylène Glycol
PNEK	Parc National d'El Kala
PPT	PolyPhénols Totaux
RV	Coefficient de Redondance Vectorielle
SAT	Surface Agricole Totale
SAU	Surface Agricole Utile
TAD	Territoire, Aménagement et Développement
TC	Tanins Condensés
TH	Tanins Hydrolysables
TT	Tanins Totaux
UF	Unité Fourragère
UFL	Unité Fourragère Lait
UFV	Unité Fourragère Viande
Unesco	Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture

LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

Articles publiés :

- Laadjal, A.,** Houd-Chaker, K., Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhifallah, A., & Rouissi, H. (2023). Nutritional characterization and digestibility parameters of four browse lianas of Ain Khiair alder grove (North-East of Algeria). *Agroforestry Systems*, 97(6), 1185-1197. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00856-w>
- Laadjal, A.,** Chaker-Houd, K., Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhif Allah, A., & Rouissi, H. (2022). Nutrient potential of *Rubia peregrina* (L., 1753) for ruminants, by season, in a sylvopastoral system in North-East Algeria. *Fourrages*, 4, 63-69.
- Laadjal, A.,** Chaker-Houd, K., Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhif Allah, A., & Rouissi, H. (2024). Seasonal variation in the chemical composition and fermentation parameters of *Fraxinus angustifolia* (Vahl, 1804) harvested from northeastern Algeria. *Fourrages*, 258(2), 17-26.

Communications :

- Chaker-Houd, K., **Laadjal, A.,** Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhif Allah, A., & Rouissi, H. (2024). Variation saisonnière de la composition chimique et des paramètres de fermentation de *Fraxinus angustifolia* (Vahl, 1804) récolté du Nord-est de l'Algérie. *Journées du printemps de l'AFPF*. Angers, France.
- Laadjal, A.,** Chaker-Houd, K., Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhif Allah, A., & Rouissi, H. (2020). Nutritional characterization and fermentation parameters of *Erica arborea* ; fodder shrub of the alder grove of Ain Khiair (northeast of Algeria). *25 èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants (3R)*. Paris, France.
- Chaker-Houd, K., **Laadjal, A.,** Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhif Allah, A., & Rouissi, H. (2020). Composition chimique, facteurs antinutritionnels et paramètres de digestibilité de quelques lianes fourragères de l'aulnaie d'Ain Khiair (nord est algérien). *25 èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants (3R)*. Paris, France.
- Laadjal, A.,** Chaker-Houd, K., Bendekoum, I., & Mebirouk-Boudechiche, L. (2019). Composition chimique de trois types de glands au niveau de l'aulnaie de Ain Khiair, El Tarf, Algérie. *3 ème Séminaire International Sur Les Pâturages, Les Parcours et L'alimentation Des Animaux Dans Le Bassin Méditerranéen, El-Tarf, Algérie*.
- Chaker-Houd, K., **Laadjal, A.,** Ghamri, A. N., & Mebirouk-Boudechiche, L. (2019). Inventaire des ligneux fourragers au niveau d'une zone humide d'El Tarf, (aulnaie de Ain Khiair), Algérie. *3 ème Séminaire International Sur Les Pâturages, Les Parcours et L'alimentation Des Animaux Dans Le Bassin Méditerranéen, El-Tarf, Algérie*

Introduction

La sécurité alimentaire constitue un défi majeur pour l'humanité au XXI^e siècle. Selon les dernières estimations de la FAO, près de 828 millions de personnes souffrent de la faim dans le monde, soit 9,8% de la population mondiale. Cette situation s'est aggravée suite aux crises successives : pandémie de COVID-19, conflits géopolitiques, changement climatique et la raréfaction des ressources naturelles (FAO *et al.*, 2022).

En Algérie, où les terres arables ne représentent que 3% du territoire national (MADR, 2021), et bien que la situation soit moins critique que dans d'autres régions, le pays reste fortement dépendant des importations alimentaires, notamment pour les céréales (70% des besoins) et les produits d'origine animale, ce qui fragilise sa souveraineté alimentaire et expose le pays à une vulnérabilité accrue, notamment dans un contexte d'augmentation de la population, de sécheresses récurrentes et de pression sur les pâturages (Bessaoud *et al.*, 2022) ce qui incite le pays de développer impérativement des systèmes de production durables et résilients.

Face à ces défis, l'agroforesterie émerge comme une solution durable. En effet, le sylvopastoralisme est un système agroforestier qui combine l'élevage et l'utilisation des ligneux comme source d'affouragement des ruminants (Jose & Dollinger, 2019). Cet ancien système regagne sa place vu les différents services écosystémiques qu'il fournit : séquestration de carbone (Varsha *et al.*, 2019), conservation du sol et réduction de l'érosion (Pent, 2020), amélioration de la biodiversité (Mosquera-Losada *et al.*, 2009) et des performances animales (Broom *et al.*, 2013) et réduction des émissions de méthane (Thornton & Herrero, 2010) s'inscrivant ainsi dans le cadre du développement durable (Sharrow *et al.*, 2009 ; Jose *et al.*, 2019).

En région méditerranéenne, le sylvopastoralisme est une pratique ancestrale des éleveurs (Le Houérou, 2006), où les espèces ligneuses deviennent les ressources uniques disponibles pour le bétail durant les périodes critiques de pénurie alimentaire (Papanastasis *et al.*, 2008).

Les espèces ligneuses (arbres, arbustes et lianes) constituent une ressource fourragère stratégique dans ces systèmes, particulièrement durant les périodes de sécheresse où les ressources herbacées sont limitées (Papachristou *et al.*, 2005). Ces ligneux fourragers présentent plusieurs avantages pour l'alimentation des ruminants : ils maintiennent une teneur

élevée en protéines tout au long de l'année (Pent & Fike, 2021), fournissent des minéraux essentiels et contiennent des métabolites secondaires aux propriétés bénéfiques (Ammar *et al.*, 2005). En effet, certains composés comme les tanins condensés, lorsqu'ils sont présents en quantités modérées, peuvent améliorer l'utilisation des protéines par les ruminants (Vasta *et al.*, 2019), réduire les infestations parasitaires (Hoste *et al.*, 2015) et diminuer les émissions de méthane entérique (Jayanegara *et al.*, 2015), contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique. Malgré ces avantages potentiels, la valeur nutritionnelle des espèces ligneuses méditerranéennes reste insuffisamment caractérisée, particulièrement en ce qui concerne les variations saisonnières et leur potentiel anti-méthanogène (Boufennara *et al.*, 2012). Cette connaissance est pourtant essentielle pour optimiser l'utilisation de ces ressources dans les systèmes d'élevage extensifs.

La filière de production animale en Algérie, souffre depuis longtemps de l'insuffisance des ressources fourragères notamment en période de soudure (été et hiver). Au nord du pays, les forêts présentent la seule alternative pour les éleveurs en extensif pour pallier au déficit alimentaire du bétail (Bessaoud *et al.*, 2019).

Les aulnaies glutineuses sont des forêts marécageuses très particulières ; elles sont considérées des hot spot de biodiversité de grande valeur biologique de par leur richesse spécifique qui dépasse 400 espèces (Belouahem-Abed *et al.*, 2012). L'aulnaie de Ain Khia, classée site Ramsar en 2003, est considérée parmi les sites les plus vulnérables de la réserve de biosphère d'El-Kala. En effet, elle subit une dégradation sévère et rapide imputée à la pression anthropique incontrôlée (les coupes illicites, le surpâturage, les incendies provoquées, le pompage excessif des ressources hydriques et la pollution) (Ramsar, 2019). Elle a fait l'objet de diverses études sur sa biodiversité floristique (Belouahem-Abed *et al.*, 2011 ; Nacer *et al.*, 2019), toutefois, aucune étude n'a été recensée en vue de déterminer le potentiel nutritif de son couvert végétal.

Dans ce sens, notre objectif global est d'avoir une vision approfondie du potentiel nutritionnel des espèces ligneuses fourragères de l'aulnaie glutineuse de Ain Khia et de leur valorisation dans l'alimentation des ruminants.

À cet effet, notre hypothèse principale de recherche est que : « *L'aulnaie glutineuse de Ain Khia constitue un écosystème capable de fournir des ressources fourragères de qualité à faible coût, permettant de réduire la dépendance aux fourrages conventionnels tout en*

contribuant à la préservation de la biodiversité et à l'atténuation des effets du changement climatique ».

Alors, la principale question de notre thématique de recherche est : Quelle est la contribution des espèces ligneuses de l'aulnaie glutineuse de Ain Khiair en matière de couverture des besoins alimentaires des ruminants de race locale en extensif ? et cela tout en préservant l'équilibre écologique de cet écosystème vulnérable.

Pour étayer davantage notre principale question de recherche, nous avons soulevé de multiples questionnements à savoir :

- a) Quelles sont les espèces consommées par les ruminants de race locale en extensif ?
- a) Quelle est la valeur nutritive de ces fourrages ligneux ?
- b) La valeur nutritive des espèces ligneuses varie-t-elle selon la catégorie botanique (arbres, arbustes, lianes) ? y a-t-il des variations intra-catégorie ?
- c) La saison a-t-elle un impact significatif sur la qualité nutritionnelle de ces ressources fourragères naturelles ?
- d) Quel est l'impact des métabolites secondaires notamment les tanins condensés sur la digestibilité, la fermentation ruminale et la production de méthane entérique des espèces ligneuses ?
- e) L'élevage extensif des animaux de rente dans ce système sylvo-pastoral est-il avantageux ou préjudiciable pour cet écosystème ?

La présente thèse vise à combler ces lacunes en évaluant la valeur nutritionnelle et le potentiel anti-méthanogène de différentes espèces ligneuses (arbres, arbustes et lianes) consommées par les ruminants sous la canopée de l'aulnaie d'Ain Khiair.

Afin de répondre à ces questions, nous avons planifié notre démarche scientifique comme suite : (I) inventorier les espèces ligneuses consommées par les ruminants, leur abondance et leur palatabilité (II) caractériser la composition chimique et les métabolites secondaires de ces espèces selon les saisons ; (III) déterminer leur digestibilité et leurs paramètres de fermentation *in vitro* ; (IV) évaluer leur potentiel anti-méthanogène et l'effet des tanins sur la fermentation ruminale ; et (V) identifier les espèces les plus prometteuses à la fois pour l'alimentation des ruminants et la réduction des émissions de méthane un gaz à effet de serre.

INTRODUCTION

Le manuscrit se structure en trois (03) parties : (I) une première concerne une revue de littérature en deux chapitres qui traitent le sylvopastoralisme comme système agroforestier et l'utilisation des ligneux fourragers en Algérie et l'état des ressources fourragères, (II) une seconde partie consacrée la méthodologie d'échantillonnage, l'analyse des ligneux et les traitements statistiques adoptés, (III) et une dernière regroupant la présentation des résultats, leur discussion et la conclusion suivie des perspectives.

Partie I

Revue de littérature

Chapitre I : Le sylvopastoralisme : un système agroforestier au service de l'élevage et de l'environnement

I.1. L'Agroforesterie

Le terme agroforesterie a été inventé en 1977 dans le cadre des premiers efforts internationaux visant à lancer des recherches sur les systèmes de production intégrés impliquant des cultures et /ou et des arbres (Nair *et al.*, 2021).

I.1.1. Définitions

Au cours du progrès de l'agroforesterie, une panoplie de définitions ont été élaborées et proposées lors de nombreuses discussions et débats qui ont eu lieu par plusieurs chercheurs et institutions dans diverses régions du monde (tableau 1).

Tableau 1: Différentes définitions de l'agroforesterie

Région/Pays	Définition	Source
Tropicale	Un système de gestion des ressources naturelles dynamique et écologique qui, grâce à l'intégration des arbres dans les fermes et dans le paysage agricole, diversifie et soutient la production des petits exploitants pour des avantages sociaux, économiques et environnementaux accrus.	Garrity (2004)
Amérique du Nord (Etats Unies et Canada)	Gestion intensive de l'utilisation des terres qui optimise les avantages (physiques, biologiques, écologiques, sociaux) des interactions biophysiques créées lorsque les arbres et/ou arbustes sont délibérément combinés avec des cultures et/ou du bétail.	Garrett (2009)
Europe	La pratique consistant à intégrer délibérément la végétation ligneuse (arbres ou arbustes) aux systèmes de culture et/ou d'élevage pour bénéficier des interactions écologiques et économiques qui en résultent.	Burgess <i>et al.</i> , (2015)
Mondiale	La pratique qui contribue à diversifier et à soutenir la production d'un large éventail de produits agricoles pour des avantages économiques, environnementaux et sociaux	World Agroforestry Centre (2008)

accrus en intégrant des arbres dans les fermes et dans le paysage agricole.

France	La culture du sol avec une association simultanée ou séquentielle d'arbres et de cultures ou d'animaux pour obtenir des produits ou services utiles à l'homme.	Torquebiau (2000)
---------------	--	-------------------

Il ressort clairement des références ci-dessus que l'agroforesterie est relativement une récente nomenclature pour un ensemble de pratiques anciennes. La nomenclature ainsi que le concept ont été adoptés dans le langage international de l'aménagement du territoire en assez peu de temps. Au début (dans les années 1970 et au début des années 1980), il existait sans aucun doute beaucoup d'ambiguïté et de confusion à propos du concept d'agroforesterie. La situation a été passée en revue dans un éditorial intitulé à juste titre : Qu'est-ce que l'Agroforesterie ? dans le numéro inaugural d'*Agroforestry Systems* (Vol 1, pp. 7-12, 1982), qui contenait une sélection de « définitions » de l'agroforesterie, proposées par divers auteurs. En résumant ces définitions, Bjorn Lundgren (1982) de l'ICRAF a souligné deux caractéristiques communes à toutes les formes d'agroforesterie et les distinguant des autres formes d'utilisation des terres, à savoir :

- La culture délibérée de plantes ligneuses vivaces sur la même unité de terrain que des cultures agricoles et/ou des animaux, soit sous une forme de mélange spatial ou de séquence.
- Il doit y avoir une interaction significative (positive et/ou négative) entre les composantes ligneuses et non ligneuses du système, soit écologique et/ou économique.

I.1.2. Concepts et attributs

Aujourd'hui, l'agroforesterie représente une approche moderne et scientifique permettant d'exploiter les attributs de durabilité et les avantages de production des pratiques éprouvées d'intégration des arbres dans les systèmes agricoles pour une variété d'objectifs. Son rôle démontré dans le maintien des rendements agricoles, la diversification de la production agricole, la réalisation de services écosystémiques et la garantie de l'intégrité environnementale dans l'utilisation des terres ; a fait l'objet d'une attention croissante dans les programmes et paradigmes de développement du monde entier.

Le concept de base commun à toutes les diverses pratiques agroforestières est la culture d'arbres avec des cultures et/ou des animaux dans des combinaisons interactives pour de multiples produits ou bénéfices provenant de la même unité de gestion (Nair *et al.*, 2021). En

plus de ce qui précède, trois attributs fondamentaux sont communs à toutes les pratiques agroforestières :

I.1.2.1. La productivité

Les systèmes agroforestiers, étant des mélanges de différentes formes de vie, pourraient maintenir ou augmenter la production (des produits préférés) ainsi que la productivité (de la terre). De telles améliorations de la productivité peuvent se produire de différentes manières, notamment par une production accrue de produits forestiers, une amélioration des rendements des cultures associées, une réduction des besoins en intrants, une efficacité accrue du travail et une résilience accrue au changement climatique et à d'autres aléas environnementaux (Montoya-Molina *et al.*, 2016).

I.1.2.2. La durabilité

En conservant le potentiel de production des ressources de base, principalement grâce aux effets bénéfiques des plantes ligneuses pérennes sur les sols, l'agroforesterie peut atteindre et maintenir indéfiniment les objectifs de conservation et de fertilité (Cubillos *et al.*, 2016).

I.1.2.3. L'adoptabilité ou l'acceptabilité

Le fait que l'agroforesterie soit un mot relativement nouveau désignant un ensemble ancien de pratiques signifie que, dans certains cas, l'agroforesterie a déjà été acceptée par la communauté agricole. Cependant, cela implique que les technologies agroforestières améliorées ou nouvelles introduites dans d'autres régions devraient également être conformes aux pratiques agricoles locales.

Ces attributs sont si caractéristiques de tous les systèmes agroforestiers qu'ils constituent la base de leur évaluation (Nair, 1993).

I.2. Les systèmes agroforestiers

Selon Rigueiro-Rodríguez *et al.*, (2008) ; Nair *et al.*, (2021) et Garrett *et al.*, (2022) il n'existe pas de système universellement pour la classification des systèmes agroforestiers. Plusieurs modèles et schémas ont été suggérés, chacun d'entre eux étant généralement destiné à des situations spécifiques ; par conséquent, chacun a également des limites pour une applicabilité universelle.

D'après Rao *et al.*, (2007) et Nair *et al.*, (2010) les systèmes agroforestiers sont classés en trois grandes catégories selon leurs composantes (arbres, cultures et élevages) à savoir

l'agrosylviculture, le sylvopastoralisme et l'agro-sylvopastoralisme (tableau 2). Tous les autres pratiques sont inclus en dessous.

Tableau 2 : Les systèmes agroforestiers (Rao *et al.*, 2007 et Nair *et al.*, 2010)

Système agroforestier	Description
Agrosylviculture	Le système agro-sylvicole intègre des cultures vivrières annuelles avec des arbres simultanément ou séquentiellement et comprend principalement des jachères améliorées, des cultures en couloirs, des plantations, des brise-vent, des parcelles boisées, des jardins familiaux, etc. pratiqués dans diverses situations écologiques et socio-économiques. Les systèmes sont conçus pour la production simultanée de produits alimentaires et de produits en bois.
Agro sylvopastoralisme	C'est un système plus complexe visant la production simultanée de nourriture, de fourrage, de bois et d'animaux, qui comprend des jardins familiaux avec des animaux, des haies ligneuses polyvalentes, l'apiculture forestière, l'aqua foresterie, etc.
Sylvopastoralisme	Le système sylvopastoral intègre des arbres fourragers, des graminées et des légumineuses pour la production simultanée de bois et de fourrage pour l'élevage des animaux. Il comprend des parcours avec des arbres dispersés, des banques de protéines/fourrages, des zones tampons riveraines, etc.

I.3. Le Sylvopastoralisme

I.3.1. Définitions et concepts

Le sylvopastoralisme, un système multifonctionnel d'utilisation des terres qui associe les animaux aux arbustes ou aux arbres et aux pâturages, est l'un des systèmes agroforestiers les plus anciens (Etienne, 1996). En effet, les animaux sont amenés à paître les herbacées qui poussent sous ou à côté des ressources ligneuses mais ne sont pas nourris avec celles-ci, tandis que dans d'autres, elles sont considérées comme un aliment. En supposant que deux types de fourrage peuvent être produits à partir d'arbustes et d'arbres, le feuillage (c'est-à-dire les feuilles

et les brindilles) et les fruits (Liagre, 2006). Habituellement, le feuillage constitue la principale ressource fourragère à partir de laquelle les animaux sont nourris, mais parfois, les fruits peuvent également être utilisés dans des cas plus spécifiques. Par exemple, les châtaignes (*Castanea sativa* (Miller, 1768)), les gousses de *Gleditsia triacanthos* (Linnaeus, 1753) et les glands (*Quercus spp.*) peuvent être donnés comme nourriture aux ruminants et parfois aux animaux monogastriques (Liagre, 2006).

I.3.2. Les systèmes sylvopastoraux

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes en fonction des objectifs et des procédures de gestion, les systèmes sylvopastoraux sont généralement réalisés de deux manières, soit en plantant des arbres sur un pâturage établi, soit en introduisant l'élevage et/ou la production fourragère dans une zone forestière (Peeters *et al.*, 2014). Conformément à Etienne (1996) et Sharrow *et al.* (2009) à l'échelle de l'exploitation agricole, trois principales structures sylvopastorales peuvent être considérées en termes de composition végétale :

- Arbres de pâturage : des plantes ligneuses vivaces sont plantées très espacées sur une couverture déjà établie afin de bénéficier de la diversification des produits et/ou des associations de plantes ligneuses-herbacées ;
- Forêt pâturée : une forêt ou une forêt existante est éclaircie et semée pour profiter de l'interaction et/ou de la diversification des composants ;
- Foresterie dans une ferme d'élevage ou dans des parcours forestiers : des arbres et arbustes sont plantés à haute densité pour diversifier la production à l'échelle de l'ensemble de l'exploitation.

D'autres distinctions peuvent inclure des différences dues aux espèces et races animales, aux espèces et cultivars d'arbres et d'arbustes, aux plantes de pâturage et autres éléments de la végétation, au sol, au climat, aux modes d'utilisation des terres et aux modalités de plantation (Papanastasis *et al.*, 2008). En ce qui concerne les ruminants, soit les chèvres (Papachristou & Papanastasis, 1994 ; Hove *et al.*, 2001 ; Bestman *et al.*, 2014), les moutons (Pitta *et al.*, 2005 ; Rangel & Gardiner, 2009) et les bovins (Moore *et al.*, 2003 ; Vandermeulen *et al.*, 2018a) sont signalés comme étant gérés avec du fourrage pour arbustes et arbres.

I.3.3. Distribution géographique

Les systèmes sylvopastoraux sont présents dans le monde entier, soit intentionnellement mis en œuvre par les agriculteurs dans le cadre de différentes dispositions, soit à la suite d'une

adaptation et d'une gestion des écosystèmes naturels pour fournir un abri et des services comme, par exemple, dans les écosystèmes de Dehesa et Montado dans la péninsule ibérique, El Chaco dans l'Amérique du sud et plusieurs régions d'Afrique et d'Asie (Le Houerou, 1987, Ferraz-de-Oliveira, 2016, Kunst *et al.*, 2016, Soni *et al.*, 2016). En Europe et en Amérique du Nord, ils s'intéressent de plus en plus à l'introduction de composants d'arbres et d'arbustes, soit dans des systèmes intégrés pour produire du bois, des fruits ou des noix dans des systèmes de culture en couloirs, comme brise-vent ou pour fournir des nutriments supplémentaires au bétail par broutage direct ou après la taille ou taillis (Orefice *et al.*, 2017, Vandermeulen *et al.*, 2018a). En Australie, les agriculteurs ont développé un système dans lequel *Leucaena leucocephala* (de Wit, 1953) est cultivé à haute densité en association avec des graminées (Shelton & Dalzell, 2007).

Les systèmes sylvopastoraux de la région méditerranéenne d'Afrique (Maroc, Algérie, Tunisie, Lybie et l'Egypte) diffèrent par leur composition biologique, leur structure et leur physionomie de ceux des systèmes intertropicaux. Cependant, certaines similitudes peuvent être trouvées avec les systèmes sylvopastoraux des hautes terres d'Afrique de l'Est, avec un certain nombre de genres communs tels que *Pistacia*, *Olea*, *Rhus*, *Osyris*, *Jasminum*, *Colutea*, *Buxus*, *Ceratonia*, *Asparagus*, *Juniperus*, *Argyrolobium*, et une physionomie et une structure qui rappellent fortement la garrigue et le maquis méditerranéens à arbustes sclérophylles et les forêts à arbres à feuilles aciculaires (*Juniperus*, *Podocarpus*) (Le Houérou, 1984). Les principaux types de systèmes sylvopastoraux des pays du Maghreb sont présentés dans le tableau 3. Il existe au total environ 8,8 millions d'hectares de systèmes sylvopastoraux en Afrique du Nord (Le Houerou, 1987).

Tableau 3 : Les principaux types de systèmes sylvopastoraux des pays du Nord d'Afrique (Le Houerou, 1987)

Système	Végétation	Climat
1	Chênaies à <i>Quercus canariensis</i>	Humide et pré humide
2	Chênaies à <i>Quercus suber</i>	Humide et subhumide
3	Chênaies à <i>Quercus ilex</i> et <i>Q. coccifera</i>	Subhumide et semi-aride
4	Forêts à <i>Cedrus atlantica</i>	Humide et subhumide froid
5	Forêts à <i>Pinus halepensis</i>	Subhumide à semi-aride

6	Forêts et matorrals à <i>Tetraclinis</i>	Semi-aride et aride
7	Matorrals oléo-lentisques	Semi-aride à humide
8	Forêts à <i>Juniperus phenicea</i>	Semi-aride et aride
9	Parc à <i>Argania sideroxylon</i> au Maroc	Aride et désertique

Par ailleurs, d'autres systèmes à faibles étendues comprennent les formations à :

- *Pinus pinaster* subsp. *mesogeensis* (Maire) Gaussen, zones de fortes précipitations, sols acides, en Tunisie (2 000 ha), Algérie (1 200 ha) et au Maroc (15 000 ha).
- *Abies moroccana* (Trabut, 1934), en haute altitude : 5 500 ha au nord du Maroc ; à *Abies numidica* (de Lannoy ex Carrière, 1867), en haute altitude : 1 000 ha au nord de l'Algérie.
- *Juniperus thurifera* (L., 1753), à des altitudes supérieures à 2 500 m : 31 000 ha au Maroc et 1 000 ha en Algérie.
- *Cupressus atlantica* (Gaussen, 1926) : 9 500 ha au Maroc ; *Cupressus sempervirens* (L., 1753) : 100 ha en Algérie et 100 ha en Tunisie.
- *Quercus toza* (Poir., 1789) (chêne feuillu) : 14 000 ha au nord du Maroc.
- *Pinus nigra* (J.F. Arnold, 1785) : 100 ha dans le nord du Maroc.
- *Cupressus dupreziana* (A. Camus, 1926), quelques hectares dans un lit d'oued profond dans le Tassili n'Ajjer, Sahara central algérien.

Ces systèmes sylvopastoraux contribuent de manière substantielle à la nutrition de quelque 10 millions d'équivalents têtes de mouton dans la région. Il est estimé que les systèmes sylvopastoraux fournissent environ 10% de la consommation alimentaire totale du cheptel régional. La productivité annuelle de ces systèmes sylvopastoraux dans la région est de l'ordre de 360 UF/ha/an. (Le Houérou, 1975, 1980). La productivité varie considérablement d'un système à l'autre, avec des valeurs allant de 100 à 900 UF/ha/an. De même, la période d'utilisation varie considérablement d'un système à l'autre ; les systèmes d'altitude (*Juniperus thurifera*, *Abies* sp., *Cedrus atlantica* ((Endl.) Manetti ex Carrière, 1855)) sont principalement utilisés comme pâturages d'été dans le cadre de systèmes d'élevage transhumants. Les systèmes de plaine sont utilisés différemment selon les espèces d'élevage : les bovins et les ovins les utilisent lorsque les chaumes et les jachères ne sont pas disponibles de la fin de l'automne au début de l'été, tandis que les chèvres les utilisent toute l'année.

La forêt et les espaces boisés, et donc les systèmes sylvopastoraux, sont en déclin en Afrique du Nord. Ce déclin a deux aspects : la réduction de la superficie totale et une baisse continue de la productivité par unité de surface.

La réduction des superficies boisées (forêts, zones boisées et arbustives) est estimée à l'ordre de 1% par an (Le Houérou, 1981 ; Bourbouze, 1981). Il y a deux raisons à cela :

- La pression anthropique croissante entraînant la régression des zones forestières au profit des agglomérations urbaines en plus de surpâturage et les coupes illicites.
- La législation et les politiques forestières obsolètes. Les terres forestières et les pâturages appartiennent à l'état et les communautés locales n'ont pas leur mot à dire dans leur gestion.

Le déclin de la productivité est le résultat d'une surexploitation : surpâturage, coupe excessive de bois. Il en résulte le piétinement, le ruissellement, l'érosion, la perte de fertilité des sols et la perte de productivité de l'écosystème dans son ensemble. Le niveau actuel de productivité ne représente souvent qu'un tiers de celui des écosystèmes raisonnablement bien gérés et peut descendre jusqu'à un dixième dans les cas extrêmes : coefficient d'efficacité pluviale (CEP) de 0,5 à 1,0 kg de MS/ha/an/mm, au lieu des 4-6 habituels, sont fréquents (Le Houérou, 1984).

I.3.4. Les avantages des systèmes sylvopastoraux

Les systèmes sylvopastoraux permettent des productions animales basées sur des processus naturels et sont reconnus comme une approche intégrée de l'utilisation durable des terres. Ils favorisent des interactions écologiques bénéfiques qui se manifestent par une utilisation plus efficace des ressources et une meilleure fourniture de services environnementaux. En utilisant des races animales adaptées, les systèmes sylvopastoraux ont le potentiel d'atteindre des niveaux élevés de production à partir de sources alimentaires locales de meilleure qualité dans des environnements basés sur les pâturages. Généralement, des plantes fixatrices d'azote sont utilisées, de sorte qu'un engrais artificiel n'est pas nécessaire et des fourrages de meilleure qualité réduisent le besoin de supplémentation provenant de sources externes (Chara' *et al.*, 2019). Il a été rapporté que les systèmes sylvopastoraux jouent un rôle dans :

- La réduction de la déforestation et la dégradation des terres en améliorant la qualité du sol grâce à une plus grande absorption des nutriments provenant des couches plus profondes du sol et à une meilleure disponibilité des nutriments provenant de la litière

de feuilles et un apport accru d'azote par les arbres fixateurs de N₂ (Nair *et al.*, 2007, Vallejo *et al.*, 2010, Cubillos *et al.*, 2016) ;

- L'amélioration de la capacité de rétention d'eau et d'infiltration du sol qui contribue à la régulation du cycle hydrologique en réduisant l'intensité du ruissellement (Jose, 2009) ;
- L'amélioration du bien-être animal grâce à :
 - Une plus grande disponibilité de nutriments que dans les systèmes de pâturage conventionnel ;
 - Une réduction du stress thermique dû à l'apport d'ombre, les températures de la peau des bovins dans un système sylvopastoral étaient inférieures de 4 °C à celles d'un système de pâturage conventionnel (Broom *et al.*, 2013) ;
 - Une possibilité de se cacher qui réduit la peur et l'anxiété (Mancera & Galindo 2011) ;
 - Une réduction des infestations ectoparasitaires (Broom *et al.*, 2013) ;
- La réduction des risques d'incendie dans les systèmes méditerranéens en broutant la végétation basse par le bétail principalement les chèvres (Papanastasis *et al.*, 2008, 2009), et le contrôle des mauvaises herbes (Sharro *et al.*, 2009).
- La production élevée de fourrages de meilleure qualité, ce qui réduit le besoin de supplémentation provenant de sources externes (Mojnardino *et al.*, 2010) ;
- L'augmentation (jusqu'à 4 fois) de la production bovine par hectare (Thornton & Herrero, 2010) ;
- La séquestration plus élevée de carbone dans les compartiments aériens et souterrains du système (Nair *et al.*, 2010 ; Montagnini *et al.*, 2013)
- La résilience accrue des sols à la dégradation, à la perte de nutriments et au changement climatique (Ibrahim *et al.*, 2010) ;
- L'amélioration de la biodiversité de l'écosystème (Nair *et al.*, 2010, Giraldo *et al.*, 2011, Montoya-Molina *et al.*, 2016).

I.4. Les arbres et les arbustes : une ressource fourragère de qualité pour les ruminants

I.4.1. Les ligneux fourragers comme aliment de bétail

Les ligneux fourragers constituent une composante alimentaire importante pour les ruminants dans les systèmes sylvopastoraux, en particulier pendant la saison sèche, lorsque le pâturage disponible n'est pas suffisant en qualité ou en quantité pour répondre aux besoins d'entretien des animaux (Leng, 1997). Les ligneux fourragers représentent une énorme source potentielle de protéines pour les ruminants (Kouch *et al.*, 2003). Plusieurs espèces pourraient

fournir un fourrage palatable et nutritif pendant les périodes de sécheresse et de pénurie en coupant leurs branches (Reddy & Elanchezhian, 2008). Le feuillage de certains arbres est presque aussi nutritif que celui des légumineuses fourragères. Cependant, la présence de facteurs antinutritionnels, notamment les tanins, limite leur utilisation en alimentation animale (Makkar *et al.*, 2007).

I.4.2. Les modes d'utilisation des ligneux par le bétail

Les fourrages sont récoltés dans les milieux naturels à travers : (i) la coupe sélective des parties feuillues, des fleurs et des fruits des arbustes et des arbres. (ii) Taille des arbustes et des arbres adaptés au bétail. (iii) Étêtage des cimes des arbres (Osemeobo, 2006). Dans une enquête menée par Hassen *et al.* (2010), ils ont observé que les parties consommées par le bétail étaient les feuilles, les brindilles, les fleurs, les gousses et les fruits. Ainsi, les feuilles étaient les parties les plus consommées. Néanmoins, les gousses et les glands constituaient une ressource alimentaire importante pendant la saison sèche. Les feuilles séchées se sont révélées plus palatables pour les bovins et les chèvres que les feuilles humides (Aregawi *et al.*, 2008). Bien que les herbacées des pâturages soient le principal moyen d'approvisionnement en aliments pour le bétail, les arbres fourragers jouent un rôle important dans son alimentation (Klein *et al.*, 2014).

Également, dans une étude menée par Sultan *et al.* (2008), ils ont découvert que les feuilles des arbres fourragers constituent une source alternative d'alimentation du bétail en période de pénurie, en particulier pendant la saison sèche prolongée. Les feuilles des arbres fourragers sont récoltées plusieurs fois au cours de l'été et données au bétail et également stockées comme foin. Ils ont soutenu que les herbes des pâturages constituent bien que le principal moyen d'obtention de nourriture, mais que les arbres fourragers jouent un rôle important dans l'alimentation du bétail.

I.4.3. Composition nutritive des ligneux fourragers

Le fourrage ligneux peut être une ressource alimentaire intéressante comme complément au fourrage herbacé, notamment lors de périodes plus sèches (Novak *et al.*, 2020 ; Mahieu *et al.*, 2021). Les organes foliaires et les jeunes pousses consommables sont souvent plus riches en protéines brutes et plus pauvres en fibres (ADF et NDF) que l'herbe (Papachristou *et al.*, 2020). Ces jeunes rameaux non lignifiés et ces feuilles sont préférentiellement pâturés par les ruminants (Jarrige *et al.*, 1995). Cependant, la teneur en fibre et le taux en lignine augmentent avec la maturité de l'arbre. Ainsi, les branches plus âgées ont

souvent une valeur nutritive moindre et ne sont pas consommées (Holechek, 1984). La teneur en énergie, en azote et en minéraux est assez variable entre espèces ligneuses (Novak *et al.*, 2020) ; elle varie également en fonction des saisons (Vandermeulen *et al.*, 2018a ; Mesbahi *et al.*, 2022). Enfin, la présence de composés phénoliques et de tanins modifie la digestibilité de ces fourrages (Papanastasis *et al.*, 2008 ; Vandermeulen *et al.*, 2018b ; Jose et Dollinger, 2019), les seconds étant souvent présents chez les espèces à feuilles persistantes (Holecheck, 1984).

I.4.4. Facteurs antinutritionnels dans les ligneux fourragers

Les facteurs antinutritionnels peuvent être considérés comme une classe de composés qui ne sont généralement pas mortels. Ils diminuent la productivité animale mais peuvent également provoquer une toxicité en période de disette ou de confinement lorsque les aliments riches en ces substances sont consommés par les animaux en grande quantité (Makkar *et al.*, 2007).

Les métabolites secondaires sont un groupe diversifié de molécules impliquées dans l'adaptation des plantes à leur environnement, mais ne font pas partie de leurs principales voies biochimiques de croissance et de reproduction cellulaires (Ghasemzadeh *et al.*, 2011).

Les composés phénoliques sont les métabolites secondaires des plantes les plus abondants et les plus répandus (Reed, 1995). Chimiquement, ils ont des groupes hydroxyles libres sur le groupe aromatique et peuvent être classés comme ceux qui peuvent précipiter les protéines (tanins) et ceux qui ne le font pas. Les effets biologiques de ces produits chimiques sont complexes et diversifiés. Ces facteurs ne sont pas toujours nocifs, surtout lorsqu'ils sont consommés en dessous de la dose critique. Cependant, l'équilibre des effets nocifs et bénéfiques des anti-nutriments est déterminé par leur concentration, leur structure chimique, leur interaction avec d'autres composants alimentaires, la durée d'exposition et d'autres facteurs (Gemede & Ratta, 2014). Les métabolites secondaires présents dans les fourrages ligneux comprennent principalement les tanins hydrolysables (TH) et les tanins condensés (TC) (Reed, 1995). Kar & Banerjee (2000) ont rapporté que le traitement des protéines avec des tanins aide à produire des complexes protéines-tanins, car les tanins forment des liaisons hydrogène avec les protéines, protégeant ainsi les protéines de la dégradation ruminale. Au fur et à mesure que la protéine traitée descend dans le tube digestif, l'acidité des fluides est modifiée et le complexe tanin-protéine se dissocie, rendant les protéines accessibles à la dégradation enzymatique dans le tractus inférieur et augmentant la quantité de protéines atteignant l'animal hôte (Getachew, 2005).

La majorité des effets toxiques de ces complexes dus à des facteurs antinutritionnels peuvent être éliminés à l'aide de méthodes de traitement telles que la fermentation, le trempage, la germination, la manipulation génétique, l'autoclavage et l'ébullition (Jeyakumar & Lawrence, 2022) ainsi que la distribution de certains molécules synthétique tel que le polyéthylène glycol (PEG) (Bouazza, 2014).

I.5. Le sylvopastoralisme : un système résilient au changement climatique

Le sylvopastoralisme a récemment gagné en importance en tant que système de production animale durable et résilient au climat (Mosquera-Losada *et al.*, 2011). Le sylvopastoralisme, par rapport aux systèmes de pâturage conventionnels, a entraîné une meilleure productivité du bétail (Schoeneberger, 2009) et une amélioration de la fertilité des sols (Moreno & Obrador, 2007). Plus important encore, le sylvopastoralisme, en tant que système de production animale basé sur les arbres, offre une synergie efficace entre l'adaptation et l'atténuation du changement climatique (Dube *et al.*, 2011 ; Stavi & Lal, 2013), en contribuant directement à la séquestration des gaz à effet de serre (GES), tout en protégeant les moyens de subsistance contre la variabilité et les sécheresses récurrentes, car les arbres sont moins affectés par la variabilité du climat que les pâturages (Nair, 2012).

Le sylvopastoralisme contribue à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique avec les manières suivantes :

- Le sylvopastoralisme s'adapte mieux à la sécheresse que les pâturages, car la production de feuillage des arbres et des arbustes est moins affectée par les variations de précipitations, de température et d'autres variables climatiques, permettant ainsi aux agriculteurs de maintenir la production animale même dans des conditions météorologiques extrêmes (Papanastasis *et al.*, 2008) ;
- Les espèces ligneuses fourragères dans un système sylvopastoral augmentent la fertilité des pâturages en fournissant des conditions appropriées pour les herbacées en améliorant les microsites pour la croissance de l'herbe (Moreno & Obrador, 2007) ;
- La productivité du bétail est plus élevée dans un système sylvopastoral que dans les systèmes traditionnels basés sur les pâturages, car les arbres fourragers sont de meilleure qualité nutritionnelle que la plupart des graminées herbacées (Ibrahim *et al.*, 2005), un fait qui permet également de réduire la quantité de méthane entérique et d'autres GES provenant du bétail (Williams *et al.*, 2011) ;

- La biomasse ligneuse augmente le stock de carbone de l'écosystème par rapport aux pâturages couverts d'herbes (Mekuria *et al.*, 2011), rendant ainsi le système écologiquement durable et politiquement acceptable.

I.6. Méthanogenèse entérique et stratégies d'atténuation

L'un des problèmes majeurs auxquels notre monde est confronté aujourd'hui est le changement climatique provoqué par les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (Cardoso *et al.*, 2016). Dans l'ensemble, l'élevage contribue à 14 à 15 % de ces émissions, et les ruminants sont responsables des deux tiers de cette production (Gerber *et al.*, 2013). Ces GES pourraient être le méthane (CH₄), le dioxyde de carbone (CO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂), qui contribuent largement au réchauffement climatique (Ugbogu *et al.*, 2019).

I.6.1. Méthane et ruminants

La production mondiale de CH₄ par les ruminants est annuellement estimée à 76-92 téragramme (Tg) (million de tonne) (Lassey, 2008). La production de CH₄ par les ruminants varie en fonction de la zone géographique, de la qualité et de la composition du régime alimentaire et du niveau d'ingestion (Johnson & Ward, 1996). Ce gaz généré par la fermentation du rumen, réalisée par un complexe microbien de bactéries, archées, protozoaires et champignons, appelé « microbiote ruminal » (Pelcastre *et al.*, 2020). Ces émissions de CH₄ sont extrêmement variables selon le type d'animal et son alimentation. En effet, les ruminants domestiques comme les vaches, les moutons et les chèvres produisent environ 86 millions Tg de CH₄ par année. Environ 18,9 Tg sont dues aux vaches laitières, 55,9 Tg aux bœufs de boucherie et 9,5 Tg aux moutons et chèvres (McMichael *et al.*, 2007). Johnson & Ward (1996), estiment la contribution annuelle mondiale des buffles entre 6,2 et 8,1 Tg et celle des camélidés entre 0,9 et 1,1 Tg. Chez les ruminants, 89 % du CH₄ produit au cours des fermentations digestives sont rejetés par éructation dans l'atmosphère, ce qui représente à la fois une perte sur la quantité d'énergie fixée par les animaux d'élevage (2–12%, en fonction du régime alimentaire) (Johnson & Johnson, 1995) et une contribution à l'effet de serre.

Dans la recherche de solutions pour réduire les émissions de GES et surtout le méthane ayant un effet de réchauffement climatique plus important (environ 23 fois) que le CO₂ (Ugbogu *et al.*, 2019), l'utilisation des ligneux fourragers au potentiel anti-méthanogène a été suggérée (Rivera *et al.*, 2015 ; Canul-Solis *et al.*, 2020 ; Jayanegara *et al.*, 2020 ; Ku-Vera *et al.*, 2020a, b).

I.6.2. Rappel sur la méthanogèse ruminale

Les régimes des ruminants comprennent approximativement de 75 % de glucides sous forme de cellulose, d'hémicelluloses et d'amidon. Dans le rumen, ces sucres complexes sont dégradés par les enzymes du microbiote ruminal et libèrent trois principaux acides gras volatils (AGV), l'acétate, le propionate et le butyrate. Ces AGV seront par la suite absorbés à travers la paroi du rumen et sont utilisés comme source d'énergie par l'animal. En plus des AGV, le microbiote ruminal génère des sous-produits du métabolisme comme le H₂ et le CO₂ qui sont les précurseurs du CH₄ entérique (figure 1) (Rira, 2019).

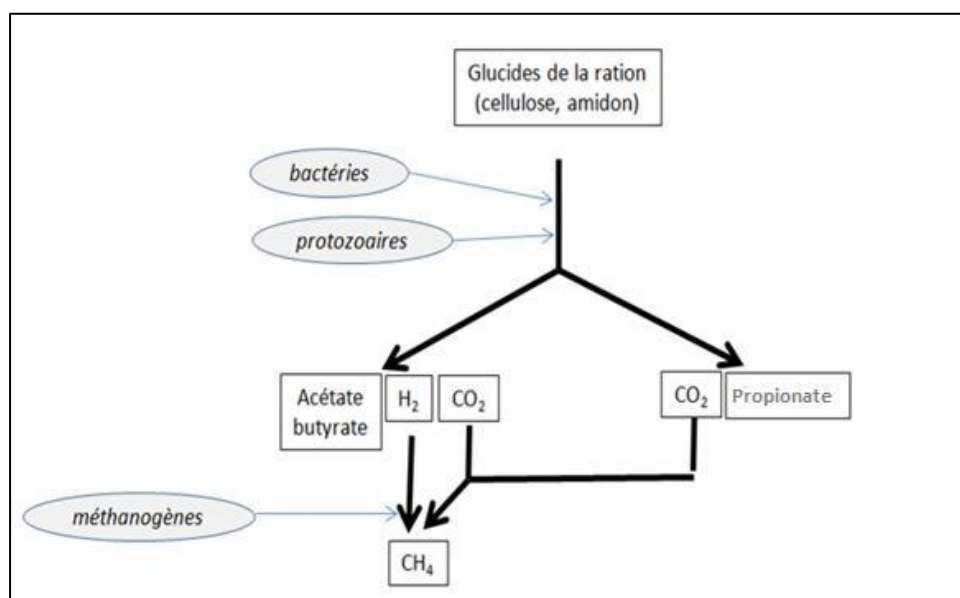


Figure 1: Schéma descriptif de la méthanogèse ruminale (Rira, 2019)

Deux groupes de ce microbiote sont les principaux producteurs de H₂, il s'agit des bactéries et des protozoaires. Un autre groupe se charge d'utiliser le H₂ pour produire le CH₄, il s'agit des archées méthanogènes. En effet, de fortes concentrations en H₂ dans le rumen impliquent le ralentissement de l'activité des microbes qui fermentent les aliments, ce qui pourrait compromettre la production d'AGV (McAllister & Newbold, 2008). Pour une fermentation optimale, un équilibre entre la production et l'utilisation de le H₂ doit être maintenu dans l'environnement ruminal. L'hydrogène est la principale source d'énergie pour les archées méthanogènes (dans un degré moindre l'acétate, le formate et les alcools). Ces bactéries utilisent le H₂ pour réduire le CO₂ en CH₄, selon la réaction suivante : $4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$. Le CH₄ et le CO₂ sont ensuite éructés pour l'essentiel, une petite partie étant absorbée par la paroi du rumen puis exhalée. D'autres voies d'utilisation du H₂ sont possibles, mais sont normalement très minoritaires. Les plus connues sont la voie de l'acétogénèse, qui produit de l'acétate à partir de CH₄ et CO₂ grâce à des bactéries acétogènes et la voie de la

réduction des nitrates qui produit des nitrites et de l'ammoniac à partir de H_2 et de NO_3 grâce à des bactéries nitroréductrices (Morgavi *et al.*, 2010).

I.6.3. Les stratégies adoptées pour l'atténuation du méthane entérique

Selon Króliczewska *et al.* (2023) la réduction des émissions entériques de CH_4 constitue un objectif important pour limiter l'augmentation de la température mondiale au cours des 30 prochaines années. Les scientifiques et les sélectionneurs travaillent à identifier diverses stratégies qui affectent la méthanogenèse dans le rumen. À mesure que de nouvelles techniques scientifiques ont été développées, la recherche sur la méthanogenèse s'est développée de façon exponentielle et notre compréhension du microbiote du rumen s'est approfondie. En outre, à partir du début des années 2000, ils ont constaté un changement d'orientation de la recherche du métabolisme énergétique vers l'impact environnemental du CH_4 des ruminants et l'élaboration de stratégies pour réduire les émissions entériques de CH_4 . Depuis, plusieurs approches et technologies se sont révélées efficaces pour réduire les émissions entériques de CH_4 . Certains, cependant, sont d'un coût prohibitif, pas seulement pour les pays en développement, et présentent des risques pour l'environnement et la santé humaine ou animale. Par conséquent, il est essentiel de comprendre comment et si les nouvelles techniques et solutions réduisent les émissions de CH_4 des ruminants (Beauchemin *et al.*, 2008 ; Hristov *et al.*, 2022).

Plusieurs approches ont été développées pour réduire les émissions de CH_4 liées à la digestion des ruminants. Certaines d'entre elles concernent la gestion agricole, les stratégies d'alimentation, l'utilisation d'additifs alimentaires et de composés chimiques pour modifier les processus biochimiques dans le rumen, la manipulation directe de la microflore du rumen, l'immunisation des animaux et les stratégies de sélection, y compris les approches génétiques (Kataria, 2015 ; Negussie *et al.*, 2017). Les additifs alimentaires les plus couramment utilisés qui modifient les processus biochimiques du rumen vers une diminution de la méthanogenèse sont les saponines, les tanins, les flavonoïdes, les probiotiques, les acides organiques, les graisses et les fibres (Patra et Saxena, 2009 ; Romero-Pérez *et al.*, 2011 ; Kumar *et al.*, 2014).

I.6.4. Les tanins : une piste prometteuse pour l'atténuation du méthane entérique

Les tanins sont un sous-ensemble de composés appartenant au groupe des composés polyphénoliques, omniprésents dans le règne végétal. Les polyphénols sont des métabolites secondaires végétaux qui vont des composés phénoliques simples jusqu'aux composés polymères de haut poids moléculaire. Les tanins sont des composés polyphénoliques hautement

polymérisés et hydroxylés (poids moléculaire ~ 500–3 000) et ils ont été historiquement étudiés comme facteurs antinutritionnels en relation avec la nutrition animale (Kumar et Singh, 1984) et pour la prévention des météorisations (Lees *et al.*, 1981 ; Min *et al.*, 2005). Les tanins constituent un groupe chimiquement diversifié qui comprend deux classes principales : tanins condensés (TC) et tanins hydrolysables (TH) (Mora *et al.*, 2022).

I.6.4.1. Les tanins condensés

Les tanins condensés, également connus sous le nom de polymères de proanthocyanidines, ont reçu le plus d'attention en ce qui concerne l'atténuation du CH₄. Des études ont montré que les pâturages contenant du TC peuvent réduire la production de CH₄ (Aboagye & Beauchemin 2019 ; Min *et al.*, 2020). Cependant, comme les TC peut former des complexes avec les protéines et les fibres, cela peut réduire la digestibilité des protéines, la fermentation ruminale et l'absorption des nutriments, diminuant ainsi la productivité du bétail. La disponibilité réduite des protéines réduira l'excrétion urinaire de N, et toute réduction de la fermentation diminuera la production de H₂ et donc de CH₄ entérique (Min *et al.*, 2020). La réduction potentielle de la productivité du bétail d'un régime riche en TC devra être équilibrée avec l'objectif de réduction du CH₄ et d'autres avantages rapportés du TC, notamment la réduction des parasites intestinaux et l'amélioration de la production laitière, de la croissance de la laine, des réponses immunitaires et de la reproduction (Waghorn, 2008 ; Min *et al.*, 2020). De plus, les TC peuvent affecter la qualité de la viande et du lait, car elles peuvent inhiber la biohydrogénation des acides gras insaturés (Vasta *et al.*, 2019).

I.6.4.2. Les tanins hydrolysables

Les tanins hydrolysables ont reçu peu d'attention en ce qui concerne leur potentiel de réduction du CH₄ entérique. Historiquement, les TH sont connus pour leur toxicité potentielle pour le bétail (McSweeney *et al.*, 1988 ; Waghorn, 2008). Cependant, à de faibles niveaux, les TH présentent un certain potentiel de réduction des émissions de CH₄ via la liaison aux protéines (Jayanegara *et al.*, 2015) ou en interagissant directement avec le microbiote du rumen sans affecter la digestion des fibres (Vasta *et al.*, 2019). Jayanegara *et al.* (2010) ont découvert que les TH ont un effet plus direct sur les protozoaires (responsables de la production de H₂) ou sur les méthanogènes (responsables de la production de CH₄), inhibant leur croissance ou leur activité, sans réduire la fermentation des fibres. De même, le TH peut également affecter la qualité de la viande et du lait, mais dans une moindre mesure que les TC (Vasta *et al.*, 2019).

Dans une récente méta-analyse et méta-régression réalisée sur l'effet des tanins sur la fermentation ruminale des vache laitière, Brutti *et al.*, (2023) concluent que l'inclusion d'un mélange de tanins dans l'alimentation des bovins améliore la fermentation ruminale, principalement en réduisant la concentration ruminale d'ammoniac. De plus, l'utilisation de tanins jusqu'à 4 % de MS réduit les émissions de méthane entérique, ce qui contribue à atténuer les impacts négatifs de l'élevage sur l'environnement. La meilleure stratégie pour obtenir ces résultats positifs consiste à utiliser une intégration entre HT et CT, en raison de la synergie entre ces deux structures phénoliques.

Cependant, par mesure de précaution, les régimes alimentaires comprenant des extraits ou des plantes contenant des tanins doivent prendre en compte des facteurs particuliers concernant la source, le type, le poids moléculaire, la concentration et la dose des tanins. De cette manière, les effets nocifs tels qu'une limitation excessive de l'azote dans le rumen et une digestibilité réduite de la matière sèche sont évités. De telles conditions peuvent se produire en raison de la grande capacité du tanin à se complexer avec les protéines et les fibres.

I.7. Le PolyEthylene Glycol (PEG) : une molécule pour inactiver l'effet antinutritionnel des tanins

Le polyéthylène glycol (PEG) est une molécule synthétique ayant l'affinité de fixer les tannins et les inactiver (Rogosic *et al.*, 2008). L'incorporation de PEG aux rations des ruminants riches en tanins permettrait donc, théoriquement, de limiter leurs effets néfastes en les neutralisant (Waghorn, 2008).

Plusieurs études *in vitro* ont confirmé que l'ajout du PEG, l'inactivation des tanins et la réduction de leurs effets sur la digestibilité ruminale mesurée par la production de gaz (Rubanza *et al.*, 2005 ; Mlambo *et al.*, 2007 ; Bouazza *et al.*, 2012 ; Boufennara *et al.*, 2013 ; Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2018). En effet, l'ajout de PEG a favorisé une restauration voire une augmentation des niveaux d'ingestion de plantes riches en tanins (Gilboa *et al.*, 2000 ; Decandia *et al.*, 2008 ; Rogosic *et al.*, 2008 ; Waghorn, 2008) et induit la restauration de la digestibilité. Cet effet s'expliquerait par une levée de l'inhibition des dégradations bactériennes par excès de tanins condensés dans le rumen (Guimarães-Beelen *et al.*, 2006).

Enfin, de meilleures performances zootechniques ont été signalées lors de l'ingestion de PEG simultanément aux tanins condensés (Gilboa *et al.*, 2000 ; Decandia *et al.*, 2008 ; Waghorn, 2008). Ainsi, une augmentation de la production de lait ou de gain de poids a été observée chez

des ruminants consommant des plantes riches en tanins condensés et recevant du PEG (Gilboa *et al.*, 2000 ; Landau *et al.*, 2002 ; Atti *et al.*, 2003 ; Waghorn, 2008)

Chapitre II : Situation des ressources fourragères en Algérie

II.1. Répartition générale des terres

La répartition générale des terres (figure 2) est présentée selon la nomenclature utilisée par la FAO pour le recensement mondial de l'agriculture.

Selon MADR (2021), la superficie totale de l'Algérie qui est de l'ordre de 238 millions d'ha se répartit ainsi :

II.1.1. Superficie agricole totale (SAT)

De l'ordre de 44,00 millions d'ha soit 18,5% de la superficie territoriale, elle comprend :

- Les pacages et parcours, terres sur lesquelles ne s'effectuent aucune façon culturale depuis au moins 5 ans, elles servent au pacage des animaux elles s'étendent sur 32,75 millions d'ha et représentent 74,5% de la SAT
- Terres improductives des exploitations agricoles (ces terres comprennent les fermes, bâtiments, cours, aires de battage, chemins, canaux, ravins, pistes etc..) s'élèvent à 2 652 454 ha, elles représentent 6,0 % de la SAT
- Superficie Agricole Utile (SAU) (terres sur lesquelles sont cultivées des spéculations depuis au moins 5 ans) s'étendent sur une surface de l'ordre de 8,56 Millions d'ha, soit 19.5 % de la SAT et elle se répartit comme suit :
 - * Cultures herbacées 4,68 millions d'ha soit 54,67 % de la SAU ;
 - * Terres au repos 2,85 millions d'ha soit 33,26 % de la SAU ;
 - * Plantations fruitières 910 322 ha soit 10,63 % de la SAU ;
 - * Vignobles 68 649 ha soit 0,80 % de la SAU ;
 - * Prairies naturelles 54 117 ha soit 0,63 % de la SAU.

II.1.2. Terres alfatières

Ce sont des terres sur lesquelles l'alfa, plante vivace pouvant servir à la fabrication du papier, pousse naturellement en d'immenses nappes sur les hauts plateaux de la frontière marocaine à la frontière tunisienne, elles s'étendent sur une superficie de l'ordre de 2,47 millions d'ha ; elle représente 1,0 % de la superficie territoriale.

II.1.3. Terres forestières

Elles sont constituées de broussailles et de maquis et occupent une superficie de l'ordre de 4,1 millions d'ha soit 1,7 % de la superficie territoriale.

II.1.4. Terres improductives

Non affectées à l'agriculture, elles concernent les terrains improductifs non susceptibles d'être cultivés ou pacagés (dunes, terrains rocheux, couverts par les agglomérations, voies, rivières etc....) ; elles sont estimées à 187,6 millions d'ha, elles représentent 78,8 % de la superficie territoriale.

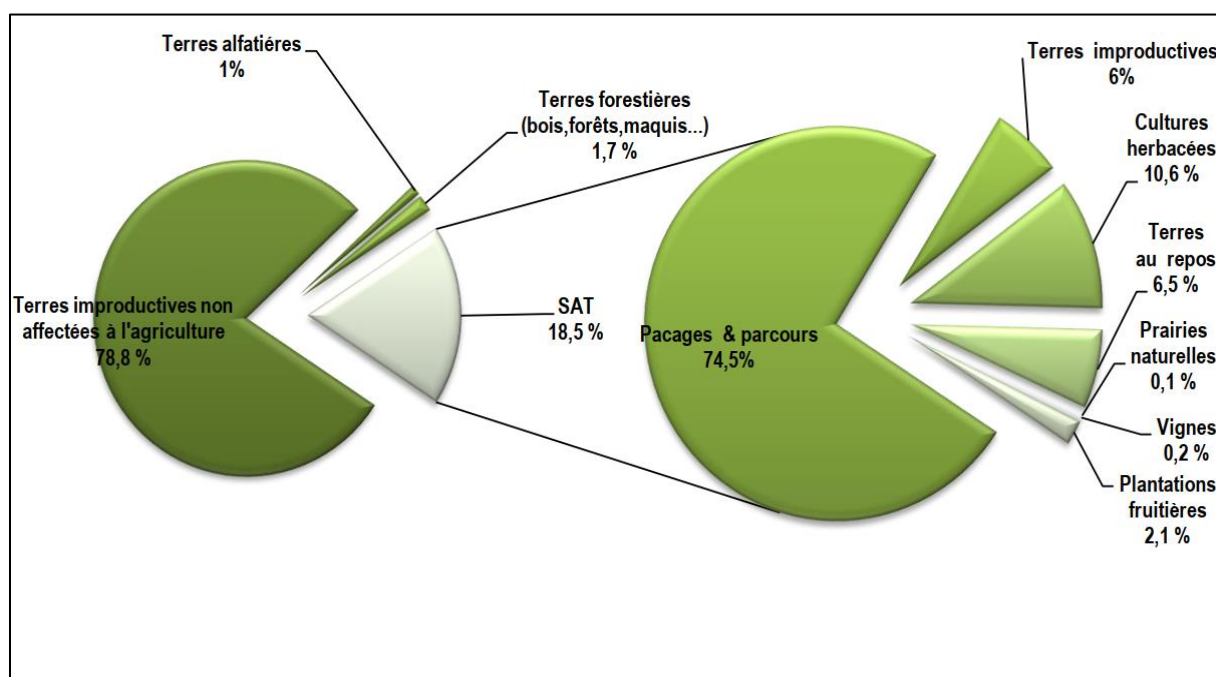


Figure 2 : Répartition générale des terres (MADR, 2021)

II.2. Les cultures fourragères : superficies et rendements

Les cultures fourragères occupent une place marginale au sein des productions végétales au regard de la faible superficie allouée à ces cultures (Abdelguerfi *et al.*, 2008). Elles contribuent faiblement à l'alimentation des herbivores comparées aux plantes fourragères spontanées.

Au cours de la période 2010-2019, la superficie moyenne des fourrages est évaluée à 997 121 hectares, dont 75% de la superficie moyenne des fourrages est occupée par les fourrages artificiels (sec et vert) et le reste est consacré aux fourrages naturels (prairies naturelles, jachères fauchées). La production moyenne des fourrages s'élève à 41,2 millions de quintaux, soit une augmentation de plus de 311% par rapport à la décennie 2000-2009 (31,2 millions de quintaux).

Les fourrages artificiels récoltés contribuent à l'alimentation des herbivores, avec une part moyenne de 83% de la production fourragère totale, ce qui représente en termes de quantité plus de 34 millions de quintaux. La production des fourrages naturels composée de prairies naturelles et jachères fauchées ne représente que 17% de la production moyenne des fourrages, soit une production moyenne de 7 millions de quintaux. De même que la production des fourrages artificiels, les fourrages naturels ont affiché une hausse de la production durant la période considérée de l'ordre de 64, 3%. En effet, elle est passée de 5,4 millions de quintaux en 2009/2010 pour atteindre 8, 9 millions de quintaux lors de la campagne 2018/2019. S'agissant du rendement moyen des fourrages, il s'est établi à 41,4 qx/ha. La campagne agricole 2017-2018 est caractérisée par le meilleur rendement, soit 55,6 qx/ha (MADR, 2020).

II.3. Le cheptel : structure et évolution

L'élevage constitue une activité économique essentielle dans la plupart des systèmes agricoles de l'Algérie. Il se caractérise principalement par la prédominance de cinq races à savoir : les bovins, les ovins, les caprins, les camelins et les équins. Toutes races confondues, l'effectif global du cheptel pour l'année 2019 s'est établi à 36 millions de têtes.

L'effectif annuel moyen du cheptel durant la période 2010-2019 est estimé à plus de 34 millions de têtes, contre 24 millions de têtes durant la décennie précédente, soit une augmentation de 41,3%. La prédominance du cheptel est pour la race ovine qui représente 78,7%, soit 26,9 millions de têtes. Les caprins viennent en seconde position avec un taux de 14,1 % suivis par les bovins avec 5,5 %. Quant aux camelins, ils ne présentent que 1,1% de l'effectif annuel moyen. Les équins sont très peu représentatifs, soit 0,6%. Durant la période 2010-2019, l'évolution de l'effectif du cheptel est marquée par une tendance à la hausse. En effet, en 2019 l'effectif global s'est établi à 36 763 671 têtes contre 29 437 805 têtes en 2010, soit une augmentation de 25% (4 763 000 têtes de plus) (MADR, 2020).

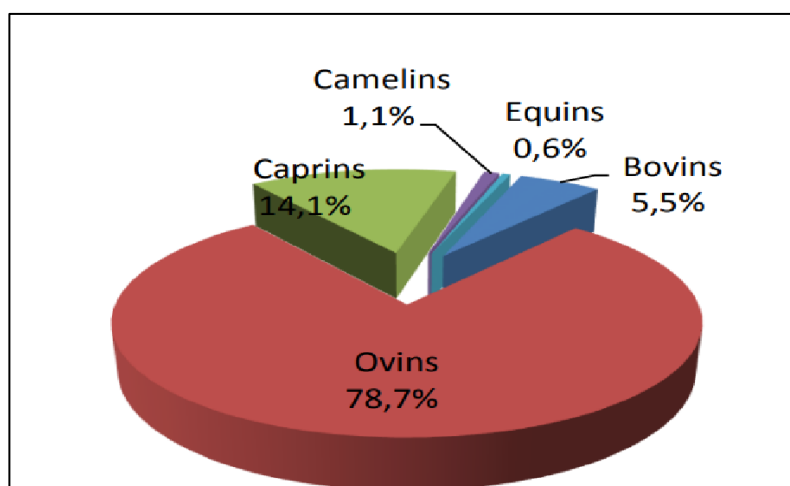


Figure 3 : Structure du cheptel (moyenne 2010- 2019) (MADR, 2020)

II.4. Bilan fourrager : un déficit chronique

De nombreux travaux ont été menés pour l'évaluation du bilan fourrager des herbivores en Algérie. Elles sont principalement celles de Laib (1988) pour la campagne 85-86 ; Houmani (1998) ; Si Ziani & Boulberhane (2001) pour la campagne 97-98 ; Adem & Ferrah (2010) ; Chachoua (2015) pour les années 2000 à 2013 et enfin Merdjane & Yekhllef (2016) pour la campagne 2008-2012. Lors de l'analyse des différentes données, il s'est avéré qu'un déficit fourrager persiste pendant des décennies. Cela est imputé selon Houmani (1999) que la production fourragère est de type extensif assurée à 82% par la jachère, les chaumes de céréales et les pacages et parcours tandis que les cultures fourragères fournissent moins de 8%.

II.4.1. Les besoins du cheptel

D'après Merdjane et Yekhllef (2016), les besoins énergétiques du cheptel national (2008-2012) s'élèvent à 13,34 Milliards d'UF dont plus de 31,86% sont exprimés par le cheptel de la zone semi-aride soit 4,250 Milliards d'UF compatible avec Chachoua (2015) qui cite 13,6 Milliards d'UF en 2013. Laib (1988) et Si Ziani & Boulberhane (2003) rapportent des valeurs inférieures soit respectivement 9,45 et 9,5 Milliards d'UF. La répartition des besoins par type animal indique qu'environ 44% des besoins relèvent de l'élevage ovin. Par ailleurs, il apparaît que les troupeaux ovins et caprins totalisent à eux seuls plus des 3/4 des besoins en UF.

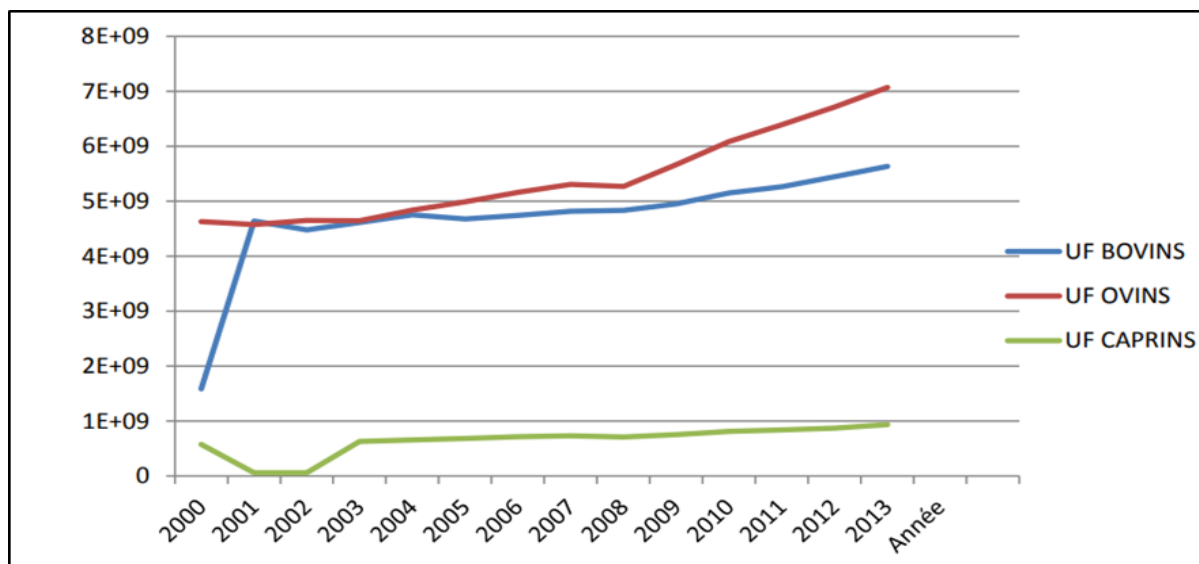


Figure 4 : Estimation des besoins du cheptel national en UF de 2000 à 2013 (MADR, 2013 in Chachoua, 2015)

II.4.2. L'évaluation de l'offre fourragère

En 2012, les terres consacrées à la production fourragères couvrent plus de 39 millions d'ha (soit 93% de la SAT) (MADR, 2020). Elles offrent plus de 6,054 Milliards d'UF (Merdjane & Yekhlef, 2016). Cette valeur est comparable avec celles rapportées par Laib (1988) et Chachoua (2015) pour respectivement les campagnes 85-86 et 2000-2013 avec dans l'ordre 5,96 et 5,56 Milliards d'UF. Elle demeure toutefois très éloignée de celles rapportées par Houmani (1999) et Adem & Ferrah (2002) avec respectivement 7,78 et 8 Milliards d'UF.

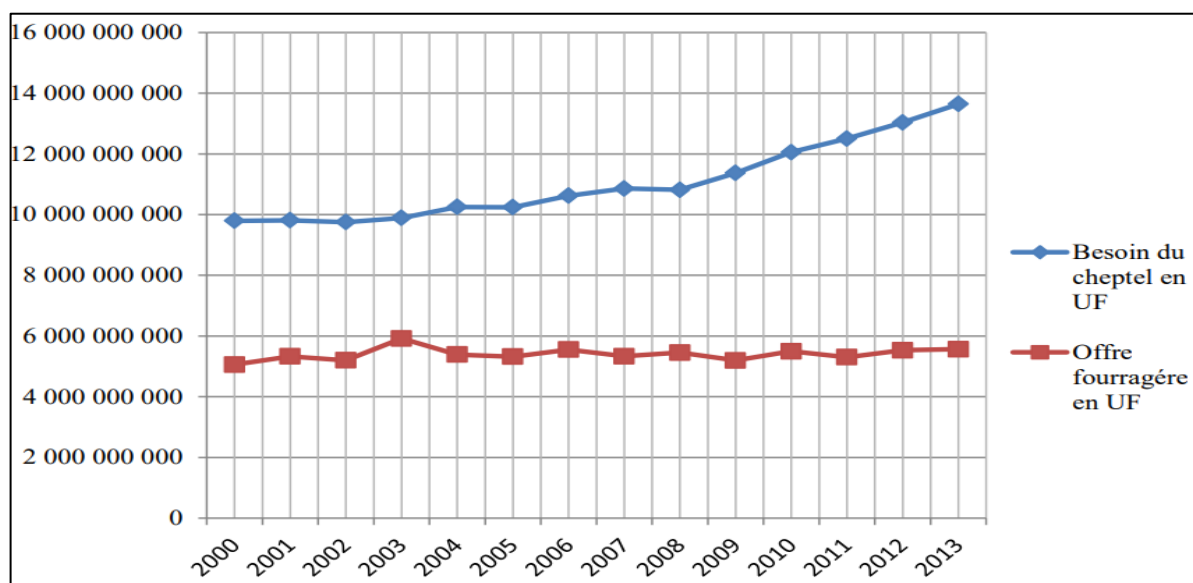


Figure 5 : Estimation des besoins du cheptel et de l'offre fourragère en UF durant la Période allant de 2000 à 2013 (MADR, 2013 in Chachoua, 2015)

II.4.3. La balance fourragère

Le bilan énergétique pour l'année 2012 se révèle négatif puisque l'offre fourragère accuse un déficit de l'ordre de 7, 289 Milliards d'UF, soit un taux de couverture moyen de 45,37% (Merdjane & Yekhllef, 2016). Ce bilan corrobore avec celui déclaré par Chachoua (2015) soit 8 Milliards d'UF et 51% de couverture. De ce fait, un hectare de production fourragère fournit un rendement assez faible, de l'ordre de 153,82 UF/ha. La valeur du déficit obtenu est nettement supérieure à celle rapportée par Bouzida (2008) pour l'année 2006 soit 3,3 Milliards d'UF.

L'analyse de Chachoua (2015) selon les diverses zones agro-écologiques montre que les déficits sont beaucoup plus prononcés dans les zones littorales, steppiques et sahariennes pour des taux respectifs de 58%, 32% et 29%. Ce déficit fourrager a des répercussions négatives sur la productivité des animaux et se traduit par un recours massif aux importations de produits animaux à l'instar des produits laitiers et carnés.

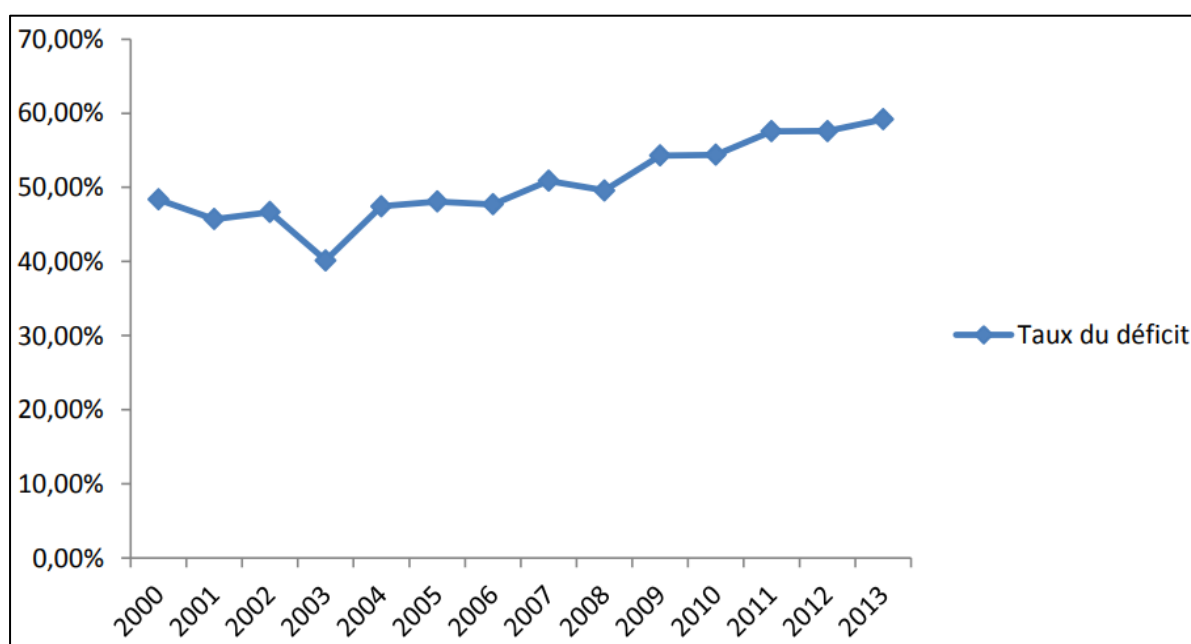


Figure 6 : Déficit national en UF durant la période allant de 2000 à 2013 (MADR, 2013 in Chachoua, 2015)

II.5. La places des arbres et arbustes fourragers dans le système d'alimentation des ruminants en Algérie

II.5.1. Les arbres et arbustes utilisés en Algérie

En Algérie, le déficit fourrager reste accentué (Bouzida, 2008 ; Chachoua, 2015) malgré les efforts dans l'augmentation de la surface irriguée à environ 600 000 ha. Cela est attribué aux

surfaces limitées des cultures fourragères et la dépendance aux parcours naturels qui subissent une surcharge animale (Merdjane *et* Yekhlef, 2016).

Pour pallier à cette situation, les éleveurs et notamment en extensif vont chercher des ressources alternatives pour combler le déficit. En effet, ils font recours aux arbres et arbustes fourragers pour répondre aux besoins de leurs cheptels (Chentli, 2015) de par leur biomasse persistante et leur valeur nutritive assez bonne notamment en protéines brutes (Cabiddu *et al.*, 2000). Cependant, la valeur nutritive des ligneux fourragers est compromise par plusieurs facteurs responsables de sa variation :

- Les particularités génétiques de l'espèce responsable de l'accumulation des nutriments (Sarr *et al.*, 2013).
- La saison qui a un effet direct sur les teneurs en MS, MO, les fibres (Kaboré-Zoungana, 1995) et surtout en MAT et en facteurs anti nutritionnels (Fadel Elseed *et al.*, 2002).
- L'environnement par la nature, la texture du sol ainsi que la température et la topographie ont sur la production de cette biomasse, ils peuvent de ce fait favoriser ou empêcher la production optimale (Sawadogo, 2006).
- Le régime d'utilisation par le bétail qui va compromettre la régénération des arbres et le rendement en biomasse (Moser-Nørgaard & Denich, 2011).

Kadi & Zirmi-Zembri en 2016 ont élaboré une revue de synthèse sur les ligneux fourragers utilisés en Algérie. Ils ont recensé 66 espèces d'arbres et d'arbustes utilisées en alimentation des ruminants appartenant à différentes familles botaniques et dans différentes régions bioclimatiques à savoir :

- Zone littorale à climat à humide ;
- Zone tellienne à climat semi-aride à subhumide
- Zone steppique à climat semi-aride ;
- Zone saharienne à climat aride.

Selon les auteurs, cette liste n'est pas exhaustive et nécessite une mise à jour périodique.

Dans ce contexte et dans l'objectif d'enrichir la liste et inventorier les espèces utilisées on va essayer de rajouter d'autres espèces disponibles dans la littérature récente.

Tableau 4 : Liste actualisée des arbres et arbustes utilisées en alimentation des ruminants en Algérie

N°	Espèce	Parties consommées	Zone bioclimatique	Source
1	<i>Acacia albida</i>	Feuilles	Semi-aride	11 ;21
2	<i>Acacia horrida</i>	Feuilles	Humide, subhumide	1 ;11 ;21
3	<i>Acacia julibrissin</i>	Feuilles	Semi-aride à subhumide	11 ;21
4	<i>Acacia nilotica</i>	Feuilles, gousses	Subhumide	11 ;21 ; 39
5	<i>Acacia raddiana</i>	Feuilles	Aride	27
6	<i>Acacia saligna</i>	Feuilles	Subhumide	11 ;21
7	<i>Anabasis articulata</i>	Feuilles	Semi-aride, aride	2 ; 3 ;10 ;19 ;27 ;30 ;32
8	<i>Antirrhinum ramosissimum</i>	Feuilles	Aride	27
9	<i>Anvillea radiata</i>	Feuilles, fleurs	Aride	27 ;17
10	<i>Argania spinosa</i>	Pulpe, feuilles	Aride	12
11	<i>Artemisia campestris</i>	Feuilles, fruits	Semi-aride	16 ;23 ;18 ;37
12	<i>Artemisia herba alba</i>	Feuilles, fruits	Semi-aride	4 ;16 ;18 ;21 ;23 ;37 ; 41 ; 42
13	<i>Arthrophytum scoparium</i>	Feuilles	Aride	27
14	<i>Asteriscus graveolens</i>	Feuilles, fleurs	Aride	17
15	<i>Atriplex canescens</i>	Feuilles	Semi-aride, aride	29 ;41
16	<i>Atriplex halimus</i>	Feuilles	Semi-aride, aride	18 ;21 ;24 ;25 ;31 ;37
17	<i>Calycotum spinosa</i>	Feuilles	Humide	1 ;9
18	<i>Calobota saharae</i>	Feuilles	Semi-aride	18 ;23 ;34 ; 41 ; 42
19	<i>Ceratonia siliqua</i>	Feuilles	Humide, semi-aride	1 ;41
20	<i>Cornulaca monacantha</i>	Boutons, Fleurs	Aride	3 ;10 ;32
21	<i>Crataegus monogyna</i>	Feuilles	Humide	1
22	<i>Ephédra alata</i>	Feuilles, tiges,	Aride	3 ;10 ;27 ;32
23	<i>Fraxinus oxyphylla</i>	Feuilles	Subhumide	20
24	<i>Pistacia atlantica</i>	Feuilles	Semi-aride	7
25	<i>Acacia farnesiana</i>	Feuilles	Semi-aride	7
26	<i>Genista saharae</i>	Feuilles	Aride	3 ;10 ;32
27	<i>Gymnocarpus decander</i>	Feuilles, tiges	Aride	27 ;33
28	<i>Haloxyton Schmittianum</i>	Feuilles	Aride	19 ;30
29	<i>Haloxyton scoparium</i>	Feuilles	Aride	3 ;10 ;32
30	<i>Helianthemum lippii</i>	Feuilles, fleurs	Aride	17
31	<i>Juniperus oxycedrus</i>	Feuilles, fruits	Semi-aride	16
32	<i>Juniperus phoenicea</i>	Feuilles, fruits	Semi-aride	16
33	<i>Limoniastrum feei</i>	Feuilles,	Aride	27
34	<i>Limoniastrum guyonianum</i>	Feuilles	Aride	3 ;10 ;31 ;32
35	<i>Moltkia ciliata</i>	Feuilles	Aride	17
36	<i>Myrtus communis</i>	Feuilles	Humide	1
37	<i>Nirtaria retusa</i>	Feuilles,	Aride	31
38	<i>Olea europea</i>	Feuilles	Humide, subhumide, semi-aride	1 ;13 ;9
39	<i>Oudneya africana</i>	Feuilles, tiges	Aride	3 ;10 ;32
40	<i>Phillyrea media</i>	Feuilles, fruits	Humide	16 ;14
41	<i>Phoenix dactylifera</i>	Feuilles, pédicelles	Aride	15 ;22 ;26 ;40
42	<i>Pistacia lentiscus</i>	Feuilles	Humide	1 ;9
43	<i>Pistacia terebinthus</i>	Feuilles, fruits	Semi-aride	16
44	<i>Prunus armeniaca</i>	Feuilles	Subhumide	13
45	<i>Prunus persica</i>	Feuilles	Subhumide	13
46	<i>Psoralea plicata</i>	Feuilles, tiges	Aride	27
47	<i>Punica granatum</i>	Feuilles	Semi-aride	21 ; 39
48	<i>Pyrus communis</i>	Feuilles	Subhumide	13
49	<i>Quercus ilex</i>	Feuilles, glands	Semi-aride	16, 8

50	<i>Quercus coccifera</i>	Feuilles, glands	Humide, semi-aride	1
51	<i>Randonia africana</i>	Tiges, boutons	Aride	3 ;10 ;27 ;32
52	<i>Retama raetam</i>	Boutons, tiges	Aride, semi-aride	3 ;10 ;18 ;23 ;27 ;32 ;37
53	<i>Rhanterium adpressum</i>	Feuilles, tiges	Aride	3 ;10 ;27 ;32
54	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Feuilles, tiges	Semi-aride	16 ;35
55	<i>Rubus fruticosus</i>	Feuilles	Humide	1
56	<i>Salsola foetida</i>	Feuilles, tiges	Semi-aride	27
57	<i>Salsola tetragona</i>	Feuilles, tiges	Semi-aride	3 ;10 ;32
58	<i>Salsola vermiculata L</i>	Feuilles, tiges	Semi-aride	3 ;24 ;25 ;31
59	<i>Suaeda mollis</i>	Feuilles, boutons	Aride	24 ;25 ; 27 ;31
60	<i>Tamarix aphylla</i>	Feuilles	Aride	3 ;10 ;32
61	<i>Tamarix articulata</i>	Feuille	Aride	3 ;10 ;32
62	<i>Tamarix gallica</i>	Feuilles, boutons	Aride	27 ;33
63	<i>Thymelaea microphylla</i>	Feuilles, boutons	Aride	3 ;10 ;27 ; 32
64	<i>Traganum nudatum</i>	Feuilles, boutons	Aride	3 ;10 ; 27 ;32 ;33
65	<i>Zilla macroptera</i>	Feuilles	Aride	27
66	<i>Zilla spinosa</i>	Feuilles	Aride	2 ;3 ; 10 ;32
67	<i>Zizyphus lotus</i>	Feuilles, fruits	Aride, Semi-aride	28
68	<i>Zygophyllum album</i>	Feuilles, boutons	Aride	3 ;10 ; 27 ;32
69	<i>Zygophyllum gaetulum</i>	Feuilles, boutons	Aride	27
70	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Feuilles	Humide	14
71	<i>Acacia dealbata</i>	Feuilles	Humide	14
72	<i>Phillyrea angustifolia</i>	Feuilles	Humide	14
73	<i>Smilax aspersa</i>	Feuilles	Humide	14
74	<i>Lavandula stoechas</i>	Feuilles	Humide	14
75	<i>Nigella sativa</i>	Feuilles	Semi-aride	35
76	<i>Zingiber officinale</i>	Feuilles	Semi-aride	35
77	<i>Opuntia ficus-indica</i>	Raquette	Semi-aride	36
78	<i>Astragalus gombiformis</i>	Feuilles	Semi-aride	37 ; 41 ; 42
79	<i>Spartidium saharae</i>	Feuilles	Semi-aride	37
80	<i>Ulmus campestris</i>	Feuilles	Humide	38
81	<i>Viburnum tinus</i>	Feuilles	Humide	38
82	<i>Albizia julibrissin</i>	Gousses	Semi-aride	39
83	<i>Vicia faba</i>	Feuilles	Semi-aride	39
84	<i>Calligonum azel</i>	Ecorce	Semi-aride	39
85	<i>Arthrocnemum macrostachyum</i>	Feuilles	Aride	41 ; 42
86	<i>Gleditsia triacanthos</i>	Feuilles	Aride	41 ; 42
87	<i>Ononis natrix</i>	Feuilles	Semi-aride	41 ; 42

Sources : 1 : Mebirouk-Boudechiche et al.,(2014) ; 2 : Longo- Hamouda et al.,(2007) ; 3 : Chehma et al.,(2010) ; 4 : Houmani et al.,(2004) ; 5 : Rekik et al.,(2014) ; 6 : Arab et al.,(2009) ; 7 : **Boubekeur et al.,(2017)** ; 8 : **Sahi et al.,(2022)** ; 9 : **Yerou et al.,(2023)** ; 10 : Chehma et Youcef(2009) ; 11 : Boufennara et al.,(2013) ; 12 : Merouane et al.,(2014) ; 13 : Houmani et al.,(2008) ; 14 : **Mebirouk-Boudechiche et al.,(2018)** ; 15 : Chehma et Longo-Hammouda (2004) ; 16 : Arbouche et al.,(2012) ; 17 : Bouallala et al.,(2013) ; 18 : Boufennara et al.,(2012) ; 19 : Mayouf et Arbouche (2014) ; 20 : **Bencherchali et al.,(2019)** ; 21 : Bouazza et al.,(2012) ; 22 : Medjekal et al(2011) ; 23 : Boufennara (2012) ; 24 : Yaakoub (2006) ; 25 : Haddi et al. (2009) ; 26 : Chehma et al.,(2009) ; 27 : Bouallala (2013) ; 28 : Abdeddaim et al.,(2014) ; 29 : Medjekal et al.,(2015b) ; 30 : Mayouf et Arbouche (2015) ; 31 : Haddi et al.,(2003) ; 32 : Chehma (2005) ; 33 : Bouallala et al.,(2011) ; 34 : Medjekal et al(2015a) ; 35 : **Medjekal et al.,(2017)** ; 36 : **Medjekal et al.,(2023)** ; 37 : **Boufennara et al.,(2022)** ; 38 : **Mebirouk-Boudechiche et al.,(2015b)** ; 39 : **Bouazza et al.,(2020)** ; 40 : **Boufennara et al.,(2019)** ; 41 : **Medjekal et al.,(2020)** ; 42 : **Medjekal et al.,(2018)**

Notre analyse du tableau 4 montrent que plus des deux tiers des espèces recensées concernent les zones arides et semi-arides. Cela est attribué à la dépendance des éleveurs aux parcours steppiques et sahariens pour alimenter leurs troupeaux (Bencherif, 2011). Seules 17 espèces sont exploitées dans les zones humides du pays, ceci est imputé sans doute à la disponibilité des cultures fourragères et des prairies (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2014).

II.5.2. La valeur nutritive des arbres et arbustes utilisés en Algérie

Kadi & Zirmi-Zembri (2016) concluent que la valeur nutritive de la majorité des espèces est appréciable alors que quelques-unes sont de très bonne qualité. Les auteurs ont analysé les données disponibles de la composition chimique, la valeur nutritive et la valeur fourragère et ont donné les appréciations suivantes :

- La majorité des ressources étudiées montrent des teneurs élevées en matière minérale (MM) qui dépassent les 8%. Le minimum a été enregistré chez *Calobota saharae* ((Coss. & Durieu) Boatwr. & B.-E. van Wyk, 2009) récolté en été (0,39%MS) tandis que *Salsola foetida* (Vest ex Schult., 1820) montre une teneur de 34%MS. Les auteurs ont signalé que même une espèce s'avère pauvre en MM mais elle peut être riche en certains éléments minéraux, c'est le cas de l'amande de *Zizyphus lotus* ((L.) Lam., 1789), pauvre en MM, mais riche en manganèse selon Boudraa *et al.* (2010).
- Les teneurs en MAT montrent une variabilité importante entre espèces avec un maximum de 33,7 % chez *Calycotum spinosa* ((L.) Link, 1822). Elles sont aussi très dispersées chez la même espèce entre les saisons et les lieux de récolte, c'est le cas de *Suaeda mollis* ((Desf.) Delile, 1813) qui montrent des teneurs qui oscillent entre 0,82 et 19,3%MS. En général, le taux moyen de la MAT des espèces inventoriées est de 10,5%MS ; un taux supérieur au minimum de 7 à 8 %MS requis pour fournir l'ammonia nécessaire pour le microbiote ruminal pour une croissance optimale (Norton *et al.*, 1998) en assurant le bon fonctionnement du rumen (Van Soest *et al.*, 1991).
- Les espèces recensées montrent une richesse en fraction pariétale. Elles ont des teneurs moyennes en NDF qui dépassent 45% alors que celles en lignocellulose (ADF) sont de 30%MS. *Phoenix dactylifera* (L., 1753) est l'espèce la plus riche en fibres avec des teneurs en NDF et ADF supérieures à 89 et 65%MS respectivement alors que les feuilles de grenadier représentent la teneur la plus faible en NDF (20%MS) et celles d'*Acacia julibrissin* (Durazz., 1772) en ADF (9%MS). Une moyenne de 12,3%MS pour les teneurs en ADL a été enregistrée chez les espèces répertoriées avec 75% des ressources qui montrent une teneur en ADL supérieure à 8,5%MS.

- Pour ce qui de valeur fourragère, les auteurs affirment que 12 espèces sont d'excellentes ressources énergétiques en offrant plus d'une unité fourragère lait (UFL) ou viande (UFV) à savoir : *Acacia nilotica* ((L.) Willd. ex Delile, 1813), *Acacia julibrissin*, *Anabasis articulata* ((Forssk.) Moq., 1849), *Artemisia herba alba* (Asso, 1779), *Atriplex canescens* ((Pursh) Nutt., 1818), *Atriplex halimus* (L., 1753), *Calycotum spinosa*, *Fraxinus angustifolia* (Vahl, 1804), *Haloxylon scoparium* (Pomel, 1875), *Nitaria retusa* ((Forssk.) Asch., 1867), *Oudneya africana* (R.Br., 1810) et *Salsola vermiculata* (L., 1753). En outre, l'espèce *Suaeda mollis* récoltée en automne est la ressource la moins énergétique : UFL = 0,3 et UFV = 0, 2 alors que *Haloxylon scoparium* est la ressource la plus énergétique : UFL = 1,5 et UFV = 1,6. En général, 75% des espèces étudiées dépassent la valeur de 0,5 en UFL et 0,4 en UFV alors que 25% dépassent même 0,8 pour les UFL et 0,7 pour les UFV.

- En ce qui concerne la valeur azotée, la variabilité entre espèces n'est pas d'autant importante. *Calycotum spinosa* est celle qui fournit le plus d'azotes (PDIN et PDIE >200 g/kg MS). Ainsi, des espèces telles que : *Acacia nilotica*, *Acacia julibrissin*, *Atriplex canescens*, *Atriplex halimus*, *Fraxinus angustifolia*, *Ficus carica* (L., 1753), *Punica granatum* (L., 1753) et *Zygophyllum album* (L., 1753) ayant des teneurs en MAT supérieures à 10%MS et des taux de NDF inférieurs à 30%MS sont comparables aux fourrages tempérés de bonne qualité. En revanche, des espèces comme *Anabasis articulata*, *Calobota saharae*, *Ceratonia siliqua* (L., 1753), *Ephedra alata* (Decne., 1834), *Genista saharae* (Coss. & Durieu, 1855), *Limoniastrum guyonianum* (Boiss., 1849), *Phoenix dactylifera*, *Pistacia lentiscus* (L., 1753), *Quercus coccifera* (L., 1753), *Randonia africana* (Coss. & Durieu, 1855), *Rhanterium adpressum* (Coss. & Durieu, 1855), *Thymelaea microphylla* (Coss. & Durieu, 1855), *Traganum nudatum* (Delile, 1813) et *Zilla spinosa* ((L.) Prantl, 1891) ont des teneurs en MAT inférieures à 10%MS et des teneurs en NDF supérieures à 50% ; elles peuvent donc être considérées des fourrages pauvres. D'ailleurs leur apport en UF varie de 0,3 à 0,6 alors que ceux en PDI varient de 25 à 69 g/kg MS.

Pour les espèces que nous avons recensées, 21 espèces ont été répertoriées. Il s'agit des espèces 23, 24, 25, 70-87 dans le tableau 4.

L'effet marquant c'est qu'un part important des ressources est utilisé dans la zone humide ce qui reflète l'intérêt acquis par ces dernières dans l'alimentation des ruminants dans cette région du pays. Ainsi, ce qui distingue les derniers travaux sur les ligneux en Algérie c'est l'intérêt croissant sur l'étude de la digestibilité *in vitro*, les métabolites secondaires et leurs

activités anti nutritionnelle et anti méthanogène ce qui rend les résultats plus fiables et mieux exploitables.

La synthèse des données collectées nous a permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation d'*Opuntia ficus indica* (L.) Mill., 1768) constitue une bonne alternative en zone aride et semi-aride de par ses caractéristiques nutritionnelles ouvrant ainsi une opportunité intéressante de production de lait de chèvre de qualité meilleure et de quantité suffisante selon Sahi *et al.* (2022).
- Le contenu minéral est très variable entre espèces. Il est en moyenne de l'ordre de 9,7%MS. Il varie entre un minimum de 3,62%MS chez *Pistacia atlantica* (Desf., 1799) et un maximum chez *Opuntia ficus indica* de l'ordre de 28,4%MS.
- Les fabacées représentent les teneurs les plus élevées en termes de MAT. Elles renferment en moyenne 20%MS avec un maximum de 24, 2%MS chez *Albizia julibrissin*. Ainsi, l'espèce la plus riche est *Nigella sativa* (L., 1753) ayant une teneur de 35,05%MS. En général, une moyenne de 11%MS est enregistrée entre espèces ce qui leur confère des qualités nutritionnelles non négligeables.
- La fraction pariétale présente des teneurs très importantes. Elle varie entre 70,84 ; 43 ; 25,6 et 17,9 ; 7,4 ; 0,9 pour NDF, ADF et ADL respectivement. De plus, l'analyse montre que près de 50% des espèces ont des contenus supérieurs à 45%MS. On remarque aussi que presque 30% des espèces représentent des teneurs en ADL inférieures à 8%MS en leur rendant plus digestibles. En outre, l'espèce la plus riche en fibres totales était *Ulmus campestris* (Mill., 1768) avec 70,87%MS et *Phillyrea angustifolia* consommée en automne s'avère la plus lignifiée avec une teneur en ADL de 25,6%MS.
- Les données disponibles sur les métabolites secondaires ; notamment les tanins condensés (TC) considérées le facteur limitant de l'ingestibilité (Waghorn, 2008) et la digestibilité (Makkar *et al.*, 2007) présentent une variabilité significative. En effet, toutes les espèces recensées ont des teneurs en TC avec des concentrations dispersées allant de 78g/kg MS chez *Astragalus gombiformis* à 1,48g/kg MS chez *Lavandula stoechas* (L., 1753). Ainsi, plus de 80% des espèces ont des concentrations en TC inférieures à 50g/kg MS, une teneur optimale bénéfique pour la santé des ruminants et leurs performances productives et reproductives (Dey *et al.*, 2008). Au-delà de cette concentration, ceci est devenu un facteur anti nutritionnel (Novak *et al.*, 2020).

- La digestibilité *in vitro* des substrats issus des différentes ressources étudiées présentent des taux très acceptables pour les ruminants avec une moyenne qui dépasse 60%. Ainsi, l'espèce la plus digestible était *Vicia faba* (L., 1753) avec un taux de 87% imputé à son contenu élevé en azote (17,9%MS) et faible en lignine (4%MS) malgré sa concentration élevée en TC (178g/kg), ceci est du probablement à leur structure chimique et leur nature (Häring *et al.*, 2008).
- L'ajout du PEG, un polymère ayant l'affinité d'inactiver les TC et libérer les protéines précipitées en augmentant leur dégradation (Makkar, 2003), a montré une efficacité remarquable dans l'amélioration de la production de gaz *in vitro* avec des taux allant jusqu'à 80 % chez *Calligonum azel* (Delile, 1813) du fait de sa teneur élevée en TC (71,9g/kg MS).
- L'utilisation des ressources étudiées montrent une réduction importante de l'émission de méthane (CH₄) entérique. Il s'agit de l'effet directe des métabolites secondaires et notamment les TC sur les bactéries, archées et protozoaires méthanogènes (Rira *et al.*, 2019). A titre d'exemple, l'incorporation de *Nigelle sativa* réduit l'émission de CH₄ entérique avec 20% selon Medjekal *et al.* (2017).

Partie II

Matériel & Méthodes

I. Présentation de la région d'étude : Parc National d'El Kala (PNEK)

I.1. Situation géographique et administrative

L'étude a été réalisée dans le Parc National d'El-Kala (PNEK) localisé à l'extrême Nord-est algérien et contenu entièrement dans la wilaya d'El-Tarf couvre une superficie d'environ 76.438 hectares presque le tiers (26,45%) de la superficie globale de la wilaya qui est de 2891,63 km². Érigé en juillet 1983, le PNEK est constitué d'une mosaïque d'écosystèmes aussi riche que diversifiés couverte à 57% de montagnes et de forêts, 31% de plaines et de collines et 12% de zones humides et de dunes. Les communes incluses totalement dans le parc sont : El-Kala, El-Aioun, Souarekh, Ain El Assel, Bougous et Ramel Souk alors que les communes incluses partiellement dans le Parc sont : El-Tarf, Boutheldja, et Berrihane. Il a été également classé en 1990 comme « Réserve de la biosphère » par l'UNESCO. Situé à 36°52 latitude Nord et 8°27 longitudes Est, il est limité à l'Est par la frontière algéro-tunisienne, au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par l'extrémité de la plaine alluviale d'Annaba et enfin au Sud par les contreforts des monts de la Medjerda (CENEAP, 2011) (figure 7).

I.2. Milieu physique

I.2.1. Caractères géologiques

Les principaux traits géologiques du PNEK sont en grande partie dus aux surrections alpines du Tertiaire. Durant le Quaternaire des mouvements transverses et des phénomènes de torsions ont mis en place une série de dômes et de cuvettes, dirigeant les chaînes telliennes vers le Nord-est. Collines et basses montagnes de la région présentent un socle sédimentaire constitué par des grès de Numidie (Eocène supérieur) et des argiles de Numidie (Eocène moyen) (Marre, 1987). Des sols profonds, meubles, sablonneux, de nature siliceuse favorisent l'installation du chêne-liège. Par ailleurs, cette structure géologique favorise l'exploitation des roches pour les matériaux de construction. Ceci a permis l'ouverture de nombreuses carrières et mines dans la zone.

Le relief du PNEK se compose dans sa partie septentrionale d'un cordon dunaire qui s'étend le long de la côte sur une distance de 40 Km, mais aussi vers le sud jusqu'au pied du Djebel Segleb, s'introduisant parfois jusqu'à 24 km dans l'arrière-pays, avec de petites éminences de relief gréseux de faible altitude. Un ensemble de collines ne dépassant pas 600 m de hauteur se situent au Nord, à l'Est et à l'Ouest de la région. Une plaine alluviale et marécageuse est adossée à ces collines (Joleaud, 1936).

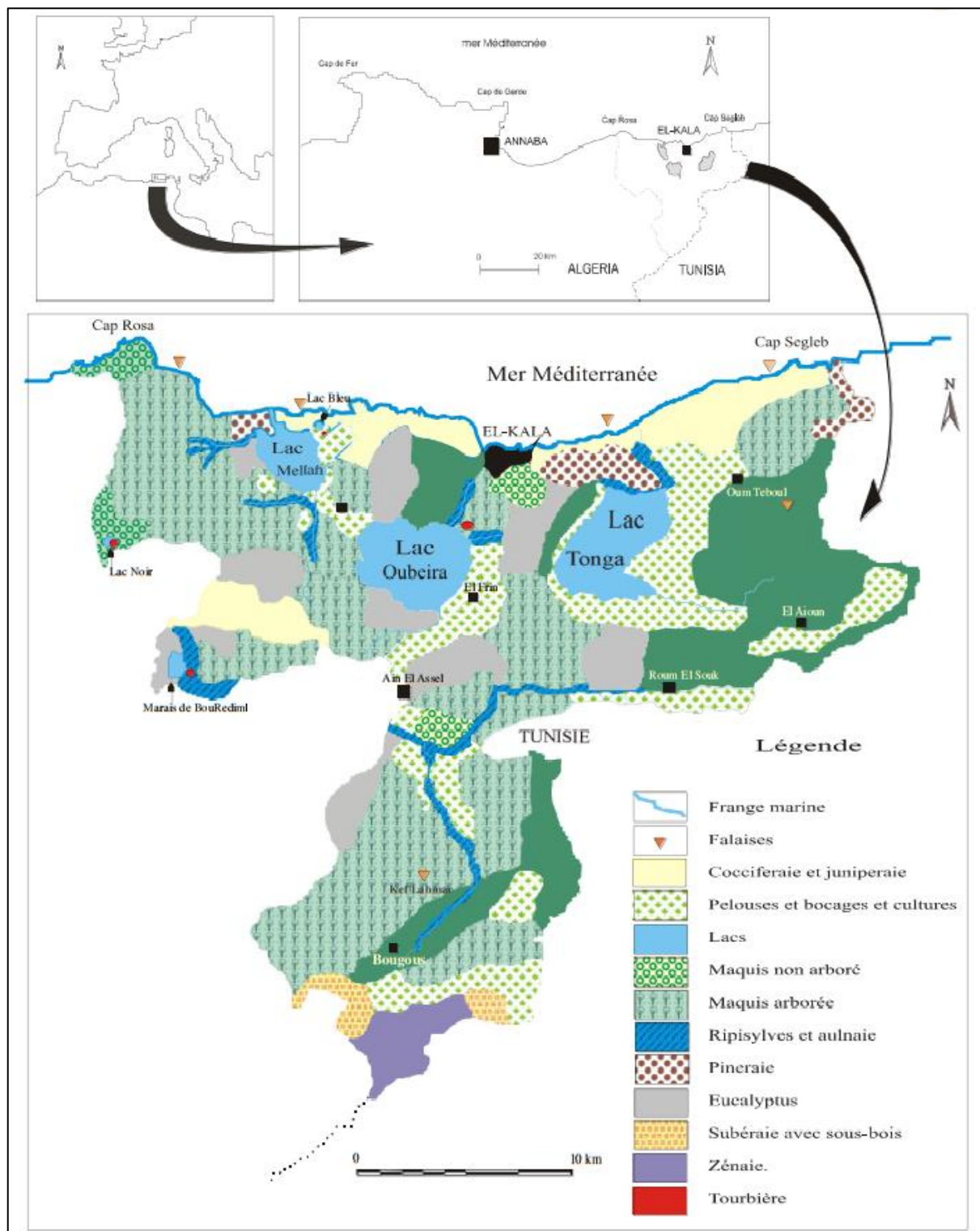


Figure 7 : Localisation géographique du Parc National d'El Kala (Benyacoub *et al.*, 1998 in Rouag, 2015)

I.2.2. Caractères hydrologiques

Le PNEK est caractérisé par une importante richesse hydrologique : lacs, sources, nappes, etc. L'importance de ses zones humides en taille et en diversité biologique, notamment en

diversité aviaire, a valu leur classement en sites d'importance internationale par la convention de Ramsar ; le PNEK est d'ailleurs un parc phare en Algérie et dans le Maghreb occidental pour ses étendues d'eau douce emblématiques, telles que le lac Tonga (2400 ha), le lac Oubéria (2200 ha), le lac des Oiseaux (70 ha) (Benyacoub *et al.*, 1998) et le marais de la Mekhada (8900 ha), l'un des plus grands sites humides d'Afrique du Nord (Belhadj, 1996). A ces plans d'eau s'ajoutent les lacs de barrage (la Cheffia, la Mexa) qui représentent des sites d'accueil non négligeables pour l'avifaune hivernante dans la région. Hormis les lacs, on dénombre aussi des sources (Bouredim, Bouglès et Oum El-Bhaim) et des oueds (El-Kebir, Bougous et El-Aroug). L'oued Kebir est le principal cours d'eau permanent de la région, qu'il draine du Sud-est vers le Nord-ouest, pour aboutir à l'exutoire de la Mafragh (Baba Ahmed, 2005).

I.2.3. Caractères climatiques

La région d'étude est sous l'influence d'un climat méditerranéen, à fort contraste saisonnier, caractérisé par une saison douce et pluvieuse entre les mois d'octobre et avril et une saison chaude et sèche entre juin et septembre. L'Automne et le printemps y sont d'assez courtes durées et sont marqués souvent par des changements brutaux du climat tels que des vagues de chaleurs dues aux siroccos, suivies par des orages violents (Boulahbel, 2012).

La synthèse élaborée par Chettibi (2021) est basée sur les données climatiques fournies par la station météorologique du Lac des Oiseaux (El Tarf) qui couvrent une période d'observation de 1988 à 2018.

I.2.3.1. La température

La température de la région est influencée par la proximité de la mer et par les formations marécageuses et lacustres qui s'y trouvent. Ainsi la température moyenne annuelle est de 18,99°C. Le mois le plus chaud est le mois d'août avec une température moyenne mensuelle 27,3°C. Quant aux températures moyennes minimales, elles sont de l'ordre de 11,5°C enregistrées au mois de janvier, mois le plus froid (tableau 5).

Tableau 5 : Températures moyennes mensuelles (1988-2018) du PNEK

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T Moy (°C)	24,7	21,5	16,8	13,3	11,5	12,1	13,9	16,4	19,9	23,8	26,7	27,3

I.2.3.2. La pluviométrie

La moyenne calculée sur trente ans (1988-2018) donne une pluviométrie annuelle de la région de 678,4 mm/an, le mois présentant le plus de précipitations est le mois de novembre avec 106,6 mm et le mois le moins arrosé et celui de juillet avec 1,9 mm (tableau 6).

Tableau 6 : Précipitations moyennes mensuelles (1988-2018) du PNEK

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P moy(mm)	61,4	66,9	106,6	97,6	79,2	78,1	63,3	49,5	47,4	14,3	1,9	12,2

I.2.3.3. L'humidité

L'humidité de l'air joue un rôle important dans le conditionnement de l'évaporation, elle atténue la sécheresse et par conséquent elle influence les conditions de développement de la végétation. L'humidité moyenne annuelle de la région est de 76,33 % avec une valeur maximale est observée au mois de décembre avec 80,4 % (tableau 7).

Tableau 7 : Humidités moyennes mensuelles (1988-2018) du PNEK

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
H %	75,3	76,3	75,6	80,4	79,8	79,6	77,4	77,2	76,2	71,9	73,2	73,1

I.2.3.4. Le vent

Ainsi, les vents dominants hivernaux du Nord-Ouest, relativement constants tout au long de l'année, issus des grandes dépressions atlantiques et générateurs de fortes précipitations sont remplacés par les vents du Nord-Est en période estivale qui accompagnent les anticyclones des Açores, moins puissant en général, mais sont assez fréquents (Aouadi, 1989 ; De Belair, 1990). Pendant la saison estivale intervient également le sirocco qui est un vent d'origine saharienne accompagnée d'une élévation de la température qui assèche l'air et favorisent les incendies des forêts (Belouahem *et al.*, 2009).

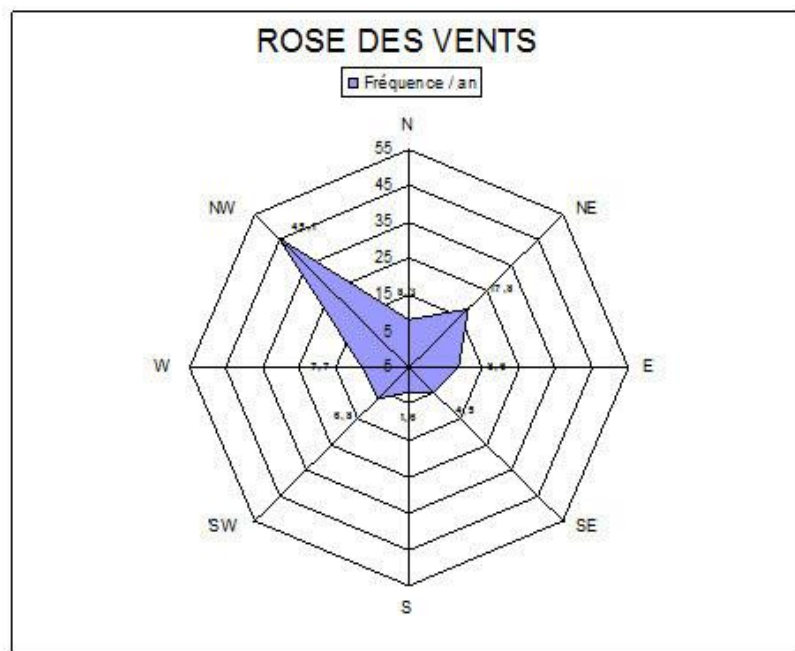


Figure 8 : Rose des vents (Rouag, 2015)

I.2.4. Caractères bioclimatiques

D'après le Climagramme d'Emberger, la région d'étude est située dans l'étage humide. La région se révèle être une véritable mosaïque d'étages bioclimatiques et de végétation. Ainsi, du littoral au massif forestier de la Medjerda, on distingue trois étages bioclimatiques (Toubal, 1986) :

- Etage subhumide à hiver chaud : Il se caractérise par l'aire de l'Oléo-lentisque à caroubier au niveau de la mer et par celle de l'Oléo-lentisque à myrte à un niveau altitudinal supérieur.
- Etage humide à hiver chaud à Tempéré : Il se caractérise par l'aire du chêne liège (*Quercus suber* (L., 1753)).

Etage humide à hiver tempéré : Il se manifeste au-delà de 800 à 900 m d'altitude et se caractérise par l'aire du chêne zeen (*Quercus canariensis* (Willd., 1809)) qui se développe lorsque la pluviométrie est supérieure ou égale à 900 mm/an.

I.2.5. Richesses biologiques

I.2.5.1. Flore

La richesse floristique du Parc National d'El-Kala est d'environ 840 espèces. La flore se caractérise par un taux particulièrement élevé d'espèces endémiques, rares et très rares (De belair, 1990). Elles représentent le tiers de la flore algérienne, parmi lesquelles on peut

observer 231 espèces rares et très rares, appartenant à 62 familles et représentant plus du quart (27%) de la flore du parc, soit 15% de la flore rare à l'échelle nationale (Ouelmouhoub, 2005).

I.2.5.2. Faune

La mosaïque d'écosystèmes a permis, sur le territoire du Parc l'installation importante d'une hétérogénéité des habitats impliquant une grande diversité biologique, notamment au niveau de la faune et particulièrement l'avifaune. Les mammifères y sont représentés par 40 espèces, soit un peu plus de 30% des mammifères d'Algérie, dont 16 sont protégées et constituent de ce fait un patrimoine réel à préserver comme pour le cas du Cerf de barbarie (*Cervus elaphus barbarus* (Bennett, 1833)) constitue le mammifère le plus précieux de la région. Ce dernier, se trouve confiné dans les subéraies qui représentent son habitat idéal. Pour éviter son extinction définitive et assurer son élevage continu, une réserve cynégétique a été installée au sein de la réserve de Brabtia du PNEK (Ouelmouhoub, 2005). Dans les biotopes marins et lacustres, on distingue 74 espèces de poissons réparties en 14 espèces strictement dulçaquicoles et 60 espèces strictement marines (DGF, 2006). Le parc national d'El-Kala est surtout connu pour sa riche avifaune sédentaire et migratrice. On y dénombre 195 espèces d'oiseaux dont 69 sont protégées. Selon le biotope, on y relève 97 espèces d'oiseaux forestiers, 64 espèces d'oiseaux d'eau et 09 espèces d'oiseaux marins. Notons aussi la présence de 25 espèces de rapaces (Benyacoub et Chabi, 2000). Les reptiles du parc national d'El Kala sont représentés par 17 espèces dont 03 protégées. Les amphibiens quant à eux sont au nombre de 07 espèces (Rouag & Benyacoub, 2006).

I.3. Milieu socio-économique

I.3.1. Population

Depuis 1962, la population du PNEK n'arrête pas d'accroître avec un rythme de 3.15% par an. Le PNEK comptait 38727 habitants au recensement général de la population et de l'habitat de 1966. En 2003, la population du PNEK est estimée à plus de 120000 habitants (Grimes, 2005). Selon le recensement de 1977 le PNEK compte 55056 habitants ce chiffre a augmenté en 1987 pour atteindre 83306 habitants. Depuis 1987 à 2008 la population du PNEK est arrivée 136140 habitants. Ce chiffre est sensé augmenté au cours de l'année 2016 pour atteindre à 160000 habitants soit une densité de l'ordre de 199 Hbts /km² (Khallef, 2019)

I.3.2. Agriculture

Le PNEK est principalement à vocation agricole, l'agriculture est le secteur le plus dominant en matière d'emplois. D'après Grimes (2005), les chiffres de 1987 utilisées par

Homewood (1993), les terres agricoles, soient-elles privées ou étatiques, couvraient quelques 17 000 ha dans le PNEK. 29% de ces terres correspondaient aux cultures céréalières, 12% pour les cultures fourragères et 59% pour les pâturages (friches et jachères).

Pour une SAU de 13149 ha (DSA, 2016) ce secteur occupe 16,33 % de la superficie totale du PNEK. Les cultures dominantes sont les céréales (30 % de la SAU), le maraîchage (18 % de la SAU) et l'arboriculture (14, % de la SAU), viennent ensuite les cultures de l'arachide et les cultures industrielles (tomate) pratiquées aux abords des sources d'eau facilement accessibles comme les Oueds et les lacs (DSA, 2017).

I.3.3. Élevage et pastoralisme

Les systèmes d'élevage qui sont pratiqués au sein du PNEK ont une importance considérable pour l'économie rurale. Un taux de 35% de la population totale trouvent leur source de revenus dans l'élevage. Dans les zones rurales, cette proportion passe à 50% et atteint 80% dans des régions comme Ramel Souk et Bougous. L'élevage, particulièrement celui des bovins, prend sur les plans économiques et écologiques des dimensions qui dépassent le cadre de la région d'étude. Celle-ci, au titre de « réservoir de viandes rouges » a une production locale estimée à 4000 tonnes par an, dont 80% sont destinées au marché national, mais elle est encore une zone de parcours dont les pâturages sont exploités par un cheptel incontrôlé provenant des régions voisines de l'ouest et du sud pour être engraisé, puis vendu ou échangé en Tunisie contre des biens de consommation à travers des circuits informels transfrontaliers. Près de 70% des éleveurs ne sont pas des propriétaires terriens mais ont des connaissances parfaites des cycles des inondations et des sécheresses et savent prendre les dispositions nécessaires pour assurer le complément en nourriture du bétail (Ouelmouhoub, 2005).

I.3.4. Pêche

El-Kala est le seul port de la zone considérée par l'étude et aussi de toute la wilaya d'El Tarf qui compte 90 km de côtes. Une centaine d'embarcations de pêche professionnelle est signalée, constituée de 10 chalutiers, de 20 sardiniers, de 60 petits métiers et d'une vingtaine de corailleurs dont quelques-uns sont réellement en activité (Ouelmouhoub, 2005).

II. Description du site d'étude : Aulnaie de Ain Khiair

II.1. Situation géographique

Notre étude a été réalisée au sein de l'aulnaie d'Ain Khiair, un milieu caractéristique du PNEK, particulièrement rare en Algérie. En effet, la Numidie orientale est la seule zone africaine qui compte des aulnaies. C'est une zone humide inscrite en 2003 sur la liste Ramsar des sites d'importance internationale. Elle est entièrement inféodée dans la commune d'El Tarf et dans le PNEK, située à 0-3 mètres d'altitude entre 36°47'57"N 08°18'59"E et s'étend sur 180 ha de superficie (Ramsar, 2019) dont 20 ha sont des sols tourbeux (Benslama, 2007). L'aulnaie se situe entre un cordon dunaire au nord et les plaines argileuses et agricoles d'El-Tarf et oued El-Kebir au sud, à l'est par le bassin versant du lac Oubeïra et à l'ouest par une subéraie dégradée. En recevant en hiver les eaux des crues de l'oued El-Kebir pour qu'elle se transforme en zone marécageuse (DGF, 2003).

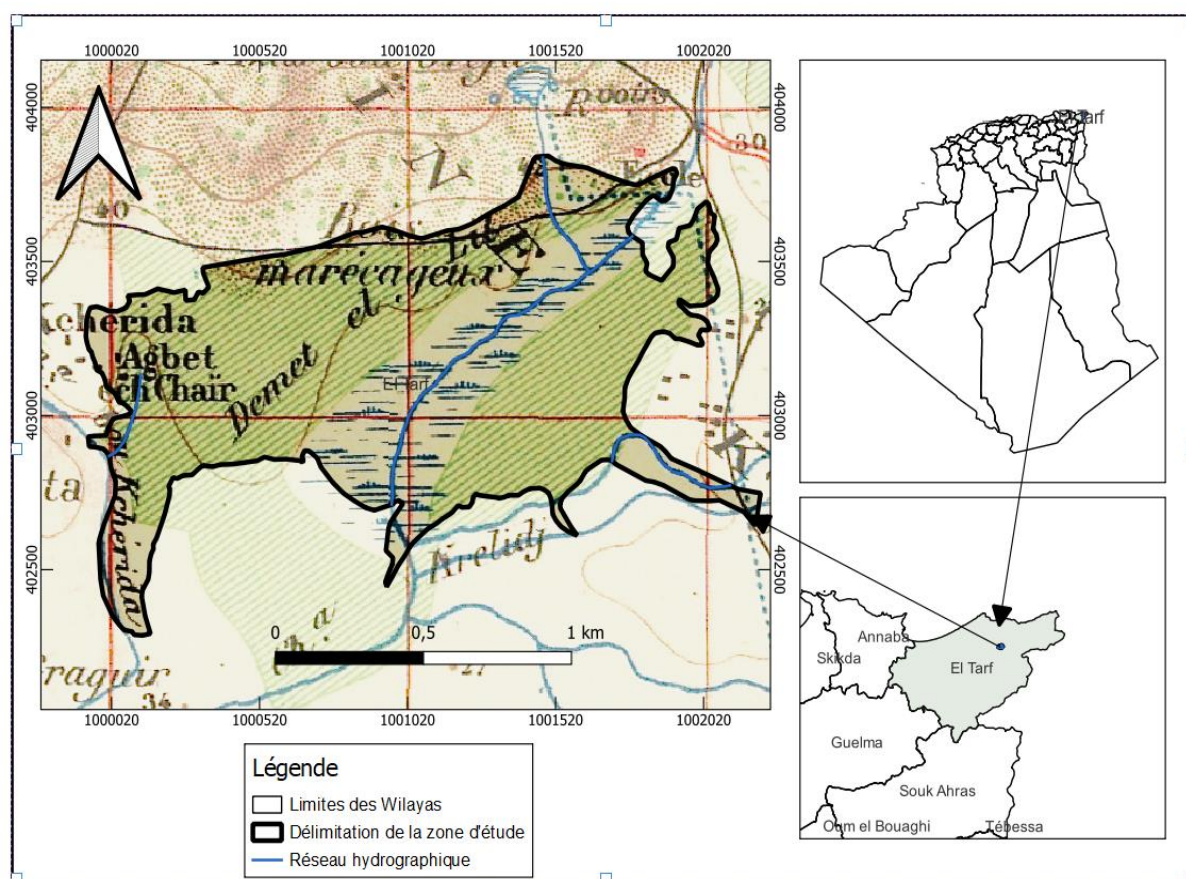


Figure 9 : Localisation géographique de l'aulnaie de Ain Khiair (Laadjal *et al.*, 2024)

Ce milieu est constitué de l'imbrication étroite de plusieurs groupements arborés. Dans sa partie ouest, on distingue une subéraie dégradée qui occupe un rehaussement topographique sur 50 ha. Au sud de l'aulnaie proprement dite on distingue un fourré dense d'oléo-lentisque, chêne

liège et quelques frênes, de forme parfaitement circulaire qui occupe une superficie de 20 ha. Cette formation bénéficie de conditions d'exondation grâce, là encore, à un léger rehaussement topographique. De ce fait, l'aulnaie *sensu stricto*, n'occupe en réalité que 110 ha environ (figure 10) (TAD, 2011).

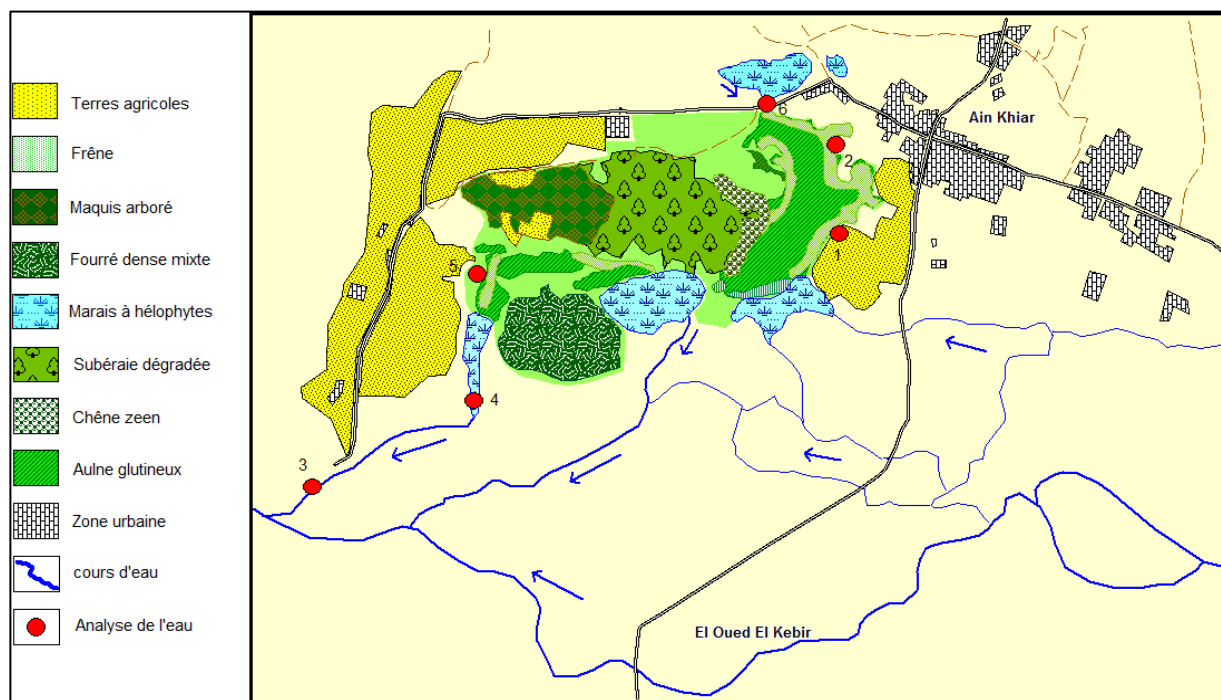


Figure 10 : Principales formations naturelles de l'aulnaie de Ain Khiair (TAD, 2011)

II.2. Caractéristiques écologiques générales

II.2.1. Types de sols

Ce sont des sols de marécages à base de limons, largement développés dans les bas-fonds inondés. Partout l'imperméabilité du sous-sol est liée à l'extension des argiles de Numidie. Alluvions limoneuses du fond de vallée de l'Oued Kebir datant du Néopléistocène et des basses terrasses de la vallée de l'Oued Kebir datant du pléistocène récent, à base de limons, sables et de cailloux roulés. Ces sols hydromorphes sont relativement acides et peuvent développer des conditions de tourbières (Benslama, 2007).

II.2.2. Richesse floristique

L'aulnaie glutineuse de Ain Khiair est une formation hygrophile qui représente une richesse floristique exceptionnelle (Belouahem, 2012) ; il s'agit de :

II.2.2.1. La strate arborée

Principalement constituée d'Aulne (*Alnus glutinosa* (L., 1753)) qui domine dans les parties inondées au centre de l'aulnaie. Il est associé au frêne (*Fraxinus angustifolia*), à l'orme

(*Ulmus campestris* (Mill., 1768)), aux saules (*Salix pedicellata* (Desf., 1799) et *Salix alba* (L., 1753)) et au laurier noble (*Laurus nobilis* (L., 1753)) et cela dans des différents niveaux d'exondation. Les chênes sont aussi présents : le chêne zeen forme un peuplement continu en lisière ouest grâce à un rehaussement topographique. Dès que l'hygrométrie diminue fortement, apparaît alors le chêne liège qui s'installe dans les parties sèches.

II.2.2.2. La strate arbustive

Sous le couvert de la strate arborée, La présence de lumière a pour conséquence l'apparition d'arbustes à feuilles caduques : la bourdaine (*Rhamnus frangula* (Mill., 1768)), l'aubépine (*Crataegus monogyna* (Jacq., 1775)), le merisier (*Prunus avium* (L., 1753)). On trouve également dans cette strate arbustive des arbustes à feuilles persistantes comme la viorne (*Viburnum tinus* (L., 1753)).

Les lianes sont nombreuses et sont représentées par les phanérophytes suivantes : la salsepareille d'Europe (*Smilax aspera* (L., 1753)), le lierre grimpant (*Hedera helix* (L., 1753)), la vigne sauvage (*Vitis vinifera* (L., 1753)), la ronce à feuilles d'orme (*Rubus ulmifolius* (Schott, 1818)), l'églatine (*Rosa sempervirens* (L., 1753)), les clématites (*Clematis cirrhosa* et *C. flammula* (L., 1753)), la garance voyageuse (*Rubia peregrina* (L., 1753)). Parmi les géophytes lianoïdes, il a été inventorié la bryone dioïque (*Bryonia dioica* (Jacq., 1774)), l'asperge à feuilles épineuses (*Asparagus acutifolius* (L., 1753)) ainsi que *Tamus communis* (L., 1753) (l'herbe aux femmes battues), généralement toutes ces lianes sont humicoles.

Plusieurs arbustes propres au cortège floristique de la subéraie se trouvent sur les bordures asséchées des aulnaies marécageuses ; c'est le cas de la filaire (*Phillyrea angustifolia* (L., 1753)), le myrte commun (*Myrtus communis* (L., 1753)), le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus* (L., 1753)), la bruyère arborescente (*Erica arborea* (L., 1753)), le calycotome (*Calycotome spinosa* ((L.) Link, 1822)) et le genêt (*Genista ferox* (Poir., 1789)). Le chêne kermès (*Quercus coccifera* (L., 1753)) est présent au niveau des bordures sèches sur un substrat purement sablonneux.

II.2.2.3. La strate herbacée

La strate herbacée est constituée par quelques ptéridophytes : l'osmonde royale (*Osmunda regalis* (L., 1753)), le capillaire noir (*Asplenium adiantum nigrum* L., 1753)), la fougère femelle (*Athyrium filix femina*((L.) Roth, 1799)) quand le milieu est ombragé. Au bord des aulnes prospèrent abondamment la fougère aigle (*Pteris aquilina* ((L.) Kuhn, 1879)) espèce

héliophile envahissante et parfois quelques pieds du capillaire de Montpellier (*Adiantum capillus veneris* (L., 1753)) en terrains sablonneux. Parmi les épiphytes inventoriées, le polypode commun (*Polypodium cambricum* (L., 1753)) affectionne les troncs d'arbres et se développe vigoureusement sur les branches étalées des aulnes et des frênes. On remarque aussi la présence de *Bellis anua* (L., 1753), *Ranunculus sp*, *Hypericum sp*, *ficaria verna* (Huds., 1762), *Fedia cornucopiae* ((L.) Gaertn., 1791), *Carex flacca* (Schreb., 1771), *Biscutella didyma* (L., 1753) et *Iris pseudacorus* (L., 1753). C'est parmi les herbacées que se trouvent les espèces les plus vulnérables et les plus patrimoniales.

II.2.3. Richesse faunistique

L'aulnaie de Ain Khiaïr renferme une richesse faunistique remarquable. Il s'agit principalement de l'avifaune qui compte 54 espèces présentées par des rapaces, des espèces cavicoles (les pics, les mésanges, l'étourneau unicolore), des sylviidés (la bouscarle de cetti, la fauvette à tête noire), des turdidés (le rossignol philomèle) et des fringillidés. La présence permanente de l'eau favorise grandement l'installation d'une avifaune aquatique. Celle-ci est composée d'anatidés, d'ardéidés, de rallidés et de sylviidés paludicoles (Benyacoub & Chabi, 2000).

Parmi les mammifères les plus fréquents on note la présence du chacal (*Canis aureus* (L., 1758)), du renard roux (*Vulpes vulpes* (L., 1758)), de la genette (*Genetta genetta* (L., 1758)), de la manguste (*Herpestes ichneumon* (L., 1758)), du sanglier (*Sus scrofa* (L., 1758)). L'hyène rayée (*Hyaena hyaena* (L., 1758)), la loutre commune et le hérisson (*Erinaceus algirus* (L., 1758)). On note également la présence des lagomorphes comme le lapin et le lièvre au niveau de la subéraie dégradée. Les rongeurs et les chiroptères sont partout présents et profitent largement de la production primaire disponible et de la masse de la faune entomologique (DGF, 2003).

II.2.4. Menaces et tendances

L'aulnaie de Ain Khiaïr est soumise à des facteurs d'altération multiples, due à l'action anthropique généralisée tels que les défrichements sur la périphérie du site, le pompage continu et incontrôlé de l'eau, le surpâturage intense, la pollution, les incendies, les coupes illicites du bois et l'urbanisation (TAD, 2011).

II.2.4.1. Urbanisation

La ville de Aïn Khiair qui compte 5000 habitants, est la seule agglomération importante à proximité du bassin versant de l'aulnaie. Les habitants sont en premier lieu des agriculteurs. Les mesures du taux d'extension urbaine montrent une évolution de 42 % entre 2005 et 2009. Cette évolution empiète largement sur la zone forestière et de grandes zones avoisinantes ont été défrichées (TAD, 2011).

II.2.4.2. Pollution

La population riveraine de l'aulnaie en constante croissance ce qui engendre une augmentation des besoins en eau. Corrélativement, les rejets des eaux usées connaissent la même tendance. L'aulnaie constitue malheureusement le réceptacle naturel et obligatoire de ces rejets. Ce phénomène qui devient de plus en plus intense a une incidence grave sur la qualité de l'eau. Deux exutoires d'eaux usées se déversent directement dans l'aulnaie. Ces déversements sont dus à l'altération des conduites d'assainissement de l'établissement pénitentiaire situé au nord et de celles de l'agglomération urbaine situé à l'est de l'aulnaie (TAD, 2011). Les effets sont potentiellement désastreux sur les végétaux et sur la qualité de l'eau ; y compris sur la faune qui y vivent. D'ailleurs, certains éleveurs se sont plaints de la perte de bovins qui ont bu des eaux usées de l'établissement pénitentiaire.

II.2.4.3. Coupe illicite de bois

Le coupe des arbres et arbustes est une pratique courante au sein de l'aulnaie ce qui impacte impérativement le patrimoine floristique. Il s'agit de détruire des arbres pour affourrager le bétail, fabriquer du charbon, ouvrir des pistes pour le bétail et même pour construire des étables.

II.2.4.4. Surpâturage

L'aulnaie de Aïn Khiair est exposée à un pâturage intensif qui affecte la régénération des essences arborées. L'aulne, le frêne et le chêne zeen en souffrent surtout dans la partie ouest de l'aulnaie qui a connu, par ailleurs, une dégradation importante ces dix dernières années par l'action conjuguée, de la sécheresse, des incendies et du surpâturage. Les bovins et les ovins y sont présents tout le long de l'année, leur action est donc permanente (TAD, 2011).

L'action du pâturage impacte la régénération des essences arborées ou buissonnantes d'une manière négative. En effet, la présence des animaux entrave soit la germination des graines par piétinement du sol, soit la croissance des plantules par consommation directe.

II.2.4.5. Sècheresse et les incendies

L'aulnaie d'Ain Khiair a connu plusieurs épisodes de destruction du milieu par le feu et la sécheresse. La conséquence de ces phénomènes est un recul de la strate arborée caducifoliée avec une quasi impossibilité de régénération du fait de la pression de pâturage. Aucune action de préservation de l'aulnaie contre les incendies n'a été entreprise jusqu'aujourd'hui. De fait, la subéraie climacique de la partie ouest, a subi une sévère dégradation à cause des incendies successives qui l'ont affectée ces dernières années. Elle s'accompagne d'une plus grande accessibilité du site aux animaux domestiques et donc d'une plus grande vulnérabilité de la flore spécifique et de la faune associée (TAD, 2011).

III. Méthodologie de travail

Pour répondre aux objectifs énoncés, la méthodologie adoptée repose sur deux principaux axes : l'identification des espèces fourragères ligneuses et l'évaluation de leur valeur nutritionnelle.

III.1. Identification des ligneux fourragers

Afin d'identifier les espèces ligneuses broutées par les ruminants au sein de l'aulnaie nous avons procédé comme suit :

- Des visites des services des forêts présentés par le PNEK pour avoir une vision globale et réelle des différents statuts de la zone d'étude (juridique, administratif et écologique) et de son état actuel vis-à-vis les facteurs anthropiques de dégradation notamment le surpâturage ;
- Des sorties de prospection afin de se familiariser avec les riverains de l'aulnaie notamment les propriétaires des bétails afin de nous permettre d'en suivre.

Nos sorties de prospection étaient très fructueuses, elles nous ont permis d'établir d'étroite relation avec les éleveurs représentés par Mr. JOUIDI Mokhtar ; propriétaire du plus grand troupeau mixte (bovin, ovin et caprin) de la zone et bénéficiaire d'une concession agricole à côté de l'aulnaie. Son aide était précieuse et nous a permis de bien cerner les espèces ligneuses, leur abondance, leur palatabilité et les préférences alimentaires du bétail.

L'identification botanique des espèces ligneuses en l'occurrence est assurée par Mr. GRIRA Abdessalem ; cadre forestier au PNEK et spécialiste dans le domaine.

Au cours de notre travail sur terrain, nous avons distingué trois grandes stations qui se différencient entre elles par l'arbre dominant, cortège associé, type du sol et hygrométrie. Il

s'agit de : station à *Alnus glutinosa*, station à *Quercus suber* et station à *Quercus coccifera* (tableau 8). La première station (station I) renferme 11 espèces fourragères soient près de 60 % suivie par la station à *Quercus suber* avec 9 espèces dont deux sont communes avec la première station. La troisième station (station III) abrite trois espèces seulement dont *Olea europea* et *Calicotome spinosa* sont des espèces communes entre cette station et la deuxième station.

Tableau 8 : Caractérisation des différentes stations de l'aulnaie adapté de Belouahem (2012)

Station	Cortège associé	Type du sol	Hygrométrie
Station I (à <i>Alnus glutinosa</i>)	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Salix alba</i> , <i>Fraxinus angustifolia</i> , <i>Quercus canariensis</i> , <i>Rubia peregrina</i> , <i>Hedera algeriensis</i> , <i>Robus ulmifolius</i> , <i>Myrtus communis</i> , <i>Smilax aspera</i> , <i>Clematis flammula</i> , et <i>Lauris nobulus</i>	Sol de texture argilo-limono sablonneuse	Hygrométrie abondante
Station II (à <i>Quercus suber</i>)	<i>Quercus suber</i> , <i>Erica arborea</i> , <i>Carataegus monogyna</i> , <i>Pistacia lentiscus</i> , <i>Myrtus communis</i> , <i>Smilax aspera</i> , <i>Olea europea</i> , <i>Calicotome spinosa</i> et <i>Phillyrea media</i>	Sol limono-sablonneux	Humidité élevée en hiver et sous ombre
Station III (à <i>Quercus coccifera</i>)	<i>Quercus coccifera</i> , <i>Olea europea</i> et <i>Calicotome spinosa</i> .	Sol limono-sablonneux	Sol sec

A l'issue de cette phase, notre choix est porté sur les ligneux les plus appétant et dont le feuillage est plus abondant. Au total, 19 espèces ligneuses appartenant à 13 familles botaniques ont été recensées (tableau 9). Cela montre que les plantes ligneuses jouent un rôle particulier dans l'alimentation animale au niveau de l'aulnaie. La famille des *Oléacées* compte le plus grand nombre d'espèces fourragères avec celle des *Fagacées* avec 03 espèces chacune. Ainsi, les espèces à feuillage permanent représentent 52,6% des espèces inventoriées, les autres espèces sont caducifoliées perdent leur feuillage la fin de l'automne. En outre, les lianes représentent une phénologie particulière ; hormis *Hedera helix*, *Robus ulmifolius* et *Smilax aspera* qui sont sempervirentes, *Clematis cirrhosa* perd son feuillage en été tandis que le feuillage de *Rubia peregrina* se manifeste qu'au printemps et en été.

Tableau 9 : Abondance du feuillage des différentes espèces ligneuses durant les quatre saisons

Famille	Espèce	Abondance			
		Automne	Hiver	Printemps	Eté
<i>Oléacées</i>	<i>Fraxinus angustifolia</i>	*	0	1	1

	<i>Olea europaea</i>	1	1	1	1
	<i>Phillyrea media</i>	1	1	1	1
Fagacées	<i>Quercus canariensis</i>	*	0	1	1
	<i>Quercus suber</i>	*	0	1	1
	<i>Quercus coccifera</i>	1	1	1	1
Rosacées	<i>Crataegus monogyna</i>	*	0	1	1
	<i>Rubus ulmifolius</i>	1	1	1	1
Bétulacées	<i>Alnus glutinosa</i>	*	0	1	1
Salicacées	<i>Salix alba</i>	*	0	1	1
Renonculacées	<i>Clematis cirrhosa</i>	1	1	1	0
Araliacées	<i>Hedera helix</i>	1	1	1	1
Lauracées	<i>Laurus nobilis</i>	1	1	1	1
Fabacées	<i>Calicotome spinosa</i>	0	1	1	*
Myrtacées	<i>Myrtus communis</i>	1	1	1	1
Éricacées	<i>Erica arborea</i>	1	1	1	1
Anacardiaceae	<i>Pistacia lentiscus</i>	1	1	1	1
Rubiaceae	<i>Rubia peregrina</i>	0	0	1	1
Smilacaceae	<i>Smilax aspera</i>	1	1	1	1

* : feuillage peu abondant ; 1 : feuillage très abondant ; 0 : feuillage absent

La palatabilité des espèces ligneuses broutées par les ruminants (bovins, ovins et caprins) a été évaluée sur la base des observations et des déclarations des pasteurs, qui accompagnent quotidiennement leurs troupeaux et possèdent une connaissance approfondie des préférences alimentaires de leurs animaux. Leur expérience de terrain et leur familiarité avec le comportement des ruminants ont permis d'identifier les espèces les plus ou moins palatables pour chaque catégorie. Bien que qualitative, cette méthode repose sur une appréciation visuelle et pratique des choix alimentaires des animaux dans leur environnement naturel (Le Houerou, 1980).

Les données, présentées dans le tableau 10, révèlent une variabilité notable de la palatabilité selon le type de ruminant. Parmi les espèces recensées, sept sont hautement palatables pour toutes les catégories : *Fraxinus angustifolia*, *Olea europaea*, *Phillyrea media*, *Salix alba*, *Clematis cirrhosa*, *Myrtus communis* et *Calicotome spinosa*. En revanche, dix espèces sont peu palatables pour les bovins et les ovins. Les caprins, quant à eux, se montrent peu sélectifs et consomment la plupart des espèces pour répondre à leurs besoins. Il est à noter que *Calicotome spinosa*, bien que très recherchée par les ruminants, est moins consommée par les bovins et les ovins en raison de la présence d'épines.

Tableau 10 : Appétences des différentes espèces ligneuses pour les ruminants

Espèce	Palatabilité		
	Bovin	Ovin	Caprin
<i>Fraxinus angustifolia</i>	***	***	***
<i>Olea europaea</i>	***	***	***
<i>Phillyrea media</i>	***	***	***
<i>Quercus canariensis</i>	*	*	**
<i>Quercus suber</i>	*	*	**
<i>Quercus coccifera</i>	*	*	*
<i>Crataegus monogyna</i>	**	**	***
<i>Rubus ulmifolius</i>	*	**	***
<i>Alnus glutinosa</i>	*	*	**
<i>Salix alba</i>	***	***	***
<i>Clematis cirrhosa</i>	***	***	***
<i>Hedera helix</i>	*	*	***
<i>Laurus nobilis</i>	*	*	*
<i>Calicotome spinosa</i>	***	***	***
<i>Myrtus communis</i>	***	***	***
<i>Erica arborea</i>	*	*	***
<i>Pistacia lentiscus</i>	*	*	**
<i>Rubia peregrina</i>	*	*	**
<i>Smilax aspera</i>	**	**	***

* : espèce peu palatable ; ** : espèce palatable ; *** : espèce hautement palatable

III.2. Échantillonnage

Les espèces de ligneux fourragers recensées ont toutes été échantillonnées sur le terrain. Cependant, en raison des contraintes liées aux manipulations au laboratoire, seuls les échantillons de treize espèces ont pu être analysées. Parmi ces espèces figurent cinq lianes (*Rubus ulmifolius* (Schott, 1818), *Clematis cirrhosa* (Linnaeus, 1753), *Hedera helix* (Linnaeus, 1753), *Rubia peregrina* (Linnaeus, 1753) et *Smilax aspera* (Linnaeus, 1753)), quatre arbres (*Fraxinus angustifolia* (Vahl, 1804), *Quercus canariensis* (Willdenow, 1809), *Alnus glutinosa* (Gaertner, 1791), *Salix alba* (Linnaeus, 1753)) et quatre arbustes

(*Phillyrea media* (Linnaeus, 1753), *Quercus coccifera* (Linnaeus, 1753), *Myrtus communis* (Linnaeus, 1753), *Erica arborea* (Linnaeus, 1753)). L'échantillonnage a lieu durant les quatre saisons de l'année 2017-2018. Cependant, toutes les espèces d'arbres caducifoliées en plus de *Quercus coccifera* seront absentes en hiver. Ainsi, *Rubia peregrina* était présente lors de deux saisons seulement soit : le printemps et l'été. Pour chaque espèce échantillonnée, les feuilles et les brindilles tendres soit les parties consommées par les ruminants ont été récoltés.

Les échantillons des espèces non analysées concernent : *Olea europaea* (Linnaeus, 1753), *Quercus suber* (Linnaeus, 1753), *Crataegus monogyna* (Jacquin, 1775), *Laurus nobilis* (Linnaeus, 1753), *Calicotome spinosa* (Link, 1831) et *Pistacia lentiscus* (Linnaeus, 1753)

Les échantillons prélevés d'au moins 10 pieds afin d'obtenir une aliquote représentatif, sont regroupés en un échantillon global, séchés dans une étuve ventilée à 45°C pendant 48 h afin d'éviter la dénaturation des substrats, broyés à une grille de 1mm et conservés dans des flacons hermétiquement fermés à l'abri de l'humidité pour les analyses ultérieures.

III.2. Détermination de la valeur nutritionnelle

Afin de déterminer la valeur nutritive des espèces ligneuses étudiées, on a effectué les analyses de la composition chimique primaire et secondaire, la digestibilité *in vitro* et l'effet du PEG sur la digestibilité des différents substrats. Les analyses sont effectuées en *duplicata* et exprimées au pourcentage de la matière sèche. Les différentes analyses et expérimentations sont réalisées au sein du Laboratoire des Ressources Sylvo- pastorale siégé à l'Institut Sylvopastoral de Tabarka (ISPT), Tunisie.

III.2.1. Analyse de la composition chimique primaire

Les paramètres analysés sont les suivants : la Matière Sèche (MS), Matière Minérale (MM), Matière Azotée Totale (MAT), et les constituants pariétaux : NDF (Neutral Detergent Fiber), ADF (Acid Detergent Fiber) et ADL (Acide Detergent Lignin).

III.2.1. 1. La Matière sèche

La matière sèche a été analysée selon la procédure de l'AOAC (1990). Il s'agit de mettre l'échantillon dans une étuve ventilée réglée à 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) pendant 24 h, refroidir dans un dessiccateur puis peser.

$$\text{La teneur en MS en \%} = (\text{Poids de l'échantillon après dessiccation} / \text{Poids de l'échantillon humide}) \times 100$$

III.2.1. 2. La Matière minérale

Ce paramètre a été analysée selon la procédure de l'AOAC (1990). Il s'agit de calciner l'échantillon dans un four à moufle pendant 4 heures à une température de 500°C. Refroidir dans un dessiccateur puis peser pour obtenir le poids des cendres.

$$\text{La teneur en MM (\%MS)} = (\text{Poids des cendres} / \text{Poids de l'échantillon} \times \%MS) \times 100$$

III.2.1.3. La Matière azotée totale

La matière azotée totale a été dosée par la méthode de Kjeldahl (ISO, 2009). La matière organique contenue dans l'échantillon est minéralisée par l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 95-97 %), en présence d'un catalyseur. L'azote organique est réduit en ammoniac sous forme de sulfate d'ammonium ; une distillation du digestat par neutralisation avec la soude (NaOH 40%) permet le dégagement de l'ammoniac qui, récupéré dans de l'acide borique (H_3BO_3 0,2 M) et enfin le titrage de l'ammoniac libéré par l'acide sulfurique 0,1 N.

$$\text{La teneur en Azote total N (\%)} = (\text{Volume de } \text{H}_2\text{SO}_4 / \text{Poids de l'échantillon} \times 0,14)$$

$$\text{La teneur en MAT (\%MS)} = \%N \times 6,25 \times \%MS$$

III.2.1.4. Les constituants pariétaux

Les composantes de la fraction pariétale ont été déterminées selon la méthode décrite par Van Soest *et al.* (1991) sous Fibertec©.

La fraction NDF correspond à la teneur en parois totales des fourrages (cellulose, hémicelluloses et lignine). Elle est estimée via le traitement de l'échantillon par une solution dite NDS (Neutral Detergent solution) qui permet de solubiliser à pH neutre des protéines, des substances pectiques et les polymères de glucose non cellulosique.

La fraction ADF correspond à la teneur en lignocellulose (cellulose et lignine). Le résidu sec récupéré, après analyse NDF est traité par la solution ADS (Acid Detergent Solution) qui permet d'hydrolyser à chaud les constituants cytoplasmiques, les hémicelluloses et les protéines.

L'estimation de la fraction ADL comporte un traitement à l'acide sulfurique concentré. Le résidu correspond, en plus des cendres, à la lignine brute. Le résidu sec récupéré, après analyse ADF, est traité par l'acide sulfurique concentré à 72% pendant trois heures. Le résidu obtenu après rinçage à l'eau distillée bouillante, lavage à l'acétone sera incinéré pour corriger la teneur en ADL par rapport aux cendres.

III.2.2. Analyse de la composition chimique secondaire

Le dosage concerne essentiellement : les Phénols Totaux (PPT), les Tanins Totaux (TT) et les Tanins Condensés (TC).

III.2.2.1. Les Phénols Totaux

Le dosage des polyphénols totaux a été réalisé selon la méthode décrite par Makkar *et al.* (1993). Cette méthode est basée sur le principe de l'oxydoréduction et l'utilisation du réactif Folin Ciocalteu, ce qui se traduit par l'apparition d'une coloration bleu foncé. La concentration en polyphénols totaux contenus dans l'extrait est calculée en se référant à une courbe d'étalonnage utilisant l'acide tannique comme étalon. Les résultats obtenus sont exprimés en g équivalent acide tannique (EAT)/Kg de matière sèche.

III.2.2.2. Les Tanins Totaux

La méthode consiste à l'utilisation d'une matrice insoluble PolyVinyl PolyPyrrolidone (PVPP) ayant l'affinité de précipiter les phénols tanniques et les distinguer de ceux non tannique. Le dosage après traitement avec le PVPP ne donne que les phénols non tanniques. La différence entre la valeur totale des phénols avant et après le traitement (PVPP) donne la mesure des tanins totaux (Makkar, 2003a). Les résultats obtenus sont exprimés en g équivalent acide tannique (EAT)/Kg de matière sèche.

$$\text{Tanins Totaux} = \text{Phénols totaux} - \text{Phénols qui ne précipitent pas avec PVPP}$$

III.2.2.3. Les Tanins Condensés

Les tanins condensés ont été déterminés par la méthode Butanol-HCl en présence d'un réactif ferrique selon la technique de Porter *et al.* (1985). Les résultats sont exprimés en g équivalent leucocyanidine (EAL)/ Kg de matière sèche.

III.2.3. Etude de la digestibilité *in vitro*

La technique de digestibilité *in vitro* est une simulation de la digestion des aliments dans le rumen. Il permet d'étudier la stœchiométrie et la cinétique de la fermentation du rumen dans les systèmes batch. Cette technique a été développée par Menke & Steingass (1988).

III.2.3.1. Collecte du jus de rumen

Le contenu ruminal a été recueilli à partir des caprins adultes pâturant sur les parcours forestiers de Tabarka (Tunisie) et abattus dans l'abattoir municipale de la même zone, immédiatement après éviscération dans un thermos préchauffé (39°C) et transféré rapidement au laboratoire. Le contenu ruminal (mélange de jus et de particules alimentaires) est

immédiatement filtré à travers trois couches de gaze chirurgicale. Le filtrat obtenu correspond au jus de rumen. La salive artificielle, préalablement préparée selon la méthode décrite par McDougall (1948), servait de tampon (pH compris entre 6,9 et 7,1) et de source de sels minéraux et d'oligoéléments pour les microorganismes du rumen.

III.2.3.2. Essai de digestibilité *in vitro*

Dans une seringue en verre d'une capacité de 100 ml, son extrémité est reliée à un tube en caoutchouc souple de 5 cm de longueur et fermée par un bouchon en plastique pour empêcher la fuite des gaz produits lors de la fermentation. Ajouter 0,3 g de substrat, 20 ml de salive artificielle, 10 ml de jus de rumen filtré. Pour chaque échantillon deux seringues ont été incubées et deux autres dans lesquelles seul le jus de rumen et la salive artificielle ont été introduits ont servi de témoin. Une fois l'inoculum placé dans la seringue, l'air est expulsé, et elles sont rapidement fermées par des pistons pré-lubrifiés à la vaseline pour faciliter leur mouvement et empêcher les gaz de s'échapper. Placer ensuite la seringue fermée dans un bain-marie à 39 °C. Les lectures du volume des gaz avec l'agitation du contenu de la seringue pour assurer l'homogénéité sont prises périodiquement toutes les 2 heures pendant 72 heures. La production nette de gaz aux différents moments est exprimée en ml/seringue.

Les paramètres caractéristiques de la cinétique de production de gaz sont prédits suivant la régression non linéaire par l'utilisation de la procédure NLINE du SAS (2002) selon le modèle exponentiel proposé et modélisé à la production de gaz total par Orskov et Mc Donald (1979).

$$Y = a + b (1 - e^{-ct})$$

Avec : y : gaz produit à l'instant t ; a : production de gaz à partir de la fraction immédiatement soluble (ml) ; b : production de gaz à partir de la fraction insoluble (ml) ; c : vitesse de production de gaz (ml/h) ; t : le temps d'incubation (h).

La digestibilité de la matière organique (dMO) selon Menke et Steingass (1988), la concentration en acide gras volatiles (AGV) et la teneur en énergie métabolisable (EM) selon Getachew *et al.* (1998) ont été déterminées à partir de la production de gaz à 24 heure d'incubation

$$\text{dMO (\%)} = 14,88 + 0,889 \text{ GP} + 0,45 \text{ MAT} + 0,0651 \text{ MM}$$

$$\text{EM (MJ/kg MS)} = 2,2 + 0,1357 \text{ GP} + 0,0057 \text{ MAT} + 0,000859 \text{ MAT}$$

$$\text{AGV (mmol/seringue)} = 0,0239 \text{ GP} - 0,0601$$

Avec : GP : le volume du gaz produit (ml/ 0,3g MS) à 24 heures d'incubation ; MAT : matière azotée totale en (g/kg MS) ; MM : matière minérale en (g/kg MS).

III.2.3.3. Effet du PEG sur la production de gaz et de méthane

Dans le but de déterminer la production de gaz et d'évaluer l'impact des tanins sur la production *in vitro* de gaz, la technique décrite plus haut a été utilisée. Ainsi, 0,3 g de chaque échantillon a été incubé dans deux séries différentes avec quatre seringues par échantillon et par série, soit : deux seringues incubées sans ajout de PEG et deux autres incubées avec addition de 0,2 g de PEG par seringue. Après 24 h d'incubation on repère le déplacement du piston de chaque seringue qui correspond au volume de gaz produit. Après chaque incubation on injecte 4 ml de NaOH (10 N) dans chaque seringue, ce dernier absorbe le CO₂, ce qui entraîne la rétraction du piston, la différence des volumes représente la quantité de méthane produite.

L'activité biologique des tanins a été calculée en faisant le rapport entre la production du gaz avec PEG et celui sans PEG pour le même échantillon mesuré après 24 heures d'incubation.

III.3. Traitement statistique

Les différentes analyses statistiques ainsi que les visualisations graphiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R version 4.4.1 (R Core Team, 2024).

Pour chaque catégorie d'espèces étudiées soit les lianes, les arbres en plus des arbustes, les résultats ont été soumis à une analyse de la variance selon la procédure GLM pour extraire l'effet de l'espèce, de la saison et de leur interaction. Les comparaisons des moyennes a été effectuée à l'aide du test des rangs multiples avec la fonction `cld` du package `emmeans`.

Equation du modèle statistique :

$$Y_{ij} = \mu + A_i + S_j + AS_{ij} + E_{ij}$$

Avec :

Y_{ij} : Paramètre mesuré

μ : Moyenne générale

A_i : Effet de l'ième espèce

S_j : Effet de la jème saison

AS_{ij} : Effet de l'interaction de l'ième espèce avec la jème saison

E_{ij} : Erreur résiduelle

Des graphiques en boîtes à moustaches ont été utilisés pour visualiser la variabilité inter espèce et les tendances saisonnières pour chaque paramètre étudié.

En revanche, des modèles linéaires mixtes généralisés (GLMM) ont été adoptés afin de cerner l'effet de la catégorie des ligneux (lianes, arbustes, arbres), l'effet de la saison (printemps, été, automne et hiver) en plus de l'interaction sur les différents paramètres étudiés de la valeur nutritionnelle. Ces modèles sont particulièrement adaptés pour analyser des données hiérarchiques, comme dans le cas présent où les mesures sont effectuées sur différentes espèces au sein de chaque saison.

Alors, pour chaque paramètre de valeur nutritionnelle, la construction d'un modèle de GLMM était de rigueur et cela selon la formule suivante :

$$\text{Variable} \sim \text{Catégorie} * \text{Saison} + (1 | \text{Espèce:Saison})$$

a - Structure du modèle

- **Effets fixes**

- **Catégorie** : Trois niveaux (lianes, arbustes, arbres).
- **Saison** : Quatre niveaux (printemps, été, automne, hiver).
- **Interaction Catégorie × Saison** : Permet d'évaluer si l'effet de la catégorie varie selon la saison.

- **Effets aléatoires**

- **Espèce : Saison** : Cet effet aléatoire modélise la variabilité entre les espèces et au sein de chaque saison, capturant ainsi la structure hiérarchique des données (espèces nichées dans les saisons).

- **Distribution des erreurs**

Les erreurs résiduelles suivent une distribution normale (modèle gaussien), adaptée aux variables continues étudiées (ex : pourcentage de matière sèche, teneur en fibres).

b - Estimation des paramètres et critères d'ajustement

Les paramètres des modèles ont été estimés par maximum de vraisemblance restreinte (REML) *via* la fonction `'glmmTMB'`. Cette méthode est appropriée pour les modèles linéaires mixtes lorsqu'on veut obtenir des estimations précises des composantes de variance (effets aléatoires).

Les résultats du modèle incluent :

- Estimations des coefficients pour les effets fixes (catégorie, saison, interaction).
- Erreur standard des coefficients pour évaluer la précision des estimations.
- Valeurs p pour tester la significativité des effets fixes.
- Effets aléatoires estimés, avec leur variabilité entre les espèces.

c - Tests de significativité

Pour évaluer l'importance des effets fixes dans les modèles, une analyse de la déviance a été effectuée à l'aide de la fonction ``Anova`` du package ``car``. Cette analyse est basée sur une ANOVA de type II, qui permet de tester l'effet de chaque facteur (catégorie, saison, interaction) en tenant compte des autres.

• ANOVA de type II

Ce test est utilisé pour comparer l'ajustement des modèles en incluant ou en excluant chaque facteur. Il permet de tester l'effet de chaque facteur indépendamment des autres, en utilisant une décomposition de la variance des résidus.

• Valeurs p

Les valeurs p obtenues pour chaque facteur (catégorie, saison, interaction) nous permettent de déterminer si ces effets sont significatifs, c'est-à-dire s'ils ont une influence importante sur les paramètres nutritionnels étudiés.

d - Visualisation des résultats

Pour faciliter l'interprétation des résultats, deux types de graphiques ont été générés à l'aide des packages ``tidyverse``, ``ggplot2``, ``dplyr``, ``ggthemes`` et ``tidyr`` à savoir :

- Graphiques en forêt (Forest Plots) : ils montrent les estimations des effets fixes (catégorie, saison, interaction) avec des intervalles de confiance à 95%. Ils permettent de visualiser la magnitude et la direction des effets.
- Graphiques des effets aléatoires : ils montrent les effets aléatoires estimés pour chaque espèce dans chaque saison. Ils permettent de visualiser la variabilité entre les espèces pour un paramètre donné, en fonction de la saison.

En fin, pour établir une typologie des espèces ligneuses étudiées en fonction de leur valeur nutritionnelle une approche statistique multivariée a été adoptée : une Analyse Factorielle Multiple (AFM) suivie d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

a - Analyse Factorielle Multiple (AFM)

• Préparation des données

Cette analyse a été effectuée en utilisant le package **'FactoMiner'**. Elle a été utilisée pour explorer la structure multidimensionnelle des données, en tenant compte des différents groupes de variables actives :

- Composition chimique (MS, MM, MO et MAT)
- Composition pariétale (NDF, ADF, ADL et CB)
- Composition phénolique (PPT, TT et TC)
- Paramètres de fermentation *in vitro* (Gaz total, dMO, CH₄ et ABT).

En plus de deux groupes de variables qualitatives supplémentaires à savoir :

- Catégories botaniques (lianes, arbres et arbustes)
- Saisons (automne, hiver, printemps et été)

Les données ont été standardisées (centrage et réduction) pour assurer une contribution équitable de chaque variable. L'AFM a permis de réduire la dimensionnalité des données tout en préservant les relations entre les groupes de variables. Les deux premières dimensions, expliquant la plus grande partie de la variabilité, ont été retenues pour l'interprétation.

• Validation de l'AFM

Avant d'interpréter l'AFM, il était nécessaire de justifier notre choix, pour cela une validation a été réalisée selon deux critères complémentaires :

- Analyse des coefficients de corrélation canoniques en examinant les contributions des groupes de variables pour vérifier leur structuration sur les dimensions principales.
- Examen de la structure des valeurs propres en analysant le graphique des valeurs propres pour identifier un "point de coude" pour justifier le nombre de dimension à retenir.

• Diagnostique des résultats

L'exécution de l'AFM nous a permis de ressortir :

- Pour les groupes de variables :
 - Contributions, coordonnées et $\cos^2$: mesurent l'importance, la position et la qualité de représentation des groupes de variables sur les axes factoriels.
 - Coefficients Lg : mesurent la liaison entre les groupes de variables.
 - Coefficients RV : quantifient la similarité ou la corrélation entre deux groupes de variables (Voir Annexe 1).

- Pour les variables quantitatives :

- Contributions, coordonnées et $\cos^2$: indiquent l'importance, la position et la qualité de représentation des variables quantitatives sur les axes factoriels (Voir Annexe 2).

- Pour les modalités qualitatives supplémentaires :

- Contributions et coordonnées : mesurent l'importance et la position des modalités qualitatives (saisons, catégories taxonomiques) sur les axes factoriels.

- *V-test* : évalue la qualité de représentation des modalités qualitatives. Un *V-test* supérieur à 1,96 indique une représentation significative (Voir Annexe 3).

- Pour les individus :

- Contributions, coordonnées et $\cos^2$: Mesurent l'importance, la position et la qualité de représentation des individus (espèces) sur les axes factoriels (Voir Annexe 4).

- **Visualisation graphique**

A l'issue de l'AFM plusieurs graphiques ont été générés en utilisant les packages :

``Factoextra`` et ``ggplot2``

- * Graphique de groupes des variables sur le plan factoriel,

- * Cercle de corrélation des variables quantitatives,

- * Graphique des points partiels des modalités qualitatives supplémentaires,

- * Graphique des individus selon la catégorie taxonomique,

- * Graphique des individus selon la saison

b - Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

La CHA a été appliquée pour regrouper les espèces en clusters homogènes à partir des coordonnées des individus sur les deux premières dimensions de AFM. Les étapes suivantes ont été suivies :

- **Préparation des données**

- Les coordonnées des individus sur les deux premières dimensions de l'AFM ont été extraites.

- Une matrice de distances euclidiennes a été calculée à partir de ces coordonnées.

- **Classification Hiérarchique**

- La méthode de ``Ward.D2`` a été utilisée pour minimiser la variance intra-cluster tout en maximisant la variance inter-cluster.

- Un dendrogramme a été généré pour visualiser la structure hiérarchique des clusters.

- **Découpage des clusters**

- Le dendrogramme a été découpé en quatre clusters en utilisant la fonction ``cutree``.

- **Validation des clusters**

- L'indice de silhouette a été calculé pour chaque cluster à l'aide du package `'cluster'`.
- Les largeurs moyennes de silhouette ont été utilisées pour évaluer la cohésion interne des clusters.

- **Caractérisation des clusters**

Afin de décrire les différentes classes issues de la CHA, différentes sorties numériques ont été extraites

- **Relation entre les dimensions et la partition des classes**

Évaluer l'importance des dimensions factorielles issues de AFM dans la structuration des clusters, en mesurant leur contribution à la différenciation des classes à l'aide de l'indice Eta^2 .

- **Description des classes par les axes**

Déterminer la position des clusters sur les dimensions principales afin d'identifier les contrastes et les similitudes entre les groupes, en utilisant les valeurs des tests de significativité ($V.test$).

- **Relation entre la partition et les variables quantitatives**

Quantifier la contribution des variables quantitatives à la différenciation des clusters, en utilisant l'indice Eta^2 pour mesurer leur influence.

- **Relation entre la partition et les variables qualitatives supplémentaires**

Analyser l'effet des variables qualitatives (catégories botaniques, saisons) sur la structure des clusters, en identifiant les modalités significatives à l'aide des tests de spécificité ($V.test$).

- **Profilage des clusters**

Décrire les caractéristiques nutritionnelles et botaniques spécifiques de chaque cluster en fonction des variables quantitatives et qualitatives, afin de mieux comprendre les profils des groupes identifiés.

- **Les individus parangons des clusters**

Identifier les individus les plus représentatifs de chaque cluster en fonction de leur proximité au centre de gravité du groupe, afin de fournir des exemples typiques illustrant les caractéristiques majeures des clusters.

- **Les individus spécifiques des clusters**

Mettre en évidence les individus présentant des caractéristiques extrêmes ou atypiques au sein de chaque cluster, afin de renforcer l'identité des groupes et de comprendre leur diversité interne.

- **Visualisation graphique**

A l'aide des package `'Factoextra'`, `'ggplot 2'` et `'ggrepel'`, trois graphiques ont été générés :

- * Un dendrogramme qui permet d'identifier les niveaux de similarité entre les individus et de visualiser la structure de regroupement des espèces issues de la CHA.
- * Une projection des clusters sur le plan factoriel permet de visualiser la séparation des clusters et leur position relative dans l'espace factoriel
- * Une projection des clusters avec annotations pour le profilage des espèces selon leurs caractéristiques nutritionnelles

Partie III

Résultats & Discussion

I. Détermination de la valeur nutritionnelle des espèces selon les catégories

I.1. Valeur nutritionnelle des arbustes

I.1.1. Composition chimique primaire

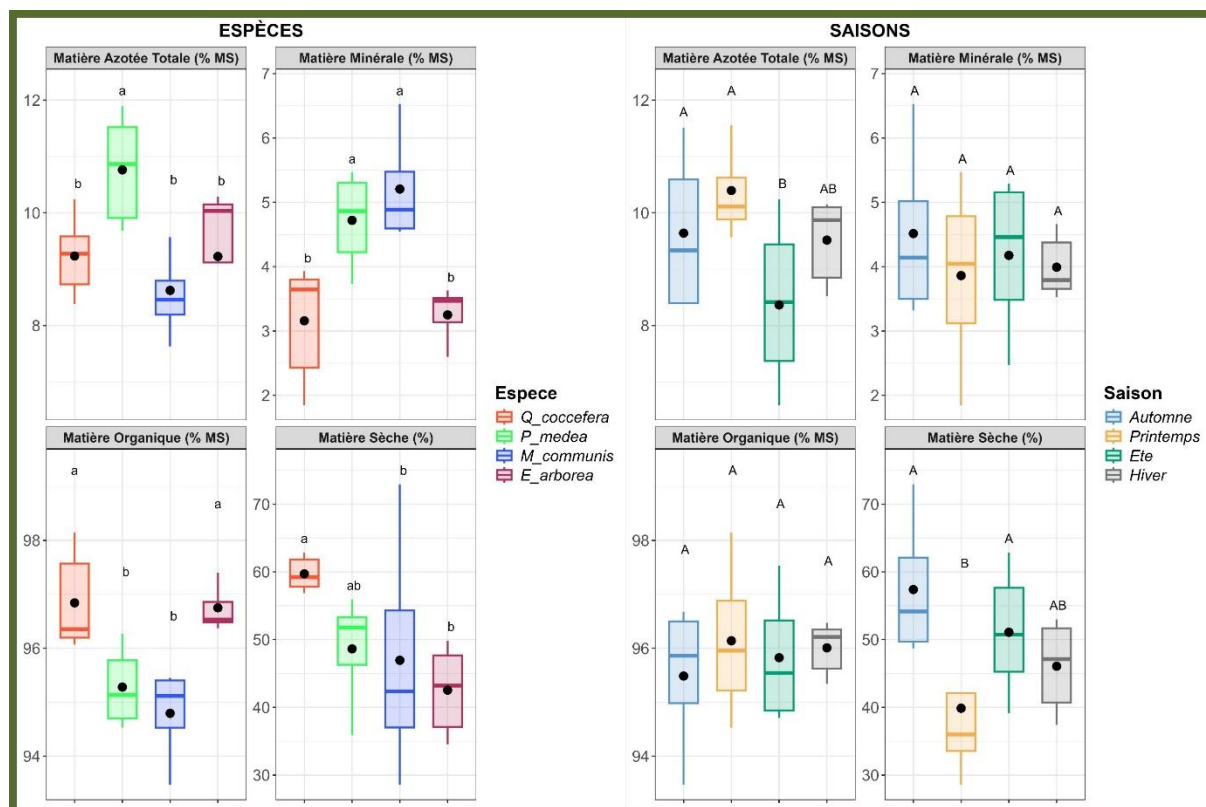
Une différence significative ($p < 0,001$) est observée pour l'interaction entre les espèces et la saison de prélèvement sur les paramètres de la composition chimique primaire (tableau 11). Les arbustes étudiés montrent généralement des teneurs élevées en MS qui oscillent entre 29,59 et 71,86 % chez *M. communis* en automne et au printemps respectivement. *Q. coccifera* est la plus pourvue en MS avec une moyenne saisonnière qui dépasse 58% alors qu'au printemps, toutes les espèces- à l'exception de *Q. coccifera* présentent les taux les plus faibles avec une moyenne de 34%. La figure 11 met en évidence cette particularité de *Q. coccifera*, révélant cependant une teneur en MS remarquablement élevée et stable à travers les saisons.

Tableau 11 : Composition chimique primaire des arbustes étudiés selon la saison

Espèce	Saison	MS	MO	MM	MAT
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	58,3 ± 1,32	96,28 ± 0,3	3,72 ± 0,3	8,48 ± 0,14
	Printemps	58,04 ± 1,66	98,04 ± 0,16	1,96 ± 0,16	9,95 ± 0,41
	Été	62,79 ± 0,1	96,21 ± 0,02	3,8 ± 0,02	9,28 ± 0,12
<i>Phillyrea media</i>	Automne	50,15 ± 1,13	95,56 ± 0,13	4,44 ± 0,13	11,5 ± 0,02
	Hiver	52,8 ± 0,28	96,21 ± 0,08	3,79 ± 0,08	9,87 ± 0,11
	Printemps	36,52 ± 0,87	94,6 ± 0,09	5,4 ± 0,09	11,72 ± 0,24
<i>Myrtus communis</i>	Automne	55,06 ± 1,24	94,76 ± 0,06	5,24 ± 0,06	9,96 ± 0,39
	Été	71,86 ± 1,52	93,5 ± 0,04	6,51 ± 0,03	8,39 ± 0,02
	Hiver	47,12 ± 2,38	95,4 ± 0,08	4,61 ± 0,08	8,53 ± 0,01
<i>Erica arborea</i>	Printemps	29,59 ± 1,43	95,41 ± 0,01	4,59 ± 0,01	9,94 ± 0,52
	Été	39,22 ± 0,06	94,88 ± 0,02	5,12 ± 0,02	7,63 ± 0
	Automne	49,27 ± 0,82	96,61 ± 0,11	3,4 ± 0,11	10,19 ± 0,14
<i>Erica arborea</i>	Hiver	38,28 ± 1,21	96,42 ± 0,07	4,44 ± 0,13	10,15 ± 0
	Printemps	35,32 ± 1,11	96,51 ± 0,03	3,79 ± 0,08	9,97 ± 0,01
	Été	47,29 ± 0,03	97,47 ± 0,09	5,4 ± 0,09	6,59 ± 0,01
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

MS : Matière Sèche (%); MO : Matière Organique (%MS); MM : Matière Minérale (%MS); MAT : Matière Azotée Totale (%MS);

Les teneurs en MM affichent des valeurs assez faibles pivotant autour une moyenne de 4,5%MS. Elles varient de 1,96 à 6,51 %MS, correspondant respectivement aux valeurs les plus basses et les plus élevées de *Q. coccifera* et *M. communis*. Cette observation est corroborée par la figure 11, qui illustre notamment une plus grande variabilité de la teneur en MM pour *M. communis*. En contrepartie, les teneurs en MO sont élevées et complémentaires aux valeurs de MM. *Q. coccifera* présente les teneurs en MO les plus élevées, atteignant 98,04% MS au printemps, tandis que *M. communis* affiche la plus grande variabilité saisonnière, allant de 93,5% MS en automne à 95,41% MS au printemps. *E. arborea* maintient des niveaux de MO constamment élevés, avec un pic à 97,47% MS observé en été.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 11 : Boxplots des paramètres de la composition chimique des arbustes

De même, le contenu enregistré en MAT ne dépasse guère les 11%MS. Ainsi, les teneurs les plus élevées sont détectées chez *P. media* en automne et au printemps (11,5 et 11,72%MS respectivement) suivies par *E. arborea* en automne et en hiver (10,19 et 10,15%MS respectivement). Cette dernière affiche la teneur la plus faible en azote et cela en été avec seulement 6,59%MS. La figure 11 souligne clairement les fluctuations saisonnières en MAT, particulièrement une chute spectaculaire en été observée chez *E. arborea*

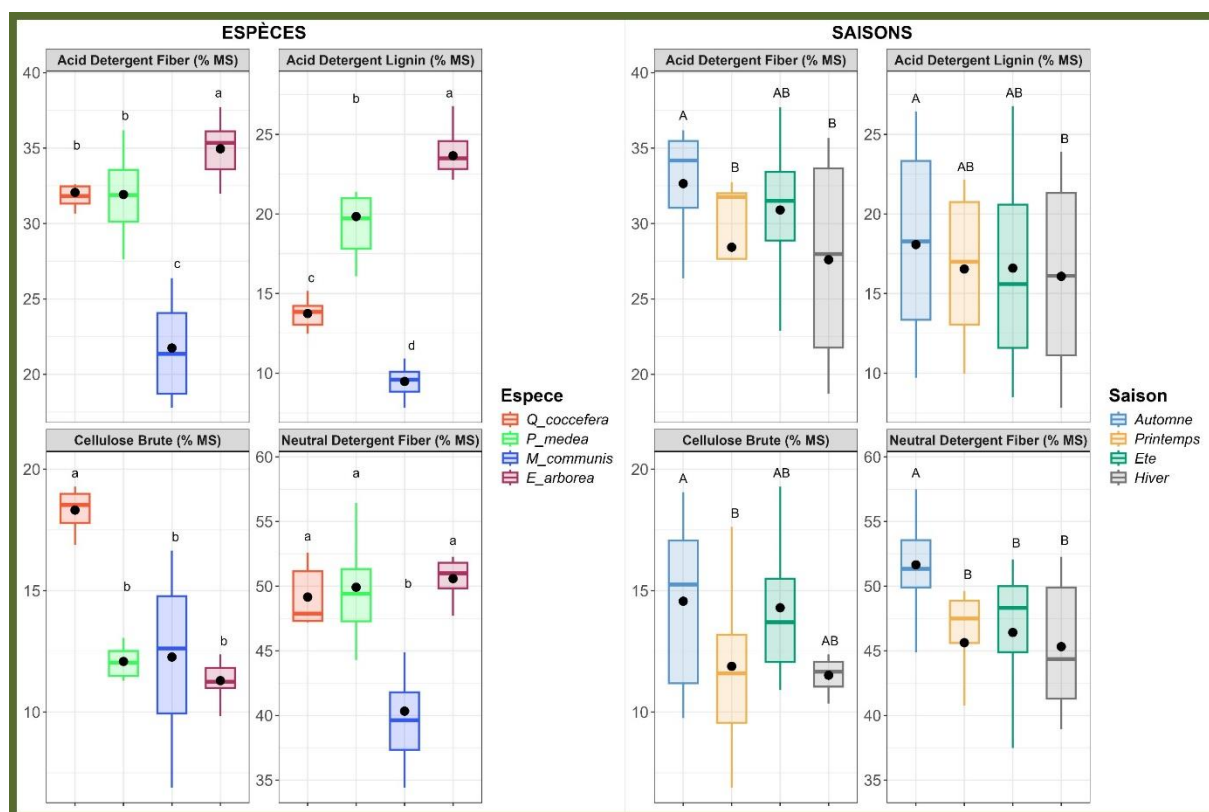
I.1.2. Composition en parois cellulaires

Les teneurs en parois cellulaires des arbustes étudiés se caractérisent par des concentrations élevées, avec une importante variabilité due essentiellement aux interactions significatives ($p < 0,001$) entre les espèces et les saisons de prélèvement (tableau 12). Les valeurs les plus élevées en NDF sont observées en automne, dépassant en moyenne 50% MS. Comparativement aux autres espèces, *M. communis* se démarque par ses teneurs globalement plus faibles en fibres, notamment une moyenne saisonnière en NDF de 40% MS, ainsi que les concentrations les plus basses en ADF et ADL (19,27% et 8,66% MS en hiver, 18,24% et 10,44% MS au printemps, respectivement).

Tableau 12 : Composition en parois cellulaires des arbustes étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	NDF	ADF	CB	ADL
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	52,35 ± 0,36	33,41 ± 1,15	18,67 ± 0,54	14,75 ± 0,6
	Printemps	47,25 ± 0,06	31,11 ± 0,64	17,26 ± 0,52	13,85 ± 0,13
	Été	47,87 ± 0,72	31,66 ± 0,59	19,03 ± 0,36	12,64 ± 0,23
<i>Phillyrea media</i>	Automne	56,96 ± 0,75	36,1 ± 0,12	12,18 ± 3,44	23,91 ± 3,56
	Hiver	44,35 ± 0,09	27,98 ± 0,49	11,87 ± 0,45	16,11 ± 0,04
	Printemps	49,46 ± 0,25	32,37 ± 0,52	11,6 ± 0,43	20,77 ± 0,09
<i>Myrtus communis</i>	Automne	46,91 ± 2,88	26,37 ± 0,01	16,28 ± 0,53	10,09 ± 0,54
	Hiver	39,63 ± 0,97	19,27 ± 0,78	10,62 ± 0,37	8,66 ± 1,15
	Printemps	37,59 ± 4,49	18,24 ± 0,61	7,8 ± 1,28	10,44 ± 0,66
<i>Erica arborea</i>	Automne	50,4 ± 0,28	34,7 ± 0,82	11,14 ± 0,16	23,56 ± 0,65
	Hiver	51,99 ± 0,39	35,55 ± 0,18	12,07 ± 0,42	23,47 ± 0,6
	Printemps	48,22 ± 0,74	31,99 ± 0,03	10,9 ± 1,49	21,1 ± 1,46
	Été	51,73 ± 0,49	37,57 ± 0,17	11,08 ± 0,24	26,49 ± 0,41
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

NDF: Neutral Detergent Fiber (%MS); ADF: Acid Detergent Fiber (%MS); ADL: Acid Detergent Lignin (%MS); CB: Cellulose Brute (%MS)



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 12 : Boxplots de la composition en parois cellulaires des arbustes

En revanche, *E. arborea* se distingue par ses teneurs élevées en ADF et ADL, atteignant leur apogée en été (37,57% et 26,49% MS respectivement), avec des moyennes saisonnières de

35% et 23,65% MS. Cette tendance à des valeurs plus élevées en été s'observe également pour la CB chez *Q. coccifera*, qui présente les concentrations les plus importantes, culminant à 19,03% MS.

La variabilité saisonnière de la CB est particulièrement prononcée chez *M. communis*, oscillant de 7,8% MS au printemps à 16,28% MS en automne. En contraste, *P. media* et *E. arborea* montrent une relative stabilité de leur teneur en CB au fil des saisons, se maintenant respectivement autour de 12% et 11% MS (figure 12).

I.1.3. Composition en métabolites secondaires

Les concentrations en métabolites secondaires sont affectées significativement ($p < 0,001$) par les interactions entre les espèces les saisons de prélèvement (tableau 13) comme l'illustrent les différentes tendances visibles dans la figure 13. L'été se distingue des autres saisons par les concentrations les plus élevées. Parmi les espèces étudiées, *M. communis* se démarque par les teneurs les plus élevées en PPT et en TT, avec des moyennes saisonnières atteignant respectivement 134,18 et 108 g EAT/kg MS.

À l'inverse, *P. media* se révèle être l'espèce la plus pauvre en ces composés, avec des concentrations moyennes de 46 et 34,22 g EAT/kg MS. En outre, cette espèce affiche les teneurs les plus faibles en TC, variant de 0,02 g EAL/kg MS au printemps à 0,29 g EAL/kg MS en hiver, ce qui est bien illustré par la figure où cette espèce montre des valeurs inférieures comparativement aux autres espèces étudiées.

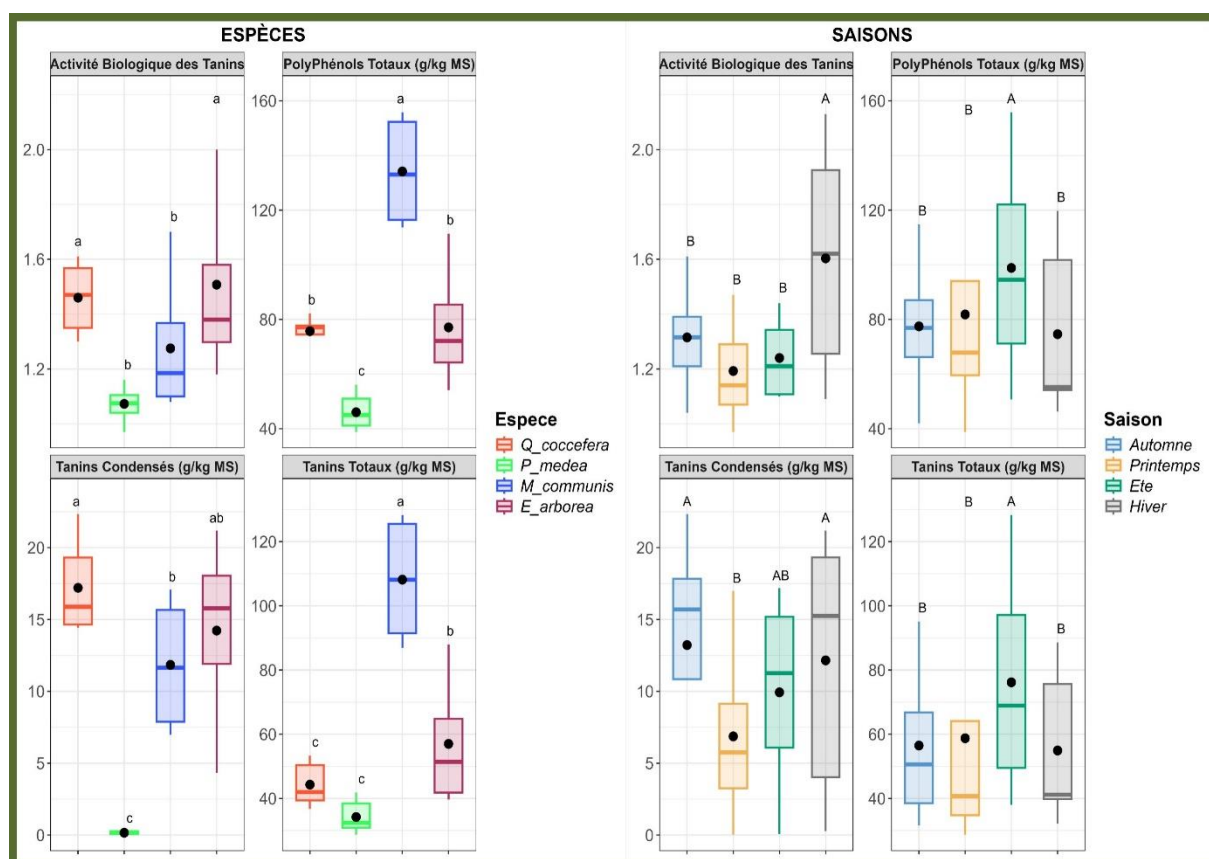
En revanche, *Q. coccifera* se distingue par une richesse notable en TC, atteignant 21,21 g EAL/kg MS en automne, suivie de près par *E. arborea* avec 20,93 g EAL/kg MS en hiver. Les boxplots révèlent clairement ces écarts entre espèces, avec des valeurs significativement plus élevées pour *Q. coccifera* et *E. arborea*.

En outre, les espèces d'arbustes étudiées se distinguent par une activité biologique élevée de leurs tanins, particulièrement chez *E. arborea*, qui atteint un pic de 2,06 en hiver, tandis que *P. media* enregistre une activité minimale avec une moyenne saisonnière de 1,07.

Tableau 13 : Composition en métabolites secondaires des arbustes étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	PPT	TT	TC	ABT
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	75,7 ± 2,75	42 ± 2,14	21,21 ± 1,6	1,61 ± 0,01
	Printemps	71,51 ± 7,21	37,91 ± 1,65	15,89 ± 1,57	1,47 ± 0
	Été	79,94 ± 3,15	53,01 ± 0,47	14,52 ± 0,13	1,31 ± 0,01
<i>Phillyrea media</i>	Automne	42,77 ± 1,2	32,16 ± 0,76	0,24 ± 0,01	1,05 ± 0,01
	Hiver	51,21 ± 6,94	37 ± 6,9	0,29 ± 0,01	1,13 ± 0,05
	Printemps	38,8 ± 0,04	28,78 ± 0,11	0,02 ± 0	1 ± 0,05
<i>Myrtus communis</i>	Automne	114,23 ± 0,77	93,78 ± 1,91	16,92 ± 0,24	1,28 ± 0,04
	Hiver	118,36 ± 1,94	87,75 ± 1,19	15,25 ± 0,07	1,62 ± 0,12
	Printemps	149,02 ± 3,78	124,63 ± 4,92	7,12 ± 0,21	1,09 ± 0,01
<i>Erica arborea</i>	Automne	77,16 ± 1,44	58,01 ± 0,4	14,52 ± 0,2	1,32 ± 0
	Hiver	54,2 ± 0,14	40,04 ± 0,57	20,93 ± 0,37	2,06 ± 0,09
	Printemps	67,85 ± 0,37	43,72 ± 1,97	4,43 ± 0,13	1,2 ± 0,03
<i>Erica arborea</i>	Été	109,13 ± 3,13	86,24 ± 2,45	17,05 ± 0,19	1,44 ± 0
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

PPT : Phénols Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TT : Tanins Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ;
 TC : Tanins condensés (g équivalent acide leucocyanidine /kg MS) ; ABT : Activité Biologique des Tanins



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 13 : Boxplots de la composition en métabolites secondaires des arbustes

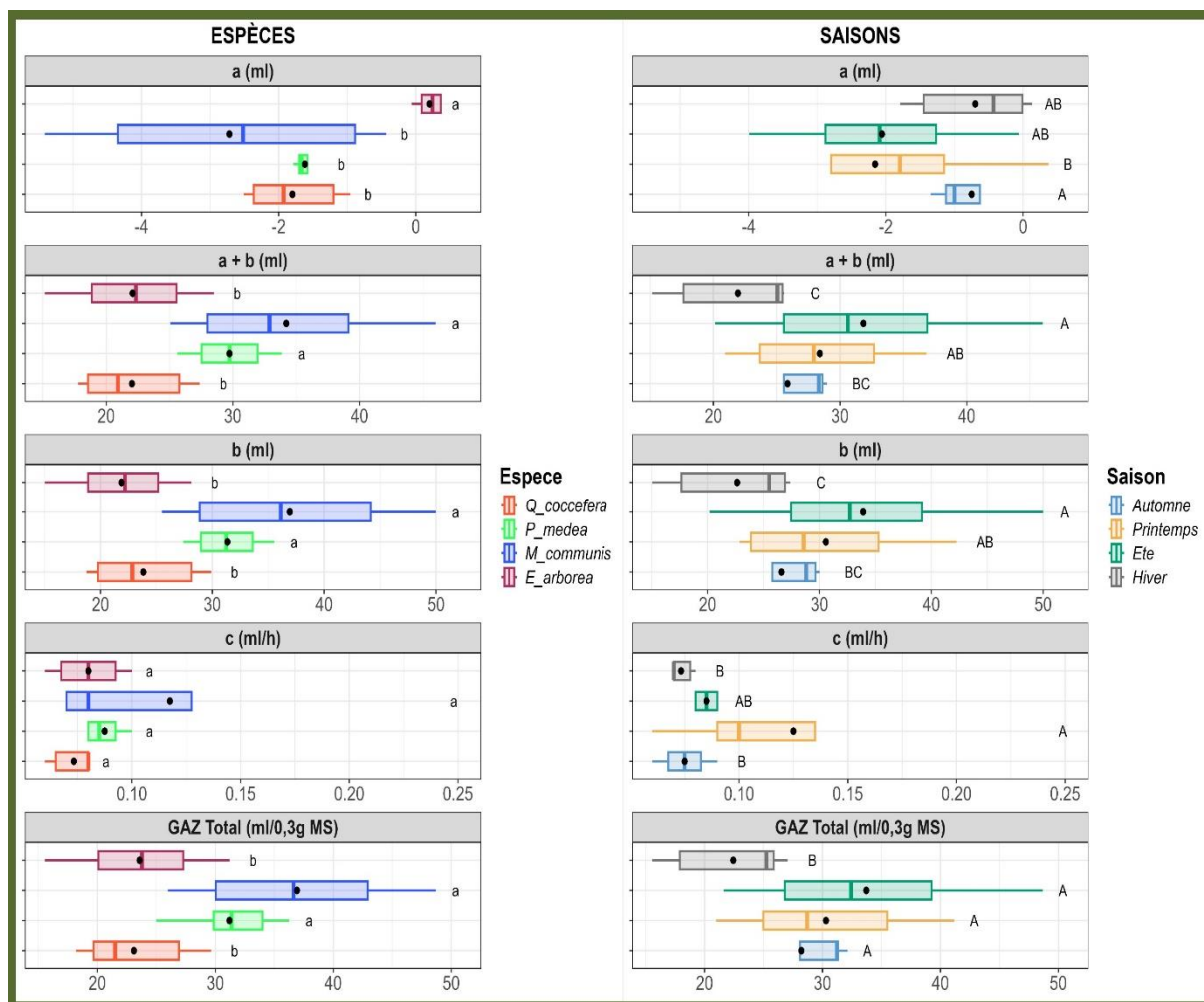
I.1.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation

Les résultats du volume de gaz total et des paramètres de fermentation des substrats incubés (tableau 14) sont hautement influencés par les interactions entre les espèces et les saisons de prélèvement ($p < 0,001$). En effet, tous les substrats incubés montrent des vitesses de dégradation importantes au printemps allant de 0,08 ml/h chez *Q. coccifera* jusqu'à 0,24 ml/h pour *M. communis*. Cette tendance saisonnière, visible également sur la figure 14, s'observe pour toutes les espèces, avec une production de gaz accrue au printemps et en été. Les meilleurs volumes de gaz total produit sont enregistrés chez *M. communis* en été et au printemps (48,42 et 41,18 ml/0,3g MS respectivement) et cela malgré sa contenance en fractions insolubles (b) (49,99 et 42,24 ml/0,3g MS) largement supérieure à la fraction soluble rapidement fermentescible (a) (-3,99 et -5,41 ml/0,3g MS) respectivement. La figure 14 met en évidence la capacité de *M. communis* à générer une production de gaz élevée, contrastant avec *E. arborea* qui affiche systématiquement les valeurs les plus faibles. Toutefois, le minimum de gaz (15,03 ml/0,3g MS) est enregistré chez *E. arborea* en hiver avec la meilleure fraction soluble parmi les substrats incubés ($a = 0,39$) et la plus faible vitesse de fermentation en automne ($c = 0,06$ ml/h).

Tableau 14 : Paramètres de cinétique de fermentation des arbustes étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Gaz total	a	b	a+b	c
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	18,72 ± 0,76	-0,96	18,74	17,78	0,08
	Printemps	21,51 ± 0,74	-0,96	18,74	17,78	0,08
	Été	29,09 ± 0,78	-1,93	22,86	20,93	0,06
<i>Phillyrea media</i>	Automne	31,32 ± 0	-1,35	29,51	28,17	0,09
	Hiver	25,23 ± 0,36	-1,79	27,39	25,6	0,08
	Printemps	32,52 ± 1,53	-1,66	32,97	31,3	0,1
	Été	35,73 ± 0,75	-1,67	35,54	33,86	0,08
<i>Myrtus communis</i>	Automne	31,57 ± 0,76	-1,05	30,01	28,97	0,07
	Hiver	26,52 ± 0,74	-0,43	25,49	25,06	0,07
	Printemps	41,18 ± 0	-5,41	42,24	36,83	0,24
	Été	48,42 ± 0,39	-3,99	49,99	46,01	0,09
<i>Erica arborea</i>	Automne	31,22 ± 0	0,36	28,13	28,49	0,06
	Hiver	15,55 ± 0	0,13	15,03	15,16	0,07
	Printemps	25,97 ± 0	0,37	24,2	24,57	0,1
	Été	21,61 ± 0	-0,06	20,18	20,12	0,09
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Gaz total : volume de gaz produit après la fin de l'incubation (ml/ 0,3g MS) ; a : Volume de gaz produit à partir de la fraction soluble facilement fermentescible (ml) ; b : Volume de gaz produit à partir de la fraction insoluble potentiellement fermentescible (ml) ; a + b : la production potentielle du gaz (ml) ; c : La vitesse de production de gaz (ml/heure)



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 14 : Boxplots des paramètres de cinétique de fermentation des arbustes

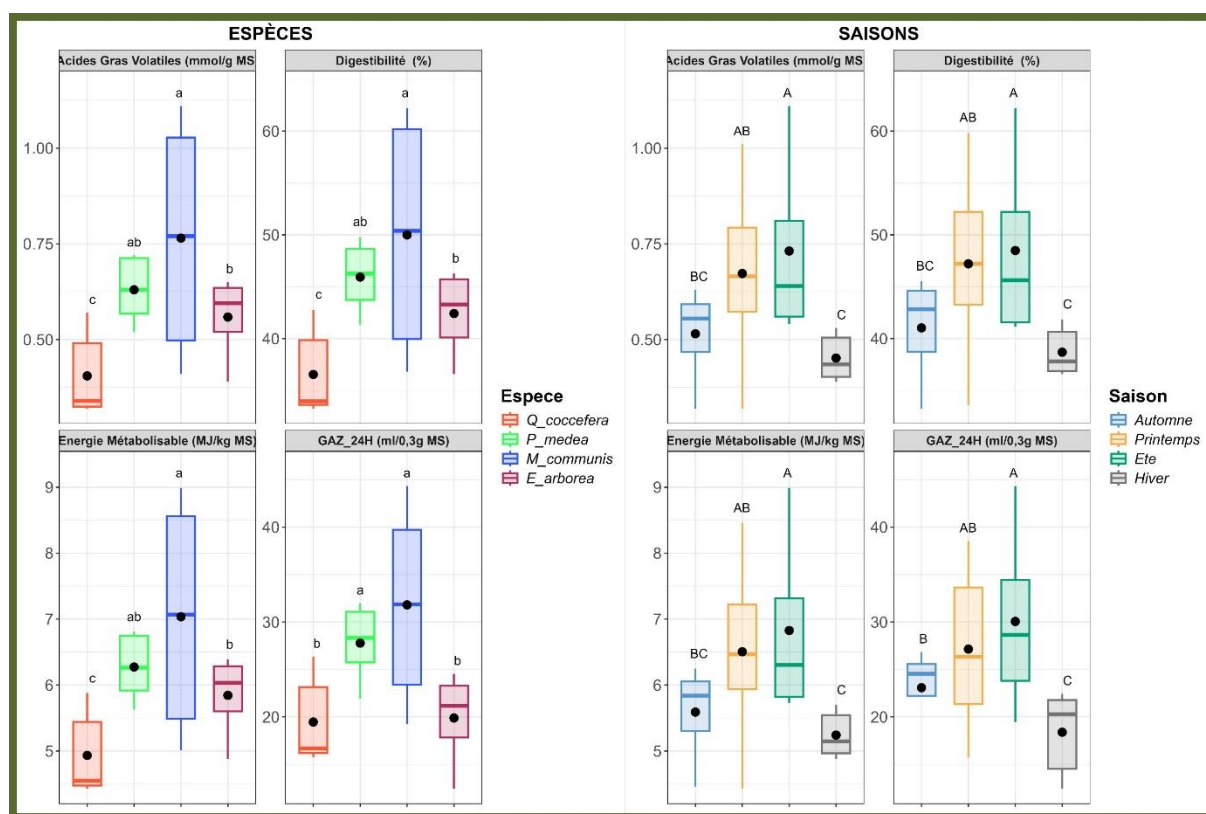
I.1.5. Paramètres de digestibilité *in vitro*

Les paramètres de digestibilité sont hautement influencés ($p < 0,001$) par les interactions entre les espèces et les saisons de prélèvement (tableau 15). Les résultats révèlent que *M. communis* est l'espèce la plus digestible parmi les substrats incubés (61,77 et 59,66%) et cela en été et au printemps respectivement. Cette espèce se distingue également par les meilleures concentrations en EM et en AGV (8,92 ; 8,45 MJ/kg MS et 1,09 ; 1,01 mmol/seringue respectivement), confirmant sa digestibilité supérieure. En revanche, *Q. coccifera* et *P. media* présentent une digestibilité plus faible, particulièrement marquée en automne et en hiver. La figure 15 illustre clairement cette tendance saisonnière, avec une baisse des valeurs de digestibilité pour ces deux espèces pour les deux saisons durant lesquelles la digestibilité de la matière organique (dMO) chute jusqu'à 33% pour *Q. coccifera* et 48% pour *P. media*, accompagnée d'une baisse significative des concentrations en EM (autour de 4,5 MJ/kg MS) et en AGV (environ 0,33 mmol/seringue).

Tableau 15 : Paramètres de digestibilité *in vitro* des arbustes étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Gaz 24h	dMO	EM	AGV
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	16,31 ± 0,37	33,44 ± 0,25	4,5 ± 0,05	0,33 ± 0,01
	Printemps	16,27 ± 0,74	33,95 ± 0,46	4,5 ± 0,1	0,33 ± 0,01
	Eté	25,8 ± 0,78	42,24 ± 0,75	5,81 ± 0,11	0,56 ± 0,02
<i>Phillyrea media</i>	Automne	26,84 ± 0	44,35 ± 0	5,99 ± 0	0,58 ± 0
	Hiver	22,18 ± 0,36	41,57 ± 0,36	5,67 ± 0,05	0,53 ± 0,01
	Printemps	30,9 ± 1,53	48,96 ± 1,16	6,68 ± 0,19	0,7 ± 0,03
	Eté	31,2 ± 0,38	48,82 ± 0,5	6,77 ± 0,05	0,72 ± 0,01
<i>Myrtus communis</i>	Automne	24,62 ± 0,76	40,86 ± 0,62	5,62 ± 0,1	0,52 ± 0,02
	Hiver	20,28 ± 1,47	37,69 ± 1,25	5,14 ± 0,19	0,44 ± 0,03
	Printemps	38,54 ± 0	59,66 ± 0,24	8,45 ± 0	1,01 ± 0
	Eté	43,77 ± 0,77	61,77 ± 0,63	8,92 ± 0,1	1,09 ± 0,02
<i>Erica arborea</i>	Automne	24,53 ± 0	45,47 ± 0,07	6,25 ± 0	0,63 ± 0
	Hiver	12,7 ± 0,37	36,79 ± 0,32	4,91 ± 0,05	0,39 ± 0,01
	Printemps	22,86 ± 0	46,26 ± 0,01	6,39 ± 0	0,65 ± 0
	Eté	19,45 ± 0	41,13 ± 0	5,82 ± 0	0,56 ± 0
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Gaz 24h : volume de gaz produit après 24 heures d'incubation (ml/ 0,3g MS) ; dMO : digestibilité de la Matière Organique (%) ; EM : Energie Métabolisable (MJ/kg MS) ; AGV : Acides Gras Volatiles (mmol/seringue)



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 15 : Boxplots des paramètres de digestibilité *in vitro* des arbustes

I.1.6. Effet du PEG sur la production de gaz

L'effet de la présence/absence du PEG sur la production de gaz des substrats étudiés est consignée dans le tableau 16 et illustrée par la figure 16. La production variable de gaz est contrôlée par les interactions entre espèces et saisons de prélèvement ($p < 0,001$). En absence du

PEG, elle varie entre 12,7 et 43,77 ml/0,3 g MS pour *E. arborea* en hiver et *M. communis* en été respectivement.

L'ajout de PEG a induit une augmentation de la production de gaz et cela pour la plupart des substrats, à l'exception de *P. media* au printemps. D'ailleurs, la figure 16 montre clairement qu'au printemps la production de gaz pour *P. media* se situe à un niveau comparable avec et sans PEG. Cependant, les taux d'augmentation les plus importants sont observés pour *E. arborea* (106,25%), suivie de *M. communis* (61,96%) et cela au cours de la saison hivernal. La figure 16 montre l'effet positif du PEG, avec des valeurs nettement plus élevées en présence de PEG pour ces deux espèces en hiver.

L'effet stimulant du PEG sur la production de gaz varie à la fois en fonction de l'espèce et la saison, soulignant l'importance des interactions complexes entre les facteurs biotiques et abiotiques dans la production de gaz.

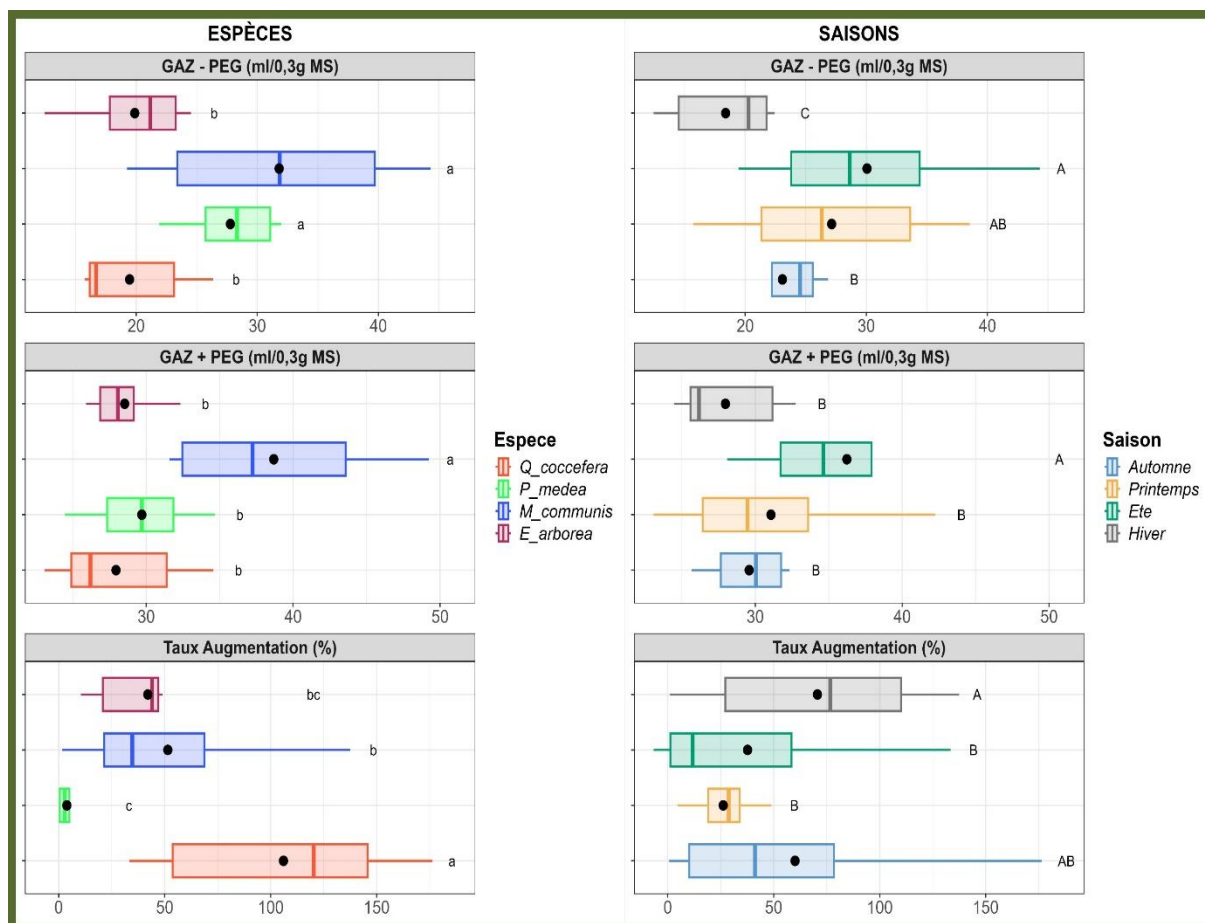
Tableau 16 : L'effet du PEG sur la production du gaz des arbustes étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Production totale du gaz (ml/0,3g MS)		
		GAZ(-PEG)	GAZ(+PEG)	Taux d'augmentation (%)
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	16,31 ± 0,37	26,2 ± 0,76	6,02 ± 0,57
	Printemps	16,27 ± 0,74	23,87 ± 1,11	6,43 ± 0,19
	Été	25,8 ± 0,78	33,76 ± 1,17	3,57 ± 0,39
<i>Phillyrea media</i>	Automne	26,84 ± 0	28,24 ± 0,4	5,21 ± 1,47
	Hiver	22,18 ± 0,36	24,98 ± 0,72	12,68 ± 5,08
	Printemps	30,9 ± 1,53	30,9 ± 0	0,12 ± 4,97
<i>Myrtus communis</i>	Été	31,2 ± 0,38	34,67 ± 0	11,12 ± 1,34
	Automne	24,62 ± 0,76	31,57 ± 0	28,32 ± 3,95
	Hiver	20,28 ± 1,47	32,76 ± 0	61,96 ± 11,75
<i>Erica arborea</i>	Printemps	38,54 ± 0	41,97 ± 0,37	8,9 ± 0,97
	Été	43,77 ± 0,77	48,42 ± 1,16	10,62 ± 0,7
	Automne	24,53 ± 0	32,33 ± 0	31,82 ± 0
<i>Erica arborea</i>	Hiver	12,7 ± 0,37	26,17 ± 0,37	106,25 ± 8,84
	Printemps	22,86 ± 0	27,53 ± 0,73	20,45 ± 3,21
	Été	19,45 ± 0	28,09 ± 0	44,44 ± 0
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001

I.1.7. Effet du PEG sur la production de méthane

Les concentrations en CH₄ sont considérablement affectées par les interactions entre espèces et saisons ($p < 0,001$), comme le montrent les résultats du tableau 17 et de la figure 17.

En absence de PEG, la production de CH₄ varie significativement d'une espèce à l'autre. *Q. coccifera* affiche une production minimale de 3,57 ml/0,3 g MS en hiver, tandis que *P. media* atteint une production maximale de 9,78 ml/0,3 g MS, soulignant la variabilité interspécifique de la méthanogenèse.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

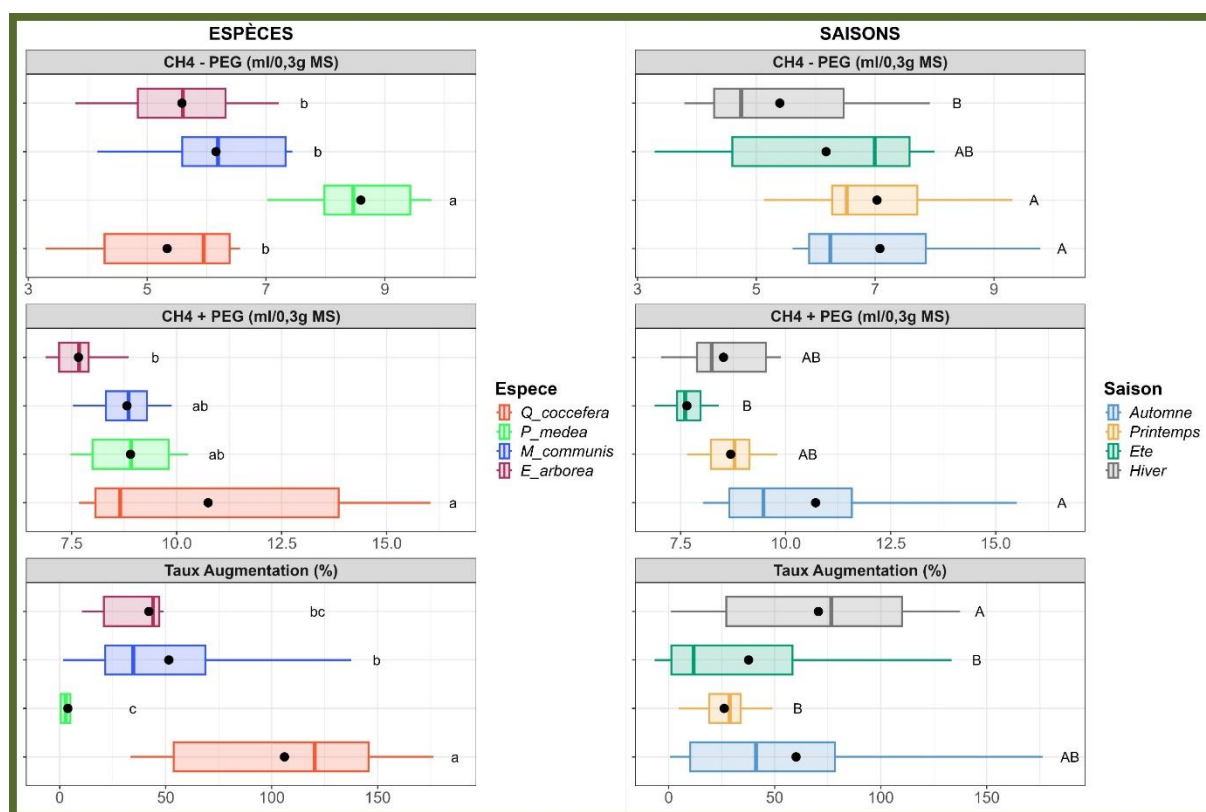
Figure 16 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de gaz des arbustes

En présence de PEG, la production de CH_4 oscille entre 7,07 ml/0,3 g MS pour *E. arborea* en été et 15,77 ml/0,2 g MS pour *Q. coccifera* en automne. Il est intéressant de noter que *Q. coccifera*, malgré une faible production en absence de PEG, présente la production la plus élevée en présence de PEG, notamment en automne. Ceci suggère une interaction complexe entre l'espèce, la saison et l'effet du PEG sur les communautés microbiennes impliquées dans la méthanogenèse.

Globalement, l'ajout de PEG tend à augmenter la production de CH_4 , bien que l'intensité de cet effet varie selon les espèces et les saisons. Cette tendance est illustrée par la figure 17, où les valeurs de CH_4 sont souvent plus élevées en présence de PEG. Néanmoins, nos résultats montrent que l'ajout du PEG peut s'accompagner par une diminution de production de CH_4 , c'est le cas de *P. media* en été qui affiche un taux négatif (-0,33%).

Tableau 17 : L'effet du PEG sur la production de CH₄ des arbustes étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Production de méthane CH ₄ (ml/0,3g MS)		
		CH ₄ (-PEG)	CH ₄ (+PEG)	Taux d'augmentation (%)
<i>Quercus coccifera</i>	Automne	15,77 ± 0,38	60,65 ± 0,95	163,07 ± 18,7
	Printemps	8,66 ± 0,37	46,72 ± 0,13	34,69 ± 1,83
	Été	7,82 ± 0,2	30,83 ± 0,57	120,36 ± 18,48
<i>Phillyrea media</i>	Automne	9,78 ± 0	10,05 ± 0,3	2,84 ± 3,08
	Hiver	7,47 ± 0,64	8,24 ± 0,34	10,92 ± 14,01
	Printemps	9,13 ± 0,27	9,57 ± 0,31	4,89 ± 0,4
<i>Myrtus communis</i>	Automne	5,89 ± 0	8,56 ± 0,76	45,45 ± 12,86
	Hiver	4,42 ± 0,37	9,88 ± 0	124,31 ± 18,66
	Printemps	6,89 ± 0,57	8,86 ± 0,31	28,72 ± 6,28
<i>Erica arborea</i>	Automne	6,64 ± 0,8	8,46 ± 0,57	28,89 ± 24,21
	Hiver	4,3 ± 0,72	7,44 ± 0,58	76,65 ± 42,99
	Printemps	5,68 ± 0,78	7,68 ± 0,05	36,36 ± 17,83
	Été	5,71 ± 1,22	7,07 ± 0,27	26,24 ± 22,32
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 17 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de méthane des arbustes

I.2. Valeur nutritionnelle des arbres

I.2.1. Composition chimique primaire

La composition chimique primaire des arbres étudiés, affichée dans le tableau 18, est fortement influencée par les interactions entre les espèces et les saisons de récolte ($p < 0,001$).

La MS présente des variations interspécifiques et saisonnières significatives entre les espèces et les saisons (figure 18). L'espèce *Q. canariensis* se distingue par sa teneur élevée en MS (moyenne de 53,5%), qui reste remarquablement stable tout au long de l'année (52,9-54,2%). Cette stabilité contraste fortement avec les autres espèces. En effet, *F. angustifolia* montre la variation saisonnière la plus prononcée, passant de 31,8% au printemps à 44,5% en été, pour enregistrer une baisse à 37,6% en automne. Cependant, *A. glutinosa* est marquée par d'importante différence, avec un pic en automne (48,9%MS), suivi d'une baisse significative en été (39,4%) et au printemps (38,3%). Par ailleurs, *S. alba* maintient des niveaux de MS relativement bas et stables, oscillant entre 36 et 38% tout au long de l'année.

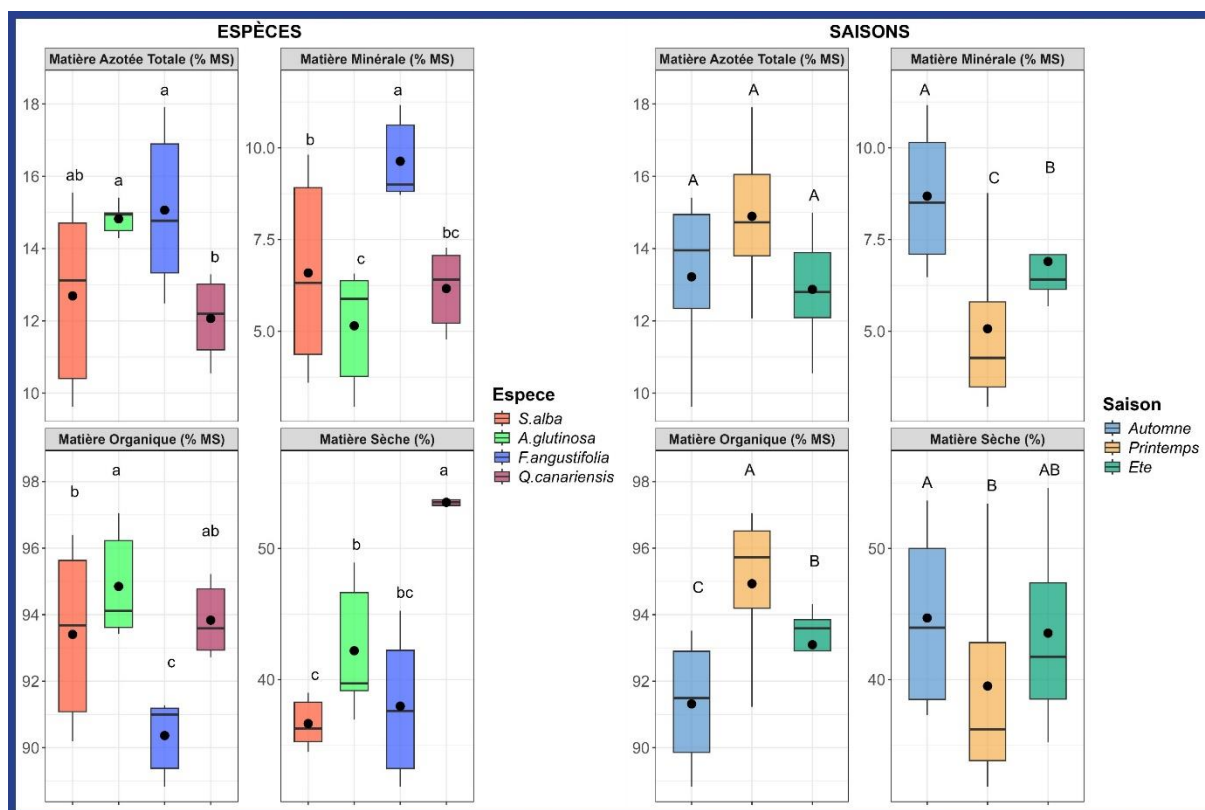
Tableau 18 : Composition chimique primaire des arbres étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	MS	MO	MM	MAT
<i>Salix alba</i>	Automne	38,83 ± 0,23	90,23 ± 0,06	9,77 ± 0,06	9,64 ± 0,01
	Printemps	34,96 ± 0,71	96,32 ± 0,12	3,69 ± 0,12	15,32 ± 0,33
	Été	36,13 ± 1,31	93,68 ± 0,21	6,32 ± 0,21	13,12 ± 0,61
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	48,92 ± 0	93,48 ± 0,06	6,53 ± 0,06	15,2 ± 0,3
	Printemps	38,27 ± 1,88	96,96 ± 0,13	3,04 ± 0,13	14,33 ± 0,05
	Été	39,4 ± 0,57	94,12 ± 0,28	5,89 ± 0,28	14,95 ± 0,06
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	37,6 ± 0,43	88,85 ± 0,02	11,16 ± 0,02	14,77 ± 0,23
	Printemps	31,84 ± 0,02	91,26 ± 0,04	8,75 ± 0,04	17,73 ± 0,25
	Été	44,47 ± 1,12	91 ± 0,07	9 ± 0,07	12,69 ± 0,3
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	53,46 ± 0,29	92,72 ± 0	7,28 ± 0	13,27 ± 0,03
	Printemps	52,93 ± 0,68	95,2 ± 0,04	4,81 ± 0,04	12,2 ± 0,18
	Été	54,18 ± 0,61	93,59 ± 0,03	6,41 ± 0,03	10,73 ± 0,25
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

MS : Matière Sèche (%); MO : Matière Organique (%MS); MM : Matière Minérale (%MS); MAT : Matière Azotée Totale (%MS);

La teneur en matière organique (MO) et en matière minérale (MM) révèle également des interactions complexes entre les espèces et les saisons. *A. glutinosa* présente la teneur en MO la plus élevée, particulièrement au printemps avec 96,96%MS alors que *F. angustifolia* montre la teneur la plus faible et cela en automne (88,84%MS). En outre, *S. alba* affiche la variation saisonnière la plus marquée, passant de 90,23%MS en automne à 96,31%MS au printemps tandis que *Q. canariensis* maintient des niveaux de MO relativement stables (92,72-95,19%MS). Ces tendances se reflètent inversement dans les teneurs en MM. En général, les

échantillons analysés montrent de fortes teneurs en MM qui atteignent 11,16%MS pour *F. angustifolia* en automne et qui présente aussi les teneurs moyennes les plus élevées entre espèces (9,4%MS). En revanche, les teneurs les plus faibles sont enregistrées au printemps (entre 3,04 et 4,81%MS) alors que les espèces étudiées présentent les concentrations maximales en automne (8 %MS en moyenne).



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 18 : Boxplots des paramètres de la composition chimique des arbres

Les arbres étudiés présentent des teneurs appréciables en MAT avec une moyenne de 13,66 %MS. *F. angustifolia* se démarque par sa teneur élevée en MAT au printemps (17,73%MS), nettement supérieure aux autres espèces. Cette valeur chute considérablement en été (12,69%MS) et en automne (14,77%MS) suivi de près par *A. glutinosa* qui montre des teneurs aussi importantes avec en moyenne 15%MS. En revanche, *Q. canariensis* présente la teneur en MAT la plus faible en été (10,73%MS) et maintient des niveaux relativement bas toute l'année. *S. alba* et *A. glutinosa* montrent des variations saisonnières moins prononcées, avec des pics au printemps (respectivement 15,32%MS et 14,32%MS).

I.2.2. Composition en Parois cellulaires

Des interactions significatives ($p < 0,001$) entre espèces et saisons de prélèvement ont été enregistrées pour les teneurs en parois cellulaires des arbres étudiés (tableau 19). Les

résultats obtenus révèlent des variations interspécifiques et saisonnières significatives (figure 19), avec des teneurs importantes en parois totales (NDF) pour tous les échantillons analysés. Ces teneurs oscillent entre 40,07%MS pour *S. alba* et 56,89%MS chez *A. glutinosa* et cela au printemps. *A. glutinosa* et *Q. canariensis* maintiennent des niveaux en NDF élevés tout au long de l'année tandis que *F. angustifolia* présente des valeurs plus faibles, particulièrement en automne (36,73%MS). Une tendance similaire est observée pour l'ADF avec des teneurs plus élevées chez *A. glutinosa* et *Q. canariensis*, et des valeurs plus faibles chez *F. angustifolia*, particulièrement en automne.

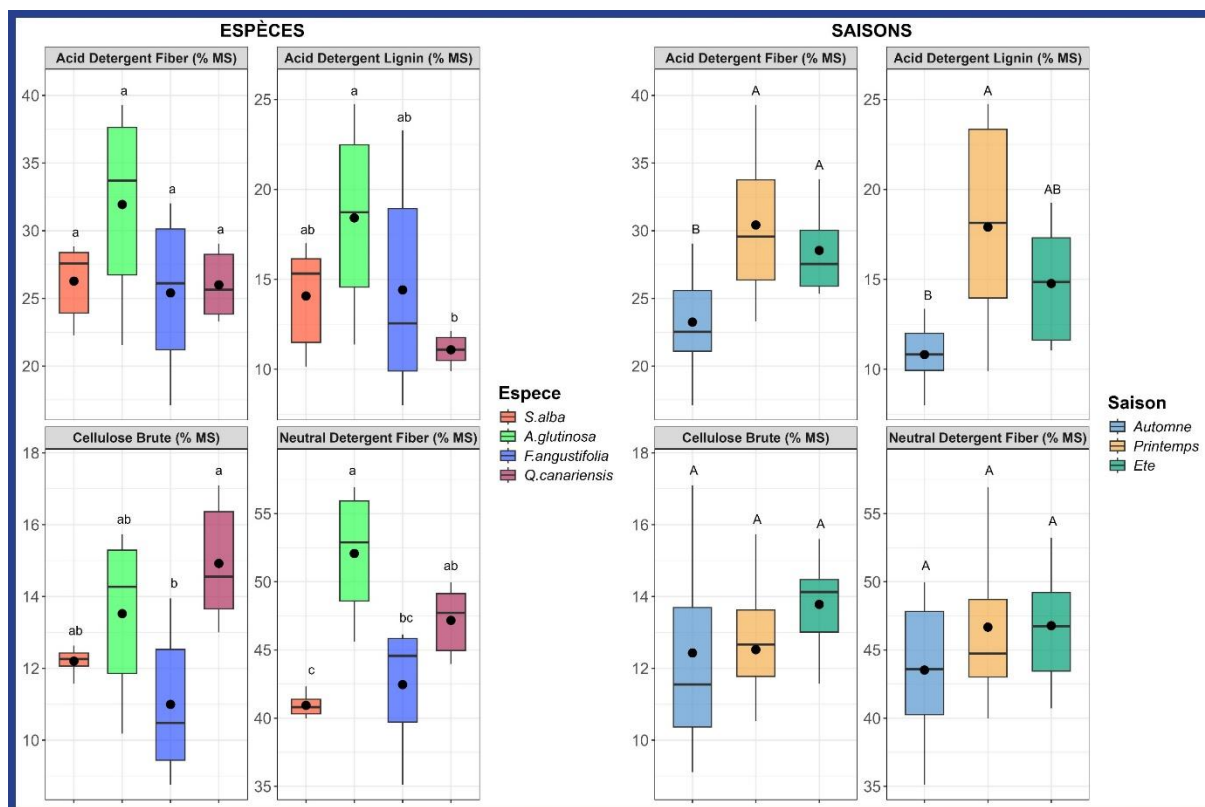
La teneur en ADL varie également selon les espèces et les saisons. *A. glutinosa* s'avère l'espèce la plus lignifiée, avec une moyenne de 18,41%MS et présente ainsi la variation saisonnière la plus marquée, passant de 12,37%MS en automne à 24,15%MS au printemps. La même tendance est constatée chez *F. angustifolia* qui montre également une importante variation saisonnière pour l'ADL, passant de 8,64%MS en automne à 22,04%MS au printemps. A l'inverse, *Q. canariensis* est l'espèce la moins pourvue en lignine avec 11%MS en moyenne.

La teneur en CB suit une tendance différente, *Q. canariensis* se distingue avec les teneurs en CB les plus élevées, oscillant entre 14.22% MS en automne et 16.34% MS au printemps. En revanche, *F. angustifolia* affiche les valeurs les plus faibles, avec 11.55% MS au printemps et 13.77% MS en automne.

Tableau 19 : Composition en parois cellulaires des arbres étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	NDF	ADF	CB	ADL
<i>Salix alba</i>	Automne	41,22 ± 0,47	22,53 ± 0,35	12,33 ± 0,43	10,21 ± 0,08
	Printemps	40,07 ± 0,14	27,58 ± 0,3	12,26 ± 0,1	15,32 ± 0,2
	Été	41,53 ± 1,12	28,71 ± 0,18	12,02 ± 0,63	16,69 ± 0,45
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	46,45 ± 1,15	23 ± 2,04	10,63 ± 0,64	12,37 ± 1,4
	Printemps	56,89 ± 0,08	39,11 ± 0,26	14,96 ± 1,1	24,15 ± 0,83
	Été	52,89 ± 0,47	33,71 ± 0,13	14,98 ± 0,88	18,73 ± 0,74
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	36,73 ± 2,28	18,41 ± 1,82	9,77 ± 0,93	8,64 ± 0,89
	Printemps	45,66 ± 0,49	31,69 ± 0,49	9,65 ± 1,25	22,04 ± 1,74
	Été	44,99 ± 1,63	26,12 ± 0,55	13,57 ± 0,54	12,55 ± 1,09
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	49,72 ± 0,33	29,04 ± 0,02	16,99 ± 0,15	12,05 ± 0,13
	Printemps	44,08 ± 0,13	23,32 ± 0,03	13,22 ± 0,31	10,1 ± 0,28
	Été	47,72 ± 0,54	25,65 ± 0,43	14,56 ± 0,36	11,09 ± 0,07
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

NDF: Neutral Detergent Fiber (%MS); ADF: Acid Detergent Fiber (%MS); ADL: Acid Detergent Lignin (%MS); CB: Cellulose Brute (%MS)



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 19 : Boxplots de la composition en parois cellulaires des arbres

I.2.3. Composition en Métabolites secondaires

Les concentrations en métabolites secondaires des arbres étudiés présentent une variabilité significative ($p < 0,001$) suivant les interactions entre les espèces et les saisons de récolte (tableau 20). *Q. canariensis* et *S. alba* se distinguent par leurs teneurs élevées en PPT et en TT, particulièrement en été, avec des valeurs maximales respectives de 71,94 g EAT/kg MS et 46,15 g EAT/kg MS. Ces deux espèces montrent également les concentrations les plus élevées en TC, atteignant environ 25 g EAL/kg MS. Par ailleurs, *A. glutinosa* occupe une position intermédiaire pour la plupart des composés. Elle présente une stabilité relative de ses concentrations en TC tout au long de l'année (figure 20).

La variabilité saisonnière est particulièrement marquée pour *S. alba* et *A. glutinosa*, qui présentent des fluctuations importantes de leurs concentrations en PPT et TT entre les saisons, avec des pics en été.

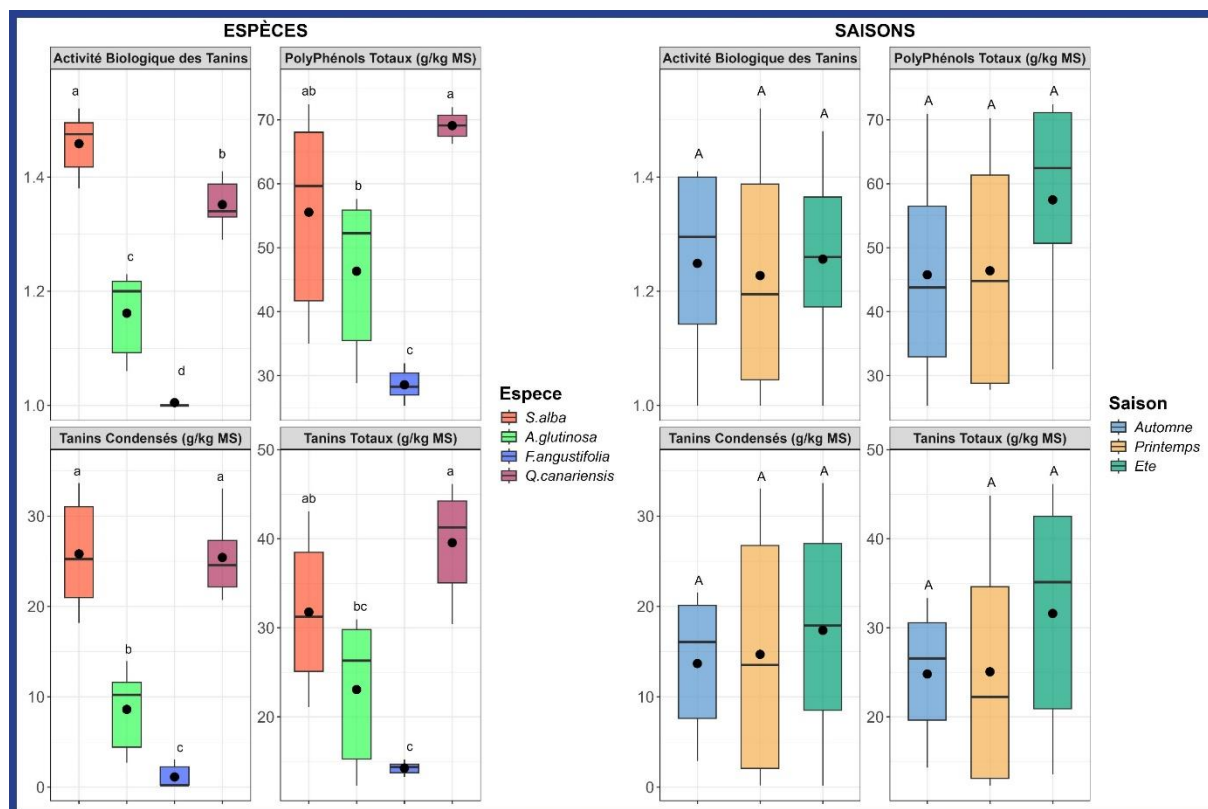
En revanche, *F. angustifolia* présente systématiquement les concentrations les plus faibles pour tous ces composés, avec notamment une moyenne de seulement 1,13 g EAL/kg MS en TC. Bien que globalement plus pauvre en métabolites secondaires, *F. angustifolia* affiche une légère augmentation des PPT et TT en été, tout en maintenant des niveaux de TC très bas et cela quelle que soit la saison.

L'activité biologique des tanins reste relativement stable pour toutes les espèces au fil des saisons, avec des variations moins prononcées. *S. alba* et *Q. canariensis* montrent les valeurs les plus élevées oscillant entre 1,31 et 1,51 alors que *F. angustifolia* ait l'activité la plus faible voire nulle.

Tableau 20 : Composition en métabolites secondaires des arbres étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	PPT	TT	TC	ABT
<i>Salix alba</i>	Automne	35,4 ± 0,52	22,34 ± 1,73	19,07 ± 1,24	1,39 ± 0,01
	Printemps	59,64 ± 0,13	31,25 ± 2,15	25,24 ± 1,52	1,51 ± 0,01
	Été	71,61 ± 1,12	41,73 ± 1,91	33,14 ± 0,74	1,48 ± 0,01
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	52,24 ± 0,65	30,26 ± 0,98	11,54 ± 3,4	1,2 ± 0,01
	Printemps	29,44 ± 0,87	12,47 ± 0,28	2,79 ± 0,11	1,06 ± 0
	Été	57,28 ± 0,47	26,47 ± 4,82	11,51 ± 0,3	1,23 ± 0,01
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	26,01 ± 0,96	14,75 ± 0,65	3 ± 0,12	1 ± 0
	Printemps	28,27 ± 0,66	14 ± 1,07	0,21 ± 0	1 ± 0
	Été	31,44 ± 0,66	13,98 ± 0,64	0,2 ± 0,04	1,02 ± 0,02
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	69,43 ± 2,06	31,9 ± 2,06	21,13 ± 0,58	1,41 ± 0,01
	Printemps	68,25 ± 2,84	42,54 ± 3,32	30,56 ± 3,54	1,34 ± 0,01
	Été	69,6 ± 3,31	44,26 ± 2,68	24,57 ± 0,73	1,31 ± 0,03
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

PPT : PolyPhénols Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TT : Tanins Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TC : Tanins condensés (g équivalent acide leucocyanidine /kg MS) ; ABT : Activité Biologique des Tanins



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 20 : Boxplots de la composition en métabolites secondaires des arbres

I.2.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation

Les paramètres cinétiques de production de gaz et de fermentation sont affichés dans le tableau 21. Ces derniers montrent une forte interaction espèce-saison ($p < 0,001$).

L'espèce *F. angustifolia* se distingue nettement des autres espèces par une forte production de gaz, particulièrement au printemps où elle atteint un pic de 62,7 ml/0,3g MS. Cette espèce maintient une production de gaz importante tout au long de l'année, avec une moyenne saisonnière de 55,5 ml/0,3g MS. Ce résultat contraste fortement avec les autres espèces qui produisent des quantités de gaz plus modérées. L'espèce *A. glutinosa* présente la variation saisonnière la plus marquée, avec une production minimale en automne (19,4 ml/0,3g MS) et maximale au printemps (39,3 ml/0,3g MS). Les espèces *Q. canariensis* et *S. alba* montrent des profils de production de gaz intermédiaires et relativement stables au fil des saisons. La production de gaz de *Q. canariensis* varie de 22,7 ml/0,3g MS en automne à 31,4 ml/0,3g MS au printemps, tandis que celle de *S. alba* oscille entre 26,0 ml/0,3g MS au printemps et 38,8 ml/0,3g MS en automne (figure 21).

Tableau 21 : Paramètres de cinétique de fermentation des arbres étudiés selon les saisons

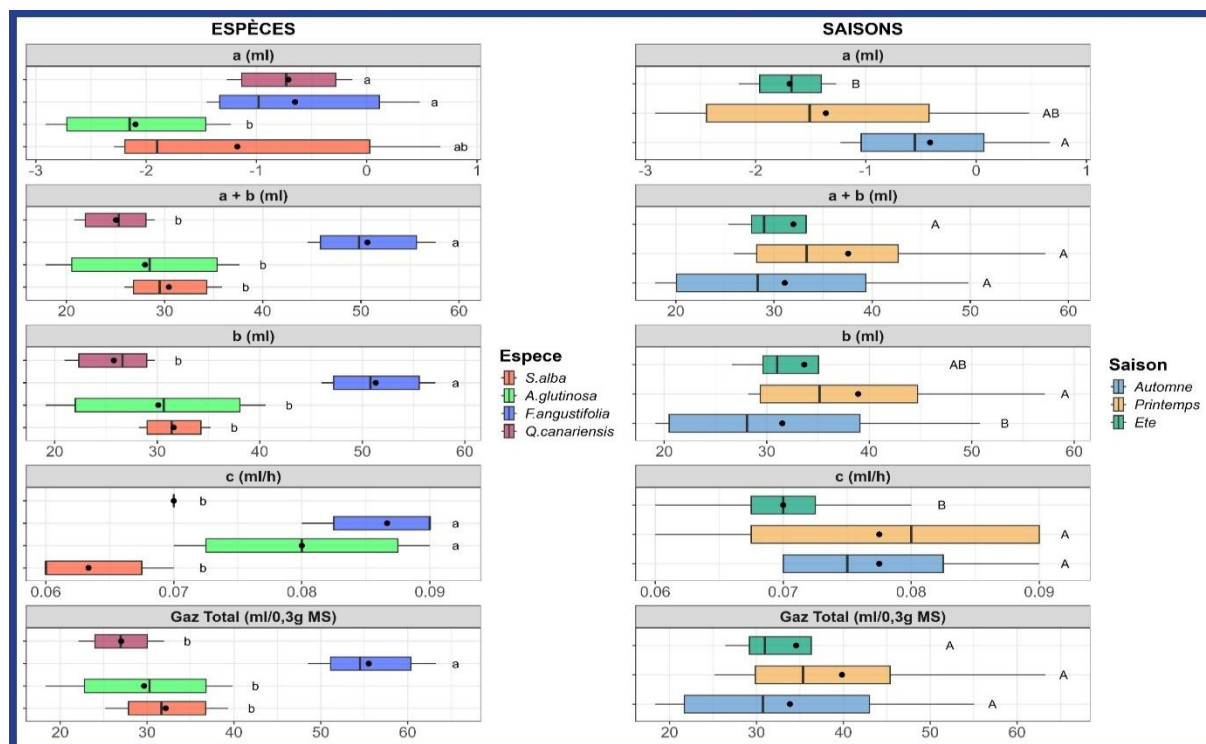
Espèce	Saison	Gaz total	a	b	a+b	c
<i>Salix alba</i>	Automne	38,81 ± 0,77	0,67	35,21	35,88	0,07
	Printemps	25,99 ± 1,12	-2,29	28,21	25,92	0,06
	Été	31,67 ± 0,79	-1,9	31,41	29,51	0,06
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	19,43 ± 1,53	-1,23	19,13	17,9	0,08
	Printemps	39,28 ± 0,74	-2,91	40,56	37,65	0,09
	Été	30,29 ± 0,78	-2,15	30,63	28,48	0,07
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	54,51 ± 0,76	-0,98	50,79	49,81	0,09
	Printemps	62,71 ± 0,77	0,48	57,14	57,62	0,09
	Été	49,35 ± 1,17	-1,45	46,02	44,57	0,08
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	22,67 ± 0,78	-0,13	20,94	20,8	0,07
	Printemps	31,43 ± 0,78	-0,73	29,76	29,02	0,07
	Été	26,98 ± 0,78	-1,27	26,61	25,34	0,07
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Gaz total : volume de gaz produit après la fin de l'incubation (ml/ 0,3g MS) ; a : Volume de gaz produit à partir de la fraction soluble facilement fermentescible (ml) ; b : Volume de gaz produit à partir de la fraction insoluble potentiellement fermentescible (ml) ; a+b : la production potentielle du gaz (ml) c : La vitesse de production de gaz (ml/heure)

Les paramètres cinétiques issus du modèle exponentiel confirment ces tendances. Le paramètre (a), représentant la fraction rapidement fermentescible, montre des variations importantes entre les espèces et les saisons. *F. angustifolia* présente la valeur la plus élevée au printemps (0,48), tandis que *A. glutinosa* montre la valeur la plus faible (-2,91) à la même saison. *F. angustifolia* présente également les valeurs les plus élevées pour la production potentielle de gaz (a+b), atteignant 57,6 ml/0,3g MS au printemps et 49,8 ml/0,3g MS en automne. Ces valeurs sont cohérentes avec celles observées dans le modèle biologique, soulignant la robustesse de ces résultats.

De plus, *F. angustifolia* se distingue par les vitesses de dégradation les plus rapides, avec un taux constant de 0,09 ml/h et cela quelle que soit la saison. Cette caractéristique suggère une fermentescibilité élevée et constante des feuilles de cette espèce tout au long de l'année.

Les autres espèces présentent des potentiels de production de gaz (a+b) plus modérés, variant de 17,9 ml/0,3g MS pour *A. glutinosa* en automne à 37,6 ml/0,3g MS pour la même espèce au printemps. Leurs taux de dégradation sont également plus faibles, oscillant entre 0,06 et 0,08 ml/h selon l'espèce et la saison.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 21 : Boxplots des paramètres de cinétique de fermentation des arbres

I.2.5. Paramètres de digestibilité *in vitro*

Les paramètres de digestibilité *in vitro* des substrats des arbres étudiés notés dans le tableau 22 montrent des différences significatives dues à une forte interaction entre espèces et saisons de prélèvement ($p < 0,001$)

Les résultats ont révélé que *F. angustifolia* émet plus de quantité de gaz après 24 heures d'incubation et cela pour les trois saisons de prélèvement (46,41, 55,08 et 41,9 ml/0,3g MS respectivement) étant ainsi l'espèce la plus digestible (63,05 ; 72,39 et 58,43% respectivement). De plus, la même espèce a rapporté les meilleures concentrations en EM et en AGV qui oscillent entre 8,04 ; 9,89 MJ/kg MS et 0,95 ; 1,26 mmol/siringue respectivement.

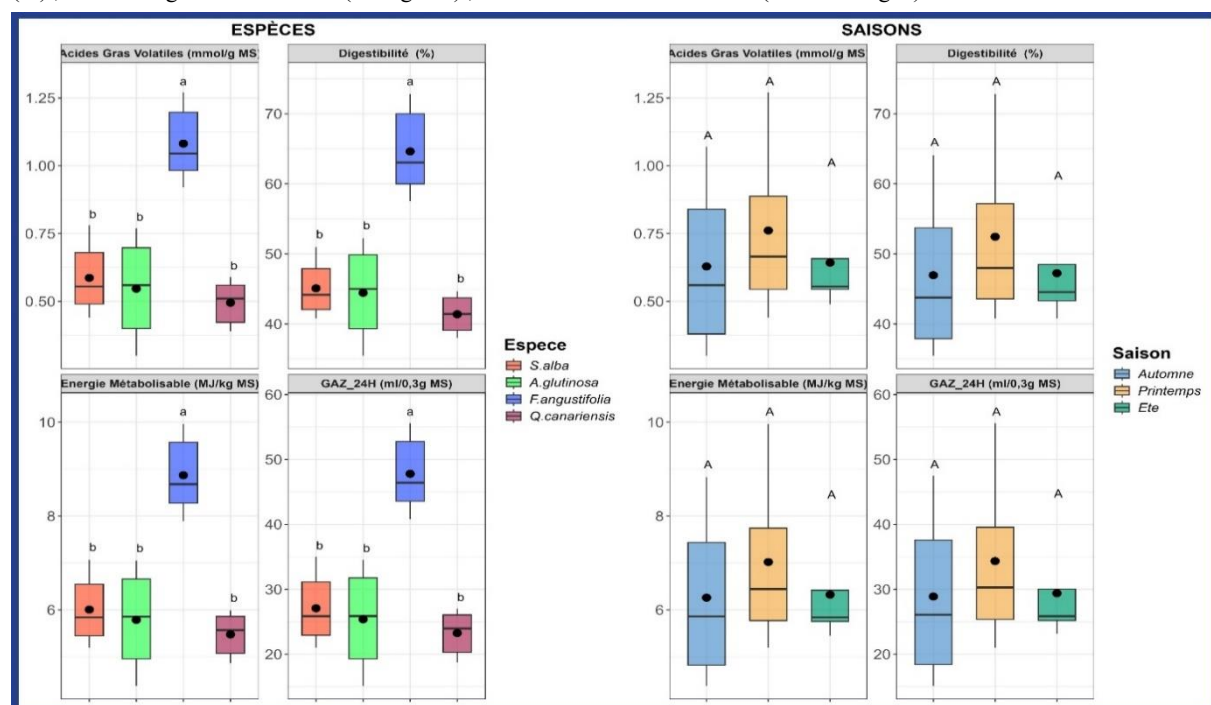
Les autres espèces montrent des différences en matière de la digestibilité. Ces dernières sont généralement inférieures à celles enregistrée par *F. angustifolia*. L'arbre *A. glutinosa*

présente les plus importantes variations saisonnières et cela pour l'ensemble des paramètres de digestibilité. Cette espèce atteint ses valeurs maximales au printemps (dMO : 51,8%MS, EM : 6,97 MJ/kg MS, AGV : 0,76 mmol/ml) et minimales en automne (dMO : 36,5%MS, EM : 4,53 MJ/kg MS, AGV : 0,33 mmol/ml). Tandis que *Q. canariensis* et *S. alba* montrent des profils de digestibilité intermédiaires, avec des variations saisonnières moins prononcées que *A. glutinosa* mais plus marquées que *F. angustifolia*. En effet, la dMO de *Q. canariensis* varie de 38,3% en automne à 44,5% au printemps, tandis que celle de *S. alba* passe de 41,1% au printemps à 50% en automne (figure 22).

Tableau 22 : Paramètres de digestibilité *in vitro* des arbres étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Gaz 24h	dMO	EM	AGV
<i>Salix alba</i>	Automne	33,89 ± 1,55	49,98 ± 1,38	6,92 ± 0,21	0,75 ± 0,04
	Printemps	21,53 ± 0,74	41,15 ± 0,51	5,26 ± 0,1	0,46 ± 0,02
	Été	25,84 ± 0,39	44,16 ± 0,61	5,84 ± 0,06	0,56 ± 0,01
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	16,2 ± 1,52	36,55 ± 1,49	4,53 ± 0,21	0,33 ± 0,04
	Printemps	34,05 ± 0,74	51,79 ± 0,63	6,98 ± 0,11	0,76 ± 0,02
	Été	25,89 ± 0,78	45 ± 0,68	5,86 ± 0,11	0,56 ± 0,01
<i>sa</i>	Automne	46,41 ± 1,53	63,05 ± 1,46	8,68 ± 0,21	1,05 ± 0,04
	Printemps	55,08 ± 0,77	72,39 ± 0,57	9,89 ± 0,1	1,26 ± 0,02
	Été	41,9 ± 1,56	58,43 ± 1,24	8,04 ± 0,21	0,95 ± 0,04
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	19,07 ± 0,4	38,28 ± 0,37	4,91 ± 0,06	0,4 ± 0,01
	Printemps	26,75 ± 0,39	44,46 ± 0,27	5,96 ± 0,05	0,58 ± 0,01
	Été	23,96 ± 1,17	41,42 ± 0,92	5,57 ± 0,16	0,51 ± 0,03
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Gaz 24h : volume de gaz produit après 24 heures d'incubation (ml/ 0,3g MS) ; dMO : digestibilité de la Matière Organique (%) ; EM : Energie Métabolisable (MJ/kg MS) ; AGV : Acides Gras Volatiles (mmol/siringue)



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

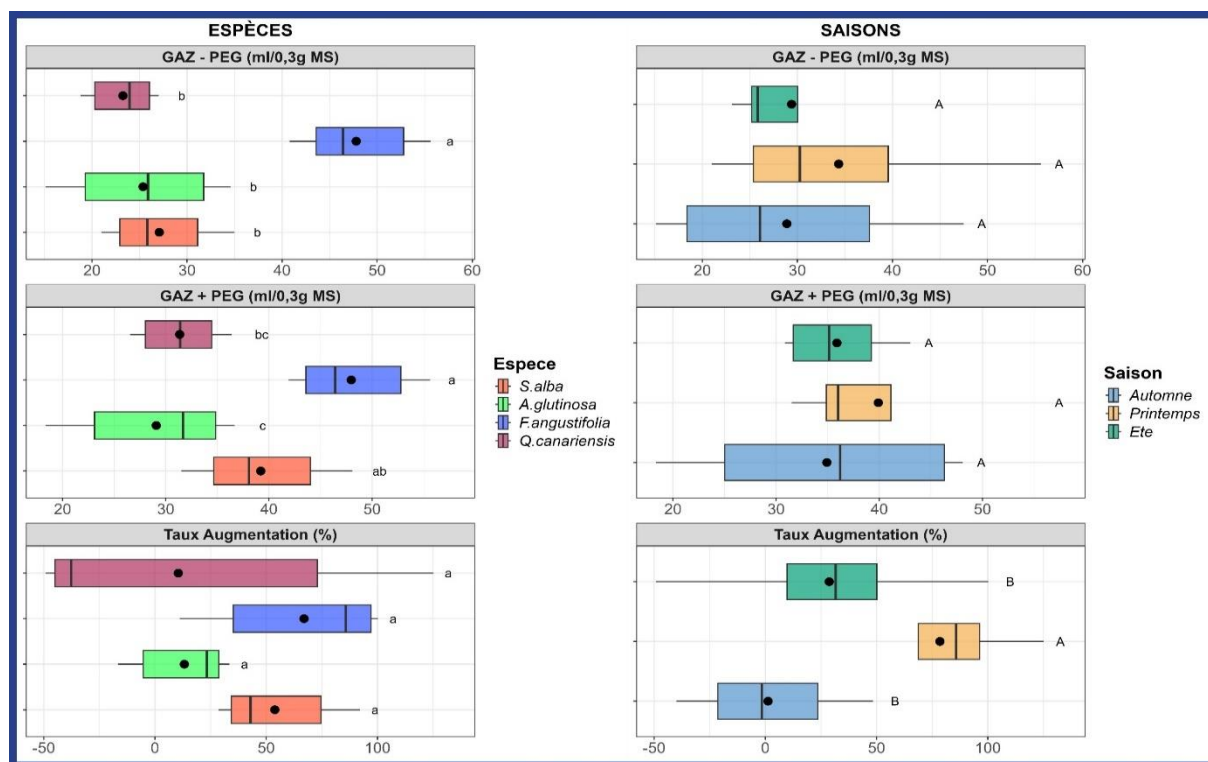
Figure 22 : Boxplots des paramètres de digestibilité *in vitro* des arbres

I.2.6. Effet du PEG sur la production de gaz

L'effet de l'addition de PEG aux substrats des arbres lors de la fermentation *in vitro* est rapporté dans le tableau 23. Les résultats obtenus montrent des interactions entre espèces et saisons de récolte hautement significatives ($p < 0,001$).

Tableau 23 : L'effet du PEG sur la production du gaz des arbres étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Production totale du gaz (ml/0,3g MS)		
		GAZ(-PEG)	GAZ(+PEG)	Taux d'augmentation (%)
<i>Salix alba</i>	Automne	33,89 ± 1,55	47 ± 1,54	38,75 ± 1,79
	Printemps	21,53 ± 0,74	32,55 ± 1,48	51,19 ± 1,68
	Eté	25,84 ± 0,39	38,06 ± 0,4	47,33 ± 0,69
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	16,2 ± 1,52	19,43 ± 1,53	20,06 ± 1,84
	Printemps	34,05 ± 0,74	36,14 ± 0,74	6,15 ± 0,13
	Eté	25,89 ± 0,78	31,67 ± 1,17	22,31 ± 0,86
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	46,41 ± 1,53	46,41 ± 1,53	0 ± 0
	Printemps	55,08 ± 0,77	55,08 ± 0,77	0 ± 0
	Eté	41,9 ± 1,56	42,45 ± 0,78	1,35 ± 1,91
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	19,07 ± 0,4	26,81 ± 0,4	40,6 ± 0,84
	Printemps	26,75 ± 0,39	35,85 ± 0,78	34,02 ± 0,99
	Eté	23,96 ± 1,17	31,39 ± 0,78	31,11 ± 3,14
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 23 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de gaz des arbres

Sans PEG, la production de gaz diffère fortement (figure 23) et varie entre 16,2 et 55,08 ml/0,3g MS chez *A. glutinosa* en automne et *F. angustifolia* au printemps respectivement. Hormis *F. angustifolia* qui n'a pas subi de changement, l'ajout du PEG a amélioré la production de gaz chez les autres substrats. Ainsi, les taux d'augmentation les plus élevés sont détectés chez *S. alba* et *Q. canariensis* avec des moyennes saisonnières de l'ordre de 45,75 et 35,30% respectivement.

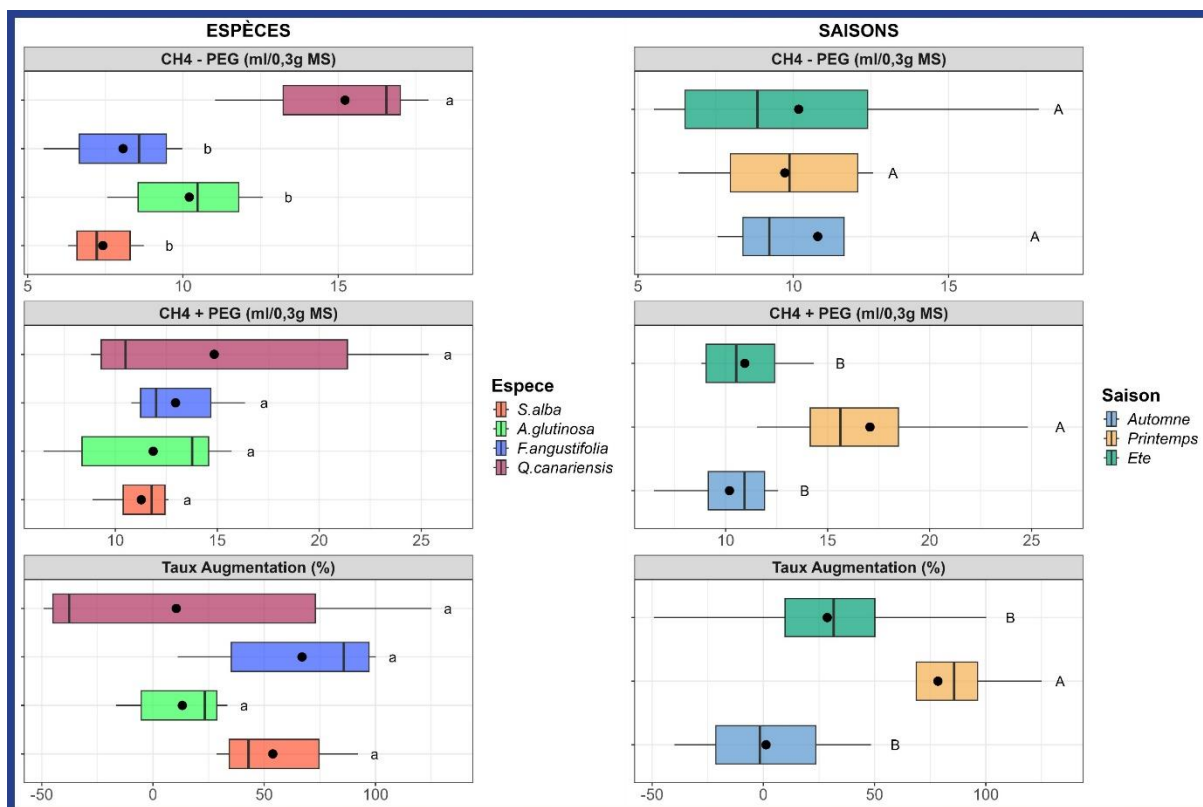
I.2.7. Effet du PEG sur la production de méthane

En absence du PEG les taux de CH₄ sont significativement impactés par les espèces et les saisons de prélèvement (figure 24) avec des fortes interactions ($p < 0,001$) entre les deux facteurs (tableau 24). L'espèce *Q. canariensis* a présenté les valeurs les plus élevées en automne et en été (16,86 et 17,21 ml/0,3g MS respectivement), tandis que *F. angustifolia* a montré la concentration la plus faible en été (5,79 ml/0,3g MS), suivie de près par *S. alba* (6,43 ml/0,3g MS) au printemps.

Tableau 24 : L'effet du PEG sur la production de méthane des arbres étudiés selon les saisons

Espèce	Saison	Production de méthane CH ₄ (ml/0,3g MS)		
		CH ₄ (-PEG)	CH ₄ (+PEG)	Taux d'augmentation (%)
<i>Salix alba</i>	Automne	8,61 ± 0,19	12,3 ± 0,39	42,97 ± 7,69
	Printemps	6,43 ± 0,18	12,08 ± 0,74	87,7 ± 6,18
	Été	7,23 ± 0,78	9,45 ± 0,78	30,91 ± 3,36
<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	7,83 ± 0,38	6,62 ± 0,19	-15,48 ± 1,68
	Printemps	12,31 ± 0,37	15,19 ± 0,74	23,32 ± 2,35
	Été	10,47 ± 0,78	13,77 ± 0,78	31,68 ± 2,44
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	9,85 ± 0,19	11,33 ± 0,76	15,03 ± 5,53
	Printemps	8,59 ± 0,19	15,95 ± 0,58	85,76 ± 2,62
	Été	5,79 ± 0,39	11,58 ± 0,78	100,18 ± 0,01
<i>Quercus canariensis</i>	Automne	16,86 ± 0,4	10,51 ± 0,78	-37,73 ± 3,2
	Printemps	11,58 ± 0,78	25,1 ± 0,39	117,09 ± 11,22
	Été	17,21 ± 0,98	8,95 ± 0,2	-47,95 ± 1,8
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001

L'incorporation du PEG a fortement influencé la production de CH₄. Les taux d'augmentation les plus élevés sont décelés pour *Q. canariensis* au printemps (117,09%) et *F. angustifolia* en été (100,18 %). Néanmoins, la présence du PEG a entraîné un effet dépressif sur la production de CH₄ qui a diminué par : 15,48 ; 37,73 et 47,95% pour *A. glutinosa* en été et *Q. canariensis* en automne et en été respectivement.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 24 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de méthane des arbres

I.3. Valeur nutritionnelle des lianes

I.3.1. Composition chimique primaire

La composition chimique des lianes étudiées, présentée dans le tableau 25, montre une des interactions significatives ($p < 0,001$) entre les espèces et les saisons de prélèvement pour l'ensemble des paramètres analysés.

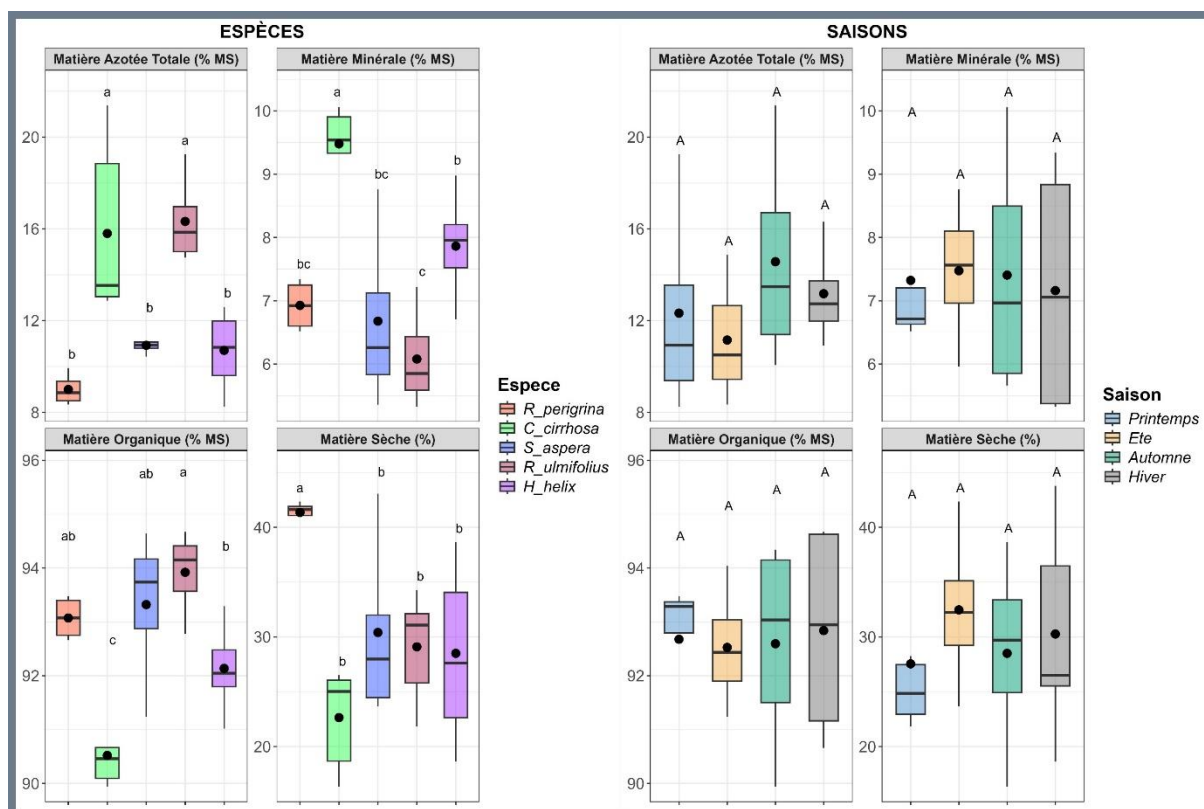
En général, les espèces de lianes étudiées montrent des teneurs faibles en MS. L'espèce *C. cirrhosa* se distingue par la teneur en MS la plus faible, se situant autour de 26% en hiver et descendant jusqu'à 16% en automne. À l'opposé, *S. aspera* présente la teneur en MS la plus élevée, atteignant 43% en hiver. Les espèces *R. ulmifolius* et *H. helix* présentent des teneurs en MS intermédiaires par rapport aux autres espèces étudiées, avec des fluctuations saisonnières remarquables (figure 25). En outre, *R. peregrina* montre des teneurs élevées et stables de l'ordre de 41% en moyenne.

La teneur en MM varie de 5% MS pour *R. ulmifolius* en hiver à 10% MS pour *C. cirrhosa* en automne. On observe une tendance saisonnière pour la MM chez *S. aspera* et *R. ulmifolius*, avec une augmentation en hiver. La MO se maintient généralement au-dessus de 90% pour toutes les espèces, indépendamment des variations saisonnières.

Tableau 25 : Composition chimique primaire des lianes étudiées selon les saisons

Espèce	Saison	MS	MO	MM	MAT
<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	40,79 ± 1,32	93,43 ± 0,08	6,57 ± 0,08	9,55 ± 0,54
	Été	41,92 ± 0,53	92,72 ± 0,08	7,28 ± 0,08	8,45 ± 0,15
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	16,46 ± 0,17	89,99 ± 0,07	10,01 ± 0,07	20,99 ± 0,53
	Hiver	26,45 ± 0,09	91,11 ± 0,63	8,89 ± 0,63	12,88 ± 0,01
	Printemps	25,01 ± 0,09	90,47 ± 0,29	9,54 ± 0,29	13,54 ± 0,01
<i>Smilax aspera</i>	Automne	28 ± 0,43	94,08 ± 0,04	5,92 ± 0,05	10,25 ± 0,26
	Hiver	43,44 ± 0,51	94,49 ± 0,21	5,51 ± 0,21	11,01 ± 0,13
	Printemps	26,49 ± 2,5	93,4 ± 0,04	6,6 ± 0,05	10,93 ± 0
	Été	23,69 ± 0	91,32 ± 0,11	8,69 ± 0,1	11,51 ± 0,64
<i>Rubus ulmifolius</i>	Automne	31,58 ± 0,71	94,3 ± 0,06	5,7 ± 0,05	15,24 ± 0,25
	Hiver	30,37 ± 5,52	94,65 ± 0,04	5,35 ± 0,04	16,38 ± 0,11
	Printemps	22,8 ± 1,36	92,81 ± 0,04	7,19 ± 0,04	18,88 ± 0,52
	Été	31,63 ± 0,8	93,93 ± 0,16	6,08 ± 0,16	14,81 ± 0,09
<i>Hedera helix</i>	Automne	37,96 ± 0,95	92,01 ± 0,02	7,99 ± 0,03	11,81 ± 0,12
	Hiver	20,8 ± 3,08	91,12 ± 0,13	8,89 ± 0,14	12,43 ± 0,23
	Printemps	22,61 ± 0,07	93,29 ± 0,01	6,71 ± 0	8,74 ± 0,67
	Été	32,63 ± 0,52	92,14 ± 0,1	7,86 ± 0,1	9,85 ± 0,16
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

MS : Matière Sèche (%); MO : Matière Organique (%MS); MM : Matière Minérale (%MS); MAT : Matière Azotée Totale (%MS);



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 25 : Boxplots des paramètres de la composition chimique des lianes

Les teneurs en MAT présentent une variabilité particulièrement marquée ; l'espèce *C. cirrhosa* se démarque par la teneur la plus élevée (20,99% MS) en automne. À l'inverse, *R. peregrina* et *H. helix* affichent les valeurs les plus faibles (8,45 et 8,74% MS respectivement) en été et au printemps. Cependant, *R. ulmifolius* maintient des teneurs azotées relativement élevées tout au long de l'année (14,81 à 18,88% MS) (figure 25).

I.3.2. Composition en parois cellulaires

Les fractions pariétales des lianes étudiées révèlent des variations importantes (figure 26) se traduisant par des interactions significatives ($p < 0,001$) entre espèces et saisons de récolte (tableau 26).

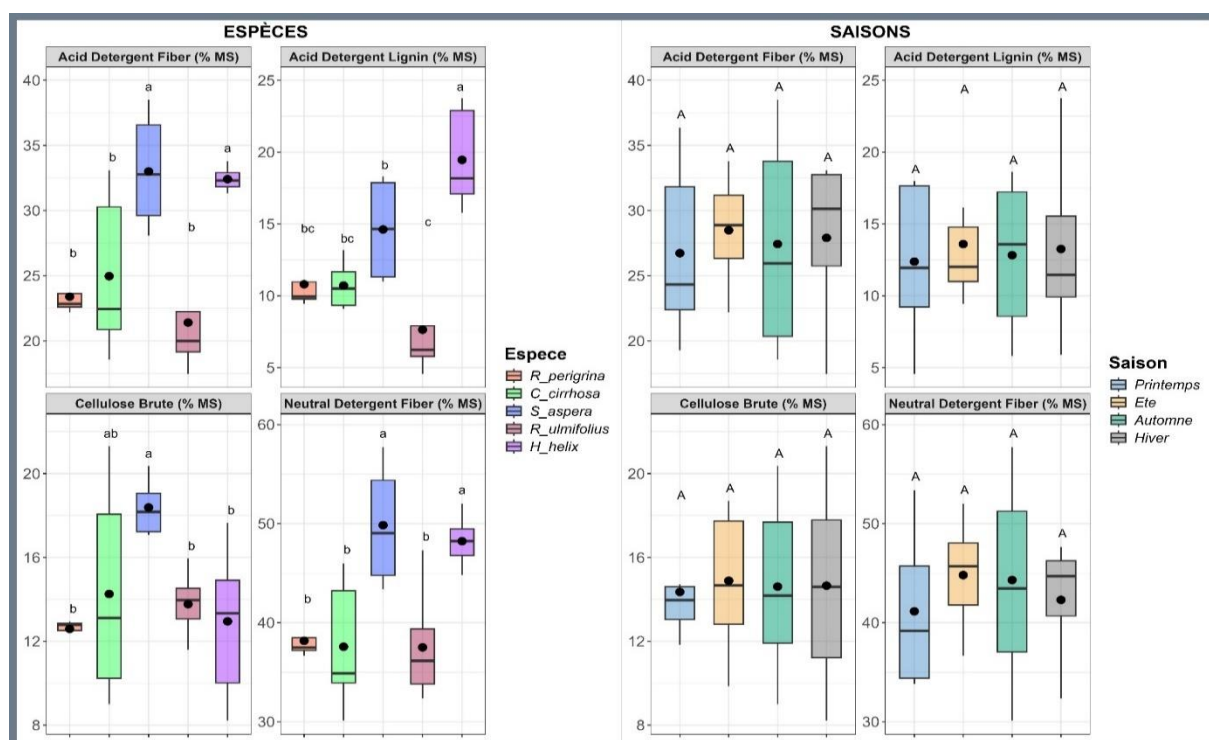
En effet, *S. aspera* et *H. helix* se distinguent par leurs teneurs élevées en NDF, montrant une relative stabilité saisonnière avec des pics en automne (57,58 %MS) et en été (51,14 %MS) respectivement. Ainsi, *C. cirrhosa* montre des fluctuations saisonnières prononcées allant de 32,78%MS à 45,9 %MS en automne et en hiver respectivement. Les teneurs en ADF et en CB pour ces espèces suivent les mêmes tendances que celles en NDF. Par ailleurs, à l'exception de ses teneurs respectives en NDF et en ADF de 45,23 %MS et 27,63 %MS enregistrées en été, *R. ulmifolius* présente avec *R. peregrina* des valeurs faibles mais stables en NDF et ADF qui pivotent autour des moyennes de 35%MS et 21%MS respectivement.

Pour la teneur en lignine (ADL), des tendances interspécifiques prononcées ont été observées. Par ailleurs, *H. helix* se démarque avec des valeurs particulièrement élevées, surtout en hiver. À l'opposé, *R. ulmifolius* maintient les teneurs en ADL les plus faibles, avec une variabilité saisonnière moins prononcée.

Tableau 26 : Composition en parois cellulaires des lianes étudiées selon les saisons

Espèce	Saison	NDF	ADF	ADL	CB
<i>Rubia perigrina</i>	Printemps	39,18 ± 2,55	24,33 ± 1,96	11,94 ± 2,75	12,39 ± 0,79
	Été	37,15 ± 0,68	22,46 ± 0,39	9,67 ± 0,33	12,79 ± 0,05
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	32,78 ± 3,76	19,49 ± 1,29	10,32 ± 1,51	9,16 ± 0,23
	Hiver	45,9 ± 0,12	32,96 ± 0,17	12,48 ± 1	20,49 ± 1,16
<i>Smilax aspera</i>	Printemps	34,05 ± 0,34	22,46 ± 0,18	9,35 ± 0,38	13,11 ± 0,2
	Automne	57,58 ± 0,16	37,86 ± 0,89	17,58 ± 1,01	20,28 ± 0,12
	Hiver	43,48 ± 0,16	28,17 ± 0,15	11,06 ± 0,1	17,12 ± 0,05
	Printemps	52,6 ± 1,08	35,73 ± 0,89	17,91 ± 0,11	17,81 ± 0,78
<i>Rubus ulmifolius</i>	Été	45,7 ± 0,75	30,25 ± 0,26	11,91 ± 0,76	18,34 ± 0,5
	Automne	37,84 ± 0,37	20,38 ± 0,14	6,19 ± 0,53	14,19 ± 0,39
	Hiver	32,49 ± 0,19	18,14 ± 0,93	6,28 ± 0,56	11,86 ± 0,37
	Printemps	34,48 ± 0,37	19,48 ± 0,29	5,11 ± 0,77	14,36 ± 0,48
<i>Hedera helix</i>	Été	45,23 ± 2,92	27,63 ± 0,12	12,97 ± 1,94	14,66 ± 1,82
	Automne	49,01 ± 0,25	32,01 ± 0,86	17,21 ± 2,02	14,81 ± 2,88
	Hiver	47,34 ± 0,4	32,35 ± 0,54	23,21 ± 0,76	9,14 ± 1,3
	Printemps	45,41 ± 0,84	31,66 ± 0,47	17,58 ± 0,22	14,09 ± 0,25
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

NDF: Neutral Detergent Fiber (%MS); ADF: Acid Detergent Fiber (%MS); ADL: Acid Detergent Lignin (%MS); CB: Cellulose Brute (%MS)



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 26 : Boxplots de la composition en parois cellulaires des lianes

I.3.3. Composition en métabolites secondaires

La concentration en métabolites secondaires des espèces des lianes étudiées est influencée significativement ($p < 0,001$) par les interactions entre les espèces et les saisons de prélèvement (tableau 27).

Tableau 27 : Composition en métabolites secondaires des lianes étudiées selon les saisons

Espèce	Saison	PPT	TT	TC	ABT
<i>Rubia peregriana</i>	Printemps	96,25 ± 2,41	88,79 ± 2,52	10,4 ± 0,02	1,2 ± 0,01
	Été	96,63 ± 0,62	87,12 ± 0,74	14,58 ± 0,39	1,45 ± 0,07
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	20,26 ± 0,19	13,01 ± 0,29	10,83 ± 0,6	1 ± 0
	Hiver	18,83 ± 0,31	13,14 ± 0,18	15,12 ± 0,23	0,96 ± 0,01
	Printemps	24,62 ± 0,36	16,97 ± 0,16	2,15 ± 0	0,98 ± 0,01
<i>Smilax aspera</i>	Automne	16,36 ± 0,08	10,28 ± 0,09	12,88 ± 0,11	1,06 ± 0
	Hiver	47,5 ± 0,15	36,43 ± 0,21	16,57 ± 0,23	1,02 ± 0,01
	Printemps	19,81 ± 0,67	14,19 ± 1,24	0,21 ± 0,04	1,04 ± 0,01
	Été	44,41 ± 0,15	30,36 ± 0,37	0,19 ± 0,01	1,11 ± 0
<i>Rubus ulmifolius</i>	Automne	55,64 ± 0,69	26,77 ± 1,01	0,41 ± 0,01	1,06 ± 0,02
	Hiver	116,91 ± 0,68	88,52 ± 0,76	1,53 ± 0,07	1,14 ± 0
	Printemps	116,03 ± 11,1	80,78 ± 11,71	0,22 ± 0,04	1 ± 0
	Été	102,07 ± 2,55	79,2 ± 3,43	1,45 ± 0,02	1,03 ± 0
<i>Hedera helix</i>	Automne	24,12 ± 0,08	16,55 ± 1,95	0,45 ± 0	1,23 ± 0,02
	Hiver	23,27 ± 0,97	15,86 ± 0,01	0,18 ± 0	1,42 ± 0,03
	Printemps	2,6 ± 0,08	2,34 ± 0,08	0,03 ± 0,01	1,12 ± 0,01
	Été	22,31 ± 0,04	20,56 ± 0,05	0,08 ± 0	1,08 ± 0,02
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

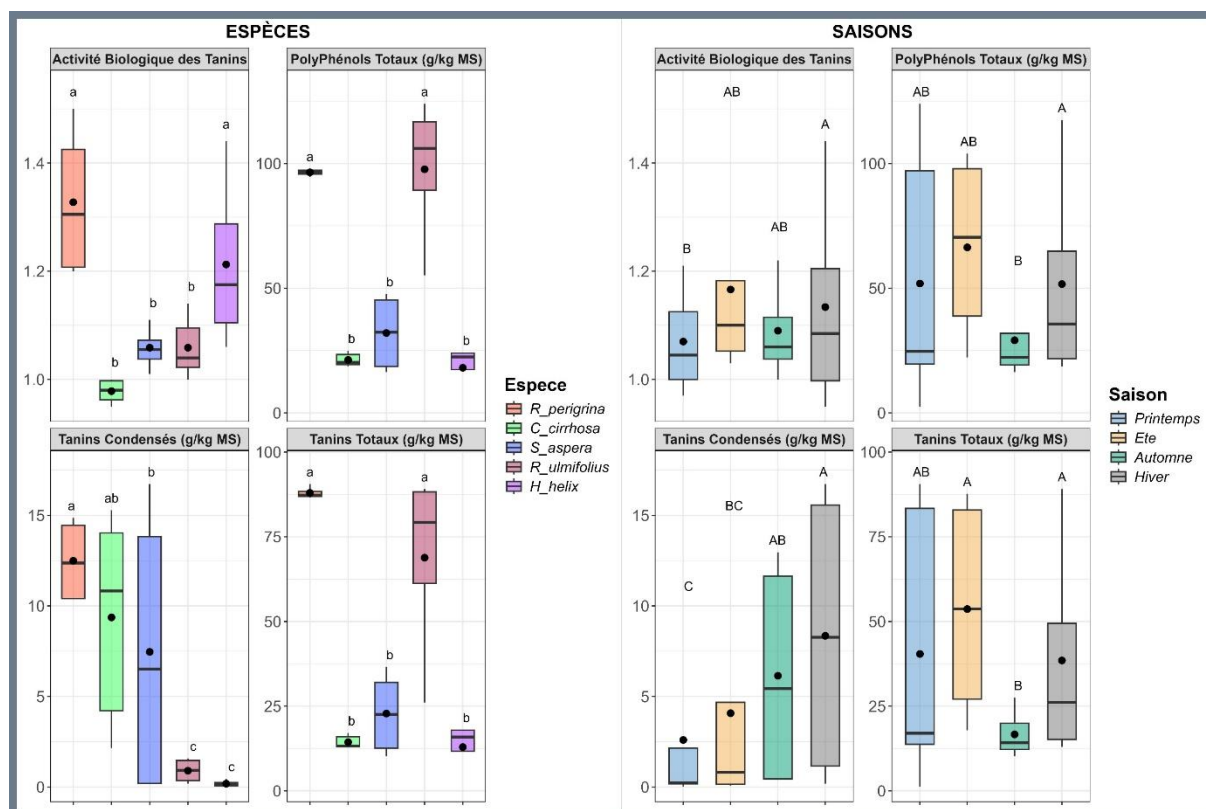
PPT : PolyPhénols Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TT : Tanins Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TC : Tanins condensés (g équivalent acide leucocyanidine /kg MS) ; ABT : Activité Biologique des Tanins

L'espèce *R. ulmifolius* se distingue comme la liane la plus riche en PPT, atteignant un pic remarquable de 116,91 g EAT/kg MS en hiver. Cependant, cette espèce présente des teneurs très faibles en TC, avec un minimum de 0,22 g EAL/kg MS au printemps. Par ailleurs, *R. peregriana*, quant à elle, montre la teneur la plus élevée en TT au printemps (88,79 g EAT/kg MS), tout en maintenant des niveaux élevés de PPT tout au long de l'année (figure 27).

À l'opposé, *C. cirrhosa* est l'espèce la plus pauvre en PPT et TT, avec des valeurs minimales respectives de 18,83 et 13,01 g EAT/kg MS en hiver et en automne respectivement, alors qu'elle présente une teneur élevée en TC, atteignant 15,1 g EAL/kg MS en hiver.

Il est à noter que *S. aspera* se révèle être l'espèce la plus riche en TC, avec un maximum de 16,8 g EAL/kg MS en hiver, suivie de près par *C. cirrhosa*. En revanche, *H. helix* présente les teneurs les plus faibles en TC, avec un minimum de 0,45 g EAL/kg MS en automne.

Concernant l'activité biologique des tanins, les valeurs observées sont modestes pour toutes les espèces étudiées. *R. peregrina* montre l'activité la plus élevée, atteignant un maximum de 1,45 en été suivie de près par *H. helix* en hiver avec 1,42. À l'inverse, *C. cirrhosa* présente l'activité anti-nutritionnelle la plus faible mais aussi la plus stable, avec des valeurs variant de 0,96 à 1,00 selon les saisons.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 27 : Boxplots de la composition en métabolites secondaires des lianes

I.3.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation

Les quantités de gaz total produit et les paramètres de fermentation des substrats de lianes incubés sont présentées dans le tableau 28. Les paramètres de fermentation présentent des variations significatives ($p < 0,001$) selon les interactions entre les espèces et les saisons de prélèvement.

Tableau 28 : Paramètres de cinétique de fermentation des lianes étudiées selon les saisons

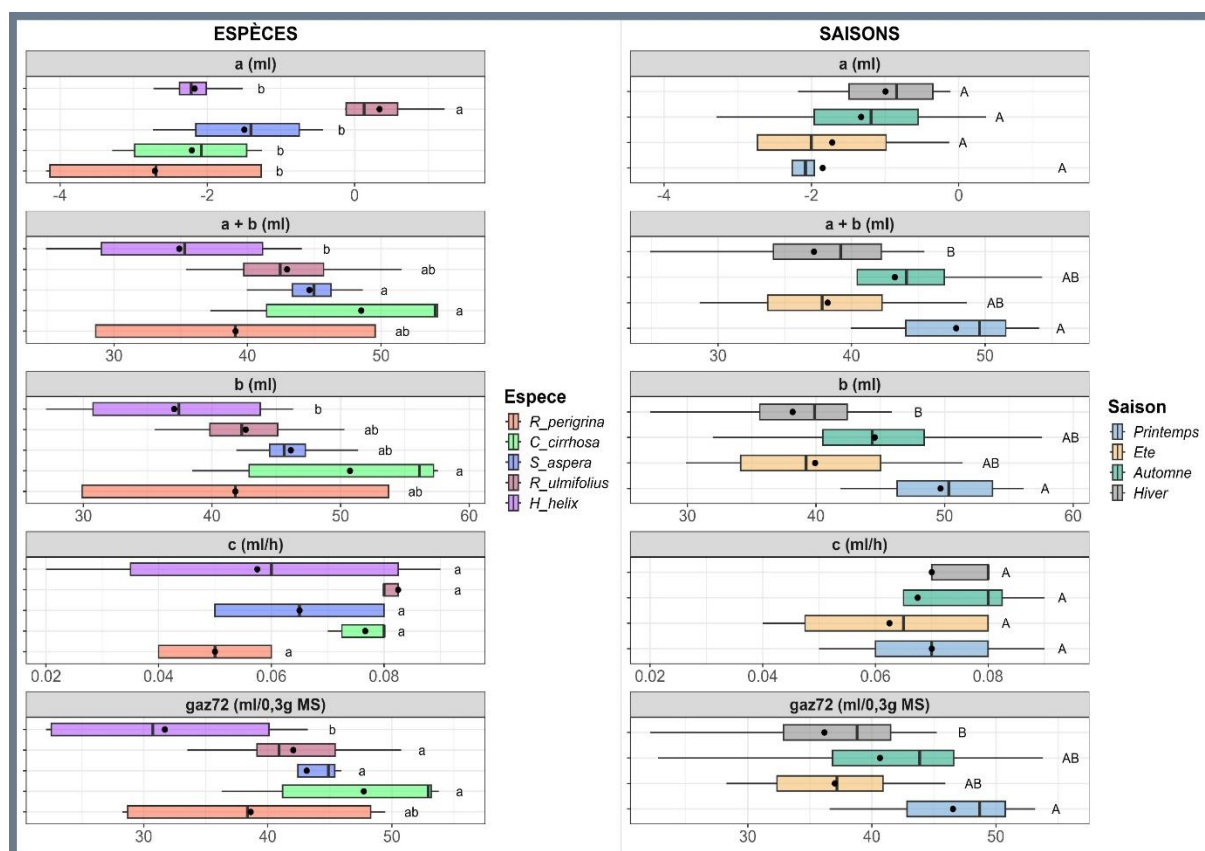
Espèce	Saison	Gaz total	a	b	a+b	c
<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	48,68 ± 1,12	-4,16	53,73	49,57	0,06
	Été	28,56 ± 0,38	-1,27	29,9	28,63	0,04
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	53,24 ± 0,76	-3,29	57,58	54,28	0,08
	Hiver	36,82 ± 0,75	-1,26	38,47	37,22	0,08
	Printemps	53,16 ± 0	-2,08	56,14	54,05	0,07
<i>Smilax aspera</i>	Automne	44,3 ± 0,37	-0,86	45,35	44,49	0,08
	Hiver	45,22 ± 0	-0,43	45,89	45,46	0,08
	Printemps	37,11 ± 0,74	-1,96	41,9	39,95	0,05
	Été	45,92 ± 0	-2,74	51,38	48,64	0,05
<i>Rubus ulmifolius</i>	Automne	42,6 ± 1,51	0,37	43,38	43,75	0,09
	Hiver	40,27 ± 0	-0,11	41,27	41,15	0,08
	Printemps	50,75 ± 0	1,22	50,31	51,54	0,08
	Été	34,61 ± 1,53	-0,13	35,55	35,42	0,08
<i>Hedera helix</i>	Automne	22,48 ± 0,4	-1,52	31,96	30,44	0,02
	Hiver	22,39 ± 0,38	-2,18	27,09	24,91	0,04
	Printemps	42,96 ± 0,37	-2,26	46,31	44,06	0,09
	Été	38,96 ± 0,38	-2,73	42,89	40,16	0,08
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Gaz total : volume de gaz produit après la fin de l'incubation (ml/ 0,3g MS) ; a : Volume de gaz produit à partir de la fraction soluble facilement fermentescible (ml) ; b : Volume de gaz produit à partir de la fraction insoluble potentiellement fermentescible (ml) ; a+b : la production potentielle du gaz (ml) c : La vitesse de production de gaz (ml/heure)

La production de gaz totale révèle une forte variabilité interspécifique et saisonnière (figure 28). L'espèce *C. cirrhosa* se distingue par sa production élevée en automne et au printemps (53,2 ml/0,3g MS), contrastant avec *H. helix* qui affiche les valeurs les plus faibles en automne et en hiver (22,5 ml/0,3g MS). Cependant, *R. ulmifolius* montre une fluctuation importante (figure 28), culminant au printemps (50,8 ml/0,3g MS) et chutant en été (33,5 ml/0,3g MS).

La fraction rapidement fermentescible (a) varie considérablement entre les espèces et les saisons. L'espèce *R. ulmifolius* présente la valeur maximale au printemps (1,22 ml/0,3g MS), tandis que *R. peregrina* affiche la plus forte amplitude saisonnière, passant en automne de -4,16 ml/0,3g MS à -1,27 ml/0,3g MS en été. Pour la fraction lentement fermentescible (b), *C. cirrhosa* maintient les valeurs les plus élevées en automne et au printemps (environ 57 ml/0,3g MS), alors que *R. peregrina* montre les plus faibles, notamment en été (29,9 ml/0,3g MS). Le potentiel de production de gaz (a+b) suit une tendance similaire à (b) où *C. cirrhosa* domine avec un pic automnal de 54,3 ml/0,3g MS.

Les résultats ont aussi révélé que *R. ulmifolius* en automne et *H. helix* au printemps sont les plus rapidement dégradées ($c=0,09$ ml/h) alors que *H. helix* en automne prend plus de temps pour se fermenter ($c=0,02$ ml/h).



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 28 : Boxplots des paramètres de cinétique de fermentation des lianes

I.3.5. Paramètres de digestibilité *in vitro*

Les paramètres issus de la digestibilité *in vitro* des substrats des lianes étudiées sont rapportés dans le tableau 29. Des tendances interspécifiques importantes et des variations saisonnières modérées ont été observées (figure 29) avec une forte interaction espèce-saison ($p < 0,001$) pour tous les paramètres étudiés.

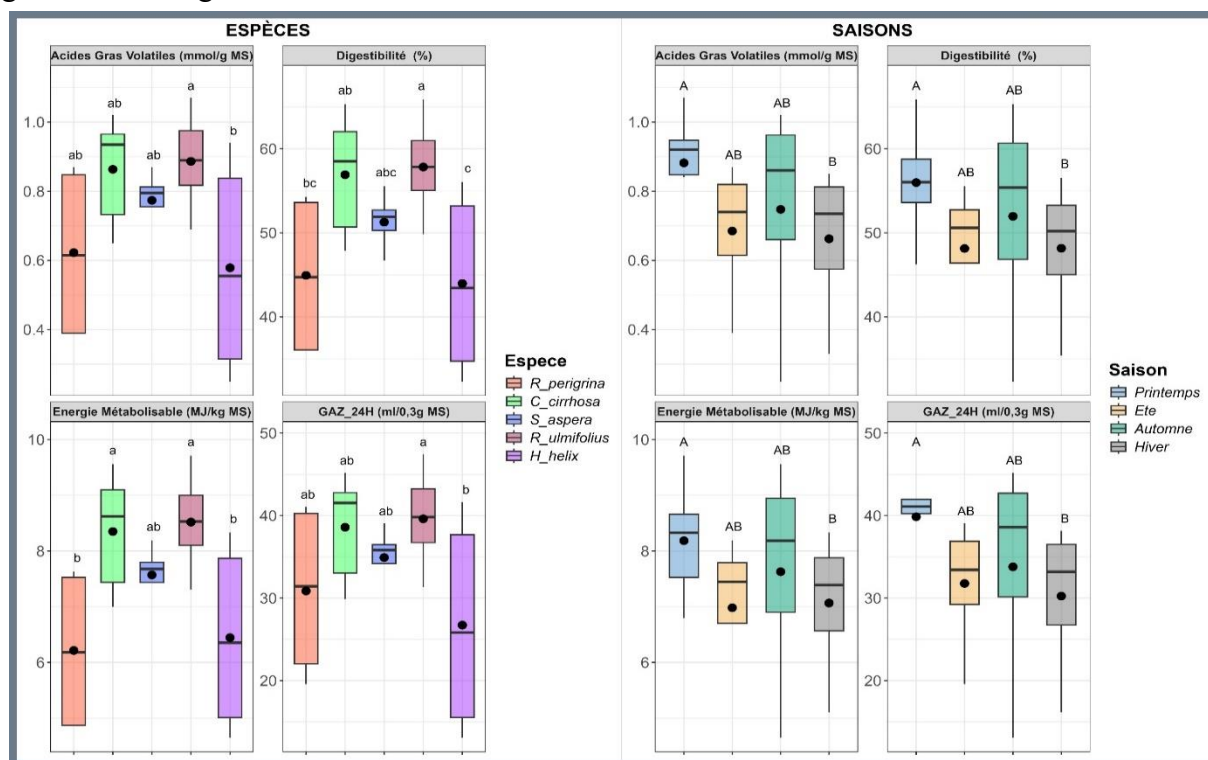
En effet, *R. ulmifolius* se distingue nettement des autres espèces par sa digestibilité élevée. Cette dernière montre une stabilité relative de ses paramètres de digestibilité au cours de l'année, suggérant une qualité nutritionnelle constante avec des moyennes saisonnières respectives en dMO, EM et AGV de l'ordre de 58%, 8,5 MJ/kg MS et 0,9 mmol/g MS. À l'opposé, *H. helix* affiche des fluctuations saisonnières importantes en dMO, EM et AGV allant de 23,6%, 4 MJ/kg MS et 0,26 mmol/g MS en hiver à 56,04%, 8,33 MJ/kg MS et 0,93 mmol/g MS au printemps. Les autres espèces présentent des profils de digestibilité moyennes, avec des amplitudes saisonnières moins marquées que *H. helix*.

Tableau 29 : Paramètres de digestibilité *in vitro* des lianes étudiées selon les saisons

Espèce	Saison	Gaz 24h	dMO	EM	AGV
<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	40,53 ± 0,74	53,83 ± 0,63	7,56 ± 0,1	0,86 ± 0,02
	Eté	21,22 ± 2,31	36,05 ± 0	4,87 ± 0	0,39 ± 0
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	44,1 ± 1,52	64,19 ± 1,61	9,4 ± 0,23	1 ± 0,04
	Hiver	30,15 ± 0,38	48,06 ± 0,29	7,04 ± 0,05	0,66 ± 0,01
	Printemps	41,53 ± 0,78	58,52 ± 0,69	8,62 ± 0,11	0,94 ± 0,02
<i>Smilax aspera</i>	Automne	35,65 ± 0	51,57 ± 0,11	7,63 ± 0,01	0,79 ± 0
	Hiver	35,97 ± 0	52,18 ± 0,05	7,72 ± 0,01	0,8 ± 0
	Printemps	29,53 ± 0,37	46,49 ± 0,33	6,84 ± 0,06	0,65 ± 0,01
	Eté	38,53 ± 0,75	54,88 ± 0,94	8,1 ± 0,13	0,86 ± 0,01
<i>Rubus ulmifolius</i>	Automne	42,07 ± 0,75	59,51 ± 0,56	8,79 ± 0,08	0,95 ± 0,02
	Hiver	38,15 ± 0	56,52 ± 0,04	8,33 ± 0,01	0,85 ± 0
	Printemps	46,34 ± 1,56	65,04 ± 1,15	9,58 ± 0,18	1,05 ± 0,04
	Eté	31,9 ± 0,76	50,3 ± 0,63	7,38 ± 0,1	0,71 ± 0,02
<i>Hedera helix</i>	Automne	13,38 ± 0,4	32,6 ± 0,41	4,7 ± 0,06	0,26 ± 0,01
	Hiver	16,72 ± 0,76	35,92 ± 0,78	5,19 ± 0,12	0,34 ± 0,01
	Printemps	41,38 ± 0,37	56,04 ± 0,02	8,33 ± 0,01	0,93 ± 0,01
	Eté	35,47 ± 1,52	51,35 ± 1,27	7,58 ± 0,2	0,79 ± 0,04
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Gaz 24h : volume de gaz produit après 24 heures d'incubation (ml/ 0,3g MS) ; dMO : digestibilité de la Matière Organique (%) ; EM : Energie Métabolisable (MJ/kg MS) ; AGV : Acides Gras Volatiles (mmol/seringue)

Comparativement aux autres saisons de l'année, le printemps se distingue comme la saison où les paramètres de digestibilité sont les plus élevés pour la plupart des espèces. L'été, en revanche, est généralement associé aux valeurs les plus basses indiquant une diminution globale de la digestibilité durant cette saison.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 29 : Boxplots des paramètres de digestibilité *in vitro* des lianes

I.3.6. Effet de PEG sur la production de gaz

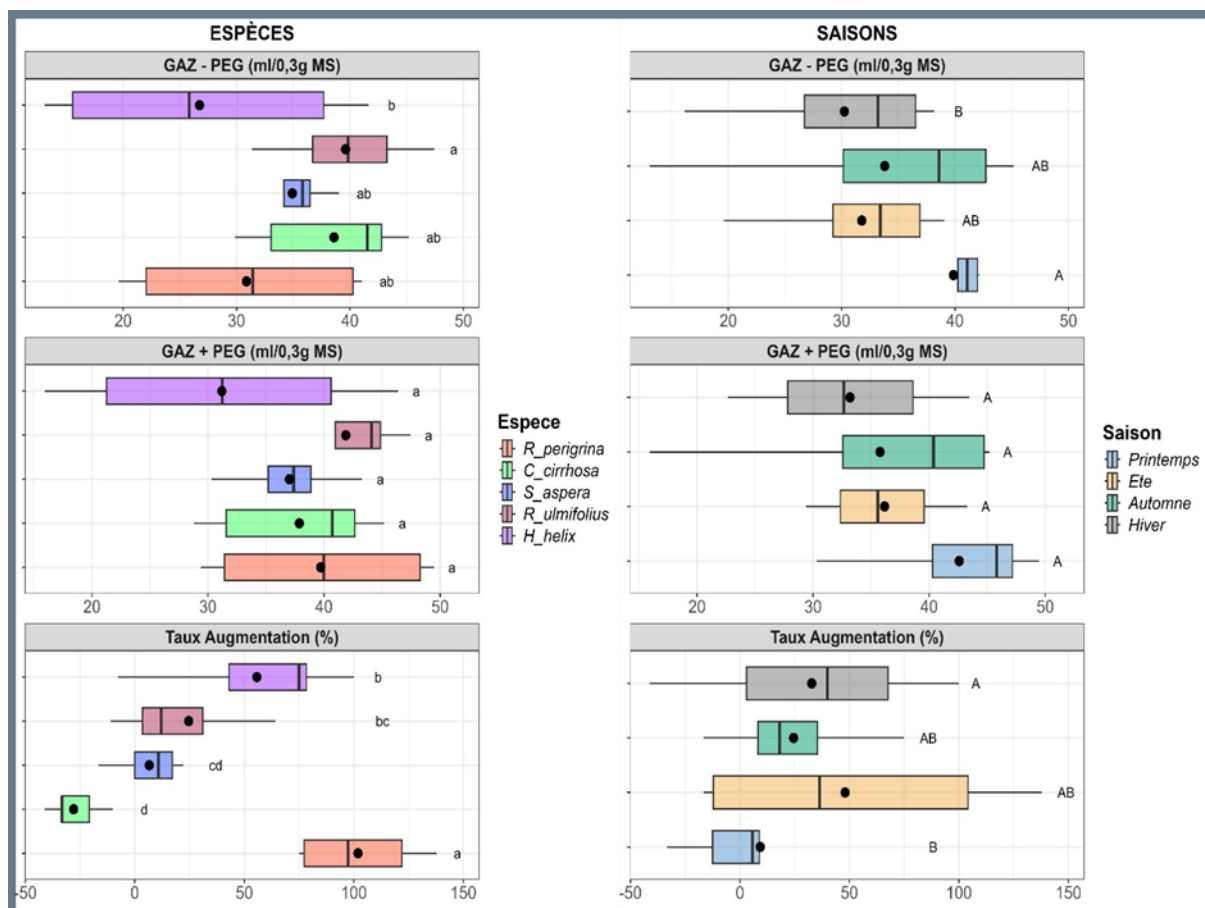
L'action de la présence/absence du PEG sur la production de gaz des substrats des lianes étudiées est consignée dans le tableau 30 ; des interactions importantes ($p < 0,001$) ont été enregistrées entre les espèces et les saisons de prélèvement des échantillons.

Tableau 30 : L'effet du PEG sur la production du gaz des lianes étudiées selon les saisons

Espèce	Saison	Production totale du gaz (ml/0,3g MS)		
		GAZ(-PEG)	GAZ(+PEG)	Taux d'augmentation (%)
<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	40,53 ± 0,74	48,68 ± 1,12	20,12 ± 0,55
	Été	21,22 ± 2,31	30,74 ± 1,92	45,24 ± 6,73
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	44,1 ± 1,52	44,1 ± 1,53	0 ± 0
	Hiver	30,15 ± 0,38	28,81 ± 0	-4,42 ± 1,19
	Printemps	41,53 ± 0,78	40,7 ± 1,17	-2,02 ± 0,97
<i>Smilax aspera</i>	Automne	35,65 ± 0	37,74 ± 0	5,86 ± 0
	Hiver	35,97 ± 0	36,74 ± 0,37	2,14 ± 1,02
	Printemps	29,53 ± 0,37	30,84 ± 0,74	4,41 ± 1,17
	Été	38,53 ± 0,75	42,75 ± 0,75	10,97 ± 0,19
<i>Rubus ulmifolius</i>	Automne	42,07 ± 0,75	44,73 ± 0	6,35 ± 1,91
	Hiver	38,15 ± 0	43,45 ± 0	13,89 ± 0
	Printemps	46,34 ± 1,56	46,34 ± 1,56	0 ± 0
	Été	31,9 ± 0,76	32,98 ± 0,76	3,39 ± 0,08
<i>Hedera helix</i>	Automne	13,38 ± 0,4	16,51 ± 0,8	23,37 ± 2,26
	Hiver	16,72 ± 0,76	23,74 ± 1,52	41,9 ± 2,61
	Printemps	41,38 ± 0,37	46,39 ± 0	12,11 ± 1
	Été	35,47 ± 1,52	38,16 ± 0,76	7,64 ± 2,48
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001

Sans PEG, la production de gaz varie considérablement entre les espèces. Alors, *R. ulmifolius* montre le volume de gaz le plus élevé au printemps avec 46,34 ml/0,3g MS, suivi de près par *C. cirrhosa* en automne avec 44,1 ml/0,3g MS. À l'opposé, *H. helix* présente les volumes les plus faibles, particulièrement en hiver et au printemps avec respectivement 13,38 et 16,78 ml/0,3g MS.

L'ajout de PEG a eu des effets variables selon les espèces. Cependant, *C. cirrhosa* a montré un effet dépressif du PEG (figure 30), avec des taux d'augmentation négatifs de -4,42% en hiver et -2,02% au printemps. En revanche, *H. helix* a montré une amélioration significative avec l'ajout de PEG, avec des taux d'augmentation de 23,37% en hiver et 41,9% au printemps.



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 30 : Boxplots de l'effet du PEG sur la production de gaz des lianes

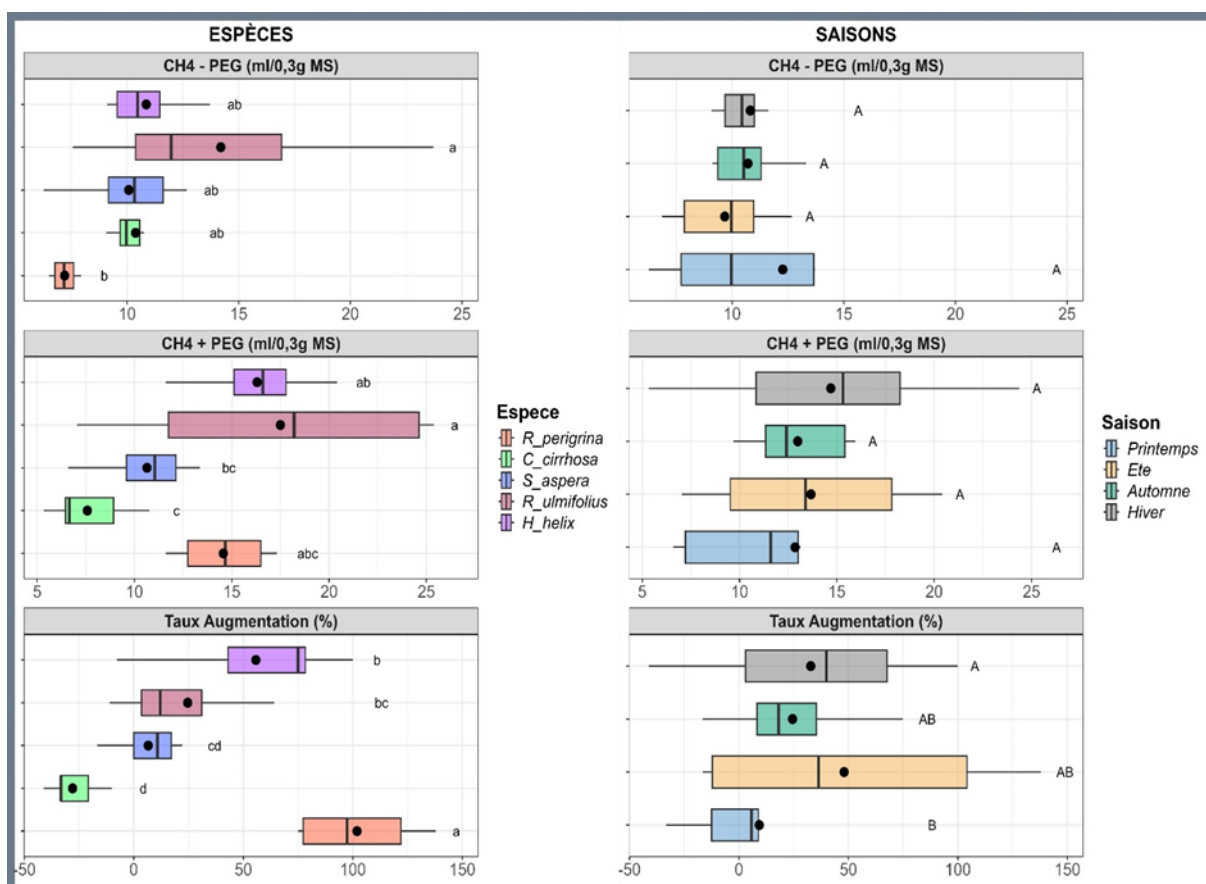
I.3.7. Effet de PEG sur la production de méthane

Effet de PEG sur l'émission de méthane est affiché dans le tableau 31. La concentration en méthane est très variable entre les substrats et les saisons de récolte ($p < 0,001$). La production de méthane en absence du PEG varie de 7,32 ml/0,3 g MS pour *S. aspera* au printemps à 23,45 ml/0,3 g MS pour *R. ulmifolius* au printemps. En présence du PEG, elle oscille de 5,87 ml/0,3 g MS pour *C. cirrhosa* en hiver à 25,38 ml/0,3 g MS pour *R. ulmifolius* au printemps.

L'ajout de PEG a contribué à l'augmentation de la production de méthane de 127,27% pour *R. peregrina* en été, illustrant une réponse positive significative. Cependant, il a également entraîné une diminution de 37,23% pour *C. cirrhosa* en hiver, indiquant un important effet dépressif (figure 31).

Tableau 31 : L'effet du PEG sur la production de CH₄ des lianes étudiées selon les saisons

Espèce	Saison	Production de méthane CH ₄ (ml/0,3g MS)		
		CH ₄ (-PEG)	CH ₄ (+PEG)	Taux d'augmentation (%)
<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	7 ± 0,7	12,36 ± 1,08	76,59 ± 2,23
	Été	7,4 ± 0,77	16,77 ± 0,79	127,27 ± 14,96
<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	11,84 ± 1,52	10,22 ± 0,76	-13,35 ± 4,68
	Hiver	9,34 ± 0,37	5,87 ± 0,75	-37,23 ± 5,51
<i>Smilax aspera</i>	Printemps	9,97 ± 0	6,65 ± 0	-33,3 ± 0
	Automne	9,91 ± 0,66	11,8 ± 0,37	19,16 ± 4,21
<i>Rubus ulmifolius</i>	Hiver	10,95 ± 0,94	12,85 ± 0,73	17,51 ± 3,44
	Printemps	7,32 ± 1,48	7,74 ± 1,63	5,72 ± 0,87
<i>Hedera helix</i>	Été	12,14 ± 0,75	10,19 ± 0,52	-16,04 ± 0,87
	Automne	11,98 ± 1,88	14,01 ± 1,73	17,21 ± 3,94
<i>Rubus ulmifolius</i>	Hiver	12,72 ± 3	22,78 ± 2,25	82,06 ± 25,23
	Printemps	23,45 ± 0,39	25,38 ± 0	8,27 ± 1,8
<i>Hedera helix</i>	Été	8,65 ± 1,53	7,84 ± 1,15	-9,12 ± 2,8
	Automne	9,11 ± 0	15,94 ± 0	74,97 ± 0
<i>Rubus ulmifolius</i>	Hiver	10,25 ± 0,76	17,26 ± 0	68,86 ± 12,58
	Printemps	13,6 ± 0,16	12,13 ± 0,74	-10,87 ± 4,44
<i>Hedera helix</i>	Été	10,48 ± 0,38	19,89 ± 0,76	90 ± 14,14
Espèce*saison		<0,001	<0,001	<0,001



a, b, c, d : Les espèces avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

A, B, C, D : Les saisons avec des lettres différentes représentent une différence significative ($p < 0,05$)

Figure 31: Boxplots de l'effet du PEG sur la production CH₄ des lianes

II. Détermination de la valeur nutritionnelle des espèces toutes catégories confondues

II.1. Composition chimique primaire

La composition chimique primaire des espèces ligneuses étudiées est affichée dans le tableau 32. La teneur moyenne en MS des lianes (catégorie de référence) au printemps (saison de référence) est estimée à 27,54% ($p < 0,001$). La catégorie montre une déviation hautement significative ($p < 0,001$). En effet, les arbres et les arbustes présentent des teneurs élevées par 11,95% ($p = 0,024$) et 12,32% ($p = 0,020$) respectivement, et cela par rapport aux lianes. L'influence des saisons sur la MS ne montre pas d'effet significatif ($p=0,07$) suggérant que les effets saisonniers sont relativement constants entre les catégories d'espèces. De même, l'interaction entre les catégories et les saisons ne révèle aucun effet notable ($p=0,37$), cependant, les arbustes en automne montrent une augmentation significative (15,32 %, $p= 0,047$) (figure 32). La variance des effets aléatoires entre les espèces durant les différentes saisons est de 61,37, indiquant une forte variabilité interspécifique pour la teneur en MS. Les espèces *A. glutinosa*, *Q. coccifera* et *R. peregrina*, présentent des teneurs élevées au printemps et en été, tandis que d'autres, telles que *M. communis* au printemps et en été, *C. cirrhosa* en automne et *H. helix* en hiver, affichent des teneurs notablement inférieures à la moyenne globale (figure 33).

En ce qui concerne la MO, les teneurs moyennes des lianes au printemps sont de 92,67%MS ($p < 0,001$). Une différence hautement significative a été notée entre les catégories ($p < 0,001$). Les arbres et les arbustes présentent des teneurs significativement élevées de 2,25%MS ($p = 0,02$) et 3,46%MS ($p < 0,001$), par rapport aux lianes. Les variations saisonnières de la MO ne sont pas globalement significatives ($p = 0,112$). Les interactions entre catégories et saisons ne révèlent pas d'effet global significatif ($p = 0,21$), mais des interactions spécifiques sont notables, notamment une diminution significative pour les arbres en automne (-3.53%, $p = 0,012$) (figure 32). La variance des effets aléatoires entre les espèces est de 2,08, indiquant une hétérogénéité modérée dans les réponses des espèces. De fait, *S. alba* et *R. ulmifolius* présentent des teneurs supérieures à la moyenne globale en automne et en hiver respectivement, tandis que *F. angustifolia* au printemps et *C. cirrhosa* en automne affichent des teneurs notablement inférieures à la moyenne globale (figure 33).

Les effet fixes des catégories, saisons et leurs interactions ont les mêmes tendances pour la MM que celles de la MO. La variabilité démontrée par les effets aléatoires entre les espèces reste modérée mais avec des différentes trajectoires interspécifiques. Certaines espèces, telles que *C. cirrhosa* et *F. angustifolia* présentent des teneurs meilleures en automne et au printemps respectivement, d'autres entre elles, telles que *E. arborea* en automne et en été, et *R. ulmifolius*

en hiver, affichent des teneurs faibles à la moyenne globale (figure 33).

Tableau 32 : Composition chimique primaire des espèces ligneuses étudiées

Catégorie	Espèce	Saison	MS	MO	MM	MAT
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	38,83 ± 0,23	90,23 ± 0,06	9,77 ± 0,06	9,64 ± 0,01
		Printemps	34,96 ± 0,71	96,32 ± 0,12	3,69 ± 0,12	15,32 ± 0,33
		Été	36,13 ± 1,31	93,68 ± 0,21	6,32 ± 0,21	13,12 ± 0,61
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	48,92 ± 0	93,48 ± 0,06	6,53 ± 0,06	15,2 ± 0,3
		Printemps	38,27 ± 1,88	96,96 ± 0,13	3,04 ± 0,13	14,33 ± 0,05
		Été	39,4 ± 0,57	94,12 ± 0,28	5,89 ± 0,28	14,95 ± 0,06
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	37,6 ± 0,43	88,85 ± 0,02	11,16 ± 0,02	14,77 ± 0,23
		Printemps	31,84 ± 0,02	91,26 ± 0,04	8,75 ± 0,04	17,73 ± 0,25
		Été	44,47 ± 1,12	91 ± 0,07	9 ± 0,07	12,69 ± 0,3
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	53,46 ± 0,29	92,72 ± 0	7,28 ± 0	13,27 ± 0,03
		Printemps	52,93 ± 0,68	95,2 ± 0,04	4,81 ± 0,04	12,2 ± 0,18
		Été	54,18 ± 0,61	93,59 ± 0,03	6,41 ± 0,03	10,73 ± 0,25
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	58,3 ± 1,32	96,28 ± 0,3	3,72 ± 0,3	8,48 ± 0,14
		Printemps	58,04 ± 1,66	98,04 ± 0,16	1,96 ± 0,16	9,95 ± 0,41
		Été	62,79 ± 0,1	96,21 ± 0,02	3,8 ± 0,02	9,28 ± 0,12
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	50,15 ± 1,13	95,56 ± 0,13	4,44 ± 0,13	11,5 ± 0,02
		Hiver	52,8 ± 0,28	96,21 ± 0,08	3,79 ± 0,08	9,87 ± 0,11
		Printemps	36,52 ± 0,87	94,6 ± 0,09	5,4 ± 0,09	11,72 ± 0,24
	<i>Myrtus communis</i>	Été	55,06 ± 1,24	94,76 ± 0,06	5,24 ± 0,06	9,96 ± 0,39
		Automne	71,86 ± 1,52	93,5 ± 0,04	6,51 ± 0,03	8,39 ± 0,02
		Hiver	47,12 ± 2,38	95,4 ± 0,08	4,61 ± 0,08	8,53 ± 0,01
		Printemps	29,59 ± 1,43	95,41 ± 0,01	4,59 ± 0,01	9,94 ± 0,52
	<i>Erica arborea</i>	Été	39,22 ± 0,06	94,88 ± 0,02	5,12 ± 0,02	7,63 ± 0
		Automne	49,27 ± 0,82	96,61 ± 0,11	3,4 ± 0,11	10,19 ± 0,14
		Hiver	38,28 ± 1,21	96,42 ± 0,07	4,44 ± 0,13	10,15 ± 0
		Printemps	35,32 ± 1,11	96,51 ± 0,03	3,79 ± 0,08	9,97 ± 0,01
	Lianes	<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	40,79 ± 1,32	93,43 ± 0,08	6,57 ± 0,08
Été			41,92 ± 0,53	92,72 ± 0,08	7,28 ± 0,08	8,45 ± 0,15
<i>Clematis cirrhosa</i>		Automne	16,46 ± 0,17	89,99 ± 0,07	10,01 ± 0,07	20,99 ± 0,53
		Hiver	26,45 ± 0,09	91,11 ± 0,63	8,89 ± 0,63	12,88 ± 0,01
		Printemps	25,01 ± 0,09	90,47 ± 0,29	9,54 ± 0,29	13,54 ± 0,01
<i>Smilax aspera</i>		Automne	28 ± 0,43	94,08 ± 0,04	5,92 ± 0,05	10,25 ± 0,26
		Hiver	43,44 ± 0,51	94,49 ± 0,21	5,51 ± 0,21	11,01 ± 0,13
		Printemps	26,49 ± 2,5	93,4 ± 0,04	6,6 ± 0,05	10,93 ± 0
<i>Rubus ulmifolius</i>		Été	23,69 ± 0	91,32 ± 0,11	8,69 ± 0,1	11,51 ± 0,64
		Automne	31,58 ± 0,71	94,3 ± 0,06	5,7 ± 0,05	15,24 ± 0,25
		Hiver	30,37 ± 5,52	94,65 ± 0,04	5,35 ± 0,04	16,38 ± 0,11
		Printemps	22,8 ± 1,36	92,81 ± 0,04	7,19 ± 0,04	18,88 ± 0,52
<i>Hedera helix</i>		Été	31,63 ± 0,8	93,93 ± 0,16	6,08 ± 0,16	14,81 ± 0,09
		Automne	37,96 ± 0,95	92,01 ± 0,02	7,99 ± 0,03	11,81 ± 0,12
		Hiver	20,8 ± 3,08	91,12 ± 0,13	8,89 ± 0,14	12,43 ± 0,23
	Printemps	22,61 ± 0,07	93,29 ± 0,01	6,71 ± 0	8,74 ± 0,67	
		Été	32,63 ± 0,52	92,14 ± 0,1	7,86 ± 0,1	9,85 ± 0,16
Effets aléatoires						
Espèce : Saison			61.7	2.07	2.07	5.29
Residual			1.88	0.022	0.022	0.08
Effets fixes						
Catégorie			<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Saison			0.07	0.11	0.11	0.22
Catégorie * Saison			0.37	0.21	0.21	0.59

MS : Matière Sèche (%); MO : Matière Organique (%MS); MM : Matière Minérale (%MS); MAT : Matière Azotée Totale (%MS);

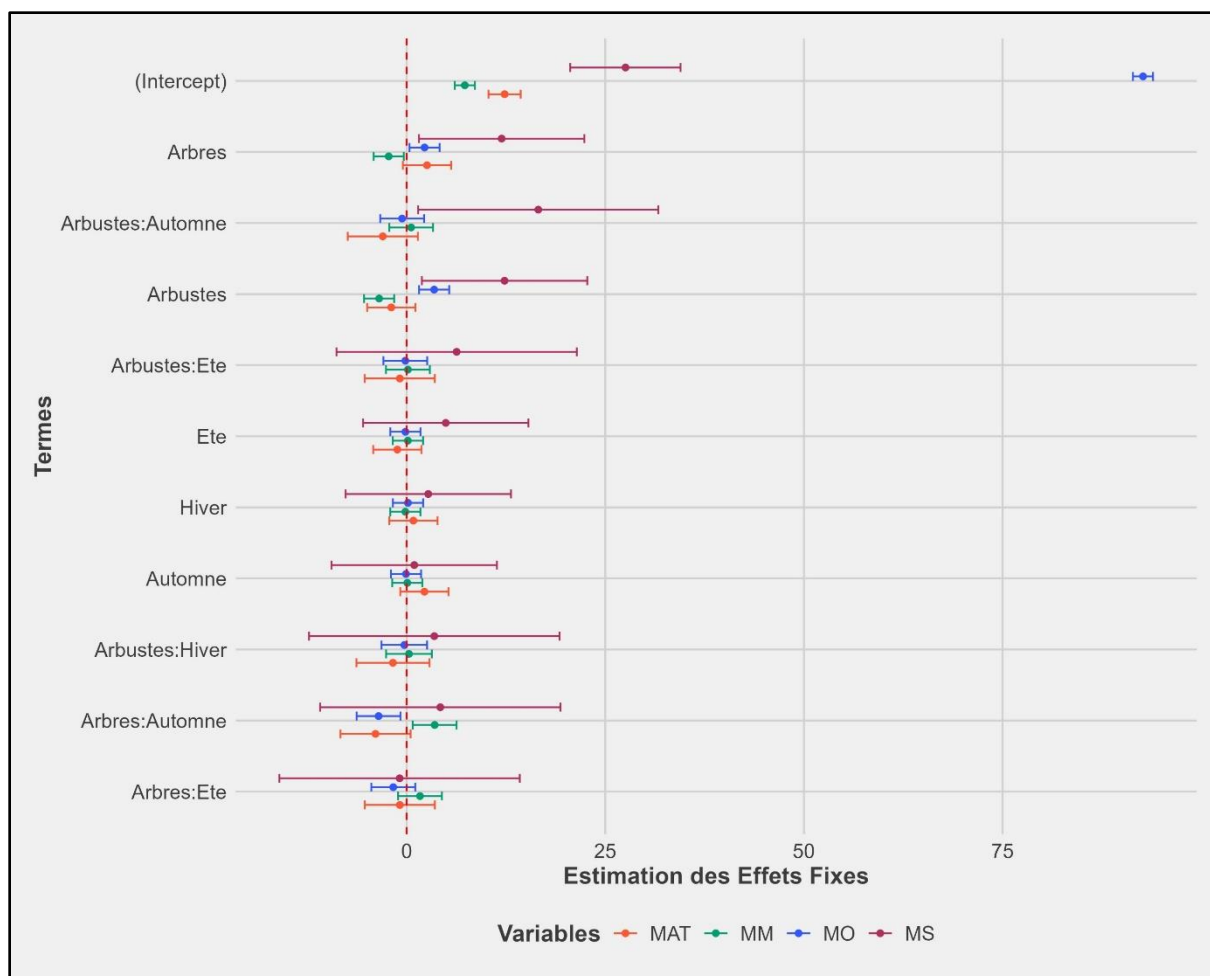


Figure 32 : Coefficients estimés des effets fixes des paramètres de la composition chimique primaire des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

Concernant la MAT, les lianes affichent en moyenne 12,32%MS ($p < 0,001$). Les teneurs en MAT présentent une grande variabilité entre les catégories ($p < 0,001$). Bien que les arbustes ne présentent pas de différence significative ($p=0,20$), les arbres affichent des valeurs légèrement supérieures mais marginalement significatives de 2,56%MS ($p = 0,097$). Les effets saisonniers sur la MAT ne montrent pas d'effet global significatif ($p = 0,22$). L'interaction entre les catégories et les saisons ne révèle pas d'effet global notable ($p = 0,590$), mais une interaction spécifique marginale a été détectée pour les arbres en automne (-3,91%MS, $p = 0,081$) (figure 32). La variance des effets aléatoires entre les espèces durant les différentes saisons est de 5,28, indiquant une variabilité inter-espèces modérée pour la teneur en MAT. Les espèces *C. cirrhosa* et *R. ulmifolius* présentent les teneurs les plus élevées en automne et au printemps respectivement, tandis que d'autres, telles que *A. glutinosa* et *R. peregrina* au printemps et en été, et *H. helix* en automne et au printemps, affichent des teneurs notablement inférieures à la moyenne globale (figure 33).

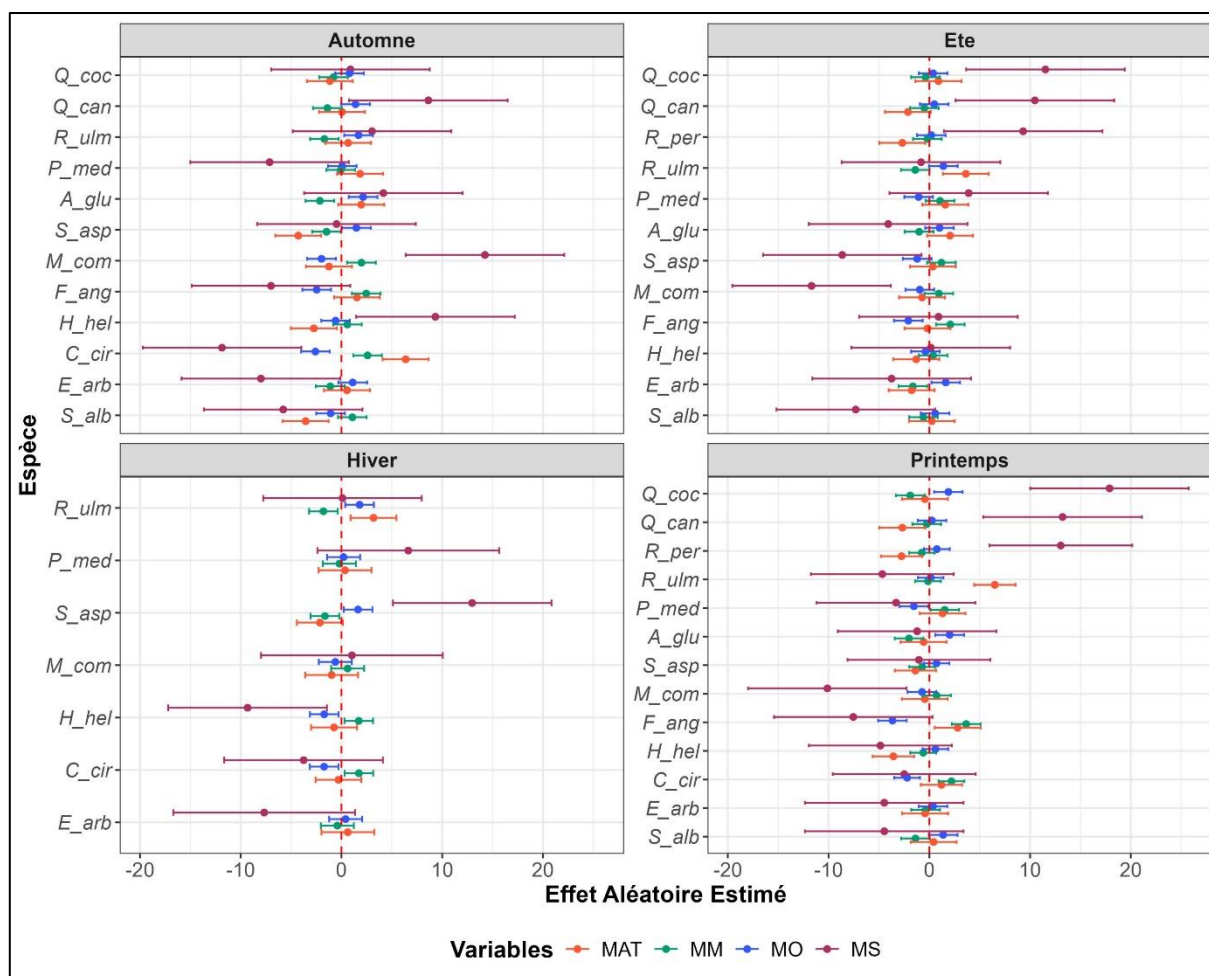


Figure 33 : Coefficients estimés des effets aléatoires des paramètres de la composition chimique primaires des espèces selon les saisons

II.2. Composition en parois cellulaires

L'analyse globale des fractions pariétales ne révèle pas de différence significative entre les catégories d'espèces de ligneux fourragers, de la saison de récolte et de leurs interactions (tableau 33).

Les teneurs moyennes en NDF des lianes au printemps sont estimées à 41.14%MS ($p < 0,001$). Les arbres et les arbustes ne montrent pas de différence par rapport aux lianes ($p=0,16$ et $0,25$ respectivement). L'influence des saisons sur le NDF n'est pas significative ($p=0,72$) ainsi que les différentes combinaisons catégorie et saison (figure 34). La variance des effets aléatoires entre les espèces durant les différentes saisons est de 32,96, suggérant une forte variabilité inter-espèces. Les espèces telles que *S. aspera* en automne et au printemps, *E. arborea* en hiver et *A. glutinosa* en automne montrent les teneurs les plus élevées, tandis que *C. cirrhosa* en automne, *M. communis* au printemps et en été, et *R. ulmifolius* en hiver affichent les teneurs les plus faibles (figure 35).

Tableau 33 : Composition en parois cellulaires des ligneux étudiés

Catégorie	Espèce	Saison	NDF	ADF	CB	ADL
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	41,22 ± 0,47	22,53 ± 0,35	12,33 ± 0,43	10,21 ± 0,08
		Printemps	40,07 ± 0,14	27,58 ± 0,3	12,26 ± 0,1	15,32 ± 0,2
		Été	41,53 ± 1,12	28,71 ± 0,18	12,02 ± 0,63	16,69 ± 0,45
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	46,45 ± 1,15	23 ± 2,04	10,63 ± 0,64	12,37 ± 1,4
		Printemps	56,89 ± 0,08	39,11 ± 0,26	14,96 ± 1,1	24,15 ± 0,83
		Été	52,89 ± 0,47	33,71 ± 0,13	14,98 ± 0,88	18,73 ± 0,74
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	36,73 ± 2,28	18,41 ± 1,82	9,77 ± 0,93	8,64 ± 0,89
		Printemps	45,66 ± 0,49	31,69 ± 0,49	9,65 ± 1,25	22,04 ± 1,74
		Été	44,99 ± 1,63	26,12 ± 0,55	13,57 ± 0,54	12,55 ± 1,09
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	49,72 ± 0,33	29,04 ± 0,02	16,99 ± 0,15	12,05 ± 0,13
		Printemps	44,08 ± 0,13	23,32 ± 0,03	13,22 ± 0,31	10,1 ± 0,28
		Été	47,72 ± 0,54	25,65 ± 0,43	14,56 ± 0,36	11,09 ± 0,07
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	52,35 ± 0,36	33,41 ± 1,15	18,67 ± 0,54	14,75 ± 0,6
		Printemps	47,25 ± 0,06	31,11 ± 0,64	17,26 ± 0,52	13,85 ± 0,13
		Été	47,87 ± 0,72	31,66 ± 0,59	19,03 ± 0,36	12,64 ± 0,23
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	56,96 ± 0,75	36,1 ± 0,12	12,18 ± 3,44	23,91 ± 3,56
		Hiver	44,35 ± 0,09	27,98 ± 0,49	11,87 ± 0,45	16,11 ± 0,04
		Printemps	49,46 ± 0,25	32,37 ± 0,52	11,6 ± 0,43	20,77 ± 0,09
	<i>Myrtus communis</i>	Été	48,89 ± 0,91	31,24 ± 0,74	12,7 ± 0,5	18,55 ± 0,24
		Automne	46,91 ± 2,88	26,37 ± 0,01	16,28 ± 0,53	10,09 ± 0,54
		Hiver	39,63 ± 0,97	19,27 ± 0,78	10,62 ± 0,37	8,66 ± 1,15
	<i>Erica arborea</i>	Printemps	37,59 ± 4,49	18,24 ± 0,61	7,8 ± 1,28	10,44 ± 0,66
		Été	37,19 ± 0,41	23,09 ± 0,3	14,38 ± 0,03	8,72 ± 0,33
		Automne	50,4 ± 0,28	34,7 ± 0,82	11,14 ± 0,16	23,56 ± 0,65
	<i>Erica arborea</i>	Hiver	51,99 ± 0,39	35,55 ± 0,18	12,07 ± 0,42	23,47 ± 0,6
		Printemps	48,22 ± 0,74	31,99 ± 0,03	10,9 ± 1,49	21,1 ± 1,46
		Été	51,73 ± 0,49	37,57 ± 0,17	11,08 ± 0,24	26,49 ± 0,41
	Lianes	<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	39,18 ± 2,55	24,33 ± 1,96	11,94 ± 2,75
Été			37,15 ± 0,68	22,46 ± 0,39	9,67 ± 0,33	12,79 ± 0,05
<i>Clematis cirrhosa</i>		Automne	32,78 ± 3,76	19,49 ± 1,29	10,32 ± 1,51	9,16 ± 0,23
		Hiver	45,9 ± 0,12	32,96 ± 0,17	12,48 ± 1	20,49 ± 1,16
		Printemps	34,05 ± 0,34	22,46 ± 0,18	9,35 ± 0,38	13,11 ± 0,2
<i>Smilax aspera</i>		Automne	57,58 ± 0,16	37,86 ± 0,89	17,58 ± 1,01	20,28 ± 0,12
		Hiver	43,48 ± 0,16	28,17 ± 0,15	11,06 ± 0,1	17,12 ± 0,05
		Printemps	52,6 ± 1,08	35,73 ± 0,89	17,91 ± 0,11	17,81 ± 0,78
<i>Smilax aspera</i>		Été	45,7 ± 0,75	30,25 ± 0,26	11,91 ± 0,76	18,34 ± 0,5
		Automne	37,84 ± 0,37	20,38 ± 0,14	6,19 ± 0,53	14,19 ± 0,39
		<i>Rubus ulmifolius</i>	Hiver	32,49 ± 0,19	18,14 ± 0,93	6,28 ± 0,56
Printemps			34,48 ± 0,37	19,48 ± 0,29	5,11 ± 0,77	14,36 ± 0,48
Été			45,23 ± 2,92	27,63 ± 0,12	12,97 ± 1,94	14,66 ± 1,82
<i>Hedera helix</i>		Automne	49,01 ± 0,25	32,01 ± 0,86	17,21 ± 2,02	14,81 ± 2,88
		Hiver	47,34 ± 0,4	32,35 ± 0,54	23,21 ± 0,76	9,14 ± 1,3
		Printemps	45,41 ± 0,84	31,66 ± 0,47	17,58 ± 0,22	14,09 ± 0,25
	Été	51,14 ± 1,22	33,61 ± 0,24	19,86 ± 5,27	13,75 ± 5,51	
Effets aléatoires						
Espèce : Saison			33,66	29,28	7,07	24,24
Residual			1,78	0,52	1,61	1,75
Effets fixes						
Catégorie			0,13	0,32	0,14	0,08
Saison			0,72	0,87	0,55	0,88
Catégorie * Saison			0,61	0,38	0,84	0,57

NDF: Neutral Detergent Fiber (%MS); ADF: Acid Detergent Fiber (%MS); ADL: Acid Detergent Lignin (%MS); CB: Cellulose Brute (%MS)

Les teneurs en ADF et en ADL présentent des tendances similaires à celles en NDF. En effet, les arbres et les arbustes ne présentent pas de différences significatives par rapport aux lianes. Ainsi, les variations saisonnières et les interactions entre catégories et saisons ne sont pas statistiquement significatives (figure 34). La variance des effets aléatoires entre les espèces est importante pour les deux fractions (29,11 et 22,92 respectivement) reflétant une forte variabilité inter-espèces mais avec des interactions spécifiques différentes avec les saisons. En fait, pour les teneurs en ADF, des espèces comme *S. aspera* en automne et au printemps, *E. arborea* en hiver et en été ainsi *S. alba* au printemps et en été affichent les meilleures valeurs tandis que des espèces telles que *C. cirrhosa* en automne et au printemps, *R. ulmifolius* en automne et en hiver et *M. communis* en hiver, au printemps et en été se distinguent par des teneurs faibles à la moyenne globale. En contrepartie, les réponses des espèces sont différentes selon les saisons pour ADL. *E. arborea* et *H. helix* en hiver et en été et *S. alba* et *S. aspera* au printemps présentent des teneurs supérieures alors que d'autres telles que *M. communis* et *R. ulmifolius* en hiver et au printemps, *A. glutinosa* au printemps *P. media* en automne affichent des teneurs remarquablement faibles par rapport à la moyenne globale (figure 35).

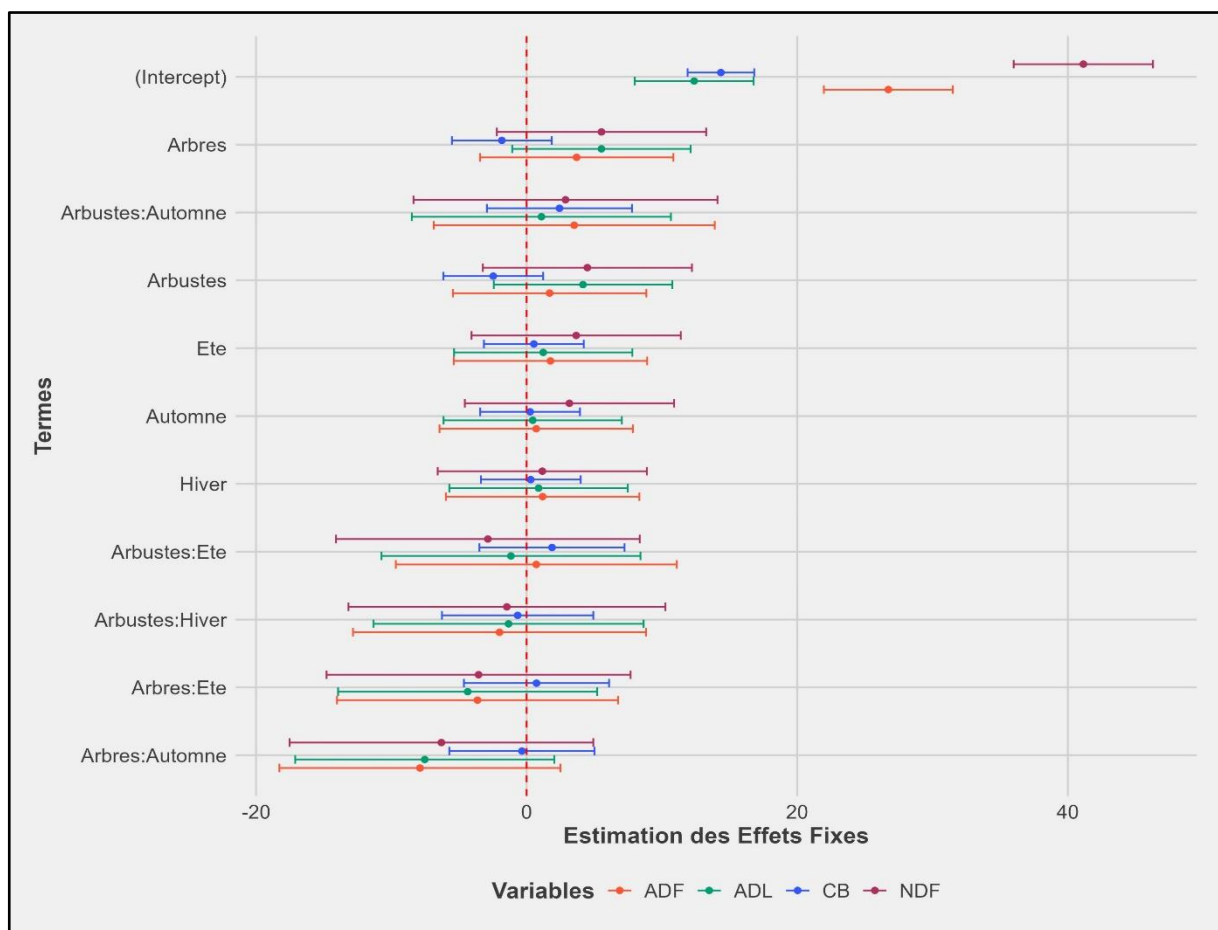


Figure 34 : Coefficients estimés des effets fixes des fractions pariétales des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

En outre, les teneurs en CB ont les mêmes profils que celles des autres fractions. De ce fait, aucune interaction globale ou spécifique n'est observée pour la catégorie, la saison ou leur interaction. La variance inter-espèces est relativement plus faible, estimée à 6,31, indiquant une variabilité modérée dans les réponses selon les espèces. Certaines espèces comme *Q. coccifera* au printemps et en été, *S. aspera* et *A. glutinosa* en automne et *C. cirrhosa* en hiver se distinguent par des teneurs notables tandis que *M. communis* au printemps, *C. cirrhosa* en automne et *H. helix* en hiver montrent des teneurs assez faibles.

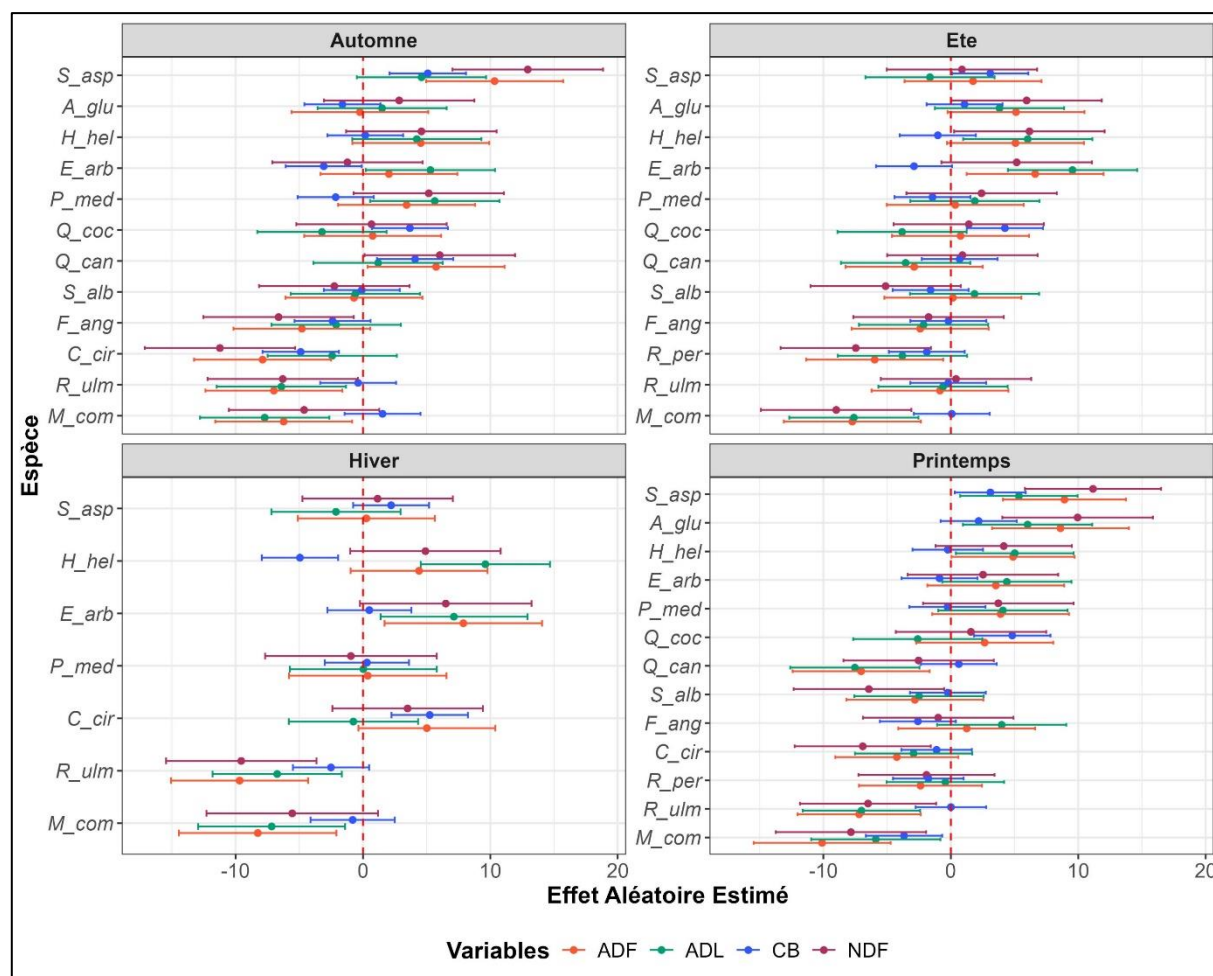


Figure 35: Coefficients estimés des effets aléatoires des fractions pariétales des espèces ligneuses selon les saisons

II.3. Composition en métabolites secondaires

L'analyse des métabolites secondaires des ligneux étudiés révèle une différence significative entre les catégories ($p < 0,01$) alors, aucun effet est observé pour les saisons et leurs interactions avec les catégories (tableau 34).

Tableau 34 : Composition en métabolites secondaires des ligneux étudiés

Catégorie	Espèce	Saison	PT	TT	TC	ABT
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	35,4 ± 0,52	22,34 ± 1,73	19,07 ± 1,24	1,39 ± 0,01
		Printemps	59,64 ± 0,13	31,25 ± 2,15	25,24 ± 1,52	1,51 ± 0,01
		Été	71,61 ± 1,12	41,73 ± 1,91	33,14 ± 0,74	1,48 ± 0,01
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	52,24 ± 0,65	30,26 ± 0,98	11,54 ± 3,4	1,2 ± 0,01
		Printemps	29,44 ± 0,87	12,47 ± 0,28	2,79 ± 0,11	1,06 ± 0
		Été	57,28 ± 0,47	26,47 ± 4,82	11,51 ± 0,3	1,23 ± 0,01
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	26,01 ± 0,96	14,75 ± 0,65	3 ± 0,12	1 ± 0
		Printemps	28,27 ± 0,66	14 ± 1,07	0,21 ± 0	1 ± 0
		Été	31,44 ± 0,66	13,98 ± 0,64	0,2 ± 0,04	1,02 ± 0,02
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	69,43 ± 2,06	31,9 ± 2,06	21,13 ± 0,58	1,41 ± 0,01
		Printemps	68,25 ± 2,84	42,54 ± 3,32	30,56 ± 3,54	1,34 ± 0,01
		Été	69,6 ± 3,31	44,26 ± 2,68	24,57 ± 0,73	1,31 ± 0,03
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	75,7 ± 2,75	42 ± 2,14	21,21 ± 1,6	1,61 ± 0,01
		Printemps	71,51 ± 7,21	37,91 ± 1,65	15,89 ± 1,57	1,47 ± 0
		Été	79,94 ± 3,15	53,01 ± 0,47	14,52 ± 0,13	1,31 ± 0,01
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	42,77 ± 1,2	32,16 ± 0,76	0,24 ± 0,01	1,05 ± 0,01
		Hiver	51,21 ± 6,94	37 ± 6,9	0,29 ± 0,01	1,13 ± 0,05
		Printemps	38,8 ± 0,04	28,78 ± 0,11	0,02 ± 0	1 ± 0,05
	<i>Myrtus communis</i>	Été	51,22 ± 0,69	38,96 ± 1,33	0,09 ± 0,01	1,11 ± 0,01
		Automne	114,23 ± 0,77	93,78 ± 1,91	16,92 ± 0,24	1,28 ± 0,04
		Hiver	118,36 ± 1,94	87,75 ± 1,19	15,25 ± 0,07	1,62 ± 0,12
	<i>Erica arborea</i>	Printemps	149,02 ± 3,78	124,63 ± 4,92	7,12 ± 0,21	1,09 ± 0,01
		Été	155,11 ± 0,98	126,48 ± 2,56	8,09 ± 0,01	1,11 ± 0,01
		Automne	77,16 ± 1,44	58,01 ± 0,4	14,52 ± 0,2	1,32 ± 0
Lianes	<i>Rubia peregrina</i>	Hiver	54,2 ± 0,14	40,04 ± 0,57	20,93 ± 0,37	2,06 ± 0,09
		Printemps	67,85 ± 0,37	43,72 ± 1,97	4,43 ± 0,13	1,2 ± 0,03
		Été	109,13 ± 3,13	86,24 ± 2,45	17,05 ± 0,19	1,44 ± 0
	<i>Clematis cirrhosa</i>	Printemps	96,25 ± 2,41	88,79 ± 2,52	10,4 ± 0,02	1,2 ± 0,01
		Été	96,63 ± 0,62	87,12 ± 0,74	14,58 ± 0,39	1,45 ± 0,07
		Automne	20,26 ± 0,19	13,01 ± 0,29	10,83 ± 0,6	1 ± 0
	<i>Smilax aspera</i>	Hiver	18,83 ± 0,31	13,14 ± 0,18	15,12 ± 0,23	0,96 ± 0,01
		Printemps	24,62 ± 0,36	16,97 ± 0,16	2,15 ± 0	0,98 ± 0,01
		Automne	16,36 ± 0,08	10,28 ± 0,09	12,88 ± 0,11	1,06 ± 0
	<i>Rubus ulmifolius</i>	Hiver	47,5 ± 0,15	36,43 ± 0,21	16,57 ± 0,23	1,02 ± 0,01
		Printemps	19,81 ± 0,67	14,19 ± 1,24	0,21 ± 0,04	1,04 ± 0,01
		Été	44,41 ± 0,15	30,36 ± 0,37	0,19 ± 0,01	1,11 ± 0
<i>Hedera helix</i>	Automne	55,64 ± 0,69	26,77 ± 1,01	0,41 ± 0,01	1,06 ± 0,02	
	Hiver	116,91 ± 0,68	88,52 ± 0,76	1,53 ± 0,07	1,14 ± 0	
	Printemps	116,03 ± 11,1	80,78 ± 11,71	0,22 ± 0,04	1 ± 0	
	Été	102,07 ± 2,55	79,2 ± 3,43	1,45 ± 0,02	1,03 ± 0	
	Automne	24,12 ± 0,08	16,55 ± 1,95	0,45 ± 0	1,23 ± 0,02	
	Hiver	23,27 ± 0,97	15,86 ± 0,01	0,18 ± 0	1,42 ± 0,03	
	Printemps	2,6 ± 0,08	2,34 ± 0,08	0,03 ± 0,01	1,12 ± 0,01	
	Été	22,31 ± 0,04	20,56 ± 0,05	0,08 ± 0	1,08 ± 0,02	
Effets aléatoires						
Espèce : Saison			983,21	674,15	65,85	0,02
Residual			7,23	7,43	0,8	0
Effets fixes						
Catégorie			0,003	0,001	0,003	0,003
Saison			0,32	0,25	0,60	0,14
Catégorie * Saison			0,95	0,85	0,94	0,40

PPT : PolyPhénols Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TT : Tanins Totaux (g équivalent acide tannique /kg MS) ; TC : Tanins condensés (g équivalent acide leucocyanidine /kg MS) ; ABT : Activité Biologique des Tanins

Les concentrations moyennes en PPT et en TT des lianes au printemps sont estimées respectivement à 51,86 et 40,40 g EAT/kg MS ($p < 0,001$). Les arbres et les arbustes ne montrent pas de différence significative par rapport aux lianes pour les deux paramètres (figure 36). Parallèlement, La variance élevée de l'effet aléatoire des espèces aux saisons (949,88 et 661,2 pour les PPT et TT respectivement) atteste d'une hétérogénéité importante dans la réponse entre les différentes espèces. Les espèces telles que *M. communis* (été, hiver, printemps) et *R. ulmifolius* (automne, été, hiver, printemps) montrent des concentrations marquées, tandis que *H. helix* (été, printemps) et *P. media* (été, printemps) affichent les valeurs les plus faibles (figure 37).

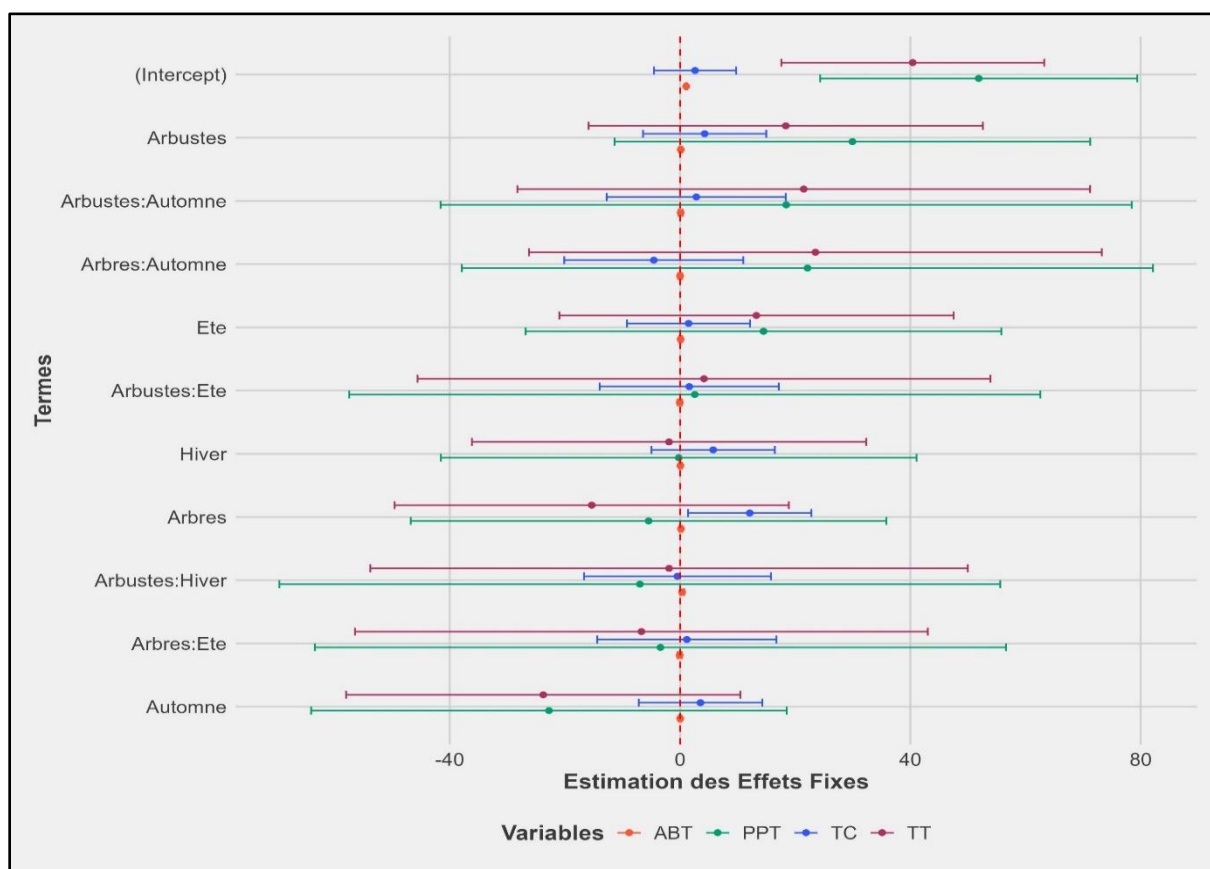


Figure 36 : Coefficients estimés des effets fixes des métabolites secondaires des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

Les teneurs moyennes estimées en TC des lianes sont de 2,6 g EAL/kg MS ($p = 0,46$). Les arbres montrent des valeurs significativement supérieures (12,09 g EAL /kg MS, $p = 0,021$) alors que les arbustes ne présentent pas de différences significatives par rapport aux lianes ($p = 0,41$).

La variance des effets aléatoires est estimée à 65,85, ce qui traduit une influence modérée de la diversité spécifique sur les teneurs en TC. *A. glutinosa* au printemps et *Q. canariensis* en

été, montrent des concentrations élevées, tandis que *F. angustifolia* en automne et en été et *P. media* en hiver et en été, présentent les teneurs les plus faibles (figure 37).

L'activité biologique moyenne estimée des tanins chez les lianes est de 1,06 ($p < 0,001$). Bien que la catégorie botanique présente un effet global hautement significatif ($p = 0,003$), les arbres et les arbustes ne montrent pas de différences significatives par rapport aux lianes ($p = 0,2$ et $p = 0,3$ respectivement). La variance des effets aléatoires entre les espèces est très faible (0.026) ce qui indique que l'activité biologique des tanins montre une certaine stabilité inter espèces durant les différentes saison (figure 37).

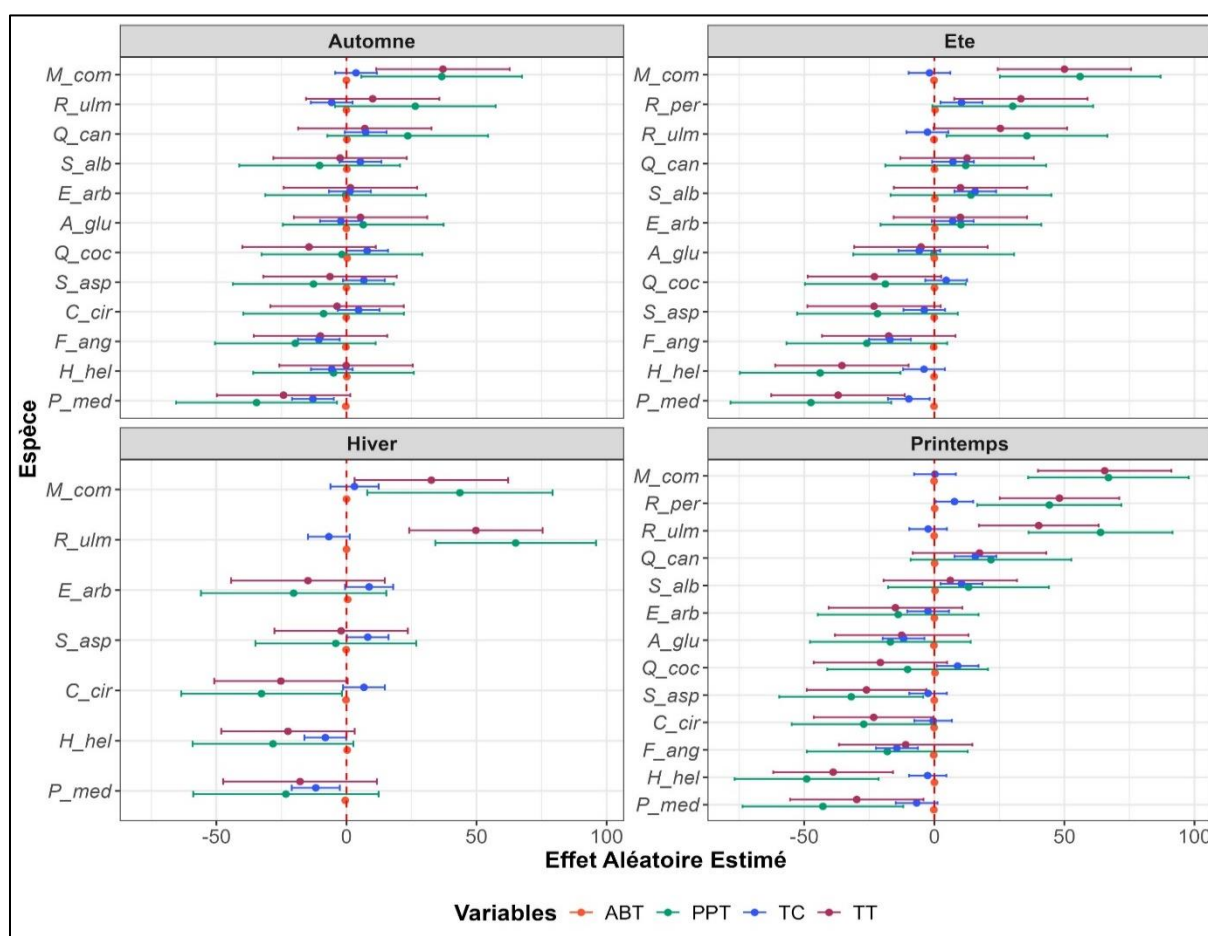


Figure 37 : Coefficients estimés des effets aléatoires des métabolites secondaires des espèces ligneuses selon les saisons

II.4. Cinétique de la production de gaz et paramètres de fermentation

La production moyenne du gaz total des lianes au printemps est estimée à 46,53 ml/0,3g MS ($p < 0,001$). La catégorie montre un effet significatif ($p = 0,003$) (tableau 35) notamment pour les arbustes qui affichent des volumes de gaz inférieures à celles des lianes (-16,24 ml/0,3g MS, $p = 0,008$) alors que les arbres présentent des diminutions non significatives au cours de l'incubation (-6,68 ml/0,3g MS, $p = 0,28$) (figure 38).

Tableau 35 : Paramètres de cinétique de fermentation des ligneux étudiés

Catégorie	Espèce	Saison	Gaz total	a	b	a+b	c
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	38,81 ± 0,77	0,67	35,21	35,88	0,07
		Printemps	25,99 ± 1,12	-2,29	28,21	25,92	0,06
		Été	31,67 ± 0,79	-1,9	31,41	29,51	0,06
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	19,43 ± 1,53	-1,23	19,13	17,9	0,08
		Printemps	39,28 ± 0,74	-2,91	40,56	37,65	0,09
		Été	30,29 ± 0,78	-2,15	30,63	28,48	0,07
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	54,51 ± 0,76	-0,98	50,79	49,81	0,09
		Printemps	62,71 ± 0,77	0,48	57,14	57,62	0,09
		Été	49,35 ± 1,17	-1,45	46,02	44,57	0,08
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	22,67 ± 0,78	-0,13	20,94	20,8	0,07
		Printemps	31,43 ± 0,78	-0,73	29,76	29,02	0,07
		Été	26,98 ± 0,78	-1,27	26,61	25,34	0,07
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	18,72 ± 0,76	-0,96	18,74	17,78	0,08
		Printemps	21,51 ± 0,74	-0,96	18,74	17,78	0,08
		Été	29,09 ± 0,78	-1,93	22,86	20,93	0,06
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	31,32 ± 0	-1,35	29,51	28,17	0,09
		Hiver	25,23 ± 0,36	-1,79	27,39	25,6	0,08
		Printemps	32,52 ± 1,53	-1,66	32,97	31,3	0,1
	<i>Myrtus communis</i>	Été	35,73 ± 0,75	-1,67	35,54	33,86	0,08
		Automne	31,57 ± 0,76	-1,05	30,01	28,97	0,07
		Hiver	26,52 ± 0,74	-0,43	25,49	25,06	0,07
	<i>Erica arborea</i>	Printemps	41,18 ± 0	-5,41	42,24	36,83	0,24
		Été	48,42 ± 0,39	-3,99	49,99	46,01	0,09
		Automne	31,22 ± 0	0,36	28,13	28,49	0,06
Lianes	<i>Rubia peregrina</i>	Hiver	15,55 ± 0	0,13	15,03	15,16	0,07
		Printemps	25,97 ± 0	0,37	24,2	24,57	0,1
		Été	21,61 ± 0	-0,06	20,18	20,12	0,09
	<i>Clematis cirrhosa</i>	Printemps	48,68 ± 1,12	-4,16	53,73	49,57	0,06
		Été	28,56 ± 0,38	-1,27	29,9	28,63	0,04
		Automne	53,24 ± 0,76	-3,29	57,58	54,28	0,08
	<i>Smilax aspera</i>	Hiver	36,82 ± 0,75	-1,26	38,47	37,22	0,08
		Printemps	53,16 ± 0	-2,08	56,14	54,05	0,07
		Automne	44,3 ± 0,37	-0,86	45,35	44,49	0,08
	<i>Rubus ulmifolius</i>	Hiver	45,22 ± 0	-0,43	45,89	45,46	0,08
		Printemps	37,11 ± 0,74	-1,96	41,9	39,95	0,05
		Été	45,92 ± 0	-2,74	51,38	48,64	0,05
<i>Hedera helix</i>	Automne	42,6 ± 1,51	0,37	43,38	43,75	0,09	
	Hiver	40,27 ± 0	-0,11	41,27	41,15	0,08	
	Printemps	50,75 ± 0	1,22	50,31	51,54	0,08	
	Été	34,61 ± 1,53	-0,13	35,55	35,42	0,08	
	Automne	22,48 ± 0,4	-1,52	31,96	30,44	0,02	
	Hiver	22,39 ± 0,38	-2,18	27,09	24,91	0,04	
	Printemps	42,96 ± 0,37	-2,26	46,31	44,06	0,09	
	Été	38,96 ± 0,38	-2,73	42,89	40,16	0,08	
Effets aléatoires							
Espèce : Saison			82,20	1,55	69,87	66	6,15e-04
Residual			3,99	0,003	2,52	2,34	2,17e-06
Effets fixes							
Catégorie			0,003	0,54	<0,001	<0,001	0,02
Saison			0,18	0,07	0,07	0,12	0,21
Catégorie * Saison			0,80	0,96	0,68	0,68	0,24

Gaz total : volume de gaz produit après la fin de l'incubation (ml/ 0,3g MS) ; a : Volume de gaz produit à partir de la fraction soluble facilement fermentescible (ml) ; b : Volume de gaz produit à partir de la fraction insoluble potentiellement fermentescible (ml) ; a+b : la production potentielle du gaz (ml) c : La vitesse de production de gaz (ml/heure)

L'influence globale des saisons sur la production du gaz total n'est pas significative ($p = 0,18$) tandis que l'hiver montre une diminution marginalement significative ($-10,36 \text{ ml/0,3g MS}$, $p=0,09$) par rapport au printemps.

La production de gaz issue de la fraction soluble rapidement fermentescible (a) des lianes est estimée à $-1,84 \text{ ml}$ ($p < 0,001$). Les arbres et les arbustes ne montrent pas de différences significatives par rapport aux lianes ($p = 0,56$ et $p = 0,71$ respectivement) confirmant l'effet global non significatif de la catégorie ($p = 0,54$). Quoiqu'il y ait un effet global marginal des saisons ($p = 0,07$), aucun effet spécifique notable n'est détectée (figure 38). De même, aucune interaction globale ou spécifique n'a été observée. La variance des effets aléatoires entre les espèces est de 1,55, montrant ainsi une variabilité inter-espèces globale faible, cependant, les espèces telles que *E. arborea* et *R. ulmifolius* au printemps montrent des volumes de gaz supérieurs à la moyenne globale, tandis que *R. peregrina* en été et *M. communis* au printemps affichent les productions les plus faibles (figure 39).

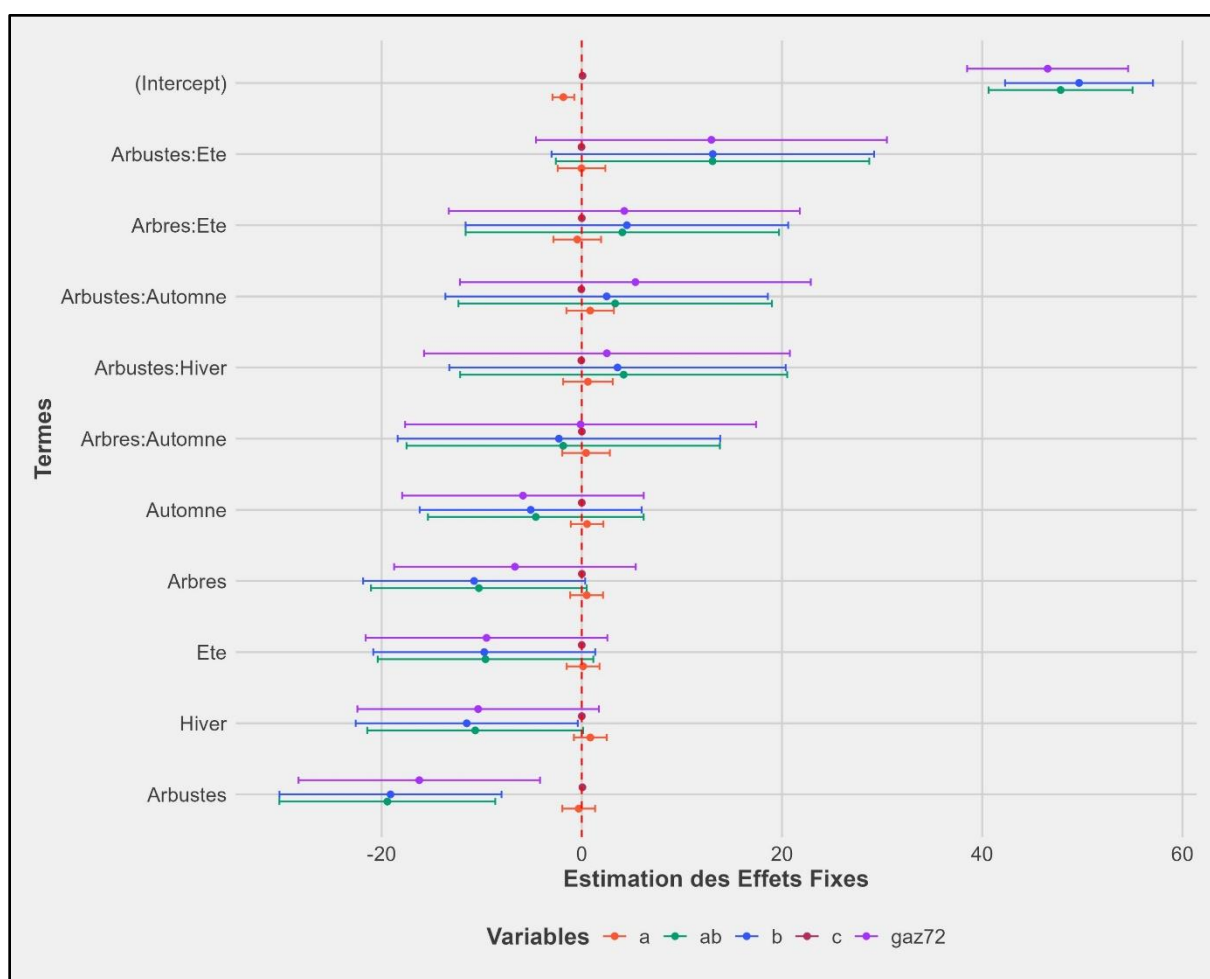


Figure 38 : Coefficients estimés des effets fixes des paramètres cinétiques de fermentation des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

En ce qui concerne la production de gaz à partir la fraction lentement fermentescible (b), la valeur moyenne des lianes est estimée à 49,67 ml ($p < 0,001$). La catégorie montre une déviance globale significative ($p < 0,001$). Les arbres présentent une réduction légèrement significative de -10,76 ml ($p = 0,057$), tandis que les arbustes montrent une baisse hautement significative de -19,11 ml ($p < 0,001$). Les effets saisonniers globaux sont mineurs ($p = 0,07$), cependant d'importante réduction est observée en hiver (-11,5 ml, $p=0,042$) (figure 38). De même, pour le paramètre (a+b) qui représente la production potentielle du gaz, la production moyenne des lianes est estimée à 47,83 ml ($p < 0,001$). Une tendance similaire à celle de la fraction lentement fermentescible (b) a été remarquée avec une réduction par 10,28 ml mais marginalement significative ($p = 0,06$) pour les arbres, alors que les arbustes montrent une importante réduction par 19,42 ml ($p < 0,001$). Les effets saisonniers sont légèrement significatifs en été et en hiver ($p=0,08$ et $p=0,05$ respectivement) (figure 38) confirmant alors l'effet non significatif de la saison ($p=0,12$) (tableau 35). Par ailleurs, les interactions globales entre catégories et saisons ne montrent pas d'effet pour les trois paramètres (tableau 35) avec aucune interaction spécifique (figure 38)

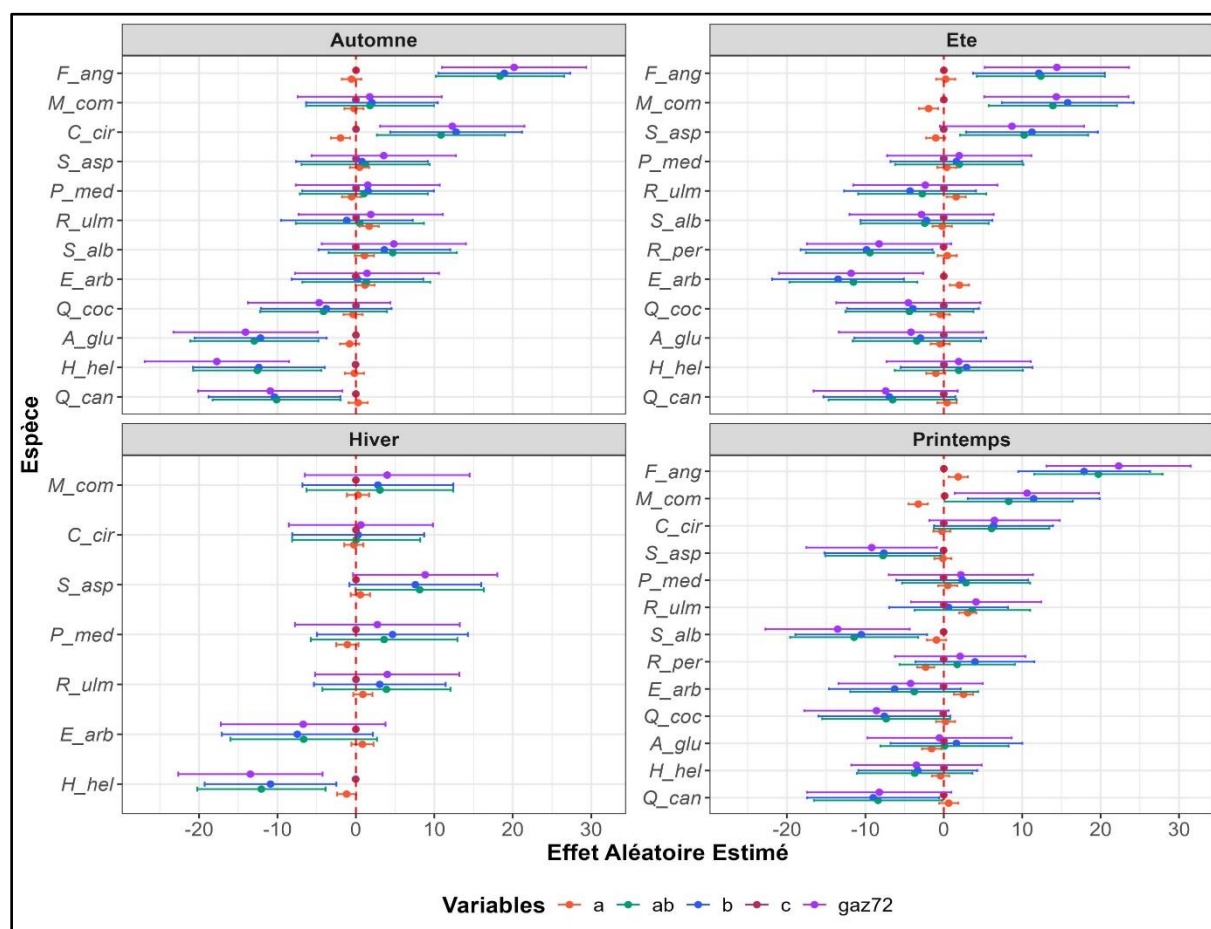


Figure 39 : Coefficients estimés des effets aléatoires des paramètres cinétiques de fermentation des espèces ligneuses selon les saisons

La variance inter-espèces des différentes saisons est très élevée pour le gaz total, (b) et (a+b) ce qui reflète une forte variabilité spécifique. Des espèces comme *F. angustifolia* en automne, au printemps et en été, *M. communis* en été et *C. cirrhosa* en automne semblent produire des volumes plus élevés de gaz, tandis que d'autres, telles que *A. glutinosa* et *S. alba* en automne, *H. helix* en automne et en hiver et *Q. canariensis* au printemps, tendent à avoir des volumes plus faibles (figure 39).

La vitesse de dégradation moyenne des lianes est estimée à 0.07 ml/h ($p < 0,001$). La catégorie présente un effet global significatif ($p=0,02$). Les arbres n'affichent pas de différence significative ($p=0,65$), tandis que les arbustes montrent des vitesses significativement supérieures ($p < 0,001$) à celles des lianes. En outre, aucun effet saisonnier ($p=0,21$) ni interactions ($p=0,24$) n'ont été détectés, néanmoins, une interaction significative entre les arbustes et l'hiver ($p=0,04$) a été observée (figure 38).

La variance des effets aléatoires entre les espèces est négligeable, révélant une faible variabilité inter-espèces. Cependant, les espèces comme *M. communis* au printemps et *R. ulmifolius* en automne montrent des vitesses de dégradation supérieures à la moyenne globale, tandis que *H. helix* en automne et *Q. coccifera* au printemps affichent des vitesses plus lentes (figure 39)

II.5. Paramètres de digestibilité *in vitro*

La production moyenne de gaz après 24 heures d'incubation des lianes est estimée à 39,86 ml/0.3g MS ($p < 0.001$). En général, la catégorie montre un effet significatif ($p=0,012$) (Tableau 36). Les arbustes présentent une réduction significative (-12,72 ml/0,3g MS, $p=0,03$) contrairement aux arbres ($p=0,34$). L'influence des saisons sur la production de gaz n'est pas significative ($p=0,13$). Également, aucune interaction globale ou spécifique entre catégories et saisons s'avère significative (tableau 36, figure 40).

Les valeurs des paramètres de la digestibilité *in vitro* (dMO et EM) se comportent de la même façon que la production de gaz. En effet, la catégorie montre un effet significatif mais la saison et son interaction avec la catégorie n'ont pas d'influence (tableau 36) avec aucun effet spécifique (figure 40)

Tableau 36 : Paramètres de digestibilité *in vitro* des ligneux étudiés

Catégorie	Espèce	Saison	Gaz 24h	dMO	EM	AGV
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	33,89 ± 1,55	49,98 ± 1,38	6,92 ± 0,21	0,75 ± 0,04
		Printemps	21,53 ± 0,74	41,15 ± 0,51	5,26 ± 0,1	0,46 ± 0,02
		Été	25,84 ± 0,39	44,16 ± 0,61	5,84 ± 0,06	0,56 ± 0,01
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	16,2 ± 1,52	36,55 ± 1,49	4,53 ± 0,21	0,33 ± 0,04
		Printemps	34,05 ± 0,74	51,79 ± 0,63	6,98 ± 0,11	0,76 ± 0,02
		Été	25,89 ± 0,78	45 ± 0,68	5,86 ± 0,11	0,56 ± 0,01
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	46,41 ± 1,53	63,05 ± 1,46	8,68 ± 0,21	1,05 ± 0,04
		Printemps	55,08 ± 0,77	72,39 ± 0,57	9,89 ± 0,1	1,26 ± 0,02
		Été	41,9 ± 1,56	58,43 ± 1,24	8,04 ± 0,21	0,95 ± 0,04
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	19,07 ± 0,4	38,28 ± 0,37	4,91 ± 0,06	0,4 ± 0,01
		Printemps	26,75 ± 0,39	44,46 ± 0,27	5,96 ± 0,05	0,58 ± 0,01
		Été	23,96 ± 1,17	41,42 ± 0,92	5,57 ± 0,16	0,51 ± 0,03
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	16,31 ± 0,37	33,44 ± 0,25	4,5 ± 0,05	0,33 ± 0,01
		Printemps	16,27 ± 0,74	33,95 ± 0,46	4,5 ± 0,1	0,33 ± 0,01
		Été	25,8 ± 0,78	42,24 ± 0,75	5,81 ± 0,11	0,56 ± 0,02
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	26,84 ± 0	44,35 ± 0	5,99 ± 0	0,58 ± 0
		Hiver	22,18 ± 0,36	41,57 ± 0,36	5,67 ± 0,05	0,53 ± 0,01
		Printemps	30,9 ± 1,53	48,96 ± 1,16	6,68 ± 0,19	0,7 ± 0,03
	<i>Myrtus communis</i>	Été	31,2 ± 0,38	48,82 ± 0,5	6,77 ± 0,05	0,72 ± 0,01
		Automne	24,62 ± 0,76	40,86 ± 0,62	5,62 ± 0,1	0,52 ± 0,02
		Hiver	20,28 ± 1,47	37,69 ± 1,25	5,14 ± 0,19	0,44 ± 0,03
	<i>Erica arborea</i>	Printemps	38,54 ± 0	59,66 ± 0,24	8,45 ± 0	1,01 ± 0
		Été	43,77 ± 0,77	61,77 ± 0,63	8,92 ± 0,1	1,09 ± 0,02
		Automne	24,53 ± 0	45,47 ± 0,07	6,25 ± 0	0,63 ± 0
	<i>Erica arborea</i>	Hiver	12,7 ± 0,37	36,79 ± 0,32	4,91 ± 0,05	0,39 ± 0,01
		Printemps	22,86 ± 0	46,26 ± 0,01	6,39 ± 0	0,65 ± 0
		Été	19,45 ± 0	41,13 ± 0	5,82 ± 0	0,56 ± 0
	Lianes	<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	40,53 ± 0,74	53,83 ± 0,63	7,56 ± 0,1
Été			21,22 ± 2,31	36,05 ± 0	4,87 ± 0	0,39 ± 0
<i>Clematis cirrhosa</i>		Automne	44,1 ± 1,52	64,19 ± 1,61	9,4 ± 0,23	1 ± 0,04
		Hiver	30,15 ± 0,38	48,06 ± 0,29	7,04 ± 0,05	0,66 ± 0,01
<i>Smilax aspera</i>		Printemps	41,53 ± 0,78	58,52 ± 0,69	8,62 ± 0,11	0,94 ± 0,02
		Automne	35,65 ± 0	51,57 ± 0,11	7,63 ± 0,01	0,79 ± 0
		Hiver	35,97 ± 0	52,18 ± 0,05	7,72 ± 0,01	0,8 ± 0
<i>Rubus ulmifolius</i>		Printemps	29,53 ± 0,37	46,49 ± 0,33	6,84 ± 0,06	0,65 ± 0,01
		Été	38,53 ± 0,75	54,88 ± 0,94	8,1 ± 0,13	0,86 ± 0,01
		Automne	42,07 ± 0,75	59,51 ± 0,56	8,79 ± 0,08	0,95 ± 0,02
		Hiver	38,15 ± 0	56,52 ± 0,04	8,33 ± 0,01	0,85 ± 0
<i>Hedera helix</i>		Printemps	46,34 ± 1,56	65,04 ± 1,15	9,58 ± 0,18	1,05 ± 0,04
		Été	31,9 ± 0,76	50,3 ± 0,63	7,38 ± 0,1	0,71 ± 0,02
		Automne	13,38 ± 0,4	32,6 ± 0,41	4,7 ± 0,06	0,26 ± 0,01
		Hiver	16,72 ± 0,76	35,92 ± 0,78	5,19 ± 0,12	0,34 ± 0,01
<i>Hedera helix</i>		Printemps	41,38 ± 0,37	56,04 ± 0,02	8,33 ± 0,01	0,93 ± 0,01
	Été	35,47 ± 1,52	51,35 ± 1,27	7,58 ± 0,2	0,79 ± 0,04	
Effets aléatoires						
Espèce : Saison			76,06	70,79	1,65	0,04
Residual			0,85	0,56	0,013	0,0004
Effets fixes						
Catégorie			0,012	0,06	0,005	0,13
Saison			0,13	0,18	0,23	0,14
Catégorie * Saison			0,83	0,81	0,74	0,79

Gaz 24h : volume de gaz produit après 24 heures d'incubation (ml/ 0,3g MS) ; dMO : digestibilité de la Matière Organique (%) ; EM : Energie Métabolisable (MJ/kg MS) ; AGV : Acides Gras Volatiles (mmol/siringue)

De même, l'effet aléatoire met en évidence une variabilité inter-espèces importante durant les différentes saisons pour les trois paramètres (tableau 36). La variance élevée souligne une variabilité considérable entre les espèces. Ainsi, les espèces telles que *F. angustifolia* en automne, été et au printemps et *C. cirrhosa* en automne, montrent des volumes importants de gaz, tandis que *H. helix* en automne et en hiver affichent des productions inférieures à la moyenne globale (figure 41).

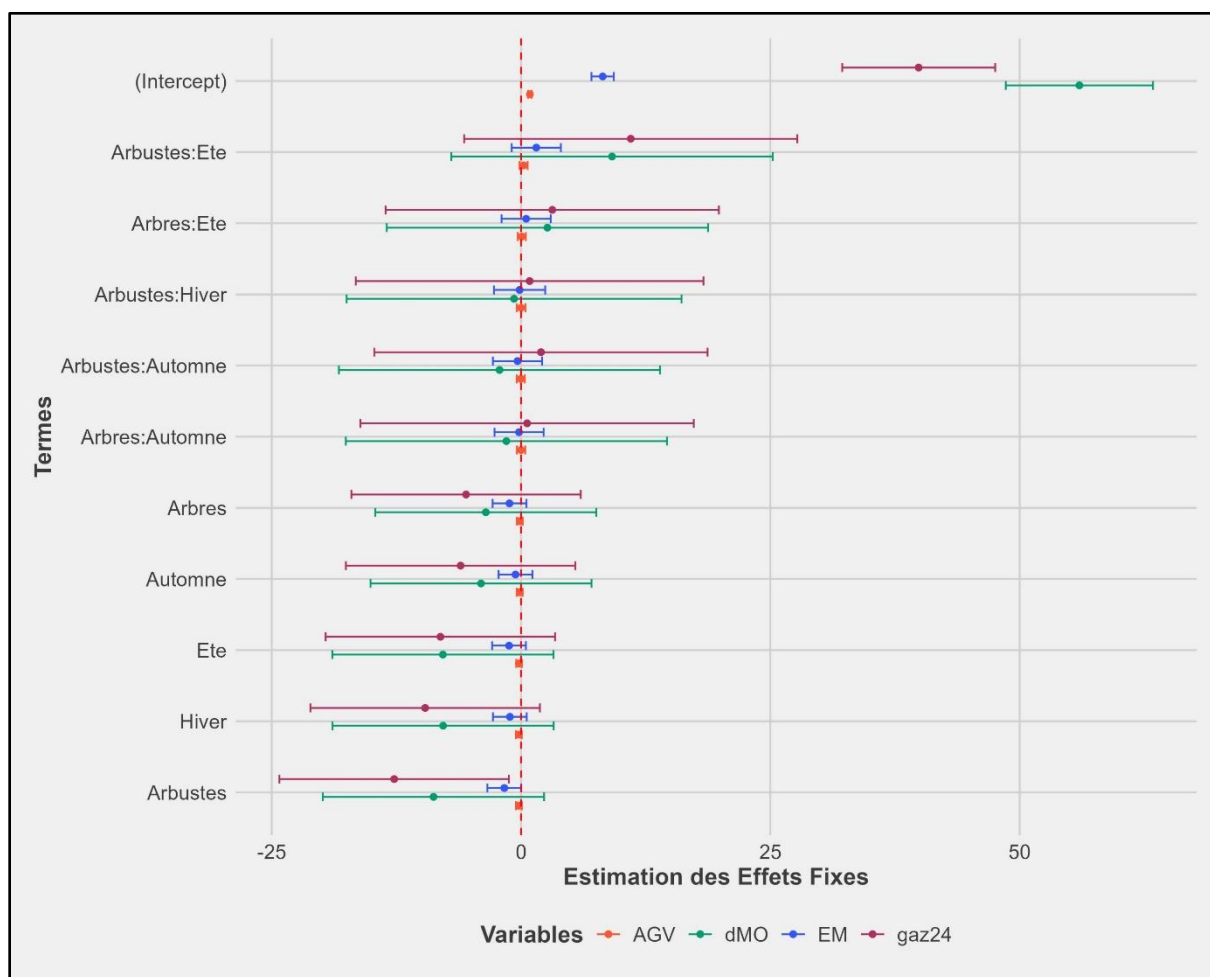


Figure 40 : Coefficients estimés des effets fixes des paramètres de digestibilité *in vitro* des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

En revanche, les concentrations en AGV ne montrent aucun effet global pour la catégorie ($p=0,13$), la saison ($p=0,14$) et leur interaction ($p=0,79$) (tableau 36). En addition, aucun effet spécifique n'a été détecté pour les saisons, les catégories ou leurs combinaisons (figure 40).

En outre, malgré la variance très faible des effets aléatoires (0,044), certaines espèces comme *F. angustifolia* en automne et au printemps et *M. communis* en été montrent des teneurs

importantes, alors *H. helix* en automne et en hiver, *Q. coccifera* et *Q. canariensis* au printemps affichent des concentrations inférieures à la moyenne globale (figure 41).

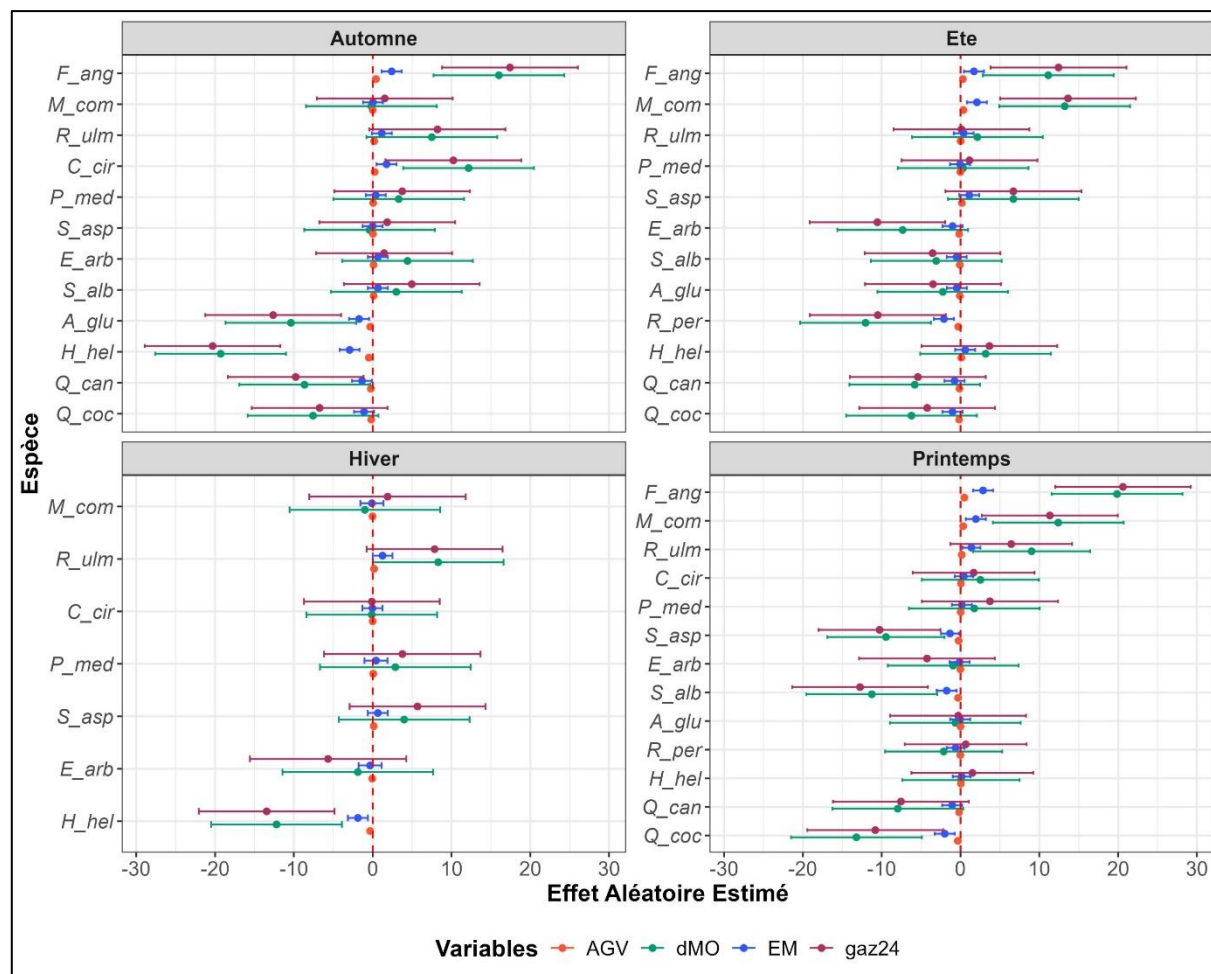


Figure 41 : Coefficients estimés des effets aléatoires des paramètres de digestibilité *in vitro* des espèces ligneuses selon les saisons

II.6. L'effet du PEG sur la production de gaz

La production moyenne de gaz sans PEG des lianes est estimée à 39,86 ml/0,3g MS ($p < 0,001$). Après l'ajout du PEG, une amélioration significative de la production de gaz est observée, atteignant 42,58 ml/0,3g MS ($p < 0,001$), ce qui correspond à un taux d'augmentation moyen de 6,92%. Bien que la catégorie montre un effet global significatif ($p = 0,001$), les arbres et les arbustes affichent des taux d'augmentation non significatifs ($p = 0,19$ et $p = 0,32$ respectivement). Néanmoins, aucune influence globale ou spécifique de la saison n'a été détectée ($p = 0,10$) (tableau 37, figure 42). Par ailleurs, bien que l'effet global des interactions ne soit pas significatif ($p = 0,4$), une différence mineure des arbustes en hiver a été observée (34,8%, $p = 0,06$).

Tableau 37 : L'effet du PEG sur la production du gaz des ligneux étudiés

Catégorie	Espèce	Saison	Production totale du gaz (ml/0,3g MS)			
			GAZ(-PEG)	GAZ(+PEG)	Taux d'augmentation (%)	
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	33,89 ± 1,55	47 ± 1,54	38,75 ± 1,79	
		Printemps	21,53 ± 0,74	32,55 ± 1,48	51,19 ± 1,68	
		Été	25,84 ± 0,39	38,06 ± 0,4	47,33 ± 0,69	
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	16,2 ± 1,52	19,43 ± 1,53	20,06 ± 1,84	
		Printemps	34,05 ± 0,74	36,14 ± 0,74	6,15 ± 0,13	
		Été	25,89 ± 0,78	31,67 ± 1,17	22,31 ± 0,86	
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	46,41 ± 1,53	46,41 ± 1,53	0 ± 0	
		Printemps	55,08 ± 0,77	55,08 ± 0,77	0 ± 0	
		Été	41,9 ± 1,56	42,45 ± 0,78	1,35 ± 1,91	
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	19,07 ± 0,4	26,81 ± 0,4	40,6 ± 0,84	
		Printemps	26,75 ± 0,39	35,85 ± 0,78	34,02 ± 0,99	
		Été	23,96 ± 1,17	31,39 ± 0,78	31,11 ± 3,14	
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	16,31 ± 0,37	26,2 ± 0,76	6,02 ± 0,57	
		Printemps	16,27 ± 0,74	23,87 ± 1,11	6,43 ± 0,19	
		Été	25,8 ± 0,78	33,76 ± 1,17	3,57 ± 0,39	
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	26,84 ± 0	28,24 ± 0,4	5,21 ± 1,47	
		Hiver	22,18 ± 0,36	24,98 ± 0,72	12,68 ± 5,08	
		Printemps	30,9 ± 1,53	30,9 ± 0	0,12 ± 4,97	
	<i>Myrtus communis</i>	Été	31,2 ± 0,38	34,67 ± 0	11,12 ± 1,34	
		Automne	24,62 ± 0,76	31,57 ± 0	28,32 ± 3,95	
		Hiver	20,28 ± 1,47	32,76 ± 0	61,96 ± 11,75	
		Printemps	38,54 ± 0	41,97 ± 0,37	8,9 ± 0,97	
		Été	43,77 ± 0,77	48,42 ± 1,16	10,62 ± 0,7	
		<i>Erica arborea</i>	Automne	24,53 ± 0	32,33 ± 0	31,82 ± 0
	Hiver		12,7 ± 0,37	26,17 ± 0,37	106,25 ± 8,84	
	Printemps		22,86 ± 0	27,53 ± 0,73	20,45 ± 3,21	
	Lianes		Été	19,45 ± 0	28,09 ± 0	44,44 ± 0
			Printemps	40,53 ± 0,74	48,68 ± 1,12	20,12 ± 0,55
			Été	21,22 ± 2,31	30,74 ± 1,92	45,24 ± 6,73
<i>Clematis cirrhosa</i>		Automne	44,1 ± 1,52	44,1 ± 1,53	0 ± 0	
		Hiver	30,15 ± 0,38	28,81 ± 0	-4,42 ± 1,19	
		Printemps	41,53 ± 0,78	40,7 ± 1,17	-2,02 ± 0,97	
<i>Smilax aspera</i>		Automne	35,65 ± 0	37,74 ± 0	5,86 ± 0	
		Hiver	35,97 ± 0	36,74 ± 0,37	2,14 ± 1,02	
		Printemps	29,53 ± 0,37	30,84 ± 0,74	4,41 ± 1,17	
		Été	38,53 ± 0,75	42,75 ± 0,75	10,97 ± 0,19	
		Automne	42,07 ± 0,75	44,73 ± 0	6,35 ± 1,91	
		Hiver	38,15 ± 0	43,45 ± 0	13,89 ± 0	
<i>Rubus ulmifolius</i>		Printemps	46,34 ± 1,56	46,34 ± 1,56	0 ± 0	
		Été	31,9 ± 0,76	32,98 ± 0,76	3,39 ± 0,08	
		Automne	13,38 ± 0,4	16,51 ± 0,8	23,37 ± 2,26	
<i>Hedera helix</i>	Hiver	16,72 ± 0,76	23,74 ± 1,52	41,9 ± 2,61		
	Printemps	41,38 ± 0,37	46,39 ± 0	12,11 ± 1		
	Été	35,47 ± 1,52	38,16 ± 0,76	7,64 ± 2,48		
Effets aléatoires						
Espèce : Saison			76,06	56,32	333,76	
Residual			0,85	0,82	9,05	
Effets fixes						
Catégorie			0,011	0,07	0,003	
Saison			0,13	0,20	0,14	
Catégorie * Saison			0,83	0,73	0,40	

En parallèle, la variance des effets aléatoires des taux d'augmentation de la production de gaz entre les espèces et les saisons est estimée à 333,77, indiquant une grande variabilité de la réponse au PEG. En effet, les estimations individuelles des effets aléatoires varient considérablement, allant de -46,98% pour *P. media* en hiver à 45,33% pour *E. arborea* en hiver. Certaines espèces, comme *Q. coccifera* en automne et au printemps, *E. arborea* en hiver et été, et *H. helix* en hiver, montrent des effets aléatoires positifs, reflétant une amélioration de la production de gaz par rapport à la moyenne. En revanche, des espèces comme *F. angustifolia* en automne, au printemps et en été, et *P. media* en automne et hiver, présentent des effets aléatoires négatifs, indiquant des rendements inférieurs à la moyenne globale (figure 43).

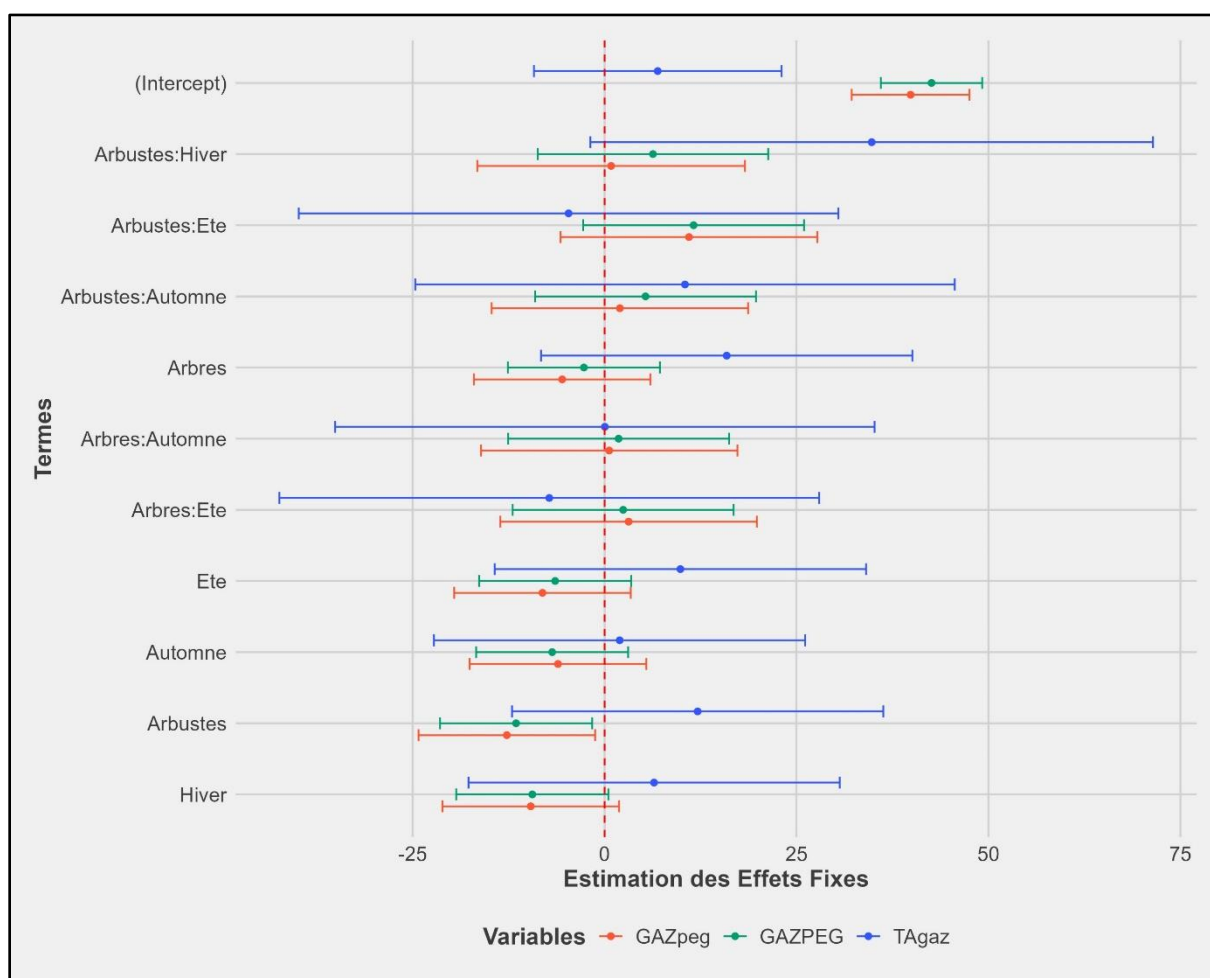


Figure 42 : Coefficients estimés des effets fixes de l'effet du PEG sur la production de gaz des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

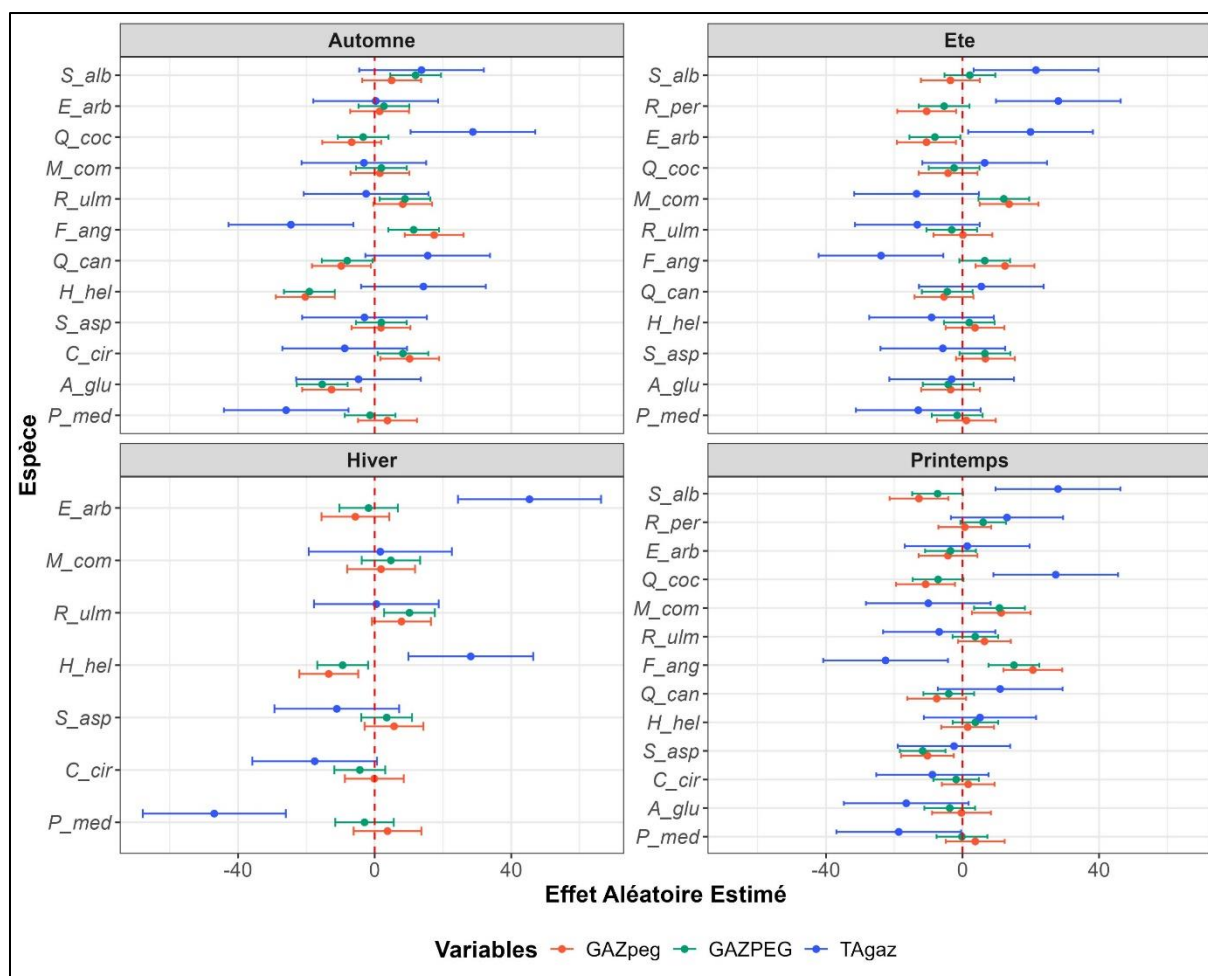


Figure 43 : Coefficients estimés des effets aléatoires de l'effet du PEG sur la production de gaz des espèces ligneuses selon les saisons

II.7. L'effet du PEG sur la production de Méthane

L'émission de CH₄ en absence PEG des lianes est estimée en moyenne à 12,26 ml/0.3g MS ($p < 0,001$). L'incorporation de PEG, a provoqué une amélioration significative ($p < 0,001$) de la production de CH₄, estimée à 12.85 ml/0,3 g MS. Le taux d'augmentation moyenne de la production de CH₄ est estimé à 9,28 % ($p = 0,63$) ce qui signifie que les lianes ne subissent pas de changement. La catégorie de ligneux ne présente pas d'effet global significatif ($p = 0,42$) (tableau 38), en revanche, un effet spécifique a été détecté pour les arbres ($p = 0,02$) avec une augmentation de 69.18%. En contrepartie, L'influence des saisons ne révèle pas d'effet global significatif ($p = 0,77$) ni d'effet spécifique (figure 44) alors que des interactions globales marginales ont été observées ($p = 0,08$) supportées par des interactions prononcées pour les arbres en automne ($p = 0,03$) et en été ($p = 0,04$) qui tendent à diminuer par des taux respectifs de l'ordre de 92,5% et 88,51%.

Tableau 38 : L'effet du PEG sur la production de méthane des ligneux étudiés

Catégorie	Espèce	Saison	Production de méthane CH ₄ (ml/0,3g MS)		
			CH ₄ (-PEG)	CH ₄ (+PEG)	Taux d'augmentation (%)
Arbres	<i>Salix alba</i>	Automne	8,61 ± 0,19	12,3 ± 0,39	42,97 ± 7,69
		Printemps	6,43 ± 0,18	12,08 ± 0,74	87,7 ± 6,18
		Été	7,23 ± 0,78	9,45 ± 0,78	30,91 ± 3,36
	<i>Alnus glutinosa</i>	Automne	7,83 ± 0,38	6,62 ± 0,19	-15,48 ± 1,68
		Printemps	12,31 ± 0,37	15,19 ± 0,74	23,32 ± 2,35
		Été	10,47 ± 0,78	13,77 ± 0,78	31,68 ± 2,44
	<i>Fraxinus angustifolia</i>	Automne	9,85 ± 0,19	11,33 ± 0,76	15,03 ± 5,53
		Printemps	8,59 ± 0,19	15,95 ± 0,58	85,76 ± 2,62
		Été	5,79 ± 0,39	11,58 ± 0,78	100,18 ± 0,01
	<i>Quercus canariensis</i>	Automne	16,86 ± 0,4	10,51 ± 0,78	-37,73 ± 3,2
		Printemps	11,58 ± 0,78	25,1 ± 0,39	117,09 ± 11,22
		Été	17,21 ± 0,98	8,95 ± 0,2	-47,95 ± 1,8
Arbustes	<i>Quercus coccifera</i>	Automne	15,77 ± 0,38	60,65 ± 0,95	163,07 ± 18,7
		Printemps	8,66 ± 0,37	46,72 ± 0,13	34,69 ± 1,83
		Été	7,82 ± 0,2	30,83 ± 0,57	120,36 ± 18,48
	<i>Phillyrea media</i>	Automne	9,78 ± 0	10,05 ± 0,3	2,84 ± 3,08
		Hiver	7,47 ± 0,64	8,24 ± 0,34	10,92 ± 14,01
		Printemps	9,13 ± 0,27	9,57 ± 0,31	4,89 ± 0,4
		Été	8 ± 0	7,73 ± 0,38	-3,33 ± 4,71
	<i>Myrtus communis</i>	Automne	5,89 ± 0	8,56 ± 0,76	45,45 ± 12,86
		Hiver	4,42 ± 0,37	9,88 ± 0	124,31 ± 18,66
		Printemps	6,89 ± 0,57	8,86 ± 0,31	28,72 ± 6,28
		Été	7,42 ± 0,02	7,97 ± 0,62	7,36 ± 8,07
	<i>Erica arborea</i>	Automne	6,64 ± 0,8	8,46 ± 0,57	28,89 ± 24,21
		Hiver	4,3 ± 0,72	7,44 ± 0,58	76,65 ± 42,99
		Printemps	5,68 ± 0,78	7,68 ± 0,05	36,36 ± 17,83
		Été	5,71 ± 1,22	7,07 ± 0,27	26,24 ± 22,32
	<i>Rubia peregrina</i>	Printemps	7 ± 0,7	12,36 ± 1,08	76,59 ± 2,23
		Été	7,4 ± 0,77	16,77 ± 0,79	127,27 ± 14,96
		<i>Clematis cirrhosa</i>	Automne	11,84 ± 1,52	10,22 ± 0,76
Hiver	9,34 ± 0,37		5,87 ± 0,75	-37,23 ± 5,51	
Printemps	9,97 ± 0		6,65 ± 0	-33,3 ± 0	
<i>Smilax aspera</i>	Automne	9,91 ± 0,66	11,8 ± 0,37	19,16 ± 4,21	
	Hiver	10,95 ± 0,94	12,85 ± 0,73	17,51 ± 3,44	
	Printemps	7,32 ± 1,48	7,74 ± 1,63	5,72 ± 0,87	
	Été	12,14 ± 0,75	10,19 ± 0,52	-16,04 ± 0,87	
<i>Rubus ulmifolius</i>	Automne	11,98 ± 1,88	14,01 ± 1,73	17,21 ± 3,94	
	Hiver	12,72 ± 3	22,78 ± 2,25	82,06 ± 25,23	
	Printemps	23,45 ± 0,39	25,38 ± 0	8,27 ± 1,8	
	Été	8,65 ± 1,53	7,84 ± 1,15	-9,12 ± 2,8	
<i>Hedera helix</i>	Automne	9,11 ± 0	15,94 ± 0	74,97 ± 0	
	Hiver	10,25 ± 0,76	17,26 ± 0	68,86 ± 12,58	
	Printemps	13,6 ± 0,16	12,13 ± 0,74	-10,87 ± 4,44	
	Été	10,48 ± 0,38	19,89 ± 0,76	90 ± 14,14	
Effets aléatoires					
Espèce : Saison		8,62	14,65	1887	
Residual		0,71	0,55	146,5	
Effets fixes					
Catégorie		<0,001	0,002	0,42	
Saison		0,76	0,58	0,77	
Catégorie * Saison		0,91	0,17	0,08	

La variance des effets aléatoires entre les espèces durant les différentes saisons est de 1309.2, cela indique une très forte variabilité inter-espèces de la réponse au PEG. La saison estivale s'avère la plus dominante en affichant les fluctuations les plus importantes entre les espèces (figure 45). Les espèces telles que *Q. coccifera*, *R. peregrina* et *F. angustifolia* montrent des effets aléatoires positifs marqués se traduisent par une importante augmentation en CH4 tandis que *R. ulmifolius*, *Q. canariensis* et *S. aspera* se caractérisent par des taux dépressifs.

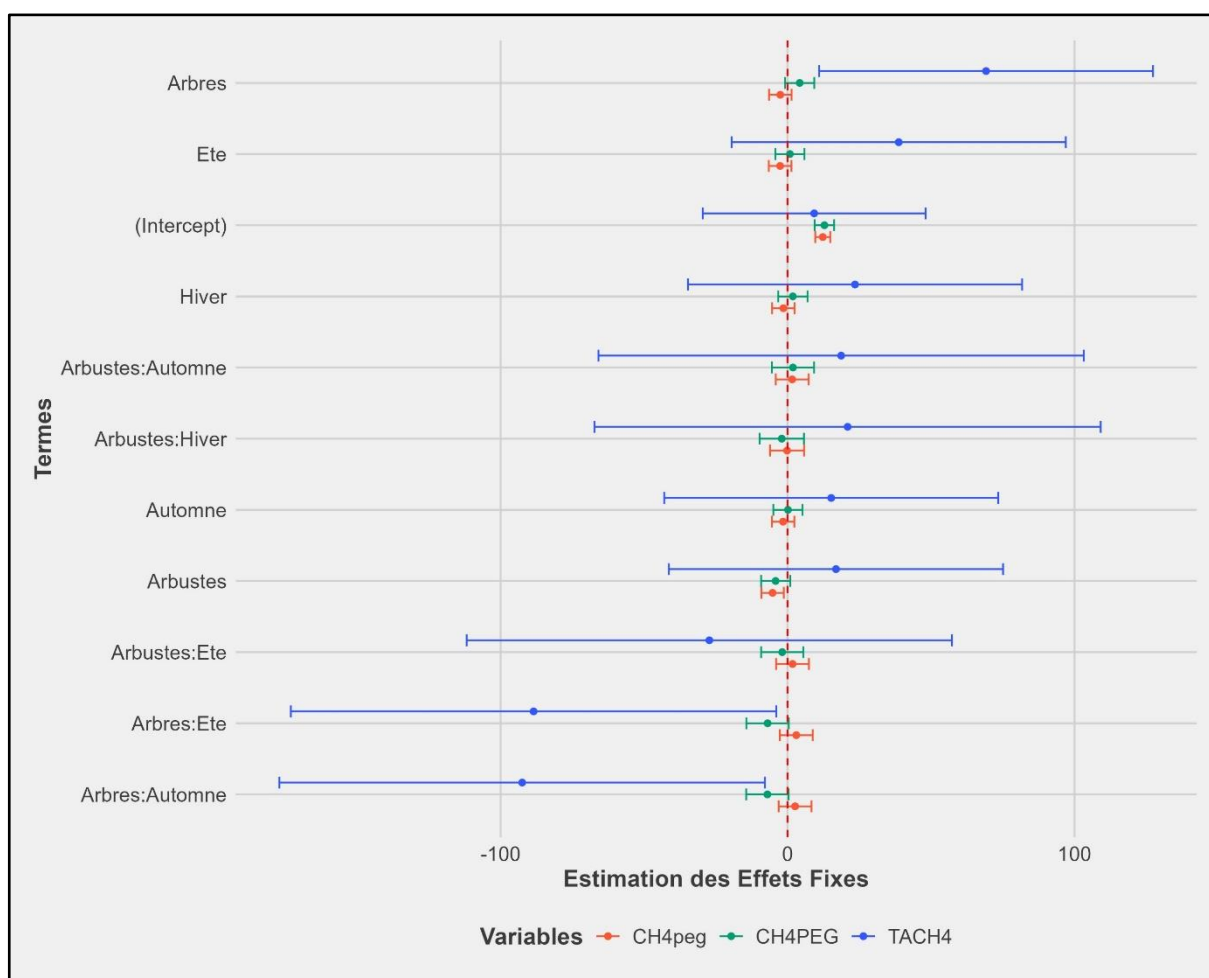


Figure 44 : Coefficients estimés des effets fixes de l'effet du PEG sur la production de Méthane des espèces ligneuses selon la catégorie, la saison et leur interaction

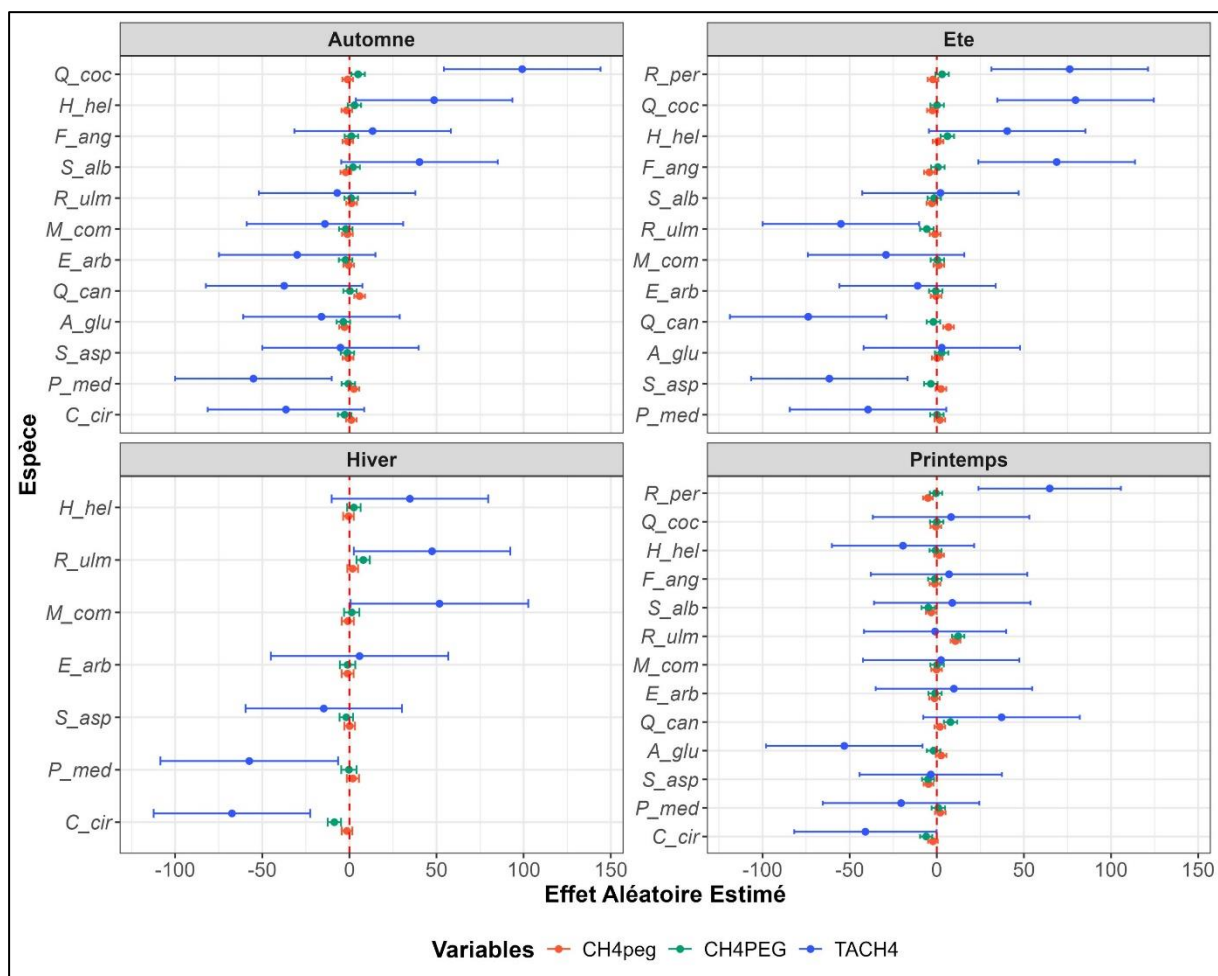


Figure 45 : Coefficients estimés des effets aléatoires de l'effet du PEG sur la production de Méthane des espèces ligneuses selon les saisons

III. Typologie des espèces ligneuses étudiées

Afin d'établir une typologie des espèces ligneuses étudiées, une approche analytique multivariée en deux étapes a été adoptée soit une Analyse Factorielle Multiple (AFM) et une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

III.1. Analyse Factorielle Multiple (AFM)

Cette méthode a permis d'explorer simultanément les différentes variables structurées en groupes thématiques (composition chimique, composition pariétale, composition phénolique et paramètres de fermentation *in vitro*). L'AFM réduit la dimensionnalité des données tout en préservant les relations entre les groupes de variables.

III.1.1. Validation de l'AFM

La validation méthodologique de l'AFM a été effectuée selon deux critères complémentaires : l'analyse des coefficients de corrélation canoniques (Pagès, 2014) et l'examen de la structure des valeurs propres (Abdi & Williams, 2010).

III.1.1.1. Inspection des coefficients de corrélation canoniques

L'analyse des coefficients de corrélation canoniques (tableau 39) montre des contributions marquées sur les deux premières dimensions, particulièrement pour la composition chimique ($r = 0,91$) et les paramètres de fermentation *in vitro* ($r = 0,88$) sur la première dimension (Dim 1). Ces valeurs témoignent d'une structuration robuste des données, renforcée par les contributions élevées de la composition pariétale ($r = 0,80$) et des composés phénoliques ($r = 0,87$) sur la deuxième dimension (Dim 2).

Tableau 39 : Coefficients de corrélation canonique des groupes de variables

Groupes de variables	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4	Dim 5
Composition chimique	0,91	0,13	0,44	0,20	0,85
Composition pariétale	0,49	0,80	0,37	0,88	0,11
Composition phénolique	0,54	0,87	0,75	0,08	0,20
Paramètres de fermentation <i>in vitro</i>	0,88	0,26	0,43	0,37	0,66

III.1.1.2. Examen de la structure des valeurs propres

Le graphique des valeurs propres (figure 46) montre une décroissance non linéaire avec un "point de coude" distinctif après la deuxième dimension, qui capture 35,6% et 24,2% de la variance totale, soit une inertie cumulée de 59,8%. Cette rupture de pente indique une

structuration claire des données et justifie la rétention des deux premières dimensions pour l'interprétation.

La convergence de ces deux critères d'évaluation - la présence de corrélations canoniques élevées ($>0,80$) pour au moins deux groupes sur la première dimension et une structure différenciée des valeurs propres - valide de manière robuste l'utilisation de l'AFM pour ces données. Cette approche permet ainsi une exploration optimale de la structure multidimensionnelle des relations entre les différents groupes de variables, tout en préservant leurs spécificités individuelles.

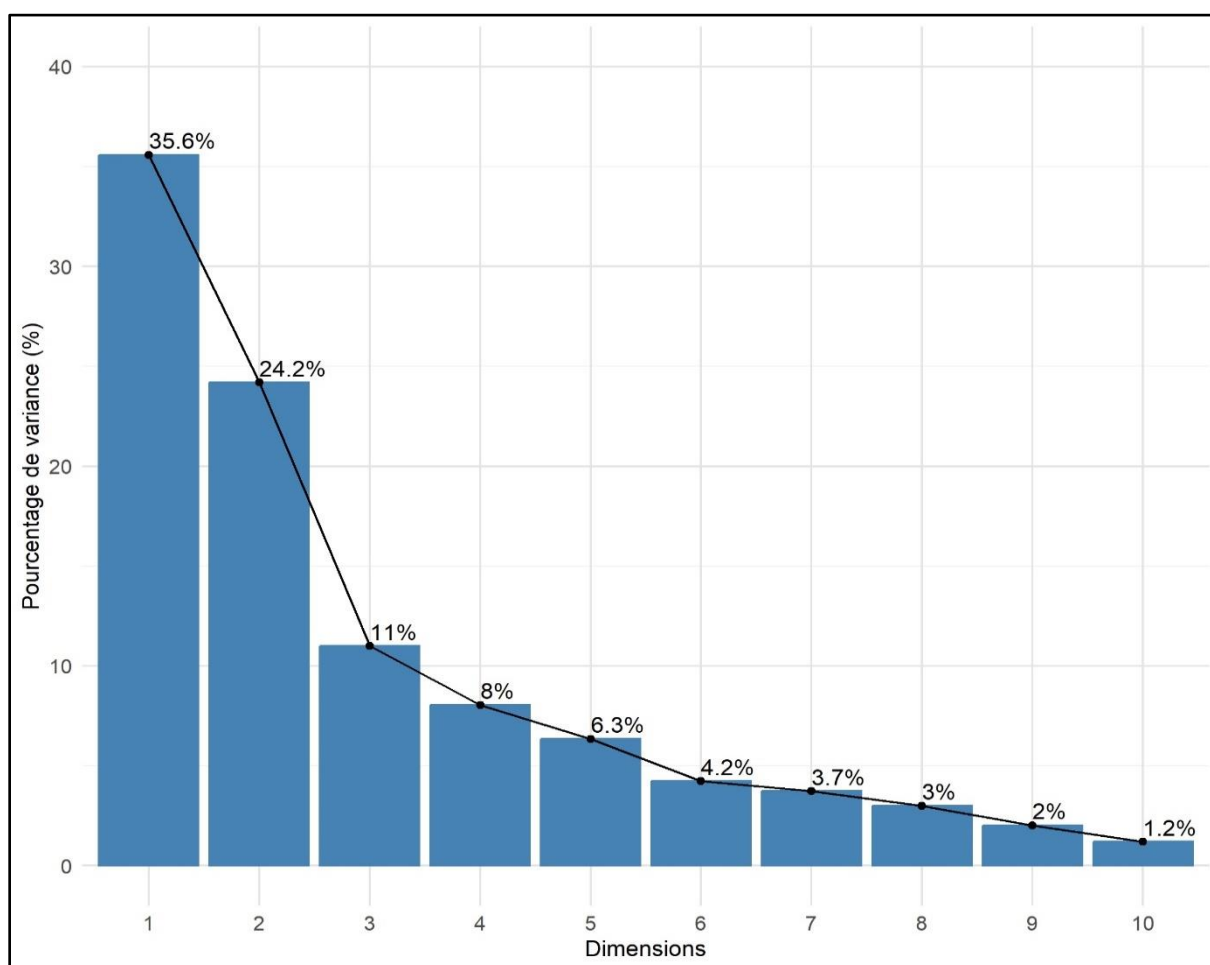


Figure 46 : Diagramme des valeurs propres de l'AFM

III.1.2. Représentation des groupes de variables

L'AFM réalisée sur les espèces ligneuses étudiées révèle une organisation biochimique complexe, structurée autour de deux dimensions principales (figure 47). La première dimension, qui explique 35,6% de la variance totale, établit un gradient métabolique fondamental, fortement influencé par le groupe composition chimique (coordonnée = 0,83, contribution = 39,8%, $\cos^2 = 0.61$) et les paramètres de fermentation *in vitro* (coordonnée =

0,76, contribution = 36,7%, $\cos^2 = 0,53$). Cette structuration primaire constitue l'axe majeur de différenciation métabolique, reflétant les aspects nutritifs et fermentaires des espèces.

La seconde dimension, englobant 24,2% de la variance, met en évidence un gradient compositionnel distinct. Celui-ci est dominé par les composés phénoliques (coordonnée = 0,75, contribution = 52,7%, $\cos^2 = 0,46$) et les constituants pariétaux (coordonnée = 0,63, contribution = 44,7%, $\cos^2 = 0,35$), traduisant des variations liées aux composantes structurales et défensives des espèces. Ces deux axes complémentaires permettent de discriminer les espèces selon leurs propriétés biochimiques et fonctionnelles.

L'analyse des coefficients Lg confirme une forte homogénéité interne pour les groupes de variables actives, avec des valeurs systématiquement supérieures à 1. En parallèle, les variables illustratives présentent une structuration marquée, notamment pour la catégorie taxonomique ($Lg = 3.00$) et la variation saisonnière ($Lg = 2.00$), témoignant d'une organisation hiérarchique robuste des modalités supplémentaires.

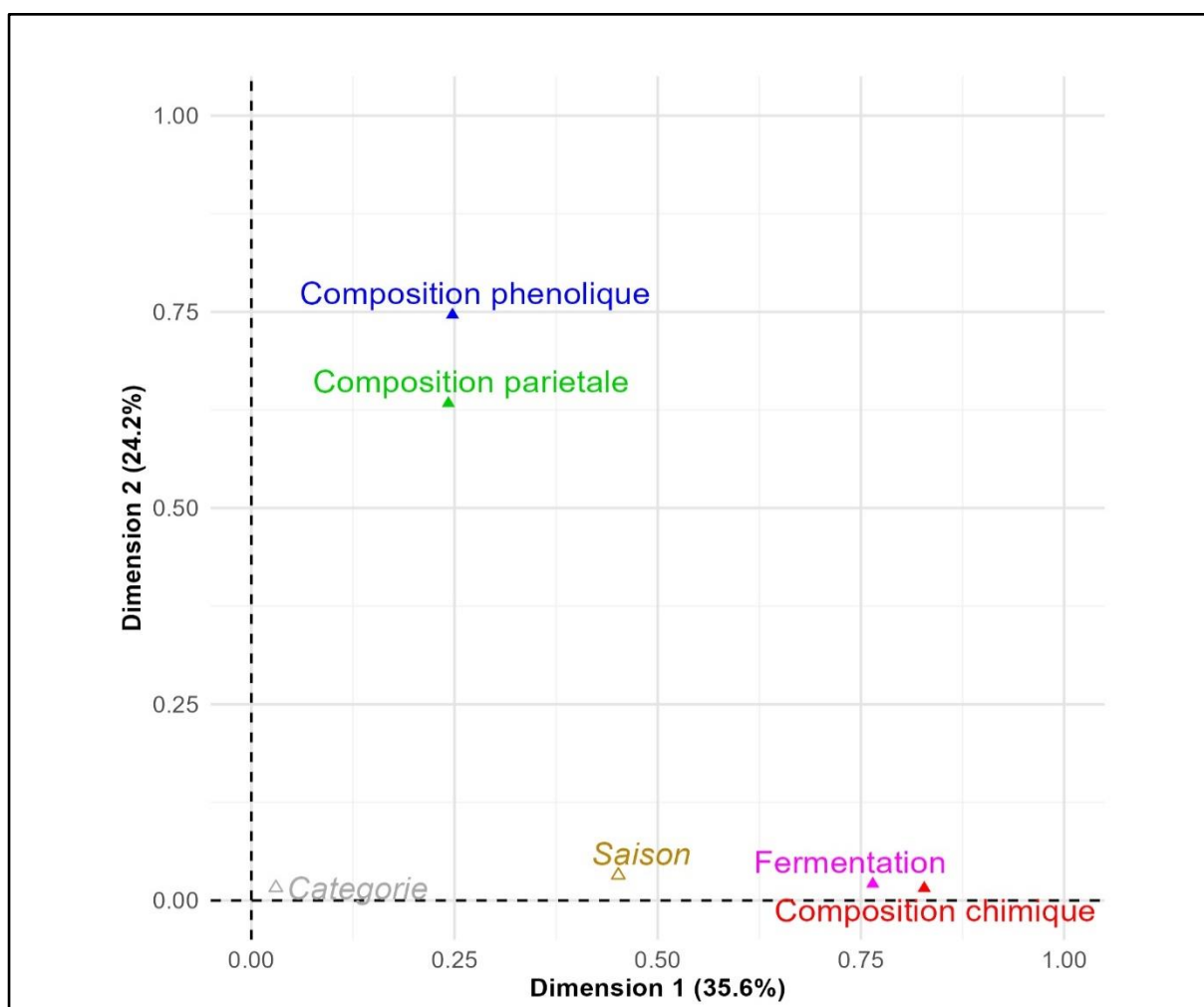


Figure 47 : Représentation des groupes de variables sur le plan factoriel de l'AFM

Les relations inter-groupes, quantifiées par les coefficients RV , mettent en lumière une hiérarchisation fonctionnelle claire. Une forte association est observée entre la composition chimique et les paramètres de fermentation ($RV = 0,38$), tandis que les composés phénoliques montrent une relation modérée avec la composition chimique ($RV = 0,21$). Les saisons, pour leur part, exercent par ailleurs une influence notable sur la composition chimique ($RV = 0,41$) cependant, l'effet de ces derniers est moins important sur les composés phénoliques ($RV = 0,18$) et sur les paramètres fermentaires ($RV = 0,19$). En revanche, les facteurs taxonomiques présentent des interactions beaucoup plus faibles avec les groupes actifs ($RV < 0,06$).

III.1.3. Représentation des variables quantitatives

Le cercle des corrélations issu de l'AFM révèle une structure complexe des relations entre les variables biochimiques et fonctionnelles des espèces ligneuses étudiées (figure 48). La distribution des variables sur les deux premiers axes factoriels met en évidence des corrélations distincts et biologiquement significatifs.

Le premier axe factoriel présente une opposition marquée entre deux ensembles de variables. Dans la partie positive, on observe un regroupement des variables de composition chimique, notamment la MO (corrélation = 0,804) et la MS (corrélation = 0,689), associées à l'activité biologique des tanins (corrélation = 0,719) et la teneur en TC (corrélation = 0,530). Cette association ABT-TC est particulièrement importante, car elle influence négativement les paramètres fermentaires qui se projettent dans la partie négative de l'axe : la dMO (corrélation = -0,80), Gaz_Total (corrélation = -0,83) et le CH₄ (corrélation = -0,52). Au niveau du côté négatif de l'AFM, on retrouve également la MAT (corrélation = -0,66) et la MM (corrélation = -0,80).

Le second axe factoriel est principalement caractérisé par une distribution verticale des variables. La région supérieure est dominée par les composés phénoliques (PPT, corrélation = 0,86 ; TT, corrélation = 0,85), tandis que la région inférieure regroupe les constituants pariétaux (NDF, corrélation = -0,74 ; ADF, corrélation = -0,80 ; ADL, corrélation = -0,70).

L'analyse des corrélations entre variables met en évidence plusieurs associations significatives :

- Un premier groupe rassemble les paramètres fermentaires (dMO, Gaz_Total, CH₄) fortement corrélés entre eux et avec les teneurs en MAT et MM. Ces paramètres sont négativement corrélés avec les teneurs en TC et avec l'ABT, soulignant l'effet antinutritionnel des tanins condensés sur la fermentation ruminale.

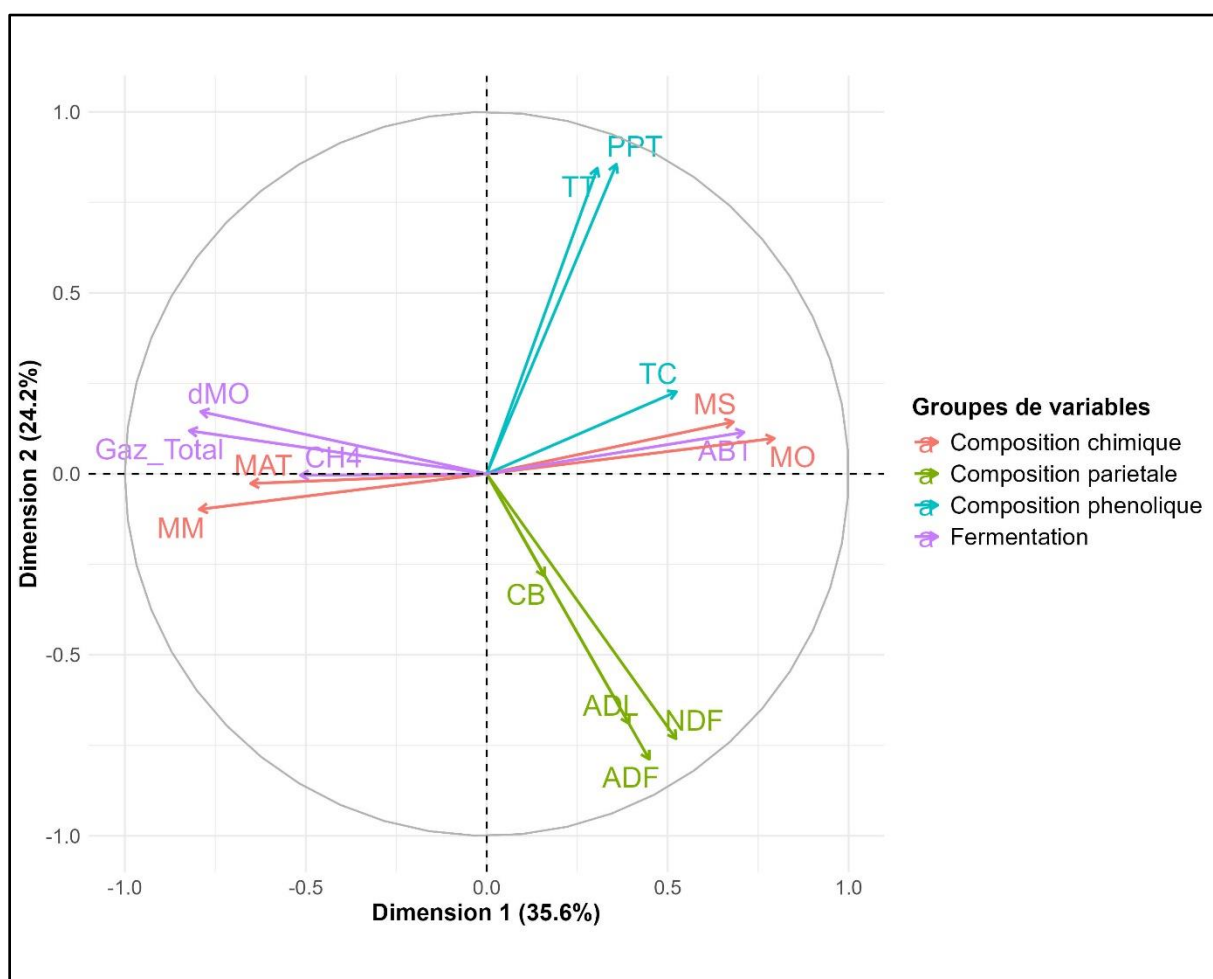
-Un second ensemble associe les composés phénoliques (PPT, TT), présentant des vecteurs ayant la même direction et de forte amplitude.

-Les constituants pariétaux (NDF, ADF, ADL) forment un groupe cohérent, leurs vecteurs étant étroitement regroupés dans le quadrant inférieur droit, traduisant leur forte inter-corrélation.

De même, des antagonismes majeurs sont mis en évidence par des oppositions marquées :

- Entre les paramètres de fermentation et les composés chimiques (MO, MS) et phénoliques.
- Entre les composés phénoliques et les constituants pariétaux.
- Entre les fractions azotées, minérales et les composés organiques structuraux.

La qualité de représentation des variables, illustrée par la longueur des vecteurs, est globalement excellente : la majorité des variables se projettent près du cercle de corrélation unitaire. Cette observation valide la pertinence de la structure bidimensionnelle pour l'analyse des relations entre variables.



MS : Matière Sèche ; MO : Matière Organique ; MM : Matière Minérale ; MAT : Matière Azotée Totale ; PPT : PolyPhénols Totaux ; TT : Tanins Totaux ; TC : Tanins Condensés ; dMO : digestibilité de la Matière Organique ; ABT : Activité Biologique des Tanins ; CH4 : Méthane ; NDF : Neutral Detergent Fiber ; ADF : Acid Detergent Fiber ; ADL : Acid detergent Lignin ; CB : Cellulose Brute

Figure 48 : Cercle de corrélation des variables quantitatives issu de l'AFM

III.1.4. Représentation des variables qualitatives supplémentaires

L'AFM a permis de mettre en évidence les relations structurales entre les différents groupes de variables actives et les modalités qualitatives. La projection des variables qualitatives sur le plan factoriel révèle des tendances distinctes de discrimination, tant au niveau taxonomique que temporel (figure 49).

La différenciation taxonomique s'avère particulièrement marquée, avec une structuration significative selon les catégories botaniques. Les arbustes se caractérisent par une signature chimique distinguée ($V\text{-test} = 4,21, p < 0,001$ sur l'axe 1), manifestant une forte teneur en TC et une composition chimique enrichie en MS et MO. Cette catégorie présente également une moindre fermentescibilité *in vitro* par rapport aux autres groupes étudiés.

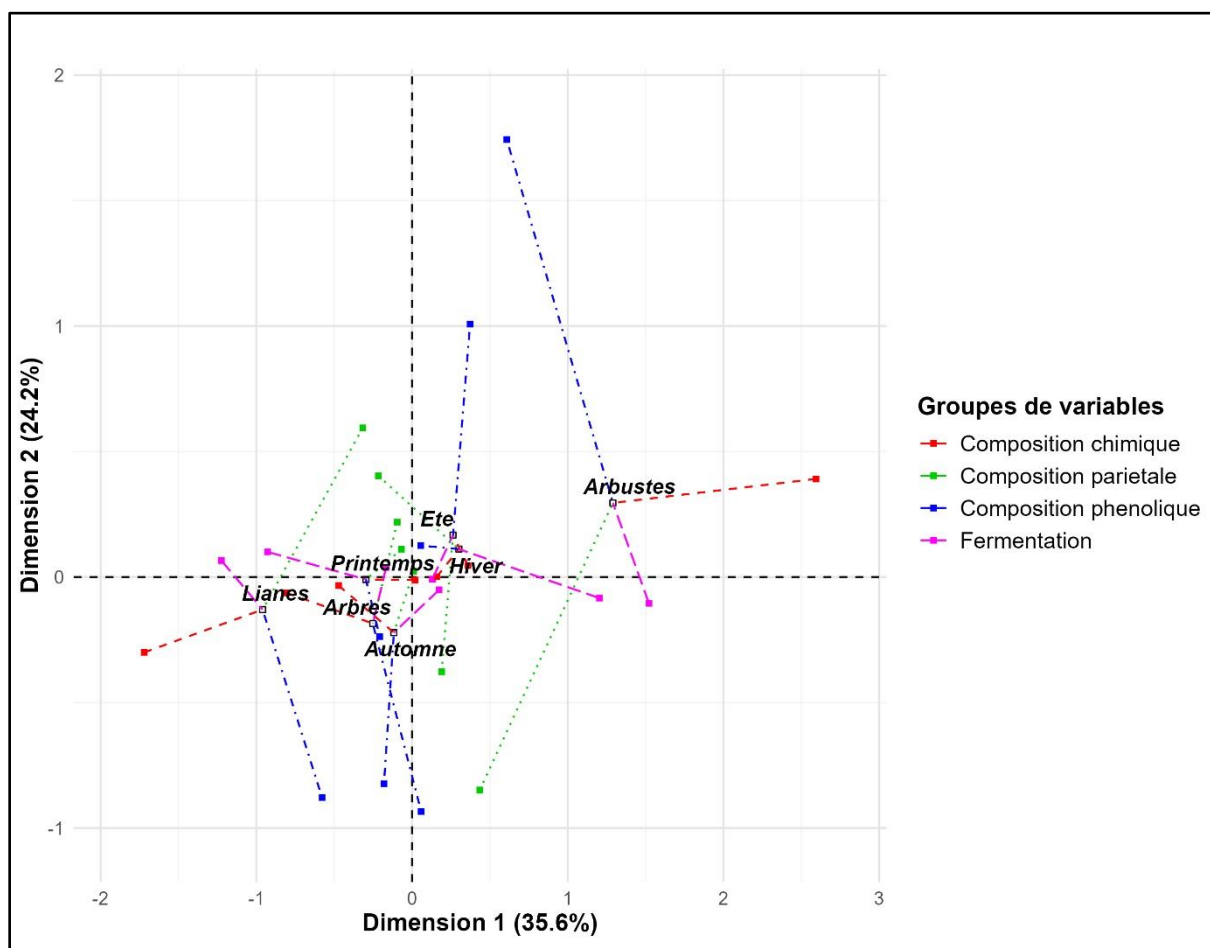


Figure 49 : Représentation des points partiels des modalités supplémentaires sur le plan factoriel de l'AFM

Les lianes présentent un profil biochimique fortement contrasté ($V\text{-test} = -3,46, p < 0,001$ sur l'axe 1), caractérisé par une composition chimique significativement différente, avec des teneurs élevées en MAT et MM. Cette catégorie se distingue par une meilleure

fermentescibilité *in vitro*, corrélée négativement avec leur des teneurs modérées en composés phénoliques. La composition pariétale des lianes présente une importante variabilité, indiquant une plasticité structurelle potentiellement adaptative.

Les arbres, contrairement à leur apparente position intermédiaire, manifestent une signature métabolique spécifique, particulièrement marquée sur l'axe 2, avec une contribution significative aux constituants pariétaux et une composition phénolique modérée.

Néanmoins, bien que les *V-tests* des saisons soient non significatifs, les projections des points partiels sur le plan factoriel révèlent des schémas de discrimination intéressants. L'été se projette positivement sur l'axe 2, reflétant une accumulation marquée de composés phénoliques. Toutesfois, l'automne se distingue par une prédominance des constituants pariétaux, marquée par sa position négative sur les deux axes. Par ailleurs, le printemps montre une légère optimisation de la fermentescibilité *in vitro*, avec des profils équilibrés en composés pariétaux et phénoliques. Enfin, l'hiver, positionné modérément en positif, reflète des teneurs moyennes en composés primaires et phénoliques. Ainsi, bien que l'effet saisonnier soit secondaire par rapport aux différences taxonomiques, les projections saisonnières indiquent des tendances distinctes qui influencent significativement les profils nutritionnels.

L'analyse met en évidence des interactions complexes entre la taxonomie et la saisonnalité. Les arbustes montrent une plus grande stabilité de leur profil biochimique face aux variations saisonnières, tandis que les lianes manifestent une adaptabilité remarquable. En outre, les arbres présentent des variations saisonnières modérée mais significatives.

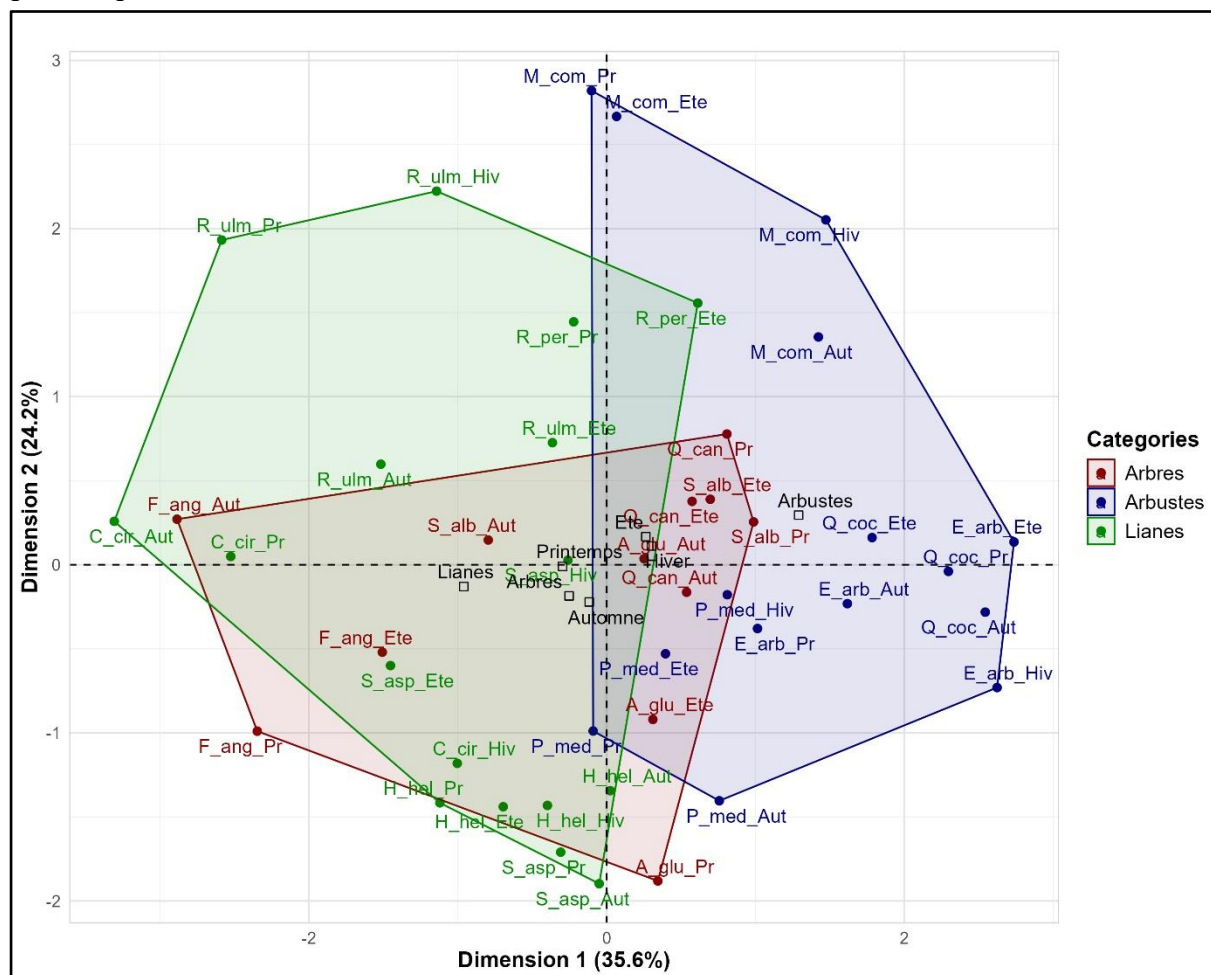
III.1.5. Représentation des individus

III.1.5.1. Représentation par catégorie taxonomique

L'AFM met en évidence une structuration claire des espèces selon leur appartenance taxonomique (arbres, arbustes, lianes), reflétant des divergences nutritionnelles significatives (figure 50).

Les lianes montrent une grande variabilité nutritionnelle marquée par un profil pauvre en MS, MO et en TC. En effet, *C. cirrhosa* se distingue sur l'Axe 1 par des niveaux élevés en MAT et MM avec une fermentescibilité optimale particulièrement marqués en automne (11,94%) tandis que *R. ulmifolius* contribue significativement aux deux axes, avec une forte variabilité en composés phénoliques (7,92%), azotés en plus des paramètres de digestibilité (7,29%). L'espèce *S. aspera* affiche un profil diversifié : elle se positionne à la fois sur l'Axe 1, avec des contributions modérées en digestibilité, et sur l'Axe 2, en relation avec les composés

pariétaux en automne (5,77%) et au printemps (4,69%). En revanche, *H. helix* occupe une position stable dans l'espace factoriel, associée à une constance en fibres structurales. De même, *R. peregrina* se distingue positivement sur l'Axe 2 par des contributions significatives au printemps (3,35 %) et en été (3,89 %), ce qui traduit par une teneur notable en composés phénoliques au cours des deux saisons.



Q. coc : *Q. coccifera* ; E. arb : *E. arborea* ; M. com : *M. communis* ; P. med : *P. media* ; Q. can : *Q. canariensis* ; A. glu : *A. glutinosa* ; S. alb : *S. alba* ; F. ang : *F. angustifolia* ; S. asp : *S. aspera* ; C. cir : *C. cirrhosa* ; R. ulm : *R. ulmifolius* ; H. hel : *H. helix* ; R. per : *R. peregrina* ; Aut : automne, Hiv : hiver ; Pr : printemps, Ete : été

Figure 50 : représentation des individus sur le plan factoriel de l'AFM selon la catégorie taxonomique

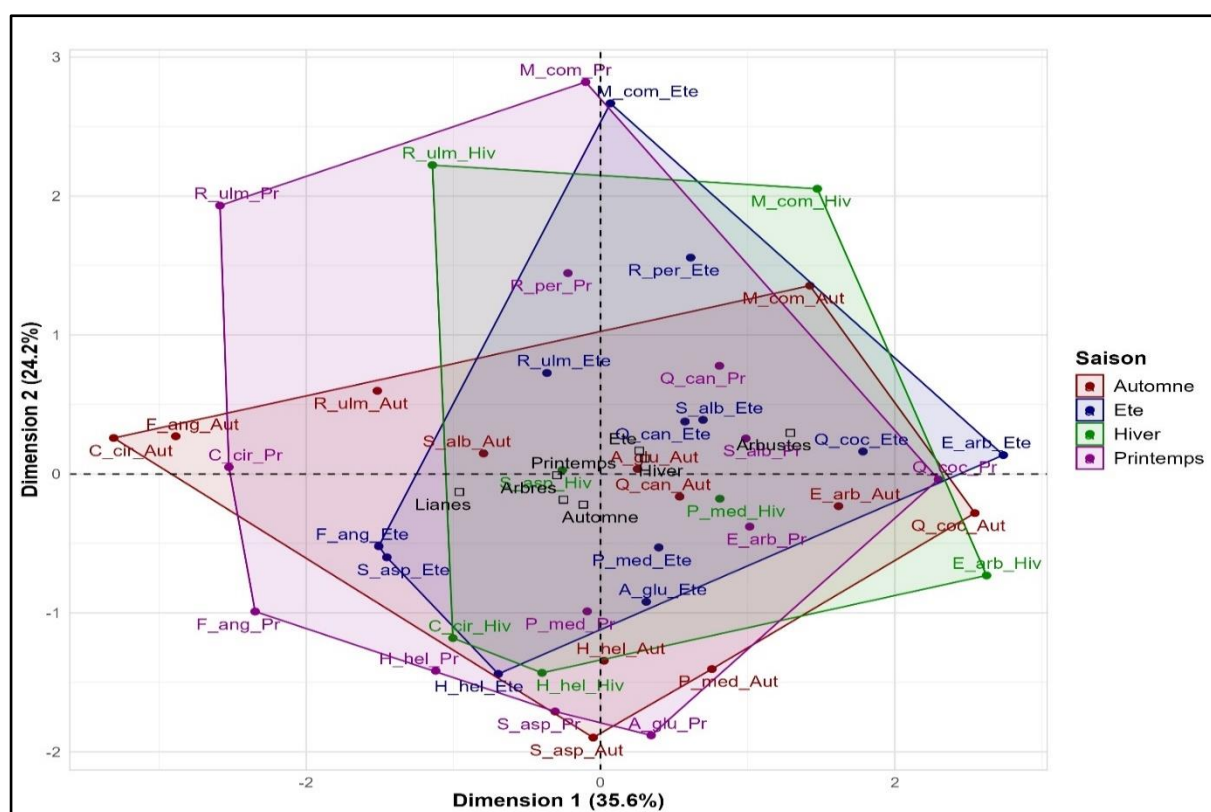
Les arbustes se caractérisent par une plus grande stabilité nutritionnelle. Ils se concentrent clairement sur la partie droite positive du plan factoriel (figure 50). Les espèces *Q. coccifera* et *E. arborea* montrent une forte contribution à l'Axe 1 en raison de leur richesse en MS, MO et TC et cela pour toutes les saisons avec d'importantes contributions positives. *M. communis* est plus équilibrée entre les deux axes, montrant un profil riche en MS, MO et en composés phénoliques. En revanche, *P. media* montre une position remarquable sur l'axe 2 avec des teneurs importantes en fibres notamment au printemps et en automne.

Les arbres présentent des profils distincts selon les axes. *F. angustifolia* est fortement associé à l'Axe 1, en raison de sa richesse en MAT et digestibilité, particulièrement marquées au printemps (6,01 %) et en automne (9,09 %). L'espèce *A. glutinosa* se démarque par des contributions élevées à l'Axe 2, en raison de sa forte teneur en fibres principalement au printemps (5,67 %) alors que *Q. canariensis* et *S. alba* conservent une position relativement stable sur les deux axes, illustrant une homogénéité nutritionnelle.

Les enveloppes de confiance montrent que les lianes présentent une plus grande amplitude de variation, traduisant leur adaptabilité écologique. Les arbustes et les arbres, en revanche, affichent une variabilité plus restreinte, synonyme de stabilité nutritionnelle accrue.

III.1.5.2. Représentation par saison

L'analyse des individus regroupés par saisons révèle des dynamiques nutritionnelles saisonnières marquées (figure 51). L'axe 1, influencé par les variables de fermentescibilité et de composition chimique, différencie les périodes de forte richesse nutritive soit le printemps et l'automne) de celles où la qualité nutritionnelle baisse (hiver et été). Par ailleurs, l'axe 2 est dominé par les fibres pariétales et les composés phénoliques, traduisant les stratégies défensives et structurales développées par les espèces notamment en hiver et en été.



Q. coc : *Q. coccifera* ; E. arb : *E. arborea* ; M. com : *M. communis* ; P. med : *P. media* ; Q. can : *Q. canariensis* ; A. glu : *A. glutinosa* ; S. alb : *S. alba* ; F. ang : *F. angustifolia* ; S. asp : *S. aspera* ; C. cir : *C. cirrhosa* ; R. ulm : *R. ulmifolius* ; H. hel : *H. helix* ; R. per : *R. peregrina* ; Aut : automne, Hiv : hiver ; Pr : printemps, Ete : été

Figure 51 : Représentation des individus sur le plan factoriel de l'AFM selon la saison

En automne, plusieurs espèces montrent une richesse nutritionnelle remarquable. Les espèces *C. cirrhosa* et *F. angustifolia* se positionnent négativement sur l'Axe 1, reflétant des niveaux élevés en MAT et en paramètres de fermentation. Par contre, *Q. coccifera* et *E. arborea* contribuent également fortement à l'Axe 1, traduisant une augmentation en MS, MO et en TC alors que *S. aspera* se distingue sur l'axe 2 avec des teneurs remarquables en composés pariétaux.

En hiver, l'Axe 2 domine, avec une augmentation des fibres et des composés phénoliques. Les deux espèces *R. ulmifolius* (7,92 %) et *M. communis* (6,75 %) se démarquent par leurs niveaux élevés en composés phénoliques tandis que *H. helix* (3,28%) et *C. cirrhosa* (2,24%) montrent des teneurs élevées en parois structuraux. Par ailleurs, *S. aspera* et *P. media* montrent un profil équilibré entre fibres et composition chimique.

Le printemps est marqué par une forte variabilité entre les espèces. *R. ulmifolius* se distingue par des contributions significatives sur les deux axes : elle affiche des niveaux élevés en composés phénoliques (5,98%) tout en maintenant une digestibilité importante (7,29). *F. angustifolia* et *C. cirrhosa* se positionnent également sur l'Axe 1, traduisant une richesse nutritionnelle maximale en cette saison. En revanche, *M. communis* (12,76 %) et *R. peregrina* (3,35%) contribuent significativement à l'axe 2, traduisant une richesse en composés phénoliques alors que *S. aspera* (4,69%), *H. helix* (3,22%) et *A. glutinosa* (5,67%) se distinguent négativement sur l'axe 2 avec des taux élevés en parois cellulaires.

La saison estivale présente une variabilité moins prononcée que celle du printemps. *M. communis* (11,41 %) et *R. peregrina* (3,89%) se projettent clairement sur l'axe 2 en conservant des niveaux élevés en composés phénoliques alors que *H. helix* (3,32%) montre ces caractéristiques pariétales sur le même axe. De même, *E. arborea* (8,17%) et *Q. coccifera* (3,47%) contribuent positivement à l'axe 1 en maintenant des taux MS, MO et TC à des niveaux supérieurs. Par ailleurs, *S. aspera* (2,30%) montre des caractéristiques azotées et fermentaires non négligeables en rejoignant *F. angustifolia* (2,47%). Les autres espèces se positionnent proches du barycentre du plan factoriel en partageant des profils nutritionnels similaires.

Cette analyse met en lumière deux grandes stratégies adaptatives : (I) des espèces stables, telles que *Q. coccifera*, *E. arborea*, et *H. helix*, qui conservent des profils nutritionnels homogènes en toute saison ; (II) des espèces plastiques, comme *R. ulmifolius*, *C. cirrhosa*, et *S. aspera*, qui montrent une grande variabilité, reflétant leur capacité d'adaptation aux variations saisonnières.

L'analyse intégrée des individus met en lumière deux points essentiels :

- Une structuration nette des profils nutritionnels selon les catégories taxonomiques. Les lianes se démarquent par leur flexibilité biochimique, les arbustes par leur richesse en composés phénoliques, et les arbres par leur stabilité structurelle.
- Des dynamiques saisonnières contrastées où le printemps et l'automne favorisent une richesse nutritive accrue, tandis que l'été et l'hiver privilégient des stratégies adaptatives axées sur la défense et la structure.

III.2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Après avoir exploré la structure des données et les relations entre variables grâce à l'AFM, une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a été appliquée pour regrouper les espèces en clusters homogènes. Cette approche maximise la variance inter-clusters tout en minimisant la variance intra-cluster, offrant ainsi une typologie cohérente des espèces étudiées. Les coordonnées factorielles issues de l'AFM, représentant les tendances principales des données, ont servi d'entrée pour cette classification.

III.2.1. Détermination et validation du nombre optimal de clusters

La CHA appliquée aux coordonnées des individus (44 individus) sur les deux premières dimensions factorielles de l'AFM a permis de générer un dendrogramme (figure 52), suggérant la formation de quatre groupes distincts. Ces groupements ont été déterminés en identifiant les coupures naturelles dans le dendrogramme, c'est-à-dire les branches principales qui maximisent la séparation entre les groupes tout en conservant une structure cohérente.

Pour valider cette segmentation, l'indice de silhouette a été calculé (tableau 39). Les largeurs moyennes de silhouette pour les quatre clusters indiquant une bonne cohésion interne pour les clusters 1, 3 et 4, tandis que le cluster 2 présente une cohésion légèrement inférieure.

Tableau 40 : Indices de silhouette pour la validation des clusters

Cluster	Taille	Largeur moyenne de silhouette
1	7	0,34
2	12	0,16
3	12	0,53
4	13	0,44

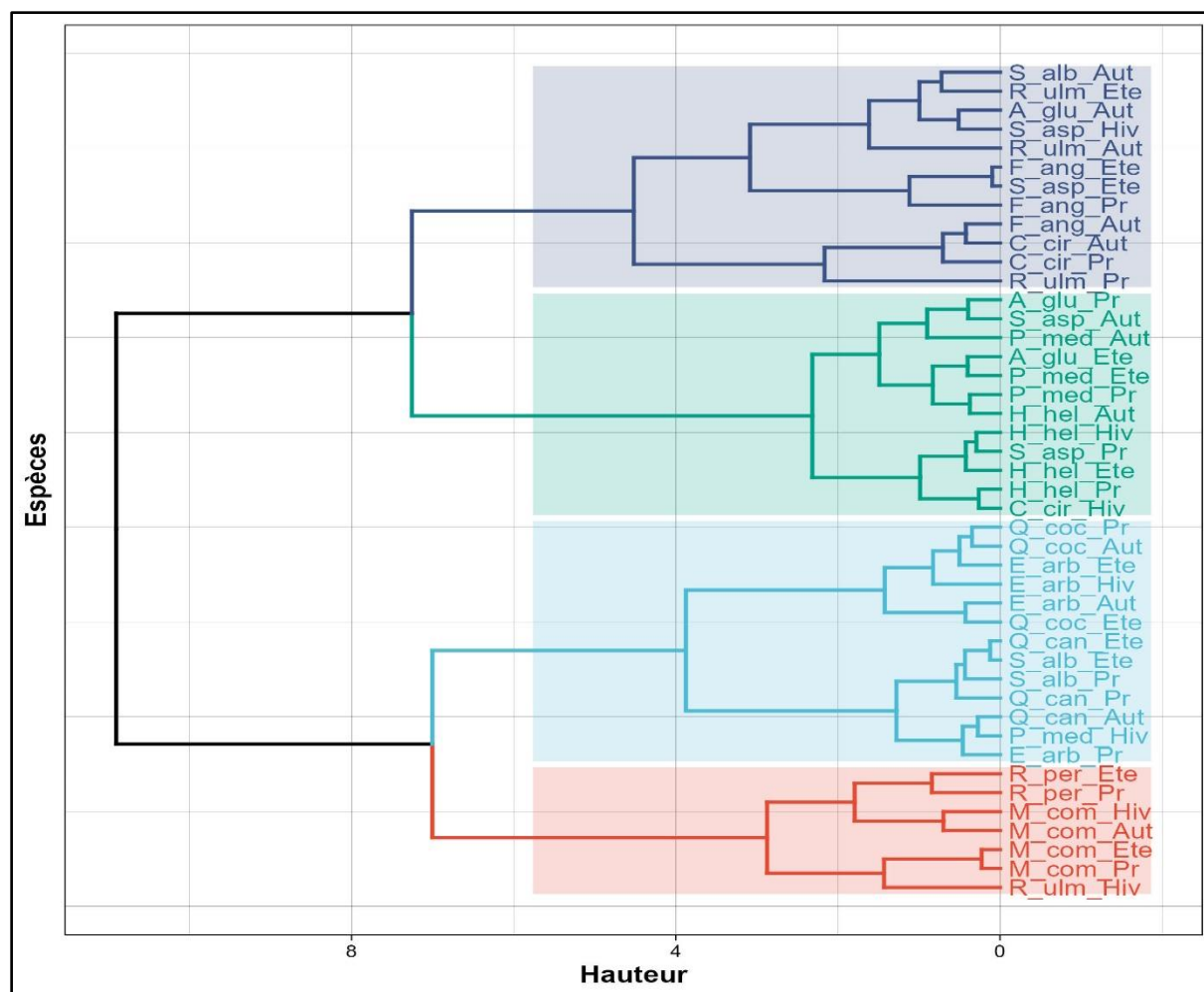


Figure 51 : Dendrogramme illustrant les groupements des espèces ligneuses

Malgré cette variabilité, la segmentation en quatre clusters reste biologiquement interprétable et en adéquation avec les caractéristiques nutritionnelles des espèces. L'approche combinée, basée sur des outils visuels (dendrogramme) et des métriques quantitatives (indice de silhouette), valide la robustesse de la classification et justifie le choix de cette partition.

III.2.2. Caractérisation des clusters issus de la CHA

L'analyse a permis d'identifier quatre clusters distincts (figure 53) en appliquant une CHA sur les coordonnées des deux premières dimensions issues de AFM. Chaque cluster a été décrit à partir des variables analysées, en se concentrant sur les valeurs standardisées pour interpréter les caractéristiques nutritionnelles des espèces étudiées.

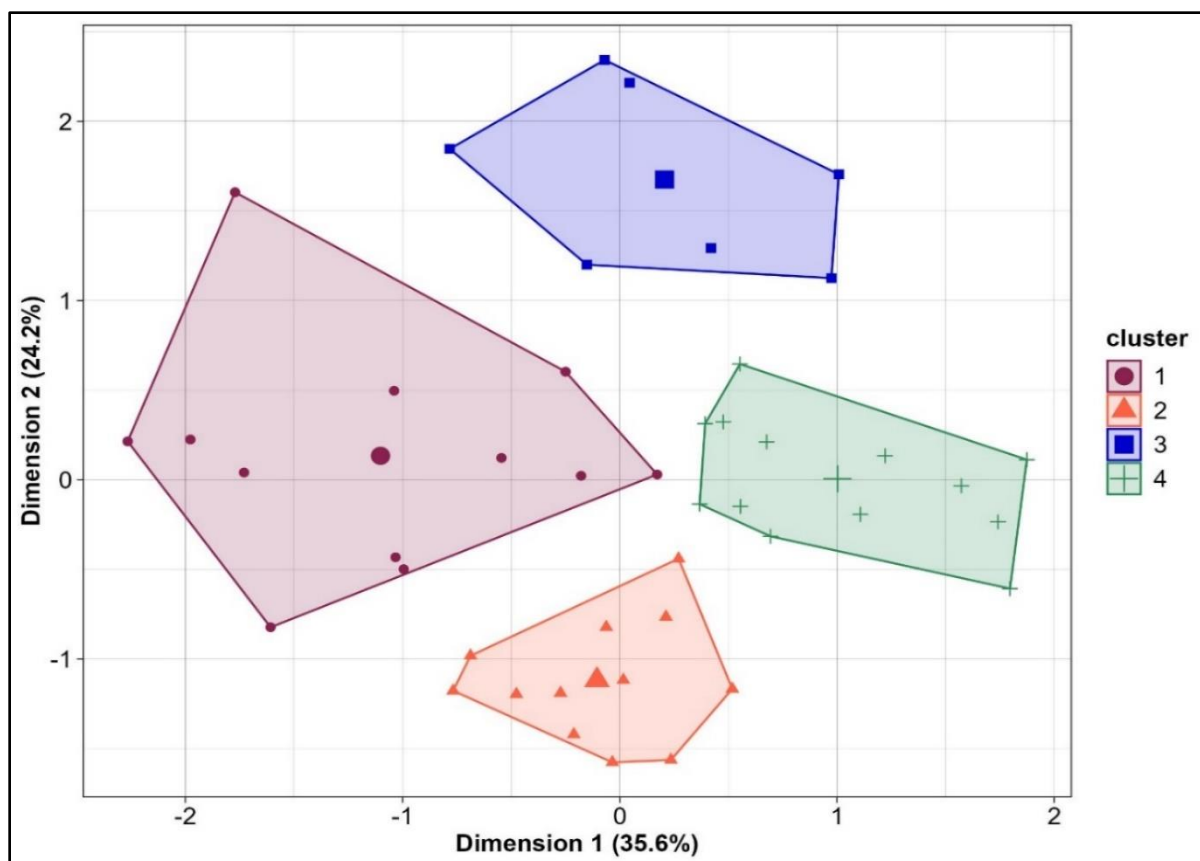


Figure 52 : Les quatre classes issues de la classification hiérarchique

III.2.2.1. Relation entre les dimensions à la partition des classes

Le tableau 40 illustre les liens entre les dimensions factorielles et la partition des clusters, mesurés à l'aide de l' η^2 , qui reflète le rapport de corrélation entre chaque dimension et la variable de classe. En effet, les dimensions 1 et 2 jouent un rôle clé dans la structuration des classes. La dimension 2 présente la contribution la plus élevée ($\eta^2 = 0,81$, $p < 0,001$), soulignant son rôle prédominant dans la séparation des classes. La dimension 1, bien que légèrement moins influente, contribue de manière significative à la différenciation des groupes ($\eta^2 = 0,652$, $p < 0,001$). Ces résultats confirment l'importance des deux premières dimensions pour caractériser et structurer les classes identifiées.

Tableau 41 : Intensité de liaison entre les dimensions et la partition des classes

Dimension	η^2	p
1	0,652	< 0,001
2	0,811	< 0,001

III.2.2.3. Description des classes par les axes

Les positions des classes sur les dimensions principales sont indiquées dans le tableau 41, basées sur leurs coordonnées significatives ($V.test$). La classe 1 se situe dans la partie négative de la dimension 1 ($V.test = -4.47, p < 0,001$), tandis que la classe 4 est positionnée dans la partie positive de cette même dimension ($V.test = 4,31, p < 0,001$). Sur la Dimension 2, la classe 2 occupe une position négative significative ($V.test = -4,54, p < 0,001$), alors que la classe 3 se situe positivement ($V.test = 4,83, p < 0,001$). Ces positions reflètent des contrastes marqués entre les classes dans l'espace factoriel, illustrant leurs caractéristiques nutritionnelles spécifiques.

Tableau 42 : Positions des classes par rapport aux dimensions factorielles

Classe	Dimension	$V.test$	p
1	1	-4,47	< 0,001
2	1	-4,54	< 0,001
3	2	4,83	< 0,001
4	2	4,31	< 0,001

III.2.2.4. Relation entre la partition et les variables quantitatives

Les liens entre la partition des classes et les variables quantitatives ont été évalués à l'aide de l' η^2 et des p -values correspondantes, permettant de quantifier la contribution globale de chaque variable à la structuration des classes (tableau 42).

Les variables les plus discriminantes sont TT ($\eta^2 = 0,72, p < 0,001$) et les PPT ($\eta^2 = 0,69, p < 0,001$), indiquant un rôle majeur des composés phénoliques dans la différenciation des groupes. Les fibres structurales, représentées par ADF ($\eta^2 = 0,64, p < 0,001$), NDF ($\eta^2 = 0,56, p < 0,001$) et ADL ($\eta^2 = 0,50, p < 0,001$), contribuent également fortement à la séparation des classes.

Les variables liées à la digestibilité la composition chimique primaire montrent également des liens significatifs avec les classes. Le Gaz Total ($\eta^2 = 0,50, p < 0,001$) et la dMO ($\eta^2 = 0,42, p < 0,001$) jouent un rôle déterminant, tandis que la MO ($\eta^2 = 0,47, p < 0,001$) et la MM ($\eta^2 = 0,47, p < 0,001$) apparaissent comme des indicateurs clés des différences inter-classes.

Enfin, les variables ABT ($Eta^2 = 0.45$, $p < 0,001$), TC ($Eta^2 = 0.45$, $p < 0,001$) et MAT ($Eta^2 = 0,34$, $p < 0,001$) confirment l'importance de ces paramètres dans la structuration des groupes. Bien que la MS présente une contribution relativement plus faible ($Eta^2 = 0,30$, $p = 0.002$), elle demeure significative dans la caractérisation des classes.

En outre, l'absence des variables CH₄ et CB indique qu'elles ne contribuent pas significativement à la différenciation des classes.

Tableau 43 : Contribution des variables quantitatives à la partition des classes

Variable	Contribution	<i>p</i>
TT (g EAT/kg MS)	0,72	< 0,001
PPT (g EAT/kg MS)	0,69	< 0,001
ADF (%MS)	0,64	< 0,001
NDF (%MS)	0,56	< 0,001
Gaz_Total (ml/0,3g MS)	0,50	< 0,001
ADL (%MS)	0,50	< 0,001
MO (%MS)	0,47	< 0,001
MM (%MS)	0,47	< 0,001
ABT	0,45	< 0,001
TC (g EAT/kg MS)	0,45	< 0,001
dMO (%)	0,42	< 0,001
MAT (%MS)	0,34	< 0,001
MS (%)	0,30	0,002

MS : Matière Sèche ; MO : Matière Organique ; MM : Matière Minérale ; MAT : Matière Azotée Totale ; PPT : PolyPhénols Totaux ; TT : Tanins Totaux ; TC : Tanins Condensés ; dMO : digestibilité de la Matière Organique ; ABT : Activité Biologique des Tanins ; NDF : Neutral Detergent Fiber ; ADF : Acid Detergent Fiber ; ADL : Acid detergent Lignin ;

III.2.2.5. Relation entre la partition et les variables qualitatives supplémentaires

L'analyse des modalités supplémentaires met en évidence un effet remarquable des catégories botaniques sur la structure des classes (tableau 43).

- Les lianes dominant dans les classes 1 ($V.test = 1,55$, $p = 0,02$) et 2 ($V.test = 1,55$, $p = 0,03$), se distinguant par leur haute valeur nutritive et leur richesse en composés phénoliques.
- Les arbustes prédominant dans les classes 3 ($V.test = 2,33$, $p = 0,002$) et 4 ($V.test = 3,03$; $p = 0,02$), avec des teneurs élevées en fibres structurales, en matière sèche et en matière organique.

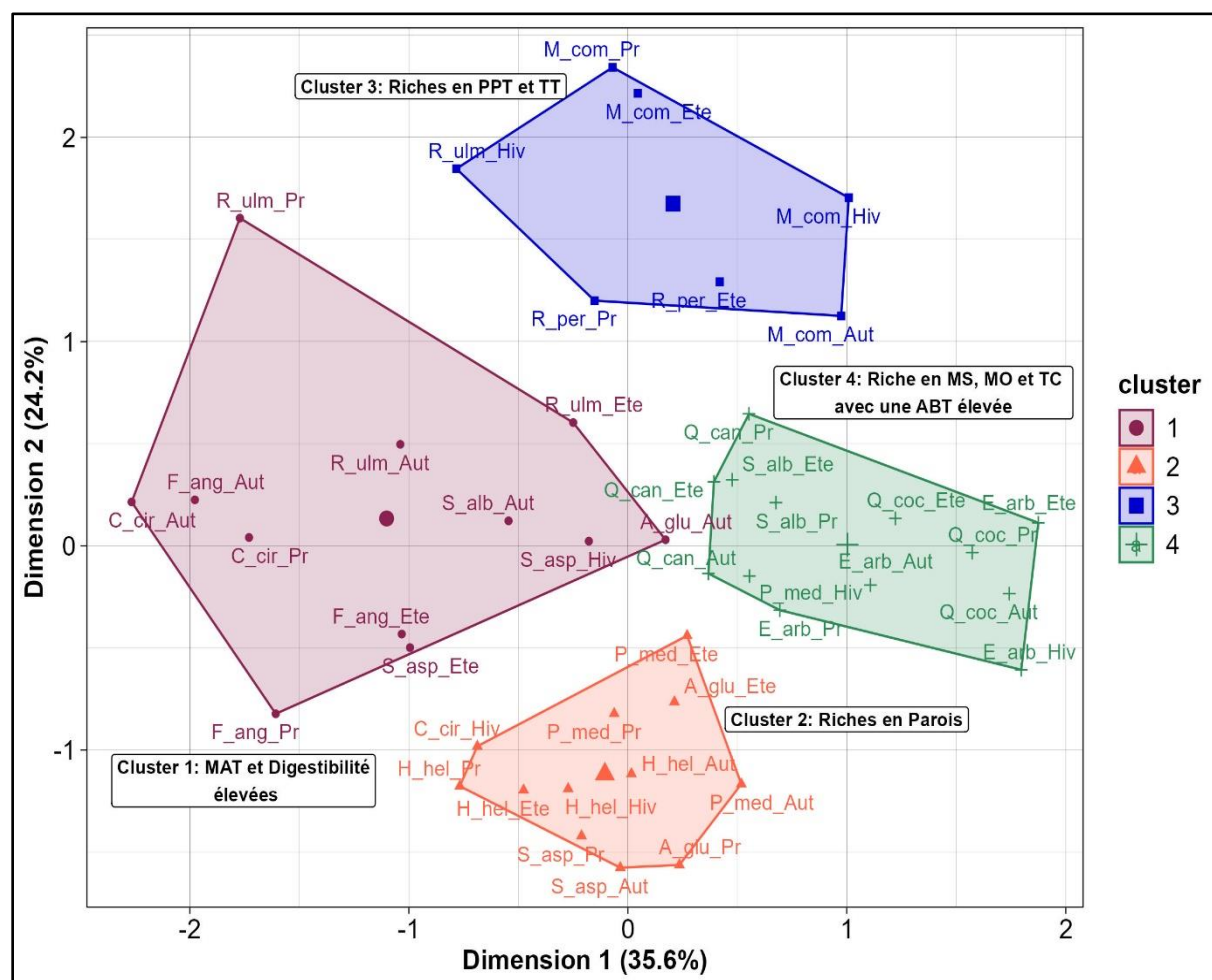
En revanche, aucun effet saisonnier n'a été détecté, suggérant que les saisons ne contribuent pas significativement à la structuration des classes.

Tableau 44 : Lien entre les variables qualitatives supplémentaires et la partition des classes

Cluster	Variable	V _{test}	p
1	Lianes	1,55	0,02
2	Lianes	1,55	0,03
3	Arbustes	2,33	0,002
4	Arbustes	3,03	0,02

III.2.2.6. Profilage des clusters

Le profilage des classes permet de décrire les caractéristiques spécifiques de chaque groupe identifié par la classification. Cette analyse repose sur les contributions significatives des variables explicatives, offrant une vision détaillée des attributs nutritionnels des espèces regroupées (figure 54).



Q. coc : *Q. coccifera* ; E. arb : *E. arborea* ; M. com : *M. communis* ; P. med : *P. media* ; Q. can : *Q. canariensis* ; A. glu : *A. glutinosa* ; S. alb : *S. alba* ; F. ang : *F. angustifolia* ; S. asp : *S. aspera* ; C. cir : *C. cirrhosa* ; R. ulm : *R. ulmifolius* ; H. hel : *H. helix* ; R. per : *R. peregrina* ; Aut : automne, Hiv : hiver ; Pr : printemps, Ete : été

Figure 53 : Caractérisation des classes selon les profils des espèces ligneuses

Cluster 1

La classe 1 se situe dans la partie négative de la dimension 1 ($V_{test} = -4,47, p < 0,001$), dominée par les lianes ($V_{test} = 1,55, p = 0,02$) et regroupe des espèces caractérisées par des teneurs moyennes élevées en Gaz Total (45,86 contre une moyenne globale de 35,39 ml/0,3g MS, $V_{test} = 3,77, p < 0,001$), en MM (8,16 contre 6,13%MS, $V_{test} = 3,74, p < 0,001$), en digestibilité de la matière organique (dMO) (57,08 contre 48,24, $v_{test} = 3,70, p < 0,001$), et en MAT (14,67 contre 11,89%MS, $V_{test} = 3,62, p < 0,001$). En revanche, ces espèces présentent des teneurs moyennes significativement plus faibles en MO (91,84 contre 93,87, $V_{test} = -3,73, p < 0,001$), en NDF (40,72 contre 45,23%MS, $V_{test} = -2,80, p < 0,01$), en ADF (24,13 contre 28,37%MS, $V_{test} = -2,88, p < 0,01$) et en ABT (1,07 contre 1,22, $V_{test} = -2,72, p < 0,01$) (tableau 44). Ce cluster renferme 12 individus soit : *F. angustifolia* et *R. ulmofolius* au printemps, en automne et en été, *C. cirrhosa* en automne et au printemps, *S. aspera* en hiver et en été en plus de *A. glutinosa* et *S. alba* en automne. Ce profil suggère une haute digestibilité et une qualité nutritionnelle intéressante des espèces avec une faible activité biologique de leurs tanins, bien que leurs teneurs en fibres soient faibles.

Tableau 45 : Description de la classe 1 par les variables quantitatives

Variable	V_{test}	Moyenne de Cluster	Moyenne globale	p
Gaz_Total (ml/0,3g MS)	3,77	45,86 ± 10,76	35,39 ± 11,14	< 0,001
MM (%MS)	3,74	8,16 ± 1,81	6,13 ± 2,18	< 0,001
dMO (%)	3,70	57,08 ± 8,85	48,24 ± 9,59	< 0,001
MAT (%MS)	3,62	14,67 ± 3,18	11,89 ± 3,07	< 0,001
MS (%)	-2,18	33,02 ± 9,50	39,66 ± 12,26	0,03
ADL (%MS)	-2,66	11,06 ± 4,06	14,72 ± 5,52	0,007
ABT	-2,72	1,07 ± 0,11	1,22 ± 0,22	0,006
NDF (%MS)	-2,80	40,72 ± 4,99	45,23 ± 6,47	0,005
ADF (%MS)	-2,88	24,13 ± 4,32	28,37 ± 5,92	0,004
MO (%MS)	-3,74	91,84 ± 1,81	93,87 ± 2,18	< 0,001

MS : Matière Sèche ; MO : Matière Organique ; MM : Matière Minérale ; MAT : Matière Azotée Totale ; dMO : digestibilité de la Matière Organique ; ABT : Activité Biologique des Tanins ; NDF : Neutral Detergent Fiber ; ADF : Acid Detergent Fiber ; ADL : Acid detergent Lignin ;

Cluster 2

Cette classe est située dans la partie négative de la dimension 2 ($V_{test} = -4,54, p < 0,001$) et dominée par des espèces de lianes ($V_{test} = 1,55, p = 0,03$). Les espèces associées à savoir : *H. helix* dans toutes les saisons, *S. aspera* en automne et au printemps, *C. cirrhosa* en hiver en

plus de *P. media* en automne, au printemps et en été et *A. glutinosa* en été et au printemps présentent des teneurs moyennes élevées en ADF (34,06 contre 28,37%MS, $V_{test} = 3,86$, $p < 0,001$), en NDF (51,17 contre 45,23%MS, $V_{test} = 3,69$, $p < 0,001$) et en ADL (19,33 contre 14,72, $V_{test} = 3,35$, $p < 0,001$), soulignant une forte richesse en fibres structurales. Par contre, elles affichent des teneurs significativement plus faibles en TC (3,63 contre 9,70g EAL/kg MS, $V_{test} = -2,60$, $p < 0,01$), en TT (19,01 contre 43,04g EAT/kg MS, $V_{test} = -3,09$, $p < 0,01$) et en PPT (28,90 contre 61,42g EAT/kg MS, $V_{test} = -3,56$, $p < 0,001$) (tableau 45). Ces caractéristiques traduisent un rôle essentiel dans l'apport en fibres mais une moindre contribution des composés phénoliques.

Tableau 46 : Description de la classe 2 par les variables quantitatives

Variable	V_{test}	Moyenne du cluster	Moyenne globale	p
ADF (%MS)	3,86	34,06 $\pm$ 2,45	28,37 $\pm$ 5,92	< 0,001
NDF (%MS)	3,69	51,17 $\pm$ 4,09	45,23 $\pm$ 6,47	< 0,001
ADL (%MS)	3,35	19,33 $\pm$ 3,19	14,72 $\pm$ 5,52	< 0,001
TC (g EAL/kg MS)	-2,60	3,63 $\pm$ 5,60	9,70 $\pm$ 9,35	0,01
TT (g EAT/kg MS)	-3,09	19,01 $\pm$ 10,12	43,04 $\pm$ 31,21	0,002
PPT (g EAT/kg MS)	-3,56	28,90 $\pm$ 15,07	61,42 $\pm$ 36,71	< 0,001

PPT : PolyPhénols Totaux ; TT : Tanins Totaux ; TC : Tanins Condensés ; NDF : Neutral Detergent Fiber ; ADF : Acid Detergent Fiber ; ADL : Acid detergent Lignin ;

Cluster 3

Positionnée dans la partie positive de la dimension 2 ($V_{test} = 4,83$, $p < 0,001$) et prédominée par des arbustes ($V_{test} = 2,33$, $p = 0,002$), cette classe regroupe des espèces à fortes teneurs moyennes en TT (99,58 contre 43,04g EAT/kg MS, $V_{test} = 5,17$, $p < 0,001$) et en PPT (120,93 contre 61,42g EAT/kg MS, $V_{test} = 4,62$, $p < 0,001$). À l'inverse, les teneurs en fibres sont significativement plus faibles, notamment en NDF (38,59 contre 45,23%MS, $V_{test} = -2,92$, $p < 0,01$), en ADF (21,70 contre 28,37%MS, $V_{test} = -3,22$, $p < 0,01$) et en ADL (9,40 contre 14,72%MS, $V_{test} = -2,75$, $p < 0,01$) (tableau 46). Ce cluster englobant *M. communis* dans toutes les saisons, *R. peregrina* au printemps et en été et *R. ulmofolius* en hiver, reflète un profil distinct, avec des concentrations élevées en composés phénoliques mais une faible richesse en fibres structurales.

Tableau 47 : Description de la classe 3 par les variables quantitatives

Variable	<i>V.test</i>	Moyenne du cluster	Moyenne globale	<i>p</i>
TT (EAT/kg MS)	5,17	99,58 ± 16,56	43,04 ± 31,21	< 0,001
PPT (EAT/kg MS)	4,62	120,93 ± 21,46	61,42 ± 36,71	< 0,001
ADL (%MS)	-2,75	9,40 ± 1,64	14,72 ± 5,52	0,006
NDF (%MS)	-2,92	38,59 ± 4,02	45,23 ± 6,47	0,003
ADF (%MS)	-3,22	21,70 ± 2,97	28,37 ± 5,92	0,001

PPT : PolyPhénols Totaux ; TT : Tanins Totaux ; NDF : Neutral Detergent Fiber ; ADF : Acid Detergent Fiber ; ADL : Acid detergent Lignin ;

Cluster 4

La classe 4 est localisée dans la partie positive de la Dimension 1 (*V.test* = 4,31, *p* < 0,001) et prédominée par des espèces arbustives (*V.test* = 3,03 ; *p* = 0.02). Elle est caractérisée par des teneurs moyennes élevées en MS (48,75 contre 39,66%, *V.test* = 3,15, *p* < 0,01), en MO (95,79 contre 93,87%MS, *V.test* = 3,72, *p* < 0,001), en TC (18,73 contre 9,70g EAL/kg MS, *V.test* = 4,10, *p* < 0,001) et une forte ABT (1,43 contre 1,22, *V.test* = 3.98, *p* < 0,001). Cependant, ces espèces présentent des teneurs significativement plus faibles en dMO (40,79 contre 48,24%, *V.test* = -3,30, *p* < 0,01), en Gaz Total (25,20 contre 35,39 ml/0,3g MS, *V.test* = -3.89, *p* < 0,001) et en MM (4,21 contre 6,13%MS, *v.test* = -3,72, *p* < 0,001) (tableau 47). Ce cluster est constitué par : *E. arborea* dans toutes les saisons, *Q. coccifera* et *Q. canariensis* en automne, au printemps et en été en plus de *S. alba* au printemps et en été et *P. media* en hiver. Ces dernières sont caractérisées par un profil à haute teneur en énergie potentielle, mais avec une digestibilité réduite due à leurs teneurs élevées en TC ayant une activité biologique importante.

Tableau 48 : Description de la classe 4 par les variables quantitatives

Variable	<i>V.test</i>	Moyenne du cluster	Moyenne globale	<i>p</i>
TC (g EAL/kg MS)	4,10	18,73 ± 8,91	9,70 ± 9,35	< 0,001
ABT	3,98	1,43 ± 0,22	1,22 ± 0,22	< 0,001
MO (%MS)	3,72	95,79 ± 1,50	93,87 ± 2,18	< 0,001
MS (%)	3,15	48,75 ± 9,21	39,66 ± 12,26	0,002
dMO (%)	-3,30	40,79 ± 3,95	48,24 ± 9,59	0,001
MM (%MS)	-3,72	4,21 ± 1,50	6,13 ± 2,18	< 0,001
Gaz_Total (ml/0,3g MS)	-3,89	25,20 ± 4,84	35,39 ± 11,14	< 0,001

MS : Matière Sèche ; MO : Matière Organique ; MM : Matière Minérale ; dMO : digestibilité de la Matière Organique ; TC : Tanins Condensés ; ABT : Activité Biologique des Tanins ;

III.2.2.7. Les individus parangons des clusters

Les parangons permettent d'identifier les individus les plus représentatifs de chaque classe, en se basant sur leur proximité aux centres de gravité des clusters. Ces individus peuvent être interprétés comme des exemples typiques reflétant les caractéristiques majeures du groupe auquel ils appartiennent.

Cluster 1

Les espèces les plus représentatives de ce cluster incluent *R. ulmifolius* et *S. alba* en automne, *F. angustifolia* et *S. aspera* en été et *C. cirrhosa* au printemps (tableau 48). Les valeurs de proximité, bien que légèrement élevées (de 0.45 à 0.92), montrent que ces individus sont fortement alignés avec les caractéristiques nutritionnelles du cluster, notamment une haute digestibilité et une forte teneur en MAT. Ces valeurs suggèrent une variabilité interne modérée, tout en conservant une cohérence globale.

Tableau 49 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 1

Espèce	<i>R. ulmifolius</i>	<i>F. angustifolia</i>	<i>S. aspera</i>	<i>S. alba</i>	<i>C. cirrhosa</i>
Saison	Automne	Eté	Eté	Automne	Printemps
Proximité	0.45	0.69	0.78	0.81	0.92

Cluster 2

Ce cluster est représenté par *H. helix* en automne, en hiver et en été et *P. media* et *S. aspera* au printemps (tableau 49). Les valeurs de proximité, parmi les plus faibles (de 0.18 à 0.55), indiquent une forte homogénéité et une représentativité marquée des individus par rapport au barycentre du cluster. Ces parangons illustrent la richesse en fibres structurales et la faible teneur en composés phénoliques caractéristiques de ce groupe.

Tableau 50 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 2

Espèce	<i>H. helix</i>	<i>H. helix</i>	<i>P. media</i>	<i>S. aspera</i>	<i>H. helix</i>
Saison	Automne	Hiver	Printemps	Printemps	Eté
Proximité	0.18	0.26	0.36	0.40	0.55

Cluster 3

Les parangons du cluster 3 incluent *R. Peregrina* au printemps et en été et *M. communis* en hiver, au printemps et en été (tableau 50). Les valeurs de proximité (de 0.56 à 1.17) montrent

une cohérence interne, bien que légèrement moins marquée que dans d'autres clusters. Ces espèces reflètent les fortes teneurs en composés phénoliques qui définissent ce groupe.

Tableau 51 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 3

Espèce	<i>R. Peregrina</i>	<i>M. communis</i>	<i>R. Peregrina</i>	<i>M. communis</i>	<i>M. communis</i>
Saison	Eté	Eté	Printemps	Printemps	Hiver
Proximité	0.56	0.69	0.77	0.90	1.17

Cluster 4

Ce cluster regroupe comme parangons *E. arborea* en automne et au printemps, *Q. coccifera* en été, *S. alba* au printemps et *P. media* en hiver (tableau 51). Les valeurs de proximité, parmi les plus faibles (de 0.28 à 0.68), indiquent une forte homogénéité et une représentativité marquée des individus. Ces parangons illustrent les caractéristiques du cluster, notamment une haute teneur en MS et MO mais une faible digestibilité.

Tableau 52 : Valeurs de proximité des parangons du cluster 4

Espèce	<i>E. arborea</i>	<i>Q. coccifera</i>	<i>S. alba</i>	<i>E. arborea</i>	<i>P. media</i>
Saison	Automne	Eté	Printemps	Printemps	Hiver
Proximité	0.28	0.36	0.54	0.59	0.68

Les parangons offrent une vue synthétique de la classification, mettant en lumière les individus exemplaires de chaque cluster. En examinant les valeurs de proximité, on remarque que les clusters 2 et 4 sont ceux ayant les valeurs les plus faibles, ce qui reflète une homogénéité marquée et une forte représentativité des individus par rapport au barycentre de leur cluster. À l'inverse, les clusters 1 et 3 présentent des proximités légèrement plus élevées, suggérant une variabilité interne plus importante tout en conservant une cohérence globale. Cette analyse renforce la pertinence des clusters identifiés et met en évidence leur utilité pour caractériser les espèces ligneuses étudiées.

III.2.2.8. Les individus spécifiques des clusters

L'analyse des spécificités permet d'identifier les individus qui contribuent de manière unique et significative à chaque cluster. Ces individus présentent des valeurs atypiques ou extrêmes pour les caractéristiques associées au cluster, renforçant ainsi leur pertinence dans la typologie établie.

Cluster 1

Les individus spécifiques de ce cluster sont : *C. cirrhosa* et *R. ulmifolius* en automne et au printemps et *F. angustifolia* en automne (tableau 52). Ces derniers, ayant les meilleures contributions (*V.test* de 2.31 à 3.54), se distinguent par des teneurs extrêmes en Gaz Total, en MM et en dMO, reflétant les caractéristiques optimales de ce cluster.

Tableau 53 : Contributions des individus spécifiques au cluster 1

Espèce	<i>C. cirrhosa</i>	<i>F. angustifolia</i>	<i>R. ulmifolius</i>	<i>C. cirrhosa</i>	<i>R. ulmifolius</i>
Saison	Automne	Automne	Printemps	Printemps	Automne
<i>V.test</i>	3.54	3.18	2.89	2.75	2.31

Cluster 2

Ce cluster est marqué par *S. aspera* en automne et au printemps, *H. helix* en automne et en hiver et *A. glutinosa* au printemps (tableau 53). Ces espèces, avec des contributions significatives (*V.test* de 1.97 à 2.43), se caractérisent par des teneurs extrêmes en fibres structurales (ADF, NDF) et une faible teneur en composés phénoliques, illustrant ainsi les traits distinctifs de ce cluster.

Tableau 54 : Contributions des individus spécifiques au cluster 2

Espèce	<i>S. aspera</i>	<i>S. aspera</i>	<i>A. glutinosa</i>	<i>H. helix</i>	<i>H. helix</i>
Saison	Automne	Printemps	Printemps	Hiver	Automne
<i>V.test</i>	2.43	2.28	2.20	2.00	1.97

Cluster 3

Les individus spécifiques incluent *M. communis* en hiver, au printemps et en été, *R. ulmifolius* en hiver et *R. peregrina* au printemps (tableau 54). Leurs contributions majeures (*V.test* de 1.89 à 3.06) mettent en évidence des teneurs extrêmes en composés phénoliques (TT, PPT). Ces espèces atypiques, caractérisées par leurs propriétés bioactives, définissent les traits uniques de ce cluster.

Tableau 55 : Contributions des individus spécifiques au cluster 3

Espèce	<i>M. communis</i>	<i>M. communis</i>	<i>R. ulmifolius</i>	<i>M. communis</i>	<i>R. peregrina</i>
Saison	Printemps	Eté	Hiver	Hiver	Printemps
<i>V.test</i>	3.06	3.00	2.11	2.04	1.89

Cluster 4

Ce cluster est représenté par *E. arborea* en hiver et en été et *Q. coccifera* en automne, au printemps et en été (tableau 55). Leurs fortes contributions (*V.test* de 2.37 à 3.08) révèlent des teneurs extrêmes en MS, en MO et une forte activité biologique des tanins. Ces espèces atypiques, bien que moins digestibles, illustrent le potentiel énergétique élevé de ce cluster.

Tableau 56 : Contributions des individus spécifiques au cluster 4

Espèce	<i>E. arborea</i>	<i>Q. coccifera</i>	<i>E. arborea</i>	<i>Q. coccifera</i>	<i>Q. coccifera</i>
Saison	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Eté
<i>V.test</i>	3.08	2.90	2.84	2.78	2.37

Les individus spécifiques permettent de mieux comprendre les différences intra- et inter-clusters. Ils renforcent l'identité des clusters en illustrant les caractéristiques uniques qui les définissent. Ces spécificités soulignent la diversité fonctionnelle des espèces ligneuses étudiées, en lien avec leurs usages potentiels en alimentation des ruminants.

IV Discussion

IV.1. Valeur nutritionnelle des espèces selon les catégories

IV.1.1. Valeur nutritionnelle des arbustes

Les arbustes jouent un rôle crucial dans l'alimentation des ruminants, particulièrement dans les régions méditerranéennes où ils constituent une ressource fourragère essentielle pendant les périodes de pénurie (Papanastasis *et al.*, 2008). Ces espèces ligneuses se distinguent par leur résistance au stress hydrique et leur aptitude à fournir un fourrage riche en nutriments lorsque les herbacées se raréfient (Kaya & Kamalak, 2012). Par ailleurs, la diversité des composés secondaires présents dans les arbustes peut conférer des effets bénéfiques sur la santé des ruminants, notamment des propriétés anthelminthiques et anti-météorisantes (Hoste *et al.*, 2015). Une connaissance approfondie de leur composition, la digestibilité et de l'influence des composés secondaires est indispensable pour une valorisation efficace et durable dans les systèmes sylvopastoraux méditerranéens (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2014).

Les espèces arbustives étudiées à savoir *M. communis*, *E. arborea*, *P. media* et *Q. coccifera* sont couramment présentes sur les maquis du pourtour méditerranéen et sont volontairement consommées par les ruminants qui y sont pâturés (Selmi *et al.*, 2020 ; Chebli *et al.*, 2021 et Akbağ & Yurtman, 2022).

Les espèces étudiées montrent des teneurs élevées en MS qui oscillent entre 37,19 et 56,96%, cela est dû à leur structure morphologique lignifiée et leur adaptation aux contraintes environnementales notamment hydriques (Bıçakçı & Türk, 2024). Nos résultats corroborent avec ceux trouvés par plusieurs auteurs pour les mêmes espèce (Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) en Algérie ; Selmi *et al.* (2018) en Tunisie ; Chebli *et al.* (2021) au Maroc et Akbağ & Yurtman (2022) en Turquie). En revanche, les teneurs en MM sont faibles et varient entre 1,96%MS pour *Q. coccifera* au printemps et 6,51%MS pour *M. communis* en automne. Ces valeurs sont similaires à celles déclarées par Ammar *et al.* (2010), Kökten *et al.* (2012) et Eseceli *et al.* (2020) pour les mêmes espèces. En revanche, Selmi *et al.* (2020) déclarent des teneurs plus élevées de l'ordre de 12 ; 12,5 et 9%MS en moyenne pour *Q. coccifera*, *M. communis* et *E. arborea* respectivement.

Le niveau des MAT dans le feuillage des arbustes méditerranéens est souvent inférieur à 10 % MS (Cabiddu *et al.*, 2000) Un constat confirmé par nos résultats dont les taux de MAT ne dépassent guère les 11%MS. Cependant, ces teneurs demeurent supérieures au minimum de 7 à 8 %MS requis par les microorganismes pour un fonctionnement optimal du rumen et une

ingestion alimentaire maximale chez les ruminants (Van Soest *et al.*, 1991) ; une teneur plus faible en MAT affecte négativement l'ingestion alimentaire et la digestibilité (Minson, 1990). La littérature révèle une grande variabilité des teneurs en MAT selon les études. Certains auteurs (Akbağ & Yurtman, 2022) ont rapporté des valeurs particulièrement faibles, de l'ordre de 5 %, pour *C. coccifera* et *P. latifolia* tandis que d'autres (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2014) ont trouvé des teneurs beaucoup plus élevées pour *M. communis* et *P. media*, atteignant respectivement 16 % et 14 %. Cette disparité peut être expliquée par plusieurs facteurs, tels que la fertilité du sol (Ammar *et al.*, 2005), les conditions environnementales spécifiques aux sites d'étude, ainsi que le stade de croissance ou l'âge des plantes au moment de la récolte (Dzowela *et al.*, 1995)

En outre, les espèces d'arbustes sont généralement décrites comme étant riches en constituants pariétaux (Papanastasis *et al.*, 2008) ce qui est en parfaite accord avec nos résultats qui montrent un taux dépassant 45, 30, et 15 %MS pour NDF, ADF et ADL respectivement à l'exception de *M. communis* qui présentent des teneurs moyennes saisonnières relativement faibles (NDF=40, ADF=23 et ADL=9%MS). Ces valeurs sont en nette concordance avec les travaux de Akbağ & Yurtman (2022) ; Selmi *et al.* (2018) et Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) pour NDF et ADF pour *C. coccifera* et *P. media*. Cependant, en matière d'ADL ces derniers avancent des valeurs supérieures aux nôtres soit 20 contre 9%MS en moyenne et cela pour *M. communis*, alors que pour, cette dernière Chebli *et al.* (2021) présente des teneurs similaires aux nôtres soit 10%MS en moyenne.

Par ailleurs, la plupart des espèces arbustives sont riches en composés phénoliques notamment les tanins (Szwajkowska-Michałek *et al.*, 2020), néanmoins, cette richesse est marquée par une grande variabilité Cette variation peut dépendre de plusieurs facteurs : le stade phénologique (Chepel *et al.*, 2020), l'effet saisonnier (Mwamatope *et al.*, 2021), le stress thermique, les effets des pathogènes (Mangan, 1988) ou contre les insectes et les herbivores (Makkar, 2003b). Ce constat est approuvé par nos résultats où les espèces étudiées montrent des teneurs importantes en PPT et en TT notamment pour *M. communis* qui présente des concentrations saisonnières moyennes respectives de 135 et 108 gEAT/kg MS ce qui est comparables à celles rapportées par Boubaker *et al.* (2004) pour la même espèce (148 et 120g/kg respectivement). De même, les teneurs en TC corroborent avec les résultats de plusieurs auteurs pour *M. communis* (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2014) et *C. coccifera* (Akbağ & Yurtman, 2022) alors que Chebli *et al.* (2021) ont obtenu des concentrations plus élevées excédant 100 g/KG MS pour *E. arborea* et *M. communis*. En revanche, *P. media* fait

l'exception avec des teneurs saisonnières stables et presque nulles (0,15 g EAL/kg MS) ce qui est traduit par l'absence d'une activité biologique pour les substrats de cet arbuste. Ce résultat est approuvé par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) ; Chebli *et al.* (2021) ; Selmi *et al.* (2020) et Akbağ & Yurtman (2022) qui ont trouvé des concentrations minimales ne dépassant pas les 3 g/kg MS.

Les substrats incubés des espèces étudiées montrent des volumes de gaz total modérés oscillant entre 15,55 ml/0,3 g MS chez *E. arborea* en hiver et 48 ml/0,3 g MS chez *M. communis* en été. En effet, les meilleurs volumes ont été enregistrés par *M. communis* et *P. media* avec des moyennes saisonnières respectives de 37 et 31 ml/0,3 g MS tandis que *Q. coccifera* et *E. arborea* présentent les volumes les plus faibles (23 ml/0,3 g MS). Ceci est imputé sans doute à la richesse des arbustes en parois cellulaires et en composés phénoliques et la faible teneur en MAT. Nos résultats sont proches de ceux rapportés par Selmi *et al.* (2018) et Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015) pour *M. communis* (40 ml) et *P. media* (37 ml) respectivement. En plus, la majorité des substrats sont tributaire d'une phase de latence indiquée par la valeur négative de (a), un temps nécessaire aux microorganismes pour dépasser l'effet des tanins (Smith *et al.*, 2005). En outre, l'estimation de la production de gaz à partir de la fraction insoluble (b) des substrats montre une faible fermentescibilité de la fraction pariétale par le microbiote ruminal (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015b) expliquée notamment par les teneurs élevées en lignine. Par ailleurs, les substrats incubés affichent des vitesses de fermentation (c) très variables (0,06-0,24h⁻¹) dont la plus élevée est détectée en printemps ce qui semble être due à la meilleure teneur en MAT durant cette saison.

Par ailleurs, les taux en DMO enregistrés sont faibles oscillant entre 33 et 48%. Cela est attribué en partie à la présence de composés peu digestibles (NDF), indigestible (lignine), et en partie à leurs composés chimiques secondaires (les tanins condensés), dont l'action inhibitrice réduit l'activité microbienne et enzymatique du rumen (Ammar *et al.*, 2005). En revanche, *M. communis* en printemps et en été montrent les meilleurs taux avec 59,66 et 61,77% respectivement. Ceci s'expliquerait par leur teneur faible en parois cellulaires notamment la lignine et la faible activité biologique de leurs tanins. Nos résultats sont inférieurs à ceux rapportés par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) ; Ertekin *et al.* (2019) et Akbağ & Yurtman (2022) alors que Chebli *et al.* (2021) et Selmi *et al.* (2018) ont déclarés des taux similaires. Cette disparité est imputée sans doute à la composition chimique des échantillons étudiés notamment les teneurs en MAT et en TC (Mbugua *et al.*, 2008). En outre, les valeurs de l'EM demeurent aussi faibles (4 à 6 MJ/kg MS) et ne répondent pas même aux besoins d'entretien

(NRC, 2021) à l'exception de *M. communis* durant la saison printanière et estivale qui montrent d'importantes quantités en EM (8,45 et 8,92 MJ/kg MS respectivement) leurs qualifiant ainsi comme des aliments potentiellement énergétiques.

L'ajout du PEG lors de l'incubation des substrats du matériel végétal étudié a induit une augmentation de la production de gaz notamment pour *Q. coccifera* et *E. arborea* avec des taux allant de 20,45 à 106,25%. Cet effet est attribué à la capacité du PEG à se lier aux tanins, en particulier les tanins condensés, et à neutraliser leur activité (Elahi *et al.*, 2014) en augmentant le flux des nutriments digestibles (Salem, 2005). En effet, plusieurs études ont montré l'amélioration du PEG de la production de gaz de plusieurs espèces arbustives (Guerrero *et al.*, 2012 ; Rojas Hernández *et al.*, 2015 et Bayssa *et al.*, 2016). Cependant, les espèces étudiées ne réagissent pas de manière similaire à l'ajout du PEG. L'espèce *P. media* et malgré ces teneurs faibles en TC (<0,2 g), une augmentation de la production de gaz a été enregistrée (jusqu'à 12%). Par contre, *E. arborea*, avec des teneurs modérées en TC (<20g) une importante augmentation des taux de production de gaz a été enregistrée allant de 20,45 à 106,25%. L'ampleur de cet effet n'est pas contrôlée seulement par la concentration en TC, mais aussi par la composition chimique (Salem, 2005) et la structure des tanins (Bouazza *et al.*, 2012) de chaque espèce.

De même, l'incorporation du PEG a amélioré les émissions en CH₄ avec des taux très variables oscillant entre 2,84 et 163,07%. L'ajout du PEG, qui bloque les tanins, induit une augmentation de la production de méthane (Patra *et al.*, 2017). En effet, les substrats de *Q. coccifera* montrent les taux les plus élevés (34,69 ; 120,36 et 163,07 %) tandis que ceux de *P. media* en présentent les plus faibles (entre -3,33 et 10,92%). L'effet dépressif du PEG sur cette dernière est rapporté par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015b) pour la même espèce et qui ont mentionné un taux de 38,01%. Cela pourrait s'expliquer selon Bouazza *et al.* (2012) par le fait que l'ammoniac libéré lors de la dégradation des MAT se combine avec le CO₂, de sorte que la quantité de gaz mesurée dans l'espace de seringue est considérablement réduite.

IV.1.2. Valeur nutritionnelle des arbres

En système sylvopastoral, les arbres permettent à la fois de diversifier les ressources fourragères et d'offrir un microclimat favorable aux animaux (Karki & Goodman, 2009). En effet, ils constituent un élément clé de l'alimentation des ruminants, en particulier dans les régions où le fourrage conventionnel est rare ou peu nutritif, en raison de leur teneur élevée en protéines, de la qualité de leurs fibres et de leur disponibilité en minéraux (Emile *et al.*, 2017,

Novak *et al.*, 2020). Leurs feuilles, mobilisables pendant les périodes de soudure ou de sécheresse, agissent comme des réserves fourragères stratégiques compensant le déclin nutritif des herbages (Bencherchali *et al.*, 2019). Cependant, leur utilisation est limitée par la variabilité de la composition nutritionnelle et la présence de facteurs antinutritionnels (ex. Tanins condensés), qui compromettent leur digestibilité (Makkar *et al.*, 2007).

Le matériel végétal des espèces d'arbres étudiées présente des taux en MS qui ne dépassent pas 50% à l'exception de *Q. canariensis* qui montre une moyenne saisonnière de l'ordre de 53%. Les teneurs les plus élevées ont été enregistrées en automne et en été alors que les plus faibles sont celles du printemps. Nos résultats sont comparables à ceux trouvés par Emile *et al.* (2017) ; Ginane *et al.* (2018) ; Bernard *et al.* (2020) et Novak *et al.* (2020) tandis que Chebli *et al.* (2021) déclarent des teneurs supérieures pour *Q. canariensis* (63 vs 53%). La teneur élevée en eau est imputée au climat humide de la région (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015a) et l'aspect hydromorphe de l'aulnaie. Par ailleurs, les teneurs en MM sont très variables selon les espèces et les saisons. Elles oscillent entre 3,04 et 11,16 %MS. Le frêne *F. angustifolia* s'avère la plus riche avec une moyenne saisonnière de 10% alors que l'aulne glutineux *A. glutinosa* affichent les teneurs les plus faibles (5%MS en moyenne). Cette variation est expliquée par la famille botanique (Baumont *et al.*, 2009), type de sol et stade de maturité (Spears, 1994). Même résultat est déclaré par Emile *et al.* (2017) ; Wielemans *et al.* (2020) et Novak *et al.* (2020) pour les deux espèces.

Les échantillons analysés montrent des teneurs importantes en MAT avec des moyennes saisonnières de l'ordre de 12 ; 12,7 ; 14,8 et 15,6 %MS pour *Q. canariensis*, *S. alba*, *A. glutinosa* et *F. angustifolia* respectivement. De telles teneurs sont supérieures au minimum de 7 à 8 %/kg MS requis pour fournir l'ammoniac nécessaire au microbiote ruminal pour une croissance optimale (Norton *et al.*, 1998) en assurant le bon fonctionnement du rumen (Van Soest *et al.*, 1991) ; ces espèces sont aussi qualifiées d'excellents aliments qui peuvent assurer même les besoins de production (Chebli *et al.*, 2021). La littérature rapporte une disparité importante en termes des MAT. En effet, Ravetto Enri *et al.* (2020) ont trouvé des valeurs similaires pour *F. excelsior* et *S. caprea* tandis que Emile *et al.* (2017) ; Novak *et al.* (2020) et Wielemans *et al.* (2020) ont déclaré des taux supérieurs pour *A. glutinosa* (18%MS en moyenne). En outre, *Q. canariensis* affiche des teneurs très faibles (8 vs 12%MS) selon Chebli *et al.* (2021). Cette disparité est probablement imputée au génotype, au stade phénologique, à la maturité, au sol et au climat (Salem, 2005 ; Novak *et al.*, 2020).

Le contenu en parois cellulaires (NDF, ADF et ADL) présente une variabilité importante avec un maximum chez *A. glutinosa* au printemps soit 56,9 ; 39,11 et 24,15 %MS respectivement-alors qu'en automne *F. angustifolia* montre les teneurs les plus faibles (36,73 ; 18,41 et 8,64%MS respectivement). En général, les teneurs en fibres augmentent avec la maturité des plantes (Kamalak, 2006 ; Mahieu *et al.*, 2021,), cependant nos résultats en printemps montrent les teneurs les plus élevées, ceci est probablement attribué à la grande portion de brindilles riche en fibres lors de prélèvement. Nos résultats semblent être proches à ceux déclarés par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015b) ; Emile *et al.* (2017) et Ravetto Enri *et al.* (2020) et pour *F. angustifolia* tandis que Chebli *et al.* (2021) et Gürsoy (2023) ont trouvé des taux plus élevés pour *Q. canariensis* et *S. alba* respectivement.

La composition en métabolites secondaires pour les espèces arborées étudiées présente des teneurs modérées en PPT qui oscillent entre 26,1 et 71,6 g EAT/kg MS avec une prépondérance de la saison estivale. *F. angustifolia* montre les teneurs les plus faibles avec une moyenne saisonnière assez stable de 28,5 g EAT/kg MS ce qui est largement supérieure à celle trouvée par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015b) et Ravetto Enri *et al.* (2020) (18,66 et g EAT/kg MS et 12,5 g/kg MS respectivement). Les échantillons analysés affichent des concentrations faibles en tanins condensés allant de 0,2 et 33,14 g EAL/kg de MS. Une telle valeur inférieure à 50 g/kg MS est bénéfique pour les ruminants et ne présente pas un effet anti nutritionnel (Mueller-Harvey *et al.*, 2019). Néanmoins, Novak *et al.* (2020) ont suggéré que cette valeur-seuil doit être considérée avec prudence car la relation structure-activité biologique est peu connu et un effet anti nutritionnel pourrait se manifester. Ceci est confirmé, dans notre étude, où l'activité biologique de *S. alba* et *Q. canariensis* était élevée (1,45 et 1,35 respectivement) malgré les teneurs en TC qui ne dépassent pas 33,14 et 30,56 g/kg. Nos résultats pour les TC sont comparables à ceux indiqués par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015b) ; Emile *et al.* (2017) ; Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2018) et Novak *et al.* (2020) avec des concentrations très faibles (<5g/kg MS) et une activité biologique presque nulle et cela pour *F. angustifolia*. De même pour *A. glutinosa* qui affiche des teneurs proches à celles affichées par Emile *et al.* (2017) et Novak *et al.* (2020) et cela en été (11,5 contre 8 et 13 g/kg MS respectivement).

A l'exception des substrats de *F. angustifolia* qui dégagent des volumes importants en gaz total allant de 49,35 jusqu'à 62,71ml/0,3g MS, les autres espèces ont affichés des volumes assez faibles qui oscillent entre 19,43 et 38,81ml/0,3g MS avec une variation saisonnière remarquable. Ceci est imputé sans doute à la synergie de la teneur élevée en MAT et faible en

TC et en lignine ce qui confère à cette espèce *F. angustifolia* une meilleure digestibilité (de 58,43 à 72,4 %) et des concentrations en EM (de 8,04 à 9,9 MJ/kg MS) et en AGV (de 0,95 à 1,26 mmol/siringue) les plus élevées. Ce constat est confirmé par Emile et al. (2017) qui affirment que le frêne est plus dégradable que les espèces prairiales. Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par Emile *et al.* (2017) ; Ginane *et al.* (2018) ; Novak *et al.* (2020) ; et Bernard *et al.* (2020) ; pour la même espèce. D'après Bernard *et al.* (2020) la digestibilité de frêne est comparable à celle de la luzerne fourragère qui compte 63-67% selon INRA (2007). Les mêmes auteurs ont constaté aussi que les feuilles de frêne contribuent à l'amélioration de niveau d'ingestion par 47% comparablement au foin. Pour ces raisons, ils ont proposé que le frêne constitue un aliment alternatif pour couvrir non seulement les besoins d'entretien mais aussi pour répondre aux besoins des animaux producteurs ou de faible capacité d'ingestion (brebis en gestation ou agneaux). De même, Bencherchali *et al.* (2019) ont noté lors d'une expérience menée sur des moutons de race Hamra que l'incorporation des feuilles de frêne a permis d'augmenter le niveau d'ingestion, la digestibilité et les gains de poids. En outre, Chebli *et al.* (2021) ont trouvé aussi des taux de dMO comparables aux nôtres pour *Q. canariensis* en automne et en été (40,6 et 44,6% contre 38 et 41%) tandis que nos résultats pour *A. glutinosa* en été (45%) sont inférieurs à ceux rapportés par Emile *et al.* (2017) ; Novak *et al.* (2020) et Bernard *et al.* (2020) (68 ; 65 et 70,8% respectivement).

L'incorporation de PEG aux substrats incubés a contribué à l'amélioration de la production du gaz avec des taux allant de 6,15 à 51,2% excepté ceux de *F. angustifolia* qui ne subissent pas de modification. Ceci est expliqué par les teneurs très faibles en TC et leur activité biologique presque nulle. Néanmoins, des résultats contradictoires sont signalés par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) et (2015b). Ces derniers ont enregistré des taux d'augmentation respectifs de l'ordre de 13,03 et 9,1% imputé probablement à la nature et la structure des tanins qui ne réagissent pas de la même manière avec le PEG (Salem *et al.*, 2005).

De l'autre côté, l'ajout du PEG présente un effet positif sur la production de CH₄ avec des taux allant jusqu'à 117% pour *Q. canariensis* en printemps. Cette augmentation est due principalement à l'affinité du PEG à inhiber les TC (Patra *et al.*, 2017). A l'opposé, un effet dépressif a été enregistré pour les substrats de *A. glutinosa* en automne (-15,48%) et *Q. canariensis* en automne (-37,73%) et en été (47,95%). Ce constat est déclaré par plusieurs auteurs pour des espèces tannifères (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015b ; Bouazza *et al.*, 2012). Ce phénomène pourrait s'expliquer pour de telles espèces contenant des TC avec une activité

biologique importante, par l'effet modificateur du PEG sur l'activité microbienne notamment méthanogène (Min *et al.*, 2003).

IV.1.3. Valeur nutritionnelle des lianes

Les lianes constituent une composante importante des aulnaies glutineuses (Belouahem-Abed, 2012). Elles se caractérisent par leur capacité à utiliser d'autres plantes comme support pour atteindre la canopée tout en gardant leurs racines ancrées dans le sol (Gentry, 1991). Cette stratégie de croissance leur permet d'allouer davantage de ressources à la production de biomasse foliaire plutôt qu'à la formation de tissus de soutien, contrairement aux arbres et aux arbustes (Schnitzer & Van Der Heijden, 2019). En outre, elles possèdent un système vasculaire efficace leur confère un meilleur équilibre hydrique, particulièrement durant les périodes sèches (Schnitzer *et al.*, 2005). Ces caractéristiques, associées à leur croissance rapide et leur importante production de biomasse foliaire, font des lianes des ressources particulièrement intéressantes dans les systèmes sylvopastoraux (Novak *et al.*, 2020).

Cinq espèces de lianes font l'objet de notre étude sur la caractérisation nutritionnelle des ligneux fourragers de l'aulnaie de Ain Khiair à savoir : *R. peregrina*, *C. cirrhosa*, *R. ulmifolius*, *S. aspera* et *H. helix*

Les espèces de lianes étudiées excepté *R. peregrina* au printemps et en été et *S. aspera* en hiver (tableau 25) présentent des teneurs en MS inférieures à 40%, ce qui est conforme avec les résultats obtenus par Novak *et al.* (2020) et Emile *et al.* (2017) pour des lianes de la région tempérée en France. La teneur élevée en eau est imputée sans doute au climat humide de la région d'étude (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015a). Les facteurs environnementaux favorables (sol, associations végétales) ont aussi intervenu du fait qu'ils permettent aux lianes de prolonger leur stade végétatif (Shah *et al.*, 2019). Les teneurs en MM oscillent entre 5 et 10 %/kg MS et corroborent avec celles reportées par Mahieu *et al.* (2021) pour des lianes en France (5,35 et 8,96 %/kg MS). En effet, *R. ulmifolius* et *S. aspera* montrent les teneurs les plus faibles en accord avec les valeurs déclarées par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) et Chebli *et al.* (2021) pour les mêmes espèces dans les maquis de chêne liège de la région méditerranéenne.

En général, les plantes ont des teneurs plus élevées en MAT au printemps (Manousidis *et al.*, 2016). Cependant, *C. cirrhosa* en automne, *H. helix* en automne et en hiver et *S. aspera* en hiver et en été ont les teneurs les plus élevées. Cela peut être probablement imputable à l'intensité lumineuse permise par la tombée du feuillage des arbres hôtes (notamment l'aulne) en automne et en hiver favorisant ainsi une photosynthèse optimale et une synthèse continue

des nutriments promus par l'humidité et le microclimat spécifique de l'aulnaie. Les teneurs moyennes en MAT des espèces étudiées varient de 8,45 à 20,99 %MS, ce sont des teneurs supérieures au minimum requis pour fournir l'ammoniac nécessaire pour le microbiote ruminal pour une croissance optimale (7 à 8 %kg MS) (Norton *et al.*, 1998) et assurer le bon fonctionnement du rumen (Van Soest *et al.*, 1994).

En outre, *C. cirrhosa* et *R. ulmifolius* avec leurs teneurs qui dépassent 13 %/kg MS constitue des excellents aliments qui peuvent assurer même les besoins de production (Chebli *et al.*, 2021). Par ailleurs, *R. ulmifolius* présente un excellent profil protéique avec une moyenne saisonnière de l'ordre de 16%MS. Ces résultats sont de même ordre de grandeur avec ceux déclarés par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014), Emile *et al.* (2017) ; Chebli *et al.* (2021) et (2022). Néanmoins, *S. aspera* montrent des teneurs moyennes (11%/kg MS) semblables aux résultats mentionnés par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015a), (2015b) et (2018) alors que *R. peregrina* montre les teneurs les plus faibles (9%MS en moyenne) qui corroborent avec ceux de Chemouri (2021) et Selmi *et al.*, (2022).

Le contenu en NDF, ADF et ADL présentent des différences hautement significatives ($p < 0,001$). Il varie de 32,49-57,58 ; 19,49-37,68 et 5,11-23,21%/kg MS respectivement. Ainsi, *S. aspera* présente les teneurs les plus élevées en fibres totaux. Cela est cohérent avec les résultats rapportés par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015a), (2015b) et (2018) pour la même espèce. En outre, *R. ulmifolius* rapporte les teneurs les plus faibles (NDF=37%/kg MS, ADL=7,5%/kg MS). Ces résultats conformes ceux indiqués par Emile *et al.* (2017) ; Novak *et al.* (2020), et Chebli *et al.* (2021). Cependant, *H. helix* est l'espèce la plus lignifiée.

Les concentrations en composés phénoliques du matériel végétal analysé présentent des variations considérables entre espèces ($p < 0,01$) et entre saisons ($p < 0,05$). En effet, *R. ulmifolius* est la plus riche en PT et TT alors que *H. helix* en hiver et au printemps en est la moins pourvue. Par ailleurs, nos échantillons contiennent des teneurs en TC inférieures à 50 g/kg MS. Piluzza *et al.* (2014) et Mueller-Harvey *et al.* (2019) rapportent que des teneurs faibles en TC (<50 g/kg MS) sont bénéfiques pour la santé des ruminants et leurs performances. Les concentrations faibles en métabolites secondaires et notamment les tanins condensés sont expliqués par le stade végétatif allongé des lianes ; à ce stade, les nutriments sont alloués pour la production végétative (Salem, 2005). Nos résultats pour les TC se diffèrent à ceux indiqués par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2014) ; (2015) et (2018) pour *S. aspera* alors qu'ils corroborent avec ceux de Emile *et al.* (2017) et Novak *et al.* (2020) pour *H. helix* et *R. ulmifolius*. En revanche, Chebli

et al. (2021) et (2022) déclarent des concentrations très supérieures pour la dernière espèce (122-144 et 109-121 g/kg MS respectivement). Cette différence est due probablement au génotype, stade phénologique, maturité, sol et climat (Salem, 2005).

En outre, *R. ulmifolius* enregistre en automne et au printemps les volumes de gaz les plus élevés après 24 heures d'incubation (42 et 46 ml/0,3g respectivement), se répercutant sur l'augmentation de sa digestibilité *in vitro* (58,52 et 64,19 % respectivement). Ceci est imputé sans doute à sa teneur élevée en MAT et faible en lignine. Nos résultats se situent au milieu entre ceux annoncés par Chebli *et al.* (2021) et (2022) (41 et 45 % respectivement) et ceux par Novak *et al.* (2020), Emile *et al.* (2017) (70 et 73% respectivement). Néanmoins, *C. cirrhosa* et malgré sa teneur élevée en TC en automne (10,83 g/kg MS) enregistre un volume important de gaz (44,1 ml/0,3g) ; ceci est expliqué probablement par la nature non active des TCs et leur degré de polymérisation (Naumann *et al.*, 2017). Ainsi, *H. helix*, en automne et en hiver, et *S. aspera* au printemps enregistrent les volumes les plus faibles (13,38, 16,72 et 15,53 ml/0,3g respectivement). Les teneurs élevées en lignine en seraient la cause (17,21, 23,21 et 17,79 % MS respectivement). Nos résultats montrent des valeurs très inférieures en digestibilité à ceux déclarés par Emile *et al.* (2017) et Novak *et al.* (2020), qui dépassent 70% expliqué probablement par l'âge avancé des individus échantillonnés et le matériel végétal prélevé (feuilles + tiges). L'EM fournie par les substrats incubés varie entre 7 et 9 MJ/ kg MS (à l'exception de *H. helix* en printemps et en hiver (4,7 et 5,19 MJ/ kg MS respectivement)). Cette caractéristique leur qualifie d'être une bonne source d'énergie pour les ruminants à l'entretien (NRC, 2021).

La fermentation de la plupart des substrats incubés est tributaire d'une phase de latence indiquée par les valeurs négatives de la production de gaz à partir la fraction soluble (a). Cette phase de latence est dépendante du temps nécessaire pour la flore ruminale à s'adapter aux tanins et moduler leurs effets (Smith *et al.*, 2005). En outre, l'estimation de la production de gaz à partir la fraction insoluble (b) du matériel végétal de *C. cirrhosa* en automne et au printemps montre une meilleure fermentescibilité de la fraction pariétale par le microbiote ruminal (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015b). Par ailleurs, les substrats incubés affichent des vitesses de fermentation(c) considérables ($> 0,07\text{ml/h}$) à l'exception de *S. aspera* au printemps, *H. helix* en automne et au printemps qui montrent les vitesses les plus faibles ($< 0,05\text{ml/h}$) ce qui semble être dû aux tanins qui inhibent les enzymes (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015b).

L'ajout du PEG a augmenté la production totale de gaz pour la plupart des substrats incubés notamment pour *R. peregrina* en été et au printemps et *H. helix* en hiver et en automne

(45,24%, 20,12%, 41,9% et 23,37% respectivement). Ceci est expliqué par l'affinité du PEG à inactiver les tanins et libérer les complexes tanins-protéines permettant par conséquence leur dégradation (Makkar, 2003b). L'amélioration de la production du gaz *in vitro* des substrats incubés en présence de PEG a été aussi reportée par plusieurs auteurs (Bouazza *et al.*, 2012, Guerrero *et al.*, 2012, Rojas Hernandez *et al.*, 2015, Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015 et Medjekal *et al.*, 2018). Cependant, le PEG n'a eu aucun effet sur *C. cirrhosa* en automne et *R. ulmifolius* au printemps qui affichent des taux d'augmentation nuls, sans doute à cause des teneurs élevées en MAT. Makkar & Becker (1996) suggèrent que les protéines imitent l'effet du PEG. Plus le niveau de protéines est élevé dans un substrat, l'effet du PEG est moindre. En outre, l'effet dépressif du PEG sur *C. cirrhosa* en hiver et au printemps qui ont affiché des taux négatifs a été aussi rapporté par Mebirouk-Boudechiche *et al.*, (2015b).

Néanmoins, *R. ulmifolius* et malgré sa teneur considérable en tanins, ne subit pas d'augmentation remarquable en gaz produit après l'ajout du PEG, il semble imputable aux différentes réactions des tanins avec le PEG qui ne dépend seulement de leur concentration mais aussi à leur structure chimique (Elahi, 2014), leur stéréochimie et leur degré de polymérisation (Schofield, 2001).

D'autre part, l'addition du PEG a induit une augmentation de la production de CH₄ pour la plupart des substrats incubés allant jusqu'à 127,27% pour *R. peregrina* en été. Ceci est imputé sans doute au rôle bloquant du PEG sur les TCs (Patra *et al.*, 2017). Cependant, l'effet du PEG était dépressif sur les substrats de *C. cirrhosa* durant les trois saisons, au cours desquelles on note une réduction de la production de méthane (-13,35, -37,23 et -33,3% respectivement). Même constat est déclaré par Bouazza *et al.* (2020) pour *Atriplex halimus*. De même, *C. cirrhosa* étant hautement dégradable, ce qui suggère que la faible production de méthane observée pourrait être due à un effet spécifique sur la méthanogenèse plutôt qu'à un effet inhibiteur général sur la fermentation ruminale. Si cet effet est confirmé, *C. cirrhosa* pourrait être un fourrage prometteur, hautement digestible, limitant les émissions de méthane par les ruminants.

IV.2. Valeur nutritionnelle des espèces toutes catégories confondues

L'évaluation de la qualité nutritive des ligneux fourragers étudiés montre une variabilité importante entre catégories. Cette variation en propriétés nutritionnelles des ligneux dépend essentiellement à la famille botanique (Hagerman *et al.*, 1992), à la fertilité du sol (Ammar *et al.*, 2005), conditions environnementales et le stade phénologique (Kokten *et al.*, 2012). En

outre, des études antérieures ont rapporté que la composition chimique des ligneux varie considérablement selon les saisons (Gurung, 2018 ; Castro *et al.*, 2021).

La composition chimique primaire (MS, MM, MO et MAT) du matériel végétal analysé présente des différences hautement significatives ($<0,001$). En effet, la teneur en MS des trois catégories présente des moyennes globales différentes. Celle-ci ne dépasse pas les 40 % pour les lianes, alors qu'elle dépasse 50 % pour les arbres et les arbustes. Cette teneur plus faible en MS (donc plus élevée en eau) des lianes est imputée à leur aptitude à maintenir leur équilibre hydrique mieux que les arbres pendant la saison sèche. Elles peuvent croître davantage dans cette période (jusqu'à 7 fois plus) grâce à leur enracinement profond et à leur architecture hydrique efficace, leur permettant une croissance continue, alors que les arbres et les arbustes subissent un stress hydrique (Schnitzer *et al.*, 2005).

Le contenu global moyenne en MAT ligneux étudiées semble être variable avec une prépondérance des arbres. Par ailleurs, les teneurs en MAT enregistrées notamment pour *F. angustifolia*, *R. ulmifolius*, *C. cirrhosa* et *A. glutinosa* demeurent élevées par rapport à celles des ligneux fourragers analysés par plusieurs auteurs dans diverses zones géographiques et sous différents contextes climatiques (Selmi *et al.*, 2018, Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2018 ; Chebli *et al.*, 2021 et Castro *et al.*, 2021). Cela s'explique par le fait que l'aulne, en tant qu'espèce dominante, a la faculté de fixer l'azote atmosphérique, favorisant ainsi le recyclage des nutriments et la fertilisation du sol (Emile *et al.*, 2017 ; Mahieu *et al.*, 2021). Cependant, la teneur en MAT des ligneux étudiés reste supérieure au minimum de 7 à 8 %/kg MS requis pour fournir l'ammoniac nécessaire au microbiote ruminal pour une croissance optimale (Norton *et al.*, 1998) en assurant le bon fonctionnement du rumen (Van Soest *et al.*, 1991). De même, Camacho *et al.* (2010) suggèrent que les fourrages ayant la teneur en MAT supérieure à 10% présentent une alternative pour combler le déficit protéique et compléter les fourrages pauvres durant les épisodes de soudure.

Les teneurs en parois cellulaires entre les catégories étudiées ne présentent pas de différence significative. Néanmoins, de fortes teneurs ont été enregistrées pour plusieurs espèces notamment *Q. canariensis*, *E. arborea* et *A. glutinosa*. En revanche, ces teneurs ne s'avèrent pas plus élevées que celles des fourrages prairiaux classiques qui sont en moyenne sur l'année de 47,3 %MS pour les légumineuses et de 57,4 %MS pour les graminées d'après Baumont *et al.* (2018). Par ailleurs, les teneurs en ADL de ligneux sont globalement plus élevées que celles des espèces fourragères herbacées. Novak *et al.* (2020) ont déclaré des teneurs de l'ordre de 7,7%/MS pour la luzerne. Dans notre étude, les concentrations en lignine peuvent

dépasser 20% pour plusieurs espèces et atteindre respectivement 23,91 ; 24,15 et 26,49 %MS pour *A. glutinosa* au printemps, *P. media* en automne et *E. arborea* en été. La lignine est considérée comme un facteur qui limite la digestibilité (Chebli *et al.*, 2022) en inhibant les enzymes cellulases et en diminuant le potentiel catalyseur des sucres (Li *et al.*, 2016). Ainsi, un contenu bas en lignine facilite l'accès des enzymes pour dégrader la cellulose (Mahieu *et al.*, 2021). En effet, des teneurs élevées en lignine induisent des teneurs faibles en extraits azotés et sucres solubles (Chebli *et al.*, 2021), ce qui expliquerait les corrélations négatives entre les teneurs en fibres et la digestibilité rapportées par Paton (2003) et Kozloski *et al.* (2005).

Les ligneux étudiés renferment des concentrations en TC variables selon les catégories avec une supériorité chez les arbres par rapport aux lianes et aux arbustes. En outre, les espèces *F. angustifolia*, *P. media*, *R. ulmifolius* et *H. helix* affichent des teneurs très faibles ne dépassant guère 3 gEAL/kg MS. Cependant, les teneurs en TC enregistrées pour tous les échantillons analysés sont inférieures à 50g/kg MS. De telles concentrations forment des complexes avec les acides aminés les protégeant des sucs gastriques dans le rumen (Makkar *et al.*, 2007 ; Dey *et al.*, 2008,). Ces complexes vont dissocier au niveau des intestins, être dégradés et absorbé (Shah *et al.*, 2019) réduisant ainsi les pertes azotées dans les urines (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2014). Novak *et al.* (2020) qualifient les TC de facteur antinutritionnel quand leur teneur est au-delà de 50 g/kg MS ; ils précipitent les protéines salivaires responsables de la lubrification de la cavité buccale (protéines riches en proline) (Soares *et al.*, 2012) en provoquant une sensation d'astringence chez les ruminants et réduisant la consommation (Waghorn, 2008) et la croissance des microorganismes ruminiaux en affectant la digestibilité (McSweeney *et al.*, 2001). De plus, Hoste *et al.* (2006) et Yagoubi *et al.* (2018) rapportent que des teneurs en TC <50 g/kg MS ont des propriétés anthelminthiques et préviennent la météorisation. Néanmoins, Novak *et al.* (2020) ont suggéré que cette valeur-seuil doit être considérée avec prudence car la relation structure-activité biologique est peu connue et un effet anti nutritionnel pourrait se manifester. C'est le cas dans notre étude pour *H. helix* ayant une teneur moyenne annuelle de 0,18 g g EAL/kg MS mais avec une activité biologique importante allant jusqu'à 1,42.

L'activité biologique des tanins dépend de leur concentration et de leur structure chimique (Bouazza *et al.*, 2012). Les tanins forment des complexes insolubles avec les différents constituants cellulaires en diminuant leur digestibilité (Waghorn, 2008). Le facteur limitant la digestibilité est l'interaction entre les tanins et les constituants structuraux et les carbohydrates et protéines non structuraux (McSweeney *et al.*, 2001 ; Jayanegara *et al.*, 2015).

Naumann *et al.* (2017) montrent que les tanins ne réagissent pas de la même façon. Ainsi, Häring *et al.* (2008) ont trouvé que *Onobrychus viciifolia* (9-10 % de TC) est plus palatable que *Lotus corniculatus* (2,6-4% TC) en déduisant que la consommation est déprimée à une concentration inférieure à 5% pour des tanins plus actifs alors que si la concentration est supérieure à 5% pour des tanins moins actifs, la consommation augmente.

Lors de la fermentation *in vitro*, la majorité des substrats incubés sont soumis à une phase de latence traduite par la valeur négative du volume de gaz généré à partir la fraction soluble (a). Cette phase de latence est imputée probablement au temps nécessaire pour que la flore ruminale s'adapte aux tanins (Smith *et al.*, 2005). En outre, l'estimation de la production de gaz à partir la fraction insoluble (b) substrats montre une meilleure fermentescibilité de la fraction pariétale par le microbiote ruminal (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015b). Par ailleurs, les substrats incubés affichent des vitesses de fermentation(c) très variables dont la plus faible est détectée pour *H. helix* en automne (0,02 ml/h) et en hiver (0,04 ml/h) et *R. peregrina* en été (0,04 ml/h) ce qui semble être due aux tanins qui inhibent les enzymes (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2015b).

La digestibilité de la matière organique est le paramètre le plus pertinent pour déterminer le potentiel nutritif des fourrages (Castro *et al.*, 2021). L'application de la méthode de la digestibilité *in vitro* sur les substrats des ligneux étudiés montre une variabilité importante inter-espèces en termes de production de gaz. Cette dernière est imputée principalement à la composition en nutriments (MAT et fibres) et en métabolites secondaires (notamment les TC) (Mbugua *et al.*, 2008). En effet, les espèces *F. angustifolia*, *C. cirrhosa* et *R. ulmifolius* affichent les valeurs de dMO les plus élevées oscillant entre 48,06 et 72,39% ce qui est expliqué sans doute aux teneurs élevées en MAT, faibles en lignines et en TC. En revanche, les deux espèces de chêne : *Q. canariensis* et *Q. coccifera* affichent les taux les plus faibles parmi les espèces étudiées (entre 33,44 et 44,46%), ceci est du principalement à l'activité biologique élevée de leurs tanins (de 1,31 à 1,61). Par ailleurs, les espèces *P. media*, *S. aspera* et *S. alba* ont montré des profils de digestibilité saisonniers stables, cependant, d'importantes fluctuations saisonnières ont été enregistrées chez *A. glutinosa*, *M. communis* et *R. peregrina*. Cette diversité a été aussi signalé par plusieurs auteurs dont les travaux portent sur une large gamme de ligneux fourragers (Emile *et al.* 2017 ; Vandermeulen *et al.*, 2018a ; Novak *et al.*, 2020, Mahieu *et al.*, 2021 ; Chebli *et al.*, 2021 et 2022 ; Verma, 2022 et Culqui *et al.*, 2025).

La technique de production de gaz *in vitro* couplée avec l'ajout du PEG est considérée comme outil efficace pour déterminer l'activité biologique des tanins (Ammar *et al.*, 2004). En

effet, l'activité biologique des tanins basée sur l'effet du PEG complète la composition chimique car elle cible le potentiel des tanins actifs tandis que leur concentration n'en représente pas un bon prédicteur (Vitti *et al.*, 2005 ; Mlambo, 2009). Bouazza *et al.* (2020) suggèrent que le PEG s'attache aux tanins en empêchant leur liaison avec les constituants alimentaires et élimine leur effet sur la digestion. L'inactivation des tanins par le PEG augmente la disponibilité des nutriments en favorisant l'activité microbienne et la production de gaz (Makkar, 2003b).

L'ajout du PEG a induit une augmentation de la production de gaz pour la plupart des substrats incubés avec des taux très variables allant de 0,12 et 106,25%. En revanche, le PEG ne semble pas exercer un effet sur les substrats de *R. ulmofolius* au printemps, *C. cirrhosa* en automne et *F. angustifolia* en automne et au printemps, d'ailleurs aucune modification de la production de gaz n'est enregistrée, ce qui est expliqué par les concentrations très faibles en TC et leurs activités biologiques presque nulle. D'un autre côté, *C. cirrhosa* en hiver et au printemps affichent des taux dépressifs après l'addition de PEG, imputé probablement aux teneurs élevées en MAT. Lorsque ces dernières sont dégradées, l'ammoniac libéré se combine avec le CO₂, de sorte que la quantité de gaz mesurée dans l'espace de seringue est considérablement réduite (Bouazza *et al.*, 2012). Ce constat est déclaré aussi par Mebirouk-Boudechiche *et al.* (2015b) qui ont signalé une réduction de production de gaz après l'addition du PEG chez *Phillyrea angustifolia* (-5,96%) et *Phillyrea latifolia* (-3,86%), espèces caractérisées par de fortes teneurs en MAT.

En outre, l'incorporation du PEG a amélioré l'émission de CH₄ des substrats incubés notamment ceux de *Q. canariensis* au printemps, *Q. coccifera* en automne et en été, *M. communis* en hiver et *R. peregrina* en été avec des taux de l'ordre de : 117,09 ; 163,07 ; 120,36 ; 124,31 et 127,27% respectivement. D'après Melesse *et al.* (2019) et Rira *et al.* (2019), les tanins ; et surtout les TC jouent un rôle primordial dans l'atténuation des émissions de méthane en inhibant les archées méthanogènes et réduisant la production d'hydrogène en raison d'une diminution de la digestion des fibres et de la population de protozoaires dans le rumen. L'ajout du PEG, qui bloque les tanins, induit une augmentation de la production de méthane (Patra *et al.*, 2017). Cette augmentation semble imputable aux différentes réactions des tanins avec le PEG qui ne dépend seulement de leur concentration mais aussi à leur structure chimique (Makkar, 2007 ; Salem *et al.*, 2007 et Elahi *et al.*, 2014), leur stéréochimie et leur degré de polymérisation (Schofield *et al.*, 2001). En revanche, les substrats des espèces telles que *A. glutinosa* en automne, *Q. canariensis* au printemps, *C. cirrhosa* en hiver ont subi une dépression en CH₄ avec des taux de -15,48 ; -47,95 ; -37,23 respectivement. Ce phénomène pourrait

s'expliquer par plusieurs mécanismes. En effet, pour les espèces contenant des teneurs élevées en TC avec une activité biologique importante telle que *Q. canariensis*, l'effet dépressif est expliqué par l'effet modificateur du PEG sur l'activité microbienne notamment méthanogène (Min *et al.*, 2003). Par ailleurs, pour *C. cirrhosa* étant hautement dégradable, ce qui suggère que la faible production de méthane observée pourrait être due à un effet spécifique sur la méthanogenèse plutôt qu'à un effet inhibiteur général sur la fermentation ruminale. Si cet effet est confirmé, *C. cirrhosa* pourrait être un fourrage prometteur, hautement digestible, limitant les émissions de méthane par les ruminants.

IV.3. Typologie des espèces ligneuses étudiées

L'objectif de cette analyse exploratoire est d'établir une typologie des espèces ligneuses (lianes, arbres et arbustes) consommées par les ruminants (ovins, bovins et caprins en extensif) dans l'aulnaie de Ain Khia, en se basant sur leur composition chimique et leur digestibilité *in vitro*. L'approche méthodologique a combiné une Analyse Factorielle Multiple (AFM) pour explorer les gradients de variation et une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour identifier des groupes homogènes d'espèces.

Cette approche a été largement utilisée pour caractériser les fourrages ligneux, comme l'ont fait Gurgel *et al.* (2020), Thapa *et al.* (2021), Dione *et al.* (2022), Pérez-Reverón *et al.* (2024) et Culqui *et al.* (2025) qui ont utilisé une ACP suivie d'une CH pour identifier des groupes de ligneux. De même, Bonizzi *et al.* (2025) ont également adopté une approche similaire en utilisant une ACM pour évaluer le potentiel des feuilles d'arbres comme source alternative d'alimentation pour les ruminants laitiers. L'AFM présente l'avantage, par rapport à l'ACP classique, de prendre en compte la structure des données en groupes thématiques, permettant ainsi d'explorer simultanément différents ensembles de variables (composition chimique, pariétale, phénolique et paramètres de fermentation) tout en préservant leurs spécificités et leurs interactions, ce qui est particulièrement pertinent pour l'étude des fourrages ligneux dont la valeur nutritive dépend de multiples facteurs interdépendants (Pagès, 2013).

Les deux premières dimensions de l'AFM expliquent presque 60% de la variance totale, révélant deux gradients fondamentaux dans la caractérisation des espèces ligneuses. Le premier axe représente un gradient nutritionnel opposant les espèces à haute digestibilité et riches en MAT aux espèces riches en MS, MO et tanins condensés ayant une activité biologique importante. Cette structuration rejoint les observations de Amiri *et al.* (2012), Chebli *et al.* (2021) et Castro *et al.* (2021) qui ont également identifié une corrélation négative entre la

digestibilité et les composés phénoliques notamment les TC. Le second axe établit un gradient de défense biochimique opposant les espèces riches en composés phénoliques à celles riches en fibres structurales. Cette opposition entre stratégies défensives chimiques (tanins) et physiques (fibres) est cohérente avec les théories écologiques sur les adaptations des plantes face à l'herbivorie (Frutos *et al.*, 2004 ; Hattas *et al.*, 2017)

L'analyse des corrélations entre les différentes variables nutritionnelles révèle des relations complexes qui expliquent en grande partie la variation observée de la valeur nutritive. La corrélation positive entre la dMO et la teneur en MAT s'explique par le fait qu'une teneur élevée en protéines brutes stimule l'activité microbienne ruminal via la production d'ammoniac (NH_3), essentielle aux microorganismes du rumen (Jayanegara *et al.*, 2016). Ce constat est conforme à celui de Thapa *et al.* (2021) dans leur étude sur la qualité des fourrages ligneux au Népal. Dans notre étude, les deux espèces *C. cirrhosa* et *F. angustifolia* illustrent parfaitement cette relation, avec des teneurs élevées en MAT (>14%) associées à une excellente digestibilité (>57%). De même, Culqui *et al.* (2025) ont également mis en évidence cette relation dans leur étude sur les espèces arbustives endémiques du Nord-est du Pérou, où *Myriocarpa stipitata* (Benth., 1846) présentait simultanément les plus hauts pourcentages de protéines totales (30,3%) et de digestibilité (89,2%). En revanche, une corrélation négative a été remarquée entre la dMO et les teneurs en MS et en parois cellulaires. Cette corrélation négative s'explique par la nature même des constituants pariétaux, particulièrement la lignine (ADL) qui limite la digestibilité (Chebli *et al.*, 2022) en inhibant les enzymes cellulases et en diminuant le potentiel catalyseur des sucres (Li *et al.*, 2016). Ainsi, un contenu bas en lignine facilite l'accès des enzymes pour dégrader la cellulose (Mahieu *et al.*, 2021). Kumar *et al.* (2022) ont aussi mis en évidence cette corrélation négative lors de l'évaluation de la qualité nutritionnelle des espèces fourragères de l'Himalaya occidental, ce qui réconforte nos résultats. Selon Bechir *et al.* (2009), cette relation s'accroît avec le vieillissement des plantes, et donc l'augmentation des teneurs en fibres, entraînant une élévation de la MS et une diminution de la digestibilité.

Par ailleurs, des corrélations négatives ont été enregistrées entre les teneurs en TC et leur activité biologique et la production de gaz et de CH_4 . La réduction de la digestibilité est imputée essentiellement aux différents effets des TC dans l'environnement du rumen (Al Gharad *et al.*, 2025). En effet, les TC forment des complexes indigestibles avec les protéines, les enzymes et les carbohydrates (Min *et al.*, 2018). Pérez-Reverón *et al.* (2024) ont également souligné des effets similaires des composés secondaires sur la digestibilité dans leur étude sur les plantes des régions arides insulaires. De même, Mhlongo *et al.* (2025) ont observé que

l'inclusion des tanins extraits d'*Acacia mearnsii* (De Wild., 1925) aux rations à base de foin de luzerne induit une faible digestibilité malgré des teneurs en protéines de l'ordre de 12%MS, confirmant ainsi l'impact négatif des tanins sur la valorisation nutritionnelle des fourrages. En plus, l'atténuation de l'émission de CH₄ est contrôlée par l'aptitude des TC à altérer les protozoaires responsables selon Vogels *et al.* (1980) du transfert de H₂ aux archées méthanogènes. Jayanegara *et al.* (2015) ont démontré que les tanins condensés peuvent réduire la production de méthane de 15 à 45% selon leur concentration et leur structure chimique.

La projection des individus sur le plan factoriel en fonction de la catégorie taxonomique révèle une structuration claire des espèces ligneuses fourragères, reflétant des stratégies adaptatives distinctes liées à leur morphologie et leur écologie. La projection des individus sur le plan factoriel en fonction de la catégorie taxonomique révèle une structuration spatiale différenciée des espèces ligneuses fourragères, suggérant l'existence de groupes fonctionnels distincts fondés sur des traits morphologiques, physiologiques et écologiques.

Les lianes montrent une grande diversité nutritionnelle en se concentrant principalement sur la partie gauche du plan factoriel, ce qui leur confère un profil riche en MAT avec une digestibilité élevée et pauvre en MS, MO et en TC. Cette distribution étendue témoigne de leur plasticité écologique remarquable, comme l'ont souligné Schnitzer et Bongers (2019). Leur stratégie de croissance, qui consiste à utiliser d'autres plantes comme support tout en investissant davantage dans la production de biomasse foliaire plutôt que dans les tissus de soutien, explique cette variabilité nutritionnelle (Novak *et al.*, 2020).

En revanche, les arbustes se caractérisent par une plus grande stabilité nutritionnelle, se concentrant clairement sur la partie droite positive du plan factoriel. Cette homogénéité relative reflète leur stratégie adaptative face aux contraintes environnementales méditerranéennes, notamment le stress hydrique estival (Papanastasis *et al.*, 2008). Comme l'expliquent Szwajkowska-Michałek *et al.* (2020), la plupart des espèces arbustives méditerranéennes sont riches en composés phénoliques, notamment les tanins, ce qui constitue une adaptation face aux stress environnementaux et à la pression d'herbivorie.

Quant aux arbres, ils présentent des profils distincts, occupant une position intermédiaire entre les lianes et les arbustes sur le plan factoriel. Cette position reflète leur rôle multifonctionnel dans les écosystèmes sylvopastoraux, ils constituent une source pérenne de fourrage ligneux en période de sécheresse, agissent comme structures modifiant le microclimat (ombrage, humidité, nutriments) au bénéfice des strates inférieures, et offrent un abri ~~essentiel~~

aux animaux contre les aléas climatiques et le stress thermique, comme le soulignent Karki et Goodman (2009).

La projection des individus sur le plan factoriel selon les saisons met en évidence des dynamiques nutritionnelles saisonnières spécifiques, reflétant l'adaptation des espèces aux variations pédoclimatiques méditerranéennes. Ces variations saisonnières soulignent l'importance de considérer la phénologie des plantes dans l'évaluation de leur potentiel nutritif (Diaz *et al.*, 2016).

Le premier axe, influencé par les variables de fermentescibilité et de composition chimique, différencie clairement les périodes de forte richesse nutritive (printemps et automne) de celles où la qualité nutritionnelle baisse (hiver et été). Cette saisonnalité nutritionnelle observée est réconfortée par Béchir *et al.* (2010) qui confirment des fluctuations nutritionnelles des espèces ligneuses. En automne, plusieurs espèces montrent une richesse nutritionnelle accrue. Les espèces *C. cirrhosa* et *F. angustifolia* se positionnent négativement sur l'Axe 1, reflétant des niveaux élevés en MAT et en paramètres de fermentation. Cette amélioration automnale pourrait s'expliquer en partie par la reprise de l'activité végétative après la sécheresse estivale, favorisée par le retour des précipitations, comme l'ont suggéré Papachristou *et al.* (2005).

Cependant ; le second axe, dominé par les fibres pariétales et les composés phénoliques, traduit les stratégies défensives et structurelles développées par les espèces notamment en hiver et en été. Ces adaptations saisonnières correspondent aux observations de Manousidis *et al.* (2016) sur les variations de la composition chimique des plantes méditerranéennes.

La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a permis d'identifier quatre groupes d'espèces ligneuses fourragères présentant des profils nutritionnels distincts. Cette discrimination des groupements ligneux selon leurs caractéristiques nutritionnelles rejoint l'approche utilisée par Gurgel *et al.* (2020), Idrissa *et al.* (2020) et récemment Culqui *et al.* (2025) qui ont tous appliqué une analyse par clusters pour regrouper des espèces fourragères selon leurs caractéristiques nutritionnelles.

Le premier cluster, dominé par les lianes, représenté principalement par *C. cirrhosa*, *R. ulmifolius* et *F. angustifolia*, se distingue par une haute digestibilité, des teneurs élevées en MAT et en MM, mais faibles en fibres totales, en MS et en TC. Ce profil nutritionnel supérieur est comparable à celui de la luzerne (Baumont *et al.*, 2018) et de *Sulla coronaria* (L.) Medik., 1787) (Chaker-Houd *et al.*, 2017). Les espèces de ce groupe représentent une source potentielle

de nutriments facilement disponibles pour les ruminants, particulièrement en automne et au printemps, ce qui en fait des ressources stratégiques pour les périodes de transition alimentaire. Les espèces de ce groupe représentent une source potentielle de nutriments facilement disponibles pour les ruminants, notamment ceux ayant des besoins nutritionnels élevés, comme en période de gestation, de lactation ou de croissance rapide.

Le Cluster 2, également dominé par les lianes, formé essentiellement par *H. helix*, *S. aspera* et *P. medea* présente des teneurs élevées en fibres structurales et faibles en composés phénoliques. Ce profil rappelle celui de certaines graminées fourragères, offrant un apport fibreux important mais une valeur nutritive modérée (Baumont *et al.*, 2018). Cette richesse en fibres pour certaines lianes s'explique par leurs adaptations structurelles développées pour assurer une croissance verticale (Schnitzer *et al.*, 2005). Néanmoins, ces espèces peuvent jouer un rôle crucial dans le maintien de la fonction ruminale en fournissant le lest nécessaire durant les périodes où les autres fourrages sont moins disponibles.

Le Cluster 3, décrit exclusivement par les deux espèces : l'arbuste *M. communis* et la liane *R. peregrina*, se caractérise par de très fortes teneurs en tanins totaux et en polyphénols totaux. Bien que ces composés puissent avoir des effets bénéfiques (propriétés anthelmintiques) (Hoste *et al.*, 2006) et préviennent la météorisation (Yagoubi *et al.*, 2018)), leur forte concentration peut potentiellement réduire la digestibilité (Naumann *et al.*, 2017), particulièrement en été où les concentrations sont maximales. Ce profil est typique des espèces arbustives méditerranéennes qui développent des défenses chimiques face aux stress environnementaux et à la pression d'herbivorie.

Le Cluster 4, constitué uniquement les arbres et les arbustes notamment *E. arborea*, *Q. coccofera* et *Q. canariensis* qui se caractérisent par des teneurs élevées en MS, en MO et en tanins condensés avec une forte activité biologique, mais une digestibilité réduite. Ce profil évoque les espèces ligneuses méditerranéennes étudiées par Bouazza *et al.* (2012) et Chebli *et al.* (2021), dont la valeur nutritive est limitée par l'activité biologique de leurs tanins. Ces espèces montrent des teneurs élevées en MS dues à leur structure morphologique lignifiée et leur adaptation aux contraintes environnementales. En revanche, ces espèces montrent une capacité anti-méthanogène importante due principalement à l'aptitude de leurs TC à inhiber les archées méthanogènes (Mueller-Harvey, 2006) et à modifier les populations de protozoaires responsables à digérer les fibres en offrant le H₂ précurseur de la méthanogenèse entérique (Verma *et al.*, 2021).

IV.4. Implications de la typologie dans la gestion sylvopastorale de l'aulnaie de Ain Khia

La typologie des espèces ligneuses fourragères offre des perspectives intéressantes pour la gestion de l'aulnaie glutineuse de Ain Khia. Les espèces du Cluster 1, comme *C. cirrhosa*, *R. ulmifolius* et *F. angustifolia* en automne et au printemps, pourraient être privilégiées pour leur haute valeur nutritive, particulièrement pour les ruminants à besoins élevés.

Les espèces du Cluster 4, comme *E. arborea* et *Q. coccifera*, malgré leur digestibilité limitée, pourraient jouer un rôle dans la diversification du régime alimentaire des ruminants, notamment des caprins. Comme l'ont souligné Chebli *et al.* (2022), les caprins peuvent inclure jusqu'à 80% de matière sèche d'espèces arbustives dans leur ration prélevée sur parcours.

La complémentarité nutritionnelle entre les différents clusters suggère l'intérêt d'une gestion favorisant la diversité des espèces ligneuses, permettant aux animaux de composer un régime équilibré à travers leurs choix alimentaires. Cette approche rejoint les conclusions de Silue *et al.* (2014) qui ont identifié 68 espèces ligneuses fourragères dans la région du Poro en Côte d'Ivoire.

La gestion saisonnière des ressources fourragères ligneuses devrait tenir compte des variations de qualité nutritive observées. D'ailleurs, durant l'automne et le printemps les espèces du Cluster 1 (*C. cirrhosa*, *R. ulmifolius* et *F. angustifolia*) offrent leur meilleure valeur nutritive. En hiver, certaines espèces comme *H. helix* (Cluster 2) et *Myrtus communis* (Cluster 3) peuvent constituer des ressources complémentaires importantes. En été, période critique, les espèces comme *S. aspera*, *A. glutinosa* et *P. medea* (Cluster 2) et *R. peregrina* (Cluster 3) peuvent contribuer à diversifier le régime alimentaire des ruminants.

Cette typologie constitue un outil précieux pour la gestion durable de ce système sylvopastoral unique, permettant d'optimiser l'utilisation des ressources fourragères ligneuses tout en préservant l'équilibre écologique de l'aulnaie. Comme le souligne la fiche descriptive Ramsar (2019), ce milieu forestier exceptionnel est menacé par la disparition d'arbres et d'arbustes due à la coupe illégale et à l'expansion agricole, d'où l'importance d'une gestion raisonnée des ressources fourragères.

Ces résultats suggèrent que la sélection judicieuse des espèces ligneuses fourragères, tenant compte de leurs profils nutritionnels et de leur variabilité saisonnière, pourrait optimiser la gestion des ressources fourragères de l'aulnaie, notamment lors des périodes de soudure.

Conclusion et perspectives

Notre étude constitue une base de données originale sur les valeurs nutritionnelles des ligneux consommés par les ruminants dans l'aulnaie de Ain Khia, permettant d'explorer le potentiel nutritif méconnu de ces espèces, notamment les lianes.

En effet notre démarche s'inscrit dans un cadre de valorisation des ressources fourragères naturelles locales, particulièrement pertinente dans un contexte de changement climatique et de recherche d'alternatives durables aux fourrages conventionnels. Ces espèces présentent l'avantage de maintenir une production fourragère même en périodes de stress hydrique, offrant ainsi une solution stratégique pour sécuriser l'alimentation des ruminants en extensif lors des périodes de soudure, tout en contribuant à la préservation des écosystèmes naturels. Au total, notre choix est porté sur treize espèces ligneuses dont quatre arbres, quatre arbustes et cinq lianes.

Les espèces arborées étudiées présentent un potentiel fourrager considérable de par leur teneur élevée en azote permettant non seulement de couvrir les besoins d'entretien mais également de répondre aux exigences nutritionnelles des animaux en phase de production. Parmi ces espèces, *F. angustifolia* se distingue par son profil exceptionnel, caractérisé par une teneur élevée en MAT, une faible teneur en parois cellulaires, une concentration minimale en TC et une activité biologique négligeable de ces derniers. Cette composition spécifique lui confère une digestibilité remarquable et une valeur énergétique importante faisant de cette espèce un fourrage alternatif de haute qualité. La présence de composés phénoliques et notamment des TC dans *A. glutinosa* et *S. alba* influence sa digestibilité, mais cette dernière reste généralement sous le seuil critique de 50 g/kg MS, ce qui préserve sa valeur nutritionnelle. Au-delà de cette concentration, ces composés peuvent avoir un effet anti-nutritionnel, limitant significativement la digestibilité et l'utilisation des nutriments par les ruminants.

En ce qui concerne les lianes étudiées, particulièrement *C. cirrhosa* et *R. ulmifolius*, se distinguent par une combinaison remarquable de digestibilité élevée, de richesse en azote et de faibles teneurs en tanins condensés, répondant efficacement aux exigences nutritionnelles des animaux, y compris en phases de production. Leur capacité à maintenir un profil nutritionnel stable malgré les variations saisonnières en fait des alternatives viables aux fourrages conventionnels dans les systèmes sylvopastoraux. Les défis posés par certaines espèces, comme *H. helix*, caractérisée par des teneurs élevées en fibres et *S. aspera* et *R. peregrina* ayant des tanins biologiquement actifs, peuvent être surmontés par des stratégies adaptées, notamment l'utilisation du PEG.

Les espèces arbustives présentent un profil nutritionnel de qualité moyenne par rapport aux arbres et aux lianes, avec des teneurs modérées en azote et des concentrations élevées en parois cellulaires et en composés phénoliques. *M. communis* se distingue toutefois par une stabilité de sa valeur nutritive et cela indépendamment des saisons, avec une digestibilité et une valeur énergétique supérieures au printemps et en été. À l'opposé, *Q. coccifera* et *E. arborea*, malgré un potentiel anti-méthanogène prometteur, nécessitent une utilisation prudente en raison de leur forte teneur en fibres et en tanins qui peuvent compromettre leur valorisation nutritionnelle.

L'impact des tanins, mesuré tant par leur concentration que par leur activité biologique, apparaît déterminant dans la modulation de la fermentation *in vitro* et de la production de gaz, y compris le méthane. L'ajout de PEG, neutralisant de l'effet des tanins, a permis de mettre en exergue une partie de ces interactions complexes.

Un aspect particulièrement prometteur concerne l'effet dépressif sur la production de méthane observé pour *C. cirrhosa*, suggérant un mécanisme d'action spécifique sur la méthanogenèse plutôt qu'une inhibition générale de la fermentation ruminale. Cette découverte ouvre des perspectives intéressantes pour la réduction des émissions de méthane entérique, positionnant cette espèce comme un fourrage potentiellement capable de concilier haute digestibilité et faible empreinte environnementale.

La typologie établie à partir de l'analyse exploratoire a permis de répartir les espèces ligneuses fourragères étudiées en quatre groupes distincts, caractérisés par des profils nutritionnels complémentaires. En effet, le premier groupe (*F. angustifolia* et *R. ulmofolius* au printemps, en automne et en été, *C. cirrhosa* en automne et au printemps, *S. aspera* en hiver et en été en plus de *A. glutinosa* et *S. alba* en automne) se distingue par une haute digestibilité et des teneurs élevées en azote, offrant un potentiel nutritif comparable aux légumineuses fourragères telles que la luzerne et le sulla. Le deuxième groupe (*H. helix* dans toutes les saisons, *S. aspera* en automne et au printemps, *C. cirrhosa* en hiver en plus de *P. media* en automne, au printemps et en été et *A. glutinosa* en été et au printemps), présente des teneurs élevées en fibres, jouant un rôle potentiel dans le maintien de la fonction ruminale. Alors que le troisième groupe (*M. communis* dans toutes les saisons, *R. peregrina* au printemps et en été et *R. ulmofolius* en hiver), quant à lui, se caractérise par des teneurs exceptionnelles en composés phénoliques, offrant des bénéfices sanitaires potentiels notamment contre les parasites gastro-intestinaux. En fin, le dernier groupe (*E. arborea* dans toutes les saisons, *Q. coccifera* et *Q. canariensis* en automne, au printemps et en été en plus de *S. alba* au printemps et en été et *P. media* en hiver), présente des teneurs élevées en matière sèche et tanins condensés biologiquement actifs. Les

espèces de ce groupe malgré leur digestibilité limitée due à leurs caractéristiques, sont particulièrement adaptées aux capacités métaboliques des caprins, qui tolèrent mieux les tanins. Cette classification constitue un outil précieux pour optimiser l'utilisation des ressources fourragères ligneuses dans les systèmes sylvopastoraux méditerranéens.

En outre, la typologie établie offre une double perspective de gestion à la fois des ressources naturelles de cet écosystème et des rations des ruminants et cela en fonction des saisons. Alors, les espèces du premier groupe notamment *C. cirrhosa*, *R. ulmifolius* et *F. angustifolia* devraient être privilégiées en automne et au printemps pour leur haute valeur nutritive, particulièrement pour les ruminants à besoins élevés. En hiver, les espèces comme *H. helix* (groupe 2) et *M. communis* (groupe 3) peuvent servir d'aliments complémentaires. Durant l'été, période critique en raison du stress hydrique et de la raréfaction des ressources conventionnelles, une ration diversifiée avec *S. aspera*, *A. glutinosa*, *P. media* (groupe 2) et *R. peregrina* (groupe 3) est recommandée pour maintenir un apport nutritionnel équilibré. Cette approche de gestion saisonnière, associée à la complémentarité nutritionnelle entre les groupes, garantit une couverture équilibrée des besoins alimentaires des animaux de race locale élevés en système extensif. Toutefois, l'efficacité de cette stratégie repose sur une adéquation entre la charge pastorale, exprimée en unités de gros bétail (UGB) par hectare, et la disponibilité en ressources fourragères, elle-même conditionnée par les variations climatiques et l'intensité du pâturage.

Par ailleurs, cette typologie constitue ainsi un outil précieux pour une gestion durable de l'aulnaie de Ain Khia, conciliant les besoins nutritionnels du bétail avec la préservation de cet écosystème à la fois unique et vulnérable. Cette stratégie de sélection judicieuse des espèces, basée sur leurs profils nutritionnels et leur diversité saisonnière, optimise l'utilisation des ressources fourragères, notamment lors des périodes de soudure, tout en contribuant à la conservation de la biodiversité de ce milieu forestier exceptionnel.

Pour connaître l'intérêt nutritionnel et alimentaire de ces fourrages ligneux aussi bien que celui des fourrages conventionnels, il serait nécessaire que des études complémentaires soient réalisées dans plusieurs domaines. Tout d'abord, il serait judicieux d'approfondir les études pour mieux cerner la valeur nutritive de ces ligneux en réalisant des mesures de digestibilité *in vivo* de la matière organique et d'absorption des minéraux, ainsi qu'une estimation de leur valeur protéique réelle afin d'attribuer des valeurs UF et PDI pour ces ligneux, permettant de les introduire dans d'éventuels calculs de rations et de mieux adapter les stratégies de complémentarité des animaux.

L'établissement d'équations allométriques pour prédire la biomasse foliaire et la détermination de la charge animale adéquate pour cet écosystème vulnérable constituent également un axe de recherche très intéressant. Ces approches permettraient d'estimer la disponibilité fourragère sans recourir à des méthodes destructives et de déterminer le nombre d'unité de gros bétail adéquate à l'hectare en fonction des saisons sans compromettre la régénération des espèces ligneuses.

Des études sur d'autres métabolites secondaires telles que les saponines et les huiles essentielles, en plus des recherches sur les éventuels risques antinutritionnels et toxiques ainsi que les molécules ayant un intérêt pour la santé animale et/ou l'environnement. Il serait également important de mieux connaître l'effet des conditions pédoclimatiques et de la saison sur la valeur nutritive de ces espèces.

L'ingestibilité et l'appétence des ligneux pour les ruminants sont également deux éléments déterminants qu'il faudra caractériser afin d'estimer la part de chaque fourrage dans la ration des ruminants. La biomasse produite par les ligneux constituera une voie de recherche très prometteuse, car de très bons ligneux sur le plan nutritionnel mais très peu productifs ou difficiles à pérenniser après exploitation ne seront pas forcément à promouvoir.

Ces suggestions sont également préconisées aussi pour les espèces non caractérisées à savoir : *Olea europaea*, *Quercus suber*, *Crataegus monogyna*, *Laurus nobilis*, *Calicotome spinosa* et *Pistacia lentiscus*.

Enfin, l'impact du broutage et de son degré d'intensité sur la régénération et la pérennité des espèces ligneuses dans l'écosystème de l'aulnaie glutineuse constitue un axe de recherche essentiel pour assurer la durabilité de cet écosystème sylvopastoral unique.

En somme, cette étude souligne l'importance d'une approche intégrée dans la gestion des ressources fourragères ligneuses de l'aulnaie de Ain Khir, alliant amélioration de la nutrition animale, préservation de la biodiversité et atténuation du changement climatique.

Références bibliographiques

1. Abdeddaim, M., Lombarkia, O., Abdeddaim, D., Farhat, R., Saadoudi, M., Noui, Y., & Lekbir, A. (2014). Biochemical characterization and nutritional properties of *Zizyphus lotus* fruits in Aures region, Northeastern of Algeria. *Annals Food Science and Technology*, 15(1), 75-81.
2. Abdelguerfi, A., Laouar, M., & M., M. (2008). Les productions fourragères et pastorales en Algérie : Situation et Possibilités d'Amélioration. *Revue Semestrielle "Agriculture & développement" (INVA, Alger)*, 6, 14-25.
3. Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *WIREs Computational Statistics*, 2(4), 433-459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
4. Aboagye, I. A., & Beauchemin, K. A. (2019). Potential of Molecular Weight and Structure of Tannins to Reduce Methane Emissions from Ruminants : A Review. *Animals*, 9(11), 856. <https://doi.org/10.3390/ani9110856>
5. Adem, R., & Ferrah, A. (2010). *Les productions fourragères en Algérie : Un déficit chronique*. GIDCA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31561.24167>
6. Akbağ, H. I., & Yurtman, Y. (2022). Concentrate and Polyethylene Glycol Supplementation in *in vitro* Incubations Enhance Ruminal Fermentation Characteristics of Some Shrub Species. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10(1), 1-15. <https://doi.org/10.33202/comuagri.1109739>
7. Al Rharad, A., El Aayadi, S., Avril, C., Souradjou, A., Sow, F., Camara, Y., Hornick, J.-L., & Boukrouh, S. (2025). Meta-Analysis of Dietary Tannins in Small Ruminant Diets : Effects on Growth Performance, Serum Metabolites, Antioxidant Status, Ruminal Fermentation, Meat Quality, and Fatty Acid Profile. *Animals*, 15(4), 596. <https://doi.org/10.3390/ani15040596>
8. Amiri, F., & Shariff, A. R. b M. (2012). Comparison of nutritive values of grasses and legume species using forage quality index. *Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST)*, 34(5), 577-586.
9. Ammar, H., López, S., & González, J. S. (2005). Assessment of the digestibility of some Mediterranean shrubs by *in vitro* techniques. *Animal Feed Science and Technology*, 119(3-4), 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.12.013>
10. Ammar, H., López, S., González, J. S., & Ranilla, M. J. (2004). Chemical composition and *in vitro* digestibility of some Spanish browse plant species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(2), 197-204. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1635>

11. Ammar, H., Salem, A. Z. M., & López, S. (2010). Impact of PEG 6000 on *in vitro* gas production kinetics of some Mediterranean shrubs in sheep. *The contributions of grasslands to the conservation of Mediterranean biodiversity*. Zaragoza : CIHEAM / CIBIO / FAO / SEEP. *Options Méditerranéennes*, 209-213.
12. AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1990). *Official Methods of Analysis*. 15th Edition. Washington DC.
13. Aouadi, H. (1989). • *Aouadi H., 1989. La végétation de l'Algérie nord-orientale : Histoire des influences anthropiques et cartographie a 1/ 200.000* [Thèse de doctorat]. Université Joseph Fourier. Grenoble.
14. Arab, H., Haddi, M. I, & Mehennaoui, S. (2009). Evaluation de la valeur nutritive par la composition chimique des principaux fourrages des zones aride et semi-aride en Algerie. *Sciences & technologie. C, Biotechnologies*, 30, 50-58.
15. Arbouche, Y., Arbouche, H. S., Arbouche, F., & Arbouche, R. (2012). Valeur fourragere des especes prelevees par *Gazella cuvieri* Ogilby, 1841 au niveau du Djebel Metlili (Algerie). *Archivos de Zootecnia*, 61(233), 145-148. <https://doi.org/10.4321/S0004-05922012000100016>
16. Aregawi, T., Melaku, S., & Nigatu, L. (2008). Management and utilization of browse species as livestock feed in semi-arid district of North Ethiopia. *Livestock Research for Rural Development*, 20(6). <http://www.lrrd.org/lrrd20/6/areg20086.htm>
17. Atti, N., Ben Salem, H., & Priolo, A. (2003). Effects of polyethylene glycol in concentrate or feed blocks on carcass composition and off al weight of Barbarine lambs fed *Acacia cyanophylla* Lindl. Foliage. *Animal Research*, 52(4), 363-375. <https://doi.org/10.1051/animres:2003022>
18. Baba Ahmed, F. (2005). *Evaluation de la contamination fécale de trois plans d'eau du complexe des zones humides d'El Kala (Oubeira, Mellah, Tonga)* [Thèse de magister]. Université Annaba.
19. Baumont, R., Aufrère, J., & Meschy, F. (2009). La valeur alimentaire des fourrages : Rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Fourrages*, 198, 153-173.
20. Baumont, R., Tran, G., Chapoutot, P., Maxin, G., Sauvart, D., Heuzé, V., Lemosquet, A., & Lamadon, A. (2018). Tables INRA de la valeur des aliments utilisés en France et dans les régions tempérées. In *Alimentation des ruminants* (p. 521-616). Editions Quæ, Versailles (France).
21. Bayssa, M., Negesse, T., & Tolera, A. (2016). Forage Quality and Methane Reduction Potentials of Selected Browse Species from Borana Rangeland, Southern Ethiopia.

- American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 11(3), 209-223.
<https://doi.org/10.5829/idosi.ajejr.2016.11.3.23363>
22. Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F., & McAllister, T. A. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 21. <https://doi.org/10.1071/EA07199>
 23. Bechir, A., Bechir, L., & Kabore-Zoungrana, C. (2009). Evaluation de la disponibilité saisonnière du fourrage ligneux en zone soudanienne du Tchad: Cas du terroir de N'Guetté 1. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(1). <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v3i1.42744>
 24. Belhadj, G. (1996). *Contribution à la cartographie des ornithocénoses en Algérie : Atlas de l'avifaune nicheuse du parc national d'El Kala* [Thèse de magister]. I.N.A, Harrach, Alger.
 25. Belouahem-Abed, D. (2012). *Etude écologique des peuplements forestiers des zones humides dans les régions de SKIKDA, ANNABA et EL TARF (Nord-Est algérien)* [Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar, Annaba]. <https://dspace.univ-annaba.dz/handle/123456789/1490>
 26. Belouahem-Abed, D., Belouahem, F., Benslama, M., De Bélair, G., & Muller, S. D. (2010). Les aulnaies de Numidie (N.E. algérien) : Biodiversité floristique, vulnérabilité et conservation. *Comptes Rendus. Biologies*, 334(1), 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.10.005>
 27. Belouahem-Abed, D., Belouahem, F., & De Bélair, G. (2009). Biodiversité floristique et vulnérabilité des aulnaies glutineuses de la Numidie Algérienne (N.E Algérien). *European Journal of Scientific Research*, 32(3), 329-361.
 28. Bencherchali, M., Houmani, Z., & Houmani, M. (2019). Composition chimique et valeur alimentaire pour les ruminants du frêne oxyphyllé (*Fraxinus oxyphylla* Bieb.). *Livestock Research for Rural Development*, 31. <http://www.lrrd.org/lrrd31/4/bench31056.html>
 29. Bencherif, S. (2011). *L'élevage pastoral et la céréaliculture dans la steppe algérienne. Évolution et possibilités de développement* [Phdthesis, AgroParisTech]. <https://pastel.hal.science/pastel-00586977>
 30. Benslama, M. (s. d.). *Les sols du complexe humide de l'Algérie Nord Orientale Formation Organisation et évolution* [Thèse de doctorat]. INA el Harrach, Alger.
 31. Benyacoub, S., & Chabi, Y. (2000). Diagnose écologique de l'avifaune du parc national d'el-kala composition—Statut—Repartition. *Synthèse*, 6(1), 7-98.

32. Benyacoub, S., Louanchi, M., Baba Ahmed, R., Benhouhou, S., Boulahbel, R., Chalabi, B., Haou, F., Rouag, R., & Ziane, N. (1998). *Plan directeur du parc national d'El-kala et du complexe des zones humides (Wilaya d'El-Tarf)* (p. 300). Direction générale des forêts.
33. Bernard, M., Ginane, C., Deiss, V., Emile, J., & Novak, S. (2020). Ingestion volontaire et digestibilité in vivo de feuilles de deux essences d'arbres, le frêne commun (*Fraxinus excelsior*) et le mûrier blanc (*Morus alba*). *Fourrages*, 242, 55-59.
34. Bessaoud, O. (2022). *De la sécurité à la souveraineté alimentaire* (p. 140). Édition CAPC, Alger. https://capc.dz/dernieres_pub/de-la-securite-a-la-souverainete-alimentaire/
35. Bessaoud, O., Pellissier, J.-P., Rolland, J.-P., & Khechimi, W. (2019). *Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie*. CIHEAM-IAMM. http://www.iamm.ciheam.org/ress_doc/opac_css/doc_num.php?explnum_id=18246
36. Bestman, M., Eekeren, N. van, Luske, B., Vonk, M., Anssems, E., Boosten, M., & Bree, M. van. (2014). Introducing trees in dairy and poultry farms - Experiences dairy and poultry farmers' networks in The Netherlands [Conference paper]. IFOAM Organic World Congress, Istanbul, Turkey. <https://orgprints.org/id/eprint/23894/>
37. Bıçakçı, E., & Türk, M. (2024). Determination of Seasonal Changes of Feed Value of Common Grazable Species Aşağı Gökdere Macquis Shrublands. *Turkish Journal of Range and Forage Science*, 5(1), 56-66. <https://doi.org/10.51801/turkjrfs.1443063>
38. Bonizzi, S., Colombini, S., Pavesi, M., Zucali, M., Failla, O., Dragoni, F., Amon, B., Ragaglini, G., & Sandrucci, A. (2025). Can tree leaves be an alternative source of feed for dairy ruminants ? *Agroforestry Systems*, 99(2), 47. <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01150-7>
39. Bouallala, M. (2013). *Etude floristique et nutritive spatio-temporelle des parcours camelins du Sahara Occidental algérien. Cas des régions de Béchar et Tindouf* (Algérie) [Thesis, Université Kasdi Merbah, Ouargla]. <https://agritrop.cirad.fr/583725/>
40. Bouallala, M., Chehma, A., & Bensetti, M. (2011). Variation de la composition chimique de principales plantes broutées par le dromadaire du Sud-Ouest Algérien. *Livestock Research for Rural Development*, 23. <http://www.lrrd.org/lrrd23/5/Boua23107.htm>
41. Bouazza, L. (2014). *Etude de la valeur nutritive de légumineuses arbustives du genre Acacia. Effets spécifiques de leurs hautes teneurs en tannins condensés sur la méthanogénèse ruminale d'ovins* [Doctoral dissertation]. Université Constantine 1, Algérie.

42. Bouazza, L., Bodas, R., Boufennara, S., Bousseboua, H., & López, S. (2012). Nutritive evaluation of foliage from fodder trees and shrubs characteristic of Algerian arid and semi-arid areas. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 21(3), 521-536. <https://doi.org/10.22358/jafs/66126/2012>
43. Bouazza, L., Boufennara, S., Bensaada, M., Zeraib, A., Rahal, K., Saro, C., Ranilla, M. J., & López, S. (2020). *In vitro* screening of Algerian steppe browse plants for digestibility, rumen fermentation profile and methane mitigation. *Agroforestry Systems*, 94(4), 1433-1443. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00408-1>
44. Boubaker, A., Kayouli, C., & Buldgen, A. (2004). Composition chimique et teneur en composés phénoliques des espèces arbustives du Nord-Ouest de la Tunisie. *Réhabilitation des pâturages et des parcours en milieux méditerranéens, Cahiers Options Méditerranéennes*, 315-317. https://www.academia.edu/24283010/Composition_chimique_et_teneur_en_compos%C3%A9s_ph%C3%A9noliques_des_esp%C3%A8ces_arbustives_du_Nord_Ouest_de_la_Tunisie
45. Boubekur, S., Mefti Korteb, H., & Houmani, M. (2017). Prédiction de la valeur alimentaire du *pistacia atlantica* Desf. et de l'*acacia farnesiana* (L.) Willd. *AGROBIOLOGIA*, 7(2), 603-609.
46. Boudraa, S., Hambaba, L., Zidani, S., & Boudraa, H. (2010). Composition minérale et vitaminique des fruits de cinq espèces sous exploitées en Algérie : *Celtis australis* L., *Crataegus azarolus* L., *Crataegus monogyna* Jacq., *Elaeagnus angustifolia* L. et *Zizyphus lotus* L. *Fruits*, 65(2), 75-84. <https://doi.org/10.1051/fruits/20010003>
47. Boufennara, S. (2017). *Effet des tanins sur la fermentescibilité in vitro et la digestibilité in sacco de végétaux et de sous produits de l'agronomie des zones arides*. [Université Frères Mentouri - Constantine 1]. <http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/4193>
48. Boufennara, S., Bouazza, L., Bodas, R., Bousseboua, H., & López, S. (2013). Nutritive evaluation of foliage from some Acacia trees characteristic of Algerian arid and semi-arid areas. *Options Méditerranéennes A*, 107, 63-68.
49. Boufennara, S., Bouazza, L., López, S., Bousseboua, H., & Bodas, R. (2013). Effect of polyethylene glycol addition on methane production from some Algerian browse plant species in an *in vitro* gas system. *14th International Seminar of the Sub-Network on Nutrition of the FAO-CIHEAM Inter-Regional Cooperative Research and Development Network on Sheep and Goats, "Feeding and Management Strategies to Improve Livestock*

- Productivity, Welfare and Product Quality under Climate Change*, 283-287.
<https://digital.csic.es/handle/10261/95729>
50. Boufennara, S., Bouazza, L., Medjekal, S., Rahal, K., Mateos, I., Ranilla, M. J., & Lopez, S. (2019). Comparing Chemical Composition and Digestibility of Pedicels and Palm Leaves as a Source for Livestock Feeding by *in vitro* and *in situ* Techniques. *Journal of Rangeland Science*, 9(4), 378-391.
 51. Boufennara, S., Lopez, S., Bousseboua, H., Bodas, R., & Bouazza, L. (2012). Chemical composition and digestibility of some browse plant species collected from Algerian arid rangelands. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(1), 88-98.
<https://doi.org/10.5424/sjar/2012101-134-11>
 52. Boufennara, S., Medjekal, S., Bouazza, L., Hamedellou, A., Bella, I., Ayeb, N. E., & Lopez, S. (2022). *In vitro* Gas Production and Fermentation Parameters of Some Plants Species Collected from Algerian Arid Rangelands. *Journal of Rangeland Science*, 12(1), 77-86. <https://doi.org/10.30495/rs.2022.681818>
 53. Boulahbal, R. (2012). *La prédation sur les populations de Cyanistes caeruleus ultramarinus (Paridae, Aves) dans les forêts du nord-est algérien* [Doctoral dissertation]. Université Badji Mokhtar, Annaba.
 54. Bourbouze, A. (1981). *L'élevage dans la montagne marocaine : Organisation de l'espace et utilisation des parcours par les éleveurs du Haut-Atlas* [Thèse de doctorat]. INAPG, Grignon (France).
 55. BOUZIDA, S. (2008). *Impact du chargement et de la diversification fourragère sur les performances du bovin laitier cas des exploitations de la wilaya de Tizi-Ouzou Samira Bouzida* [Thèse de magister]. ENSA, El-Harrach (Alger).
 56. Broom, D. M., Galindo, F. A., & Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1771), 20132025.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025>
 57. Brutti, D. D., Canozzi, M. E. A., Sartori, E. D., Colombatto, D., & Barcellos, J. O. J. (2023). Effects of the use of tannins on the ruminal fermentation of cattle : A meta-analysis and meta-regression. *Animal Feed Science and Technology*, 306, 115806.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115806>
 58. Burgess, P. J., Crous-Duran, J., den Herder, M., Dupraz, C., Fagerholm, N., Freese, D., Garnett, K., Graves, A. R., Hermansen, J. E., Liagre, F., Mirck, J., Moreno, G., Mosquera-Losada, M. R., Palma, J. H. N., Pantera, A., Plieninger, T., & Upson, M. (2015).

- AGFORWARD Project Periodic Report : January to December 2014. *AGroFOREstry That Will Advance Rural Development*.
<https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10400.5/9199>
59. Cabiddu, A., Decandia, M., Sitzia, M., & Molle, G. (2000). A note on the chemical composition and tannin content of some Mediterranean shrubs browsed by Sarda goats. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 52, 175-178.
 60. Camacho, L. M., Rojo, R., Salem, A. Z. M., Mendoza, G. D., López, D., Tinoco, J. L., Albarrán, B., & Montañez-Valdez, O. D. (2010). *In vitro* ruminal fermentation kinetics and energy utilization of three Mexican tree fodder species during the rainy and dry period. *Animal Feed Science and Technology*, 160(3-4), 110-120.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.07.008>
 61. Canul-Solis, J., Campos-Navarrete, M., Piñeiro-Vázquez, A., Casanova-Lugo, F., Barros-Rodríguez, M., Chay-Canul, A., Cárdenas-Medina, J., & Castillo-Sánchez, L. (2020). Mitigation of Rumen Methane Emissions with Foliage and Pods of Tropical Trees. *Animals*, 10(5), 843. <https://doi.org/10.3390/ani10050843>
 62. Cardoso, A. S., Berndt, A., Leytem, A., Alves, B. J. R., De Carvalho, I. D. N. O., De Barros Soares, L. H., Urquiaga, S., & Boddey, R. M. (2016). Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, 143, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.007>
 63. Castro, M., Teixeira, A., & Fernández-Núñez, E. (2021). The nutritive value of different Mediterranean browse species used as animal feeds under oak silvopastoral systems in Northern Portugal. *Agroforestry Systems*, 95(2), 269-278.
<https://doi.org/10.1007/s10457-020-00588-1>
 64. Centre National D'étude Et D'analyses Pour La Population Et Le Developpement (CENEAP). (2011). *Actualisation du zonage du parc national d'El-Kala. Diagnostic et état des lieux. Phase 1, 179p, Phase 2, 141p et Phase 3, 103p*.
 65. Chachoua, I. (2015). *L'urée dans l'alimentation des ovins : Conséquences sur la gestation, la parturition et le croît* [Doctoral dissertation]. Université de Batna.
 66. Chaker-Houd, K., Mebirouk-Boudechiche, L., Maatallah, S., & El-Hamza, T. (2017). Valeur alimentaire des populations naturelles de *Sulla coronaria* L. du nord-est de l'Algérie. *Fourrages*, 232, 347-352.
 67. Chara', J., Reyes, E., Peri, P., Otte, J., Arce, E., & Schneider, F. (2019). *Silvopastoral Systems and their Contribution to Improved Resource Use and Sustainable Development Goals : Evidence from Latin America* (p. 60). FAO, CIPAV and agri benchmark.

- https://cipav.org.co/sdm_downloads/silvopastoral-systems-contribution-improved-resource-use-and-sustainable-development-goals/
68. Chebli, Y., El Otmani, S., Chentouf, M., Hornick, J.-L., & Cabaraux, J.-F. (2021). Temporal Variations in Chemical Composition, *in vitro* Digestibility, and Metabolizable Energy of Plant Species Browsed by Goats in Southern Mediterranean Forest Rangeland. *Animals*, 11(5), 1441. <https://doi.org/10.3390/ani11051441>
 69. Chebli, Y., El Otmani, S., Hornick, J.-L., Keli, A., Bindelle, J., Cabaraux, J.-F., & Chentouf, M. (2022). Forage Availability and Quality, and Feeding Behaviour of Indigenous Goats Grazing in a Mediterranean Silvopastoral System. *Ruminants*, 2(1), 74-89. <https://doi.org/10.3390/ruminants2010004>
 70. Chehma, A. (2005). *Étude floristique et nutritive des parcours camelins du Sahara septentrional algérien. Cas des régions de Ouargla et Ghardaia* [Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah, Ouargla]. <https://dspace.univ-annaba.dz/handle/123456789/1457>
 71. Chehma, A., Benabdelhafid, M., & Hanani, A. (2009). Essais d'amélioration de la valeur azotée des sous-produits du palmier dattier (pédicelles de dattes et palmes sèches) par traitement à l'ammoniac et à l'urée. *Livestock Research for Rural Development*. <http://www.lrrd.org/lrrd21/5/cheh21077.htm>
 72. Chehma, A., Faye, B., & Bastianelli, D. (2010). Valeurs nutritionnelles de plantes vivaces des parcours sahariens algériens pour dromadaires. *Fourrages*, 204, 263-268.
 73. Chehma, A., & Longo-Hammouda, F.-H. (2004). Bilan azoté et gain de poids, chez le dromadaire et le mouton, alimentés à base de sous-produits du palmier dattier, de la paille d'orge et du drinn « *Aristida pungens* ». *Cahiers Agricultures*, 13(2), Article 2.
 74. Chehma, A., & Youcef, F. (2009). Variations saisonnières des caractéristiques floristiques et de la composition chimique des parcours sahariens du Sud-Est algérien. *Sécheresse*, 20(4), 373-381. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0203>
 75. Chemouri, S. (2021). *Impact of weeding methods on the floristic diversity and valorization of weeds in citrus orchards in the region of Tlemcen (Northwest of Algeria)* [Thesis, University of Mostaganem]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/17909>
 76. Chentli, A. (2015). *Valorisation nutritionnelle d'Opuntia et Acacia spp. Dans l'alimentation des ruminants. Effets de hautes teneurs en tannins et oxalates sur l'activité dumicrobiote ruminal* [Doctoral dissertation]. Université des Frères Mentouri, Constantine.

77. Chepel, V., Lisun, V., & Skrypnik, L. (2020). Changes in the Content of Some Groups of Phenolic Compounds and Biological Activity of Extracts of Various Parts of Heather (*Calluna vulgaris* (L.) Hull) at Different Growth Stages. *Plants*, 9(8), 926. <https://doi.org/10.3390/plants9080926>
78. Chettibi, A. (2021). *Utilisation des habitats et facteurs de distribution de certaines espèces aviennes dans les zones humides du Nord-Est Algérie* [Doctoral dissertation]. Université de M'sila.
79. Cubillos, A. M., Vallejo, V. E., Arbeli, Z., Terán, W., Dick, R. P., Molina, C. H., Molina, E., & Roldan, F. (2016). Effect of the conversion of conventional pasture to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. *European Journal of Soil Biology*, 72, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.003>
80. Culqui, L., Huaman-Pilco, Á. F., Juarez-Contreras, L., Vigo, C. N., Goñas, M., Pariente-Mondragón, E., Maicelo-Quintana, J. L., & Oliva-Cruz, M. (2025). Nutritional potential of native shrub species for cattle feeding in northeastern Peru. *Rangeland Ecology & Management*, 98, 600-608. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.11.004>
81. De Belair, G. (1990). *Structure, fonctionnement et perspective de gestion de quatre éco-complexe lacustres et marécageux (El Kala, Algérie), extrême orientale*. [Thèse de doctorat]. Université USTL Montpellier II.
82. Decandia, M., Cabiddu, A., Sitzia, M., & Molle, G. (2008). Polyethylene glycol influences feeding behaviour of dairy goats browsing on bushland with different herbage cover. *Livestock Science*, 116(1-3), 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.10.001>
83. Delaby, L., Nozière, P., & Sauvant, D. (2018). *Alimentation des ruminants : INRA 2018*. Editions Quae. <https://international.scholarvox.com/catalog/book/88863541>
84. Dey, A., Dutta, N., Sharma, K., & Pattanaik, A. K. (2008). Effect of dietary inclusion of *Ficus infectoria* leaves as a protectant of proteins on the performance of lambs. *Small Ruminant Research*, 75(2-3), 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2007.06.013>
85. Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Colin Prentice, I., Garnier, E., Bönisch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, A. T., Dickie, J., Gillison, A. N., Zanne, A. E., ... Gorné, L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167-171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>

86. Dione, A., Bathily, A., Sarr, O., Diarra, A. R., Ngom, D., & Guissé, A. (s. d.). Caractérisation bromatologique et nutritive des ligneux fourragers dans la zone agropastorale de Ngouye au Sénégal. *Journal of Applied Biosciences*, 177, 18471-18498.
87. Direction Generale des Forêts (DGF). (2003). *Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Aulnaie de Aïn Khia, Wilaya d'El Tarf* (p. 8).
88. Direction Générale des Forêts (DGF). (2006). *Atlas des parcs nationaux algériens*. Chemin Doudou Mokhtar - Ben Aknoun – Alger.
89. Dube, F., Thevathasan, N. V., Zagal, E., Gordon, A. M., Stolpe, N. B., & Espinosa, M. (2011). Carbon Sequestration Potential of Silvopastoral and Other Land Use Systems in the Chilean Patagonia. In B. M. Kumar & P. K. R. Nair (Éds.), *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems* (Vol. 8, p. 101-127). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_6
90. Dzowela, B. H., Hove, L., Topps, J. H., & Mafongoya, P. L. (1995). Nutritional and anti-nutritional characters and rumen degradability of dry matter and nitrogen for some multipurpose tree species with potential for agroforestry in Zimbabwe. *Animal Feed Science and Technology*, 55(3-4), 207-214. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00803-U](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00803-U)
91. Elahi, M. Y., Nia, M. M., Salem, A. Z. M., Mansouri, H., Olivares-Pérez, J., Cerrillo-Soto, M. A., & Kholif, A. E. (2014). Effect of Polyethylene Glycol on *in Vitro* Gas Production Kinetics of *Prosopis Cineraria* Leaves at Different Growth Stages. *Italian Journal of Animal Science*, 13(2), 3175. <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3175>
92. Emile, J. C., Barre, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., & Novak, S. (2017). Les arbres, une ressource fourragère au pâturage pour des bovins laitiers ? *Fourrages*, 230, 155-160.
93. Ertekin, İ., Atiş, İ., Yilmaz, Ş., Can, E., & Kizilşimşek, M. (2019). Comparison of Shrub Leaves in terms of Chemical Composition and Nutritive Value. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(5), 781-786. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.v22i45606.530946>
94. Eseceli, H. (2020). Nutrient and Mineral Contents, and In vitro Digestibility of Kermes Oak (*Quercus coccifera* L.) and Mock Privet (*Phillyrea latifolia* L.). *Alinteri Journal of Agricultural Sciences*, 35(2), 100-106. <https://doi.org/10.47059/alinteri/V35I2/AJAS20080>
95. Etienne, M. (1996). *Research on temperate and tropical silvopastoral systems : A review*. INRA Editions. <https://hal.inrae.fr/hal-02835834>

96. EURL- T.A.D - CONSULT – Territoire. Aménagement. Développement. (2011). *Plan Directeur de Gestion des Sites Ramsar du PNEK (Lac Tonga—Lac Oubeira—Lac Mellah—Lac Bleu—Lac Noir—Aulnaie Ain Khiair). Phase 2 évaluation et interprétation des données parc national d'El-Kala. Aulnaie Ain Khiair* (p. 23).
97. Fadel Elseed, A. M. A., Amin, A. E., Khadiga, Ati, A. A., Sekine, J., Hishinuma, M., & Hamana, K. (2002). Nutritive Evaluation of Some Fodder Tree Species during the Dry Season in Central Sudan. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 15(6), 844-850. <https://doi.org/10.5713/ajas.2002.844>
98. FAO, IFAD, WHO, WFP, & UNICEF. (2022). *L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde. Réorienter les politiques alimentaires et agricoles pour rendre l'alimentation saine plus abordable* (FAO). <https://doi.org/10.4060/cc0639fr>
99. Ferraz-de-Oliveira, M. I., Azeda, C., & Pinto-Correia, T. (2016). Management of Montados and Dehesas for High Nature Value: An interdisciplinary pathway. *Agroforestry Systems*, 90(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9900-8>
100. Frutos, P., Hervás, G., Giráldez, F. J., & Mantecón, A. R. (2004). Review. Tannins and ruminant nutrition. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2(2), 191-202. <https://doi.org/10.5424/sjar/2004022-73>
101. Garrett, H. E. (Éd.). (2009). *North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice* (2^e éd.). Wiley. <https://doi.org/10.2134/2009.northamericanagroforestry.2ed>
102. Garrett, H. E. “Gene”, Wolz, K. J., Walter, W. D. “Dusty”, Godsey, L. D., & McGraw, R. L. (2021). Alley Cropping Practices. In H. E. “Gene” Garrett, S. Jose, & M. A. Gold (Éds.), *North American Agroforestry* (1^{re} éd., p. 163-204). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780891183785.ch7>
103. Garrett, H. E., Jose, S., Gold, M. A., & John Wiley & Sons (Éds.). (2022). *North american agroforestry* (3rd edition). Wiley.
104. Garrity, D. P. (2004). Agroforestry and the achievement of the Millennium Development Goals. *Agroforestry Systems*, 61-62(1-3), 5-17. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028986.37502.7c>
105. Gemedé, H. F., & Ratta, N. (2014). Antinutritional Factors in Plant Foods : Potential Health Benefits and Adverse Effects. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(4), Article 4. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20140304.18>
106. Gentry, A. H. (1992). The distribution and evolution of climbing plants. In F. E. Putz & H. A. Mooney (Éds.), *The Biology of Vines* (p. 3-50). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511897658.003>

107. Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock : A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. FAO.
<http://www.fao.org/docrep/018/i3437e/i3437e00.htm>
108. Getachew, A. (2005). *Evaluation of forage yield and effects of forms of feeding of Acacia saligna on intake and live weight gain of Farta sheep fed on Grass hay* [Doctoral dissertation]. Haramaya University, Ethiopia.
109. Getachew, G., Blümmel, M., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (1998). *In vitro* gas measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds : A review. *Animal Feed Science and Technology*, 72(3-4), 261-281. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(97\)00189-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(97)00189-2)
110. Ghasemzadeh, A., Jaafar, H. Z. E., & Rahmat, A. (2010). Antioxidant Activities, Total Phenolics and Flavonoids Content in Two Varieties of Malaysia Young Ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Molecules*, 15(6), 4324-4333.
<https://doi.org/10.3390/molecules15064324>
111. Gilboa, N., Perevolotsky, A., Landau, S., Nitsan, Z., & Silanikove, N. (2000). Increasing productivity in goats grazing Mediterranean woodland and scrubland by supplementation of polyethylene glycol. *Small Ruminant Research*, 38(2), 183-190.
[https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(00\)00151-6](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(00)00151-6)
112. Ginane, C., Bernard, M., Deiss, V., Emile, C., Novak, S., & Beral, C. (2017). Fodder trees as an alternative resource to feed ruminants : Voluntary intake and *in vivo* digestibility of white mulberry (*Morus alba*) and common ash (*Fraxinus excelsior*) leaves in sheep. *10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Clermont-Ferrand, France. Cambridge University Press, Advances in Animal Biosciences*, 9 (3).
113. Giraldo, C., Escobar, F., Chará, J. D., & Calle, Z. (2011). The adoption of silvopastoral systems promotes the recovery of ecological processes regulated by dung beetles in the Colombian Andes : Ecological processes regulated by dung beetles. *Insect Conservation and Diversity*, 4(2), 115-122. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2010.00112.x>
114. Grimes, S. (2005). *Plan de gestion de l'aire marine du parc national d'El Kala*. Projet MedMPA, PNUE, PAM, CAR-ASP.
115. Guerrero, M., Cerrillo-Soto, M. A., Ramírez, R. G., Salem, A. Z. M., González, H., & Juárez-Reyes, A. S. (2012). Influence of polyethylene glycol on *in vitro* gas production profiles and microbial protein synthesis of some shrub species. *Animal Feed Science and Technology*, 176(1-4), 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.005>

116. Guimarães-Beelen, P. M., Berchielli, T. T., Beelen, R., & Medeiros, A. N. (2006). Influence of condensed tannins from Brazilian semi-arid legumes on ruminal degradability, microbial colonization and ruminal enzymatic activity in Saanen goats. *Small Ruminant Research*, 61(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.01.007>
117. Gurgel, A. L. C., Difante, G. D. S., Montagner, D. B., Euclides, V. P. B., Araujo, A. R. D., & Santana, J. C. S. (2021). Principal component analysis of steers performance and structural and nutritional characteristics of Mombasa grass. *Ciência Rural*, 51(1), e20200306. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200306>
118. Gursoy, E. (2024). Potential feeding value, feed quality, microbial protein production, and antimethanogenic properties of tree leaves admixed with Italian ryegrass at different ratios using *in vitro* gas production. *South African Journal of Animal Science*, 53(4), 550-559. <https://doi.org/10.4314/sajas.v53i4.09>
119. Gurung, N. (2019). The Effect of Growing Season on the Nutrient Composition and *in Vitro* True Digestibility of Browse and Forb Species Commonly Consumed by Goats in the Southeastern United States. *World Journal of Agriculture and Soil Science*, 3(2). <https://doi.org/10.33552/WJASS.2019.03.000556>
120. Haddi, M.-L., Arab, H., Yacoub, F., Hornick, J.-L., Rollin, F., & Mehennaoui, S. (2009). Seasonal changes in chemical composition and *in vitro* gas production of six plants from Eastern Algerian arid regions. *Livestock Research for Rural Development*, 21. <http://www.lrrd.org/lrrd21/4/hadd21047.htm>
121. Haddi, M.-L., Filacorda, S., Meniai, K., Rollin, F., & Susmel, P. (2003). *In vitro* fermentation kinetics of some halophyte shrubs sampled at three stages of maturity. *Animal Feed Science and Technology*, 104(1-4), 215-225. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00323-1](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00323-1)
122. Hagerman, A. E., Robbins, C. T., Weerasuriya, Y., Wilson, T. C., & McArthur, C. (1992). Tannin Chemistry in Relation to Digestion. *Journal of Range Management*, 45(1), 57. <https://doi.org/10.2307/4002526>
123. Häring, D. A., Scharenberg, A., Heckendorn, F., Dohme, F., Lüscher, A., Maurer, V., Suter, D., & Hertzberg, H. (2008). Tanniferous forage plants : Agronomic performance, palatability and efficacy against parasitic nematodes in sheep. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(1), 19-29. <https://doi.org/10.1017/S1742170507002049>
124. Hassen, A., Ebro, A., Kurtu, M., & Treydte, A. C. (2010). Livestock feed resources utilization and management as influenced by altitude in the Central Highlands of

- Ethiopia. *Livestock Research for Rural Development*, 22(12).
<http://www.lrrd.org/lrrd22/12/hass22229.htm>
125. Hattas, D., Scogings, P. F., & Julkunen-Tiitto, R. (2017). Does the Growth Differentiation Balance Hypothesis Explain Allocation to Secondary Metabolites in *Combretum apiculatum*, an African Savanna Woody Species ? *Journal of Chemical Ecology*, 43(2), 153-163. <https://doi.org/10.1007/s10886-016-0808-6>
 126. Holechek, J. L. (1984). Comparative Contribution of Grasses, Forbs, and Shrubs to the Nutrition of Range Ungulates. *Rangelands Archives*, 6(6), 261-263.
 127. Homewood, K. M. (1993). Livestock Economy and Ecology in El Kala, Algeria : Evaluating Ecological and Economic Costs and Benefits in Pastoralist Systems (No. 35a; p. 1-27). *Pastoralist Development Network*.
 128. Hoste, H., Jackson, F., Athanasiadou, S., Thamsborg, Stig. M., & Hoskin, S. O. (2006). The effects of tannin-rich plants on parasitic nematodes in ruminants. *Trends in Parasitology*, 22(6), 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2006.04.004>
 129. Hoste, H., Torres-Acosta, J. F. J., Sandoval-Castro, C. A., Mueller-Harvey, I., Sotiraki, S., Louvandini, H., Thamsborg, S. M., & Terrill, T. H. (2015). Tannin containing legumes as a model for nutraceuticals against digestive parasites in livestock. *Veterinary Parasitology*, 212(1-2), 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2015.06.026>
 130. Houmani, M. (1999). Situation alimentaire du bétail en Algérie. *Recherche Agronomique*, 3(4), 35-45.
 131. Houmani, M., Benali, D. n, & Chermiti, A. (2008). Feuilles d'arbres fruitiers : Aliment de sauvegarde pour les petits ruminants. *Recherche Agronomique*, 12(21), 93-111.
 132. Houmani, M., Houmani, Z., & Skoula, M. (2004). Intérêt de *Artemisia herba alba* Asso dans l'alimentation du bétail des steppes algériennes. *Acta Botanica Gallica*, 151(2), 165-172. <https://doi.org/10.1080/12538078.2004.10516031>
 133. Hove, L., Topps, J. H., Sibanda, S., & Ndlovu, L. R. (2001). Nutrient intake and utilisation by goats fed dried leaves of the shrub legumes *Acacia angustissima*, *Calliandra calothyrsus* and *Leucaena leucocephala* as supplements to native pasture hay. *Animal Feed Science and Technology*, 91(1-2), 95-106. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00233-4](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00233-4)
 134. Hristov, A. N., Melgar, A., Wasson, D., & Arndt, C. (2022). Symposium review : Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(10), 8543-8557. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21398>

135. Ibrahim, M., Guerra, J. L., Casasola, N. C., & Neely, C. (2010). Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits. In *Grassland carbon sequestration : Management, policy and economics : Proceedings of the Workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change*. FAO. <https://www.fao.org/4/i1880e/i1880e00.htm>
136. Ibrahim, M., Villanueva, C., & Mora, J. (2005). Traditional and improved silvopastoral systems and their importance in sustainability of livestock farms. In M. R. Mosquera-Losada, A. Rigueiro-Rodríguez, & J. McAdam (Éds.), *Silvopastoralism and sustainable land management. Proceedings of an international congress on silvopastoralism and sustainable management held in Lugo, Spain, April 2004* (1^{re} éd., p. 13-18). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781845930011.0013>
137. Idrissa, I., Morou, B., Abdourhamane, H., Karim, S., Abdourhamane, T., Djibo, I., & Mahamane, A. (2020). Diversité floristique et structure démographique des peuplements ligneux des parcours naturels sahéliens du Sud-Est du Niger : Cas de l'enclave pastorale « Dadaria » (Mainé-Soroa, Diffa). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(3), 06-721. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i3.6>
138. Institut National de la Recherche Agronomique, INRA. (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux. Valeurs des aliments. Tables Inra 2007*. Editions Quae, Versailles. France.
139. ISO (International Organization for Standardization). (2009). *Aliments des animaux. Dosage de l'azote et calcul de la teneur en protéines brutes – Partie 2 : Méthode de digestion en bloc et distillation à la vapeur*. 5983-2 (2^e éd.).
140. Jarrige, R., Ruckebusch, Y., Demarquilly, C., Farce, M.-H., & Journet, M. (1995). *Nutrition des ruminants domestiques—Ingestion et digestion* (1^{re} éd.). Quae.
141. Jayanegara, A., Goel, G., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2015). Divergence between purified hydrolysable and condensed tannin effects on methane emission, rumen fermentation and microbial population in vitro. *Animal Feed Science and Technology*, 209, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.08.002>
142. Jayanegara, A., Goel, G., Makkar, H. P. S., Becker, K., Odongo, N., Garcia, M., & Viljoen, G. (2010). Reduction in methane emissions from ruminants by plant secondary metabolites : Effects of polyphenols and saponins. *Sustainable Improvement of Animal Production and Health, FAO*, 151-157.
143. Jayanegara, A., Yogiarto, Y., Wina, E., Sudarman, A., Kondo, M., Obitsu, T., & Kreuzer, M. (2020). Combination Effects of Plant Extracts Rich in Tannins and Saponins as Feed

- Additives for Mitigating *in Vitro* Ruminal Methane and Ammonia Formation. *Animals*, 10(9), 1531. <https://doi.org/10.3390/ani10091531>
144. Jeyakumar, E., & Lawrence, R. (2022). Microbial fermentation for reduction of antinutritional factors. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (p. 239-260). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823506-5.00012-6>
 145. Johnson, D. E., & Ward, G. M. (1996). Estimates of animal methane emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 42(1-2), 133-141. <https://doi.org/10.1007/BF00394046>
 146. Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73(8), 2483-2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>
 147. Joleaud, L. (1936). *Etude géologique de la région de Bône et de La Calle*. La typo-litho & Jules Carbonel. Alger. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65818547>
 148. Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits : An overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
 149. Jose, S., & Dollinger, J. (2019). Silvopasture : A sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems*, 93(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00366-8>
 150. Jose, S., Walter, D., & Mohan Kumar, B. (2019). Ecological considerations in sustainable silvopasture design and management. *Agroforestry Systems*, 93(1), 317-331. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0065-2>
 151. Kaboré-Zoungrana, C.-Y. (1995). *Composition chimique et valeur nutritive des herbacées et ligneux des pâturages naturels soudaniens et des sous-produits du Burkina Faso* [Thesis, Université de Ouagadougou]. <https://dicames.online/jspui/handle/20.500.12177/2422>
 152. Kadi, S. A., & Zirmi-Zembri, N. (2016). Valeur nutritive des principales ressources fourragères utilisées en Algérie. 2- Les arbres et arbustes fourragers. *Livestock Research for Rural Development*, 28. <https://hal.science/hal-01742651>
 153. Kamalak, A. (2006). Determination of nutritive value of leaves of a native grown shrub, *Glycyrrhiza glabra L.* using *in vitro* and *in situ* measurements. *Small Ruminant Research*, 64(3), 268-278. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.04.027>
 154. Kar, B., & Banerjee, R. (2000). Biosynthesis of tannin acyl hydrolase from tannin-rich forest residue under different fermentation conditions. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 25(1), 29-38. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000011>

155. Karki, U., & Goodman, M. S. (2010). Cattle distribution and behavior in southern-pine silvopasture versus open-pasture. *Agroforestry Systems*, 78(2), 159-168. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9250-x>
156. Kataria, R. P. (2015). Use of feed additives for reducing greenhouse gas emissions from dairy farms. *Microbiology Research*, 6(1). <https://doi.org/10.4081/mr.2015.6120>
157. Kaya, E., & Kamalak, A. (2012). Potential Nutritive Value and Condensed Tannin Contents of Acorns from Different Oak Species. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, 18(6), 1061-1066. <https://doi.org/10.9775/kvfd.2012.7053>
158. Khellaf, B. (2019). *Contribution à l'étude des facteurs de vulnérabilité par des images satellitaires : Cas du Parc national d'El Kala Wilaya d'El Taref-Algérie* [Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar, Annaba]. <https://dspace.univ-annaba.dz/handle/123456789/890>
159. Klein, H.-D., Rippstein, G., Huguenin, J., Toutain, B., Guerin, H., & Louppe, D. (2014). *Les cultures fourragères* (1^{re} éd.). Quae.
160. Kökten, K., Kaplan, M., Hatipoğlu, R., Saruhan, V., & Çınar, S. (2012). Nutritive value of mediterranean shrubs. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 22(1), 188-194.
161. Kouch, T., Preston, T. R., & Ly, J. (2003). Studies on utilization of trees and shrubs as the sole feedstuff by growing goats ; foliage preferences and nutrient utilization. *Livestock Research for Rural Development*, 15(7). <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd15/7/kouc157.htm>
162. Kozloski, G. V., Perottoni, J., & Sanchez, L. M. B. (2005). Influence of regrowth age on the nutritive value of dwarf elephant grass hay (*Pennisetum purpureum* Schum. Cv. Mott) consumed by lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 119(1-2), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.12.012>
163. Króliczewska, B., Pecka-Kiełb, E., & Bujok, J. (2023). Strategies Used to Reduce Methane Emissions from Ruminants : Controversies and Issues. *Agriculture*, 13(3), 602. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030602>
164. Kumar, R., Joshi, R., Kumar, R., Srivatsan, V., Satyakam, Chawla, A., Patial, V., & Kumar, S. (2022). Nutritional quality evaluation and proteome profile of forage species of Western Himalaya. *Grassland Science*, 68(3), 214-225. <https://doi.org/10.1111/grs.12357>
165. Kumar, R., & Singh, M. (1984). Tannins : Their adverse role in ruminant nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 32(3), 447-453. <https://doi.org/10.1021/jf00123a006>

166. Kumar, S., Choudhury, P. K., Carro, M. D., Griffith, G. W., Dagar, S. S., Puniya, M., Calabro, S., Ravella, S. R., Dhewa, T., Upadhyay, R. C., Sirohi, S. K., Kundu, S. S., Wanapat, M., & Puniya, A. K. (2014). New aspects and strategies for methane mitigation from ruminants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(1), 31-44. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5365-0>
167. Kunst, C., Navall, M., Ledesma, R., Silberman, J., Anríquez, A., Coria, D., Bravo, S., Gómez, A., Albanesi, A., Grasso, D., Nuñez, J. A. D., González, A., Tomsic, P., & Godoy, J. (2016). Silvopastoral Systems in the Western Chaco Region, Argentina. In *Silvopastoral Systems in Southern South America* (Vol. 11, p. 63-87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8_4
168. Ku-Vera, J. C., Castelán-Ortega, O. A., Galindo-Maldonado, F. A., Arango, J., Chirinda, N., Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S. S., Flores-Santiago, E. J., Montoya-Flores, M. D., Molina-Botero, I. C., Piñeiro-Vázquez, A. T., Arceo-Castillo, J. I., Aguilar-Pérez, C. F., Ramírez-Avilés, L., & Solorio-Sánchez, F. J. (2020b). Review : Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal*, 14, s453-s463. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001780>
169. Ku-Vera, J. C., Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S. S., Montoya-Flores, M. D., Molina-Botero, I. C., Arango, J., Gómez-Bravo, C. A., Aguilar-Pérez, C. F., & Solorio-Sánchez, F. J. (2020a). Role of Secondary Plant Metabolites on Enteric Methane Mitigation in Ruminants. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 584. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00584>
170. Laadjal, A., Chaker-Houd, K., Mebirouk-Boudechiche, L., Selmi, H., Dhif Allah, A., & Rouissi, H. (2024). Seasonal variation in the chemical composition and fermentation parameters of *Fraxinus angustifolia* (Vahl, 1804) harvested from northeastern Algeria. *Fourrages*, 258(2), 17-26.
171. Laib, A. (1988). *Evaluation des bilans fourragers à travers les différents plans de développement et leurs impacts sur le cheptel national (bovin, ovin, caprin)* [Doctoral dissertation]. INA d'Alger.
172. Landau, S., Silanikove, N., Nitsan, Z., Barkai, D., Baram, H., Provenza, F. D., & Perevolotsky, A. (2000). Short-term changes in eating patterns explain the effects of condensed tannins on feed intake in heifers. *Applied Animal Behaviour Science*, 69(3), 199-213. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00125-8)

173. Lassey, K. R. (2008). Livestock methane emission and its perspective in the global methane cycle. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 114. <https://doi.org/10.1071/EA07220>
174. Le Houérou, H. N. (1975). *The rangelands of North Africa : Typology, yield, productivity and development*. Symposium on evaluation and mapping of tropical African Rangelands, ILCA ed, Addis Ababa. <https://hdl.handle.net/10568/50036>
175. Le Houérou, H. N. (1980). Browse in northern Africa. In *Browse in Africa*. ILRI (aka ILCA and ILRAD).
176. Le Houérou, H. N. (1981). Impact of man and his animate on Mediterranean vegetation. In *Mediterranean-type shrublands. Ecosystems of the world* (1st edition, p. 479-517). Elsevier Science.
177. Le Houérou, H. N. (1984). Rain use efficiency : A unifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7(3), 213-247. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)31362-4](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)31362-4)
178. Le Houérou, H. N. (2006). Agroforestry and sylvopastoralism : The role of trees and shrubs (Trubs) in range rehabilitation and development. *Sécheresse*, 17, 343-348.
179. Le Houérou, H.-N. (1987). Indigenous shrubs and trees in the silvopastoral systems of Africa. In *agroforestry a decade of development*. International Council for Research in Agroforestry. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/Book%2007/agroforestry%20a%20decade%20of%20development/html/3_indigenous.htm?n=17
180. Lees, G. L., Howarth, R. E., Goplen, B. P., & Fesser, A. C. (1981). Mechanical Disruption of Leaf Tissues and Cells in Some Bloat-Causing and Bloat-Safe Forage Legumes¹. *Crop Science*, 21(3), 444-448. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100030023x>
181. Leng, R. A. (1997). *Tree foliage in ruminant nutrition*. FAO. <https://www.fao.org/4/w7448e/W7448E00.htm#TOC>
182. Li, M., Pu, Y., & Ragauskas, A. J. (2016). Current Understanding of the Correlation of Lignin Structure with Biomass Recalcitrance. *Frontiers in Chemistry*, 4. <https://doi.org/10.3389/fchem.2016.00045>
183. Liagre, F. (2006). *Les haies rurales : Rôles - création - entretien*. Editions France Agricole. PARIS. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/ACCIDR/doc/SYRACUSE/165330/les-haies-rurales-roles-creation-entretien>

184. Longo-Hammouda, F. H., Siboukheur, O. E., & Chehma, A. (2007). Aspects nutritionnels des pâturages les plus appréciés par *Camelus dromedarius* en Algérie. *Cahiers Agricultures*, 16(6), Article 6. <https://doi.org/10.1684/agr.2007.0144>
185. MADR. (2020). *Les statistiques de l'agriculture. Les productions végétales et animales. Rétrospective 2010-2019*. (p. 52). Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Algérie.
186. MADR. (2021). *Statistiques agricoles, superficies et productions série B 2019* (p. 87). Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Algérie.
187. Mahieu, S., Novak, S., Barre, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., Gastal, F., & Emile, J.-C. (2021). Diversity in the chemical composition and digestibility of leaves from fifty woody species in temperate areas. *Agroforestry Systems*, 95(7), 1295-1308. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00662-2>
188. Makkar, H. P. S. (9/2003b). Effects and fate of tannins in ruminant animals, adaptation to tannins, and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin-rich feeds. *Small Ruminant Research*, 49(3), 241-256. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(03\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(03)00142-1)
189. Makkar, H. P. S. (2003a). *Quantification of Tannins in Tree and Shrub Foliage: A Laboratory Manual*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0273-7>
190. Makkar, H. P. S., & Becker, K. (1996). A bioassay for tannins. *Polyphenols Communications*, 96, *Proceedings of XVIIIth International Conference on Poly-phenols, Bordeaux*, 197-198.
191. Makkar, H. P. S., Blümmel, M., Borowy, N. K., & Becker, K. (1993). Gravimetric determination of tannins and their correlations with chemical and protein precipitation methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61(2), 161-165. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740610205>
192. Makkar, H. P. S., Francis, G., & Becker, K. (2007). Bioactivity of phytochemicals in some lesser-known plants and their effects and potential applications in livestock and aquaculture production systems. *Animal*, 1(9), 1371-1391. <https://doi.org/10.1017/S1751731107000298>
193. Mancera, A. K., & Galindo, F. A. (2011). Evaluation of some sustainability indicators in extensive bovine stockbreeding systems in the state of Veracruz. *VI Reunión Nacional de Innovación Forestal, México*, 31.
194. Mangan, J. L. (1988). Nutritional Effects of Tannins in Animal Feeds. *Nutrition Research Reviews*, 1(1), 209-231. <https://doi.org/10.1079/NRR19880015>

195. Manousidis, T., Kyriazopoulos, A. P., Parissi, Z. M., Abraham, E. M., Korakis, G., & Abas, Z. (2016). Grazing behavior, forage selection and diet composition of goats in a Mediterranean woody rangeland. *Small Ruminant Research*, 145, 142-153. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2016.11.007>
196. Mayouf, R., & Arbouche, F. (2014). Chemical composition and relative feed value of three Mediterranean fodder shrubs. *African Journal of Agricultural Research*, 9(8), 746-749. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7805>
197. Mayouf, R., & Arbouche, F. (2015). Seasonal variations in the chemical composition and nutritional characteristics of three pastoral species from Algerian arid rangelands. *Livestock Research for Rural Development*, 27. <http://www.lrrd.org/lrrd27/3/mayo27042.html>
198. Mbugua, D. M., Kiruiro, E. M., & Pell, A. N. (2008). *In vitro* fermentation of intact and fractionated tropical herbaceous and tree legumes containing tannins and alkaloids. *Animal Feed Science and Technology*, 146(1-2), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.11.008>
199. McAllister, T. A., & Newbold, C. J. (2008). Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 7-13. <https://doi.org/10.1071/EA07218>
200. McDougall, E. I. (1948). Studies on ruminant saliva. 1. The composition and output of sheep's saliva. *Biochemical Journal*, 43(1), 99-109.
201. McMichael, A. J., Powles, J. W., Butler, C. D., & Uauy, R. (2007). Food, livestock production, energy, climate change, and health. *Lancet (London, England)*, 370(9594), 1253-1263. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61256-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61256-2)
202. McSweeney, C. S., Palmer, B., McNeill, D. M., & Krause, D. O. (2001). Microbial interactions with tannins : Nutritional consequences for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 91(1-2), 83-93. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00232-2)
203. Mebirouk-Boudechiche, L., Abidi, S., Cherif, M., & Bouzouraa, I. (2015a). Digestibilité *in vitro* et cinétique de fermentation des feuilles de cinq arbustes fourragers du nord est algérien. *Revue Méd. Vét*, 166(11-12), 350-359.
204. Mebirouk-Boudechiche, L., Chaker-Houd, K., Boukhris, R., Abidi, R., & Cherif, M. (2018). Effect of polyethylene glycol on the *in vitro* gas production and fermentation parameters leaves of six fodder shrubs of northern Algeria. *Livestock Research for Rural Development*, 30(2). <http://www.lrrd.org/lrrd30/2/boud30024.html>

205. Mebirouk-Boudechiche, L., Cherif, M., Abidi, S., & Bouzouraa, L. (2015b). Composition chimique et facteurs antinutritionnels de quelques feuilles de ligneux fourragers des zones humides du nord-est de l'Algérie. *Fourrages*, 224, 321-328.
206. Mebirouk-Boudechiche, L., Cherif, M., Boudechiche, L., & Sammar, F. (2014). Levels of primary and secondary compounds of foliage from fodder shrubs of Algerian wet area. *Revue de médecine vétérinaire*, 165(11-12), 344-352.
207. Medjekal, S., Arhab, R., & Bousseboua, H. (2011). Nutritive value assessment of some desert by-products by gas production and rumen fermentation *in vitro*. *Livestock Research for Rural Development*, 23. <http://www.lrrd.org/lrrd23/3/medj23046.htm>
208. Medjekal, S., Benbelkhir, F. Z., & López, S. (2023). Assessment of volatile fatty acids and methane production *in vitro* of *Opuntia ficus-indica* cladodes in an algerian arid area. *Journal of Applied Biological Sciences*, 17(1), 46-54.
<https://doi.org/10.71336/jabs.1076>
209. Medjekal, S., Bodas, R., Bousseboua, H., & López, S. (2017). Evaluation of three medicinal plants for methane production potential, fiber digestion and rumen fermentation *in vitro*. *Energy Procedia*, 119, 632-641.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.089>
210. Medjekal, S., Ghadbane, M., Bodas, R., Bousseboua, H., & López, S. (2018). Volatile fatty acids and methane production from browse species of Algerian arid and semi-arid areas. *Journal of Applied Animal Research*, 46(1), 44-49.
<https://doi.org/10.1080/09712119.2016.1257432>
211. Medjekal, S., Ghadbane, M., Boufennara, S., Benderradji, L., Bodas, R., Bousseboua, H., & López, S. (2020). Chemical Composition, In Situ Degradation and Fermentation Kinetics of Some Browse Plant Species Collected from Algerian Arid and Semi-Arid Areas. *Journal of Rangeland Science*, 10(2), 188-203.
212. Medjekal, S., Ghadbane, M., & Bousseboua, H. (2015a). Impact of season of harvest on potential nutritive value, methane production and condensed tannins content of *calobota saharae* in msila, north-central Algeria. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 18(2). <http://www.ejpau.media.pl/volume18/issue2/abs-03.html>
213. Medjekal, S., Guetouache, M., & Bousseboua, H. (2015b). Effect of Season on Potential Nutritive Value, Methane Production and Condensed Tannin Content of Fourwing Saltbush (*Atriplex canescens*). *Global Veterinaria*, 14(2), 166-172.
214. Mekuria, W., Veldkamp, E., Tilahun, M., & Olschewski, R. (2011). Economic valuation of land restoration : The case of exclosures established on communal grazing lands in

- Tigray, Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 22(3), 334-344.
<https://doi.org/10.1002/ldr.1001>
215. Melesse, A., Steingass, H., Schollenberger, M., Holstein, J., & Rodehutschord, M. (2019). Nutrient compositions and *in vitro* methane production profiles of leaves and whole pods of twelve tropical multipurpose tree species cultivated in Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 93(1), 135-147. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0110-9>
216. Menke, H. H., & Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, 7-55.
217. Merdjane, L., & hacene, I. (2016). Le déficit fourrager en zone semi-aride : Une contrainte récurrente au developpement durable de l'élevage des ruminants. *Revue Agriculture, Numéro spécial*, 1, 43-51.
218. Merouane, A., Noura, A., & Khelifa Zoubir, M. (2014). Estimation *in vitro* de la valeur énergétique de l'arganier en Algérie. *Livestock Research for Rural Development*, 26. <http://www.lrrd.org/lrrd26/5/abde26092.html>
219. Mesbahi, G., Barre, P., Delagarde, R., Bourgoïn, F., Perceau, R., & Novak, S. (2022). Dynamic of 16 fodder trees' nutritive values from June to October. *6th European Agroforestry Conference. EURAF2022, Agroforestry for the Green Deal Transition. Research and Innovation towards the Sustainable Development of Agriculture and Forestry*, 340. <https://hal.inrae.fr/hal-03683783>
220. Min, B. R., Barry, T. N., Attwood, G. T., & McNabb, W. C. (2003). The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh temperate forages : A review. *Animal Feed Science and Technology*, 106(1-4), 3-19. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(03\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(03)00041-5)
221. Min, B. R., Pinchak, W. E., Fulford, J. D., & Puchala, R. (2005). Wheat pasture bloat dynamics, *in vitro* ruminal gas production, and potential bloat mitigation with condensed tannins1. *Journal of Animal Science*, 83(6), 1322-1331. <https://doi.org/10.2527/2005.8361322x>
222. Min, B. R., Solaiman, S., Waldrip, H. M., Parker, D., Todd, R. W., & Brauer, D. (2020). Dietary mitigation of enteric methane emissions from ruminants : A review of plant tannin mitigation options. *Animal Nutrition*, 6(3), 231-246. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.05.002>
223. Minson, D. J. (1990). *Forage in ruminant nutrition*. Academic Press.

224. Mhlongo, L. C., Kenyon, P., & Nsahlai, I. V. (2025). Effect of *Acacia mearnsii* forage or tannin extract on rumen dry matter and crude protein degradation. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 109(1), 22-29. <https://doi.org/10.1111/jpn.14033>
225. Mlambo, V., Mould, F., Smith, T., Owen, E., Sikosana, J., & Mueller-Harvey, I. (2009). *In vitro* biological activity of tannins from Acacia and other tree fruits : Correlations with colorimetric and gravimetric phenolic assays. *South African Journal of Animal Science*, 39(2). <https://doi.org/10.4314/sajas.v39i2.44387>
226. Mlambo, V., Sikosana, J. L. N., Mould, F. L., Smith, T., Owen, E., & Mueller-Harvey, I. (2007). The effectiveness of adapted rumen fluid versus PEG to ferment tannin-containing substrates in vitro. *Animal Feed Science and Technology*, 136(1-2), 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.08.014>
227. Monjardino, M., Revell, D., & Pannell, D. J. (2010). The potential contribution of forage shrubs to economic returns and environmental management in Australian dryland agricultural systems. *Agricultural Systems*, 103(4), 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.12.007>
228. Montagnini, F., Ibrahim, M., & Murgueitio, E. (2013). Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. *Bois et forêts des tropiques*, 136(2), 3-16.
229. Montoya-Molina, S., Giraldo-Echeverri, C., Montoya-Lerma, J., Chará, J., Escobar, F., & Calle, Z. (2016). Land sharing vs land sparing in the dry Caribbean lowlands : A dung beetles' perspective. *Applied Soil Ecology*, 98, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.017>
230. Moore, K. M., Barry, T. N., Cameron, P. N., Lopez-Villalobos, N., & Cameron, D. J. (2003). Willow (*Salix* sp.) as a supplement for grazing cattle under drought conditions. *Animal Feed Science and Technology*, 104(1-4), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00326-7](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00326-7)
231. Mora, J., Pott, D. M., Osorio, S., & Vallarino, J. G. (2022). Regulation of Plant Tannin Synthesis in Crop Species. *Frontiers in Genetics*, 13, 870976. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.870976>
232. Moreno, G., & Obrador, J. J. (2007). Effects of trees and understorey management on soil fertility and nutritional status of holm oaks in Spanish dehesas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78(3), 253-264. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9089-3>
233. Morgavi, D. P., Forano, E., Martin, C., & Newbold, C. J. (2010). Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, 4(7), 1024-1036. <https://doi.org/10.1017/S1751731110000546>

234. Moser-Nørgaard, P. M., & Denich, M. (2011). Influence of livestock on the regeneration of fodder trees along ephemeral rivers of Namibia. *Journal of Arid Environments*, 75(4), 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.11.009>
235. Mosquera-Losada, M. R., Freese, D., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2011). Carbon Sequestration in European Agroforestry Systems. In B. M. Kumar & P. K. R. Nair (Éds.), *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems* (Vol. 8, p. 43-59). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_3
236. Mueller-Harvey, I. (2006). Unravelling the conundrum of tannins in animal nutrition and health. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(13), 2010-2037. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2577>
237. Mueller-Harvey, I., Bee, G., Dohme-Meier, F., Hoste, H., Karonen, M., Kölliker, R., Lüscher, A., Niderkorn, V., Pellikaan, W. F., Salminen, J.-P., Skøt, L., Smith, L. M. J., Thamsborg, S. M., Totterdell, P., Wilkinson, I., Williams, A. R., Azuhwi, B. N., Baert, N., Brinkhaus, A. G., ... Waghorn, G. C. (2019). Benefits of Condensed Tannins in Forage Legumes Fed to Ruminants: Importance of Structure, Concentration, and Diet Composition. *Crop Science*, 59(3), 861-885. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0369>
238. Mwamatope, B., Tembo, D., Kampira, E., Maliwichi-Nyirenda, C., & Ndolo, V. (2021). Seasonal Variation of Phytochemicals in Four Selected Medicinal Plants. *Pharmacognosy Research*, 13(4), 218-226. <https://doi.org/10.5530/pres.13.4.14>
239. Nair, P. K., Nair, V. D., Mohan Kumar, B., & Showalter, J. M. (2010). Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In *Advances in Agronomy* (Vol. 108, p. 237-307). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
240. Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers in cooperation with International Centre for Research in Agroforestry. https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/32_An_introduction_to_agroforestry.pdf?n
241. Nair, P. K. R. (2012). Climate Change Mitigation : A Low-Hanging Fruit of Agroforestry. In P. K. R. Nair & D. Garrity (Éds.), *Agroforestry—The Future of Global Land Use* (Vol. 9, p. 31-67). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4676-3_7
242. Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2021). *An Introduction to Agroforestry : Four Decades of Scientific Developments*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0>

243. Nair, V. D., Haile, S. G., Michel, G.-A., & Nair, P. K. R. (2007). Environmental quality improvement of agricultural lands through silvopasture in southeastern United States. *Scientia Agricola*, 64(5), 513-519. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000500009>
244. Naumann, H. D., Tedeschi, L. O., Zeller, W. E., & Huntley, N. F. (2017). The role of condensed tannins in ruminant animal production : Advances, limitations and future directions. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 46(12), 929-949. <https://doi.org/10.1590/s1806-92902017001200009>
245. Necer, A., Tadjine, A., Belouahem-Abed, D., & Saoudi, M. (2019). Vegetation heterogeneity of black alder forests in and around El-Kala Biosphere Reserve, northeastern Algeria. *Botanical Sciences*, 97(1), 13-34. <https://doi.org/10.17129/botsci.1982>
246. Negussie, E., De Haas, Y., Dehareng, F., Dewhurst, R. J., Dijkstra, J., Gengler, N., Morgavi, D. P., Soyeurt, H., Van Gastelen, S., Yan, T., & Biscarini, F. (2017). Invited review : Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle : A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions. *Journal of Dairy Science*, 100(4), 2433-2453. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12030>
247. Norton, B. W. (1998). The Nutritive Value of Tree Legumes. In *Forage Tree Legume in Tropical Agriculture* (Gutteridge, R.C. and Shelton, H.M., Eds.). CAB International.
248. Novak, S., Barre, P., Delagarde, R., Mahieu, S., Niderkorn, V., & Emile, C. (2020). Composition chimique et digestibilité *in vitro* des feuilles d'arbre, d'arbuste et de liane des milieux tempérés en été. *Fourrages*, 242, 35-47.
249. NRC. (2021). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle : Eighth Revised Edition* (1st ed). National Academies Press.
250. Orefice, J., Carroll, J., Conroy, D., & Ketner, L. (2017). Silvopasture practices and perspectives in the Northeastern United States. *Agroforestry Systems*, 91(1), 149-160. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9916-0>
251. Ørskov, E. R., & McDonald, I. (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science*, 92(2), 499-503. <https://doi.org/10.1017/S0021859600063048>
252. Osemeobo, G. J. (1996). *Natural Resources Management and in situ Plant Genetic Conservation in Nigerian Arid Zones*. International Plant Genetic Resources Institute, Kenya.

253. Ouelmouhoub, S. (2005). *Gestion multi-usage et conservation du patrimoine forestier : Cas des subéraies du Parc national d'El Kala (Algérie)* [Mémoire de Master]. CIHEAM-IAMM, Montpellier.
254. Pagès, J. (2014). *Multiple Factor Analysis by Example Using R* (1^{re} éd.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b17700>
255. Papachristou, T. G., Dziba, L. E., & Provenza, F. D. (2005). Foraging ecology of goats and sheep on wooded rangelands. *Small Ruminant Research*, 59(2-3), 141-156. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.05.003>
256. Papachristou, T. G., & Papanastasis, V. P. (1994). Forage value of Mediterranean deciduous woody fodder species and its implication to management of silvo-pastoral systems for goats. *Agroforestry Systems*, 27(3), 269-282. <https://doi.org/10.1007/BF00705061>
257. Papachristou, T. G., Platis, P. D., Papachristou, I., Samara, T., Spanos, I., Chavales, E., & Bataka, A. (2020). How the structure and form of vegetation in a black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) silvopastoral system influences tree growth, forage mass and its nutrient content. *Agroforestry Systems*, 94(6), 2317-2330. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00552-z>
258. Papanastasis, V. P., Mantzanas, K., Dini-Papanastasi, O., & Ispikoudis, I. (2009). Traditional Agroforestry Systems and Their Evolution in Greece. In *Agroforestry in Europe* (Vol. 6, p. 89-109). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8272-6_5
259. Papanastasis, V. P., Yiakoulaki, M. D., Decandia, M., & Dini-Papanastasi, O. (2008). Integrating woody species into livestock feeding in the Mediterranean areas of Europe. *Animal Feed Science and Technology*, 140(1-2), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.03.012>
260. Paton, D. (2003). Elaboration of a multi-variate model for the determination of the metabolizable energy of Mediterranean bushes based on chemical parameters. *Journal of Arid Environments*, 53(2), 271-280. <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1033>
261. Patra, A. K., & Saxena, J. (2009). The effect and mode of action of saponins on the microbial populations and fermentation in the rumen and ruminant production. *Nutrition Research Reviews*, 22(2), 204-219. <https://doi.org/10.1017/S0954422409990163>
262. Patra, A., Park, T., Kim, M., & Yu, Z. (2017). Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0145-9>

263. Peeters, A., Beaufoy, G., Canals, R.-M., Isselstein, J., Huyghe, C., De, V. A., Jones, G., Kessler, W., Kirilov, A., & Nilsdotter-Linde, N. (2014). Grassland term definitions and classifications adapted to the diversity of European grassland-based systems. *Grassland Science in Europe*, 19. <https://res.slu.se/id/publ/65255>
264. Pelcastre, A. A. S., Mella, M. R., Ávila, N. L. R., & Martinez, B. C. (2020). Tropical trees and shrubs with potential to reduce the production of methane in ruminants. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2), 1-16. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3061>
265. Pent, G. J., & Fike, J. H. (2021). Enhanced Ecosystem Services Provided by Silvopastures. In R. P. Udawatta & S. Jose (Éds.), *Agroforestry and Ecosystem Services* (p. 141-171). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80060-4_7
266. Pérez-Reverón, R., Perdomo-González, A., De La Roza-Delgado, B., Rodríguez, C., Pérez-Pérez, J. A., & Díaz-Peña, F. J. (2024). Extending beyond traditional forage : Potential nutritional benefits of native plants in extreme arid insular regions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1476809. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1476809>
267. Piluzza, G., Sulas, L., & Bullitta, S. (2014). Tannins in forage plants and their role in animal husbandry and environmental sustainability: A review. *Grass and Forage Science*, 69(1), 32-48. <https://doi.org/10.1111/gfs.12053>
268. Pitta, D. W., Barry, T. N., Lopez-Villalobos, N., & Kemp, P. D. (2005). Effects on ewe reproduction of grazing willow fodder blocks during drought. *Animal Feed Science and Technology*, 120(3-4), 217-234. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.030>
269. Porter, L. J., Hrstich, L. N., & Chan, B. G. (1985). The conversion of procyanidins and prodelphinidins to cyanidin and delphinidin. *Phytochemistry*, 25(1), 223-230. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)94533-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)94533-3)
270. R Core Team. (2024). *A Language and Environment for Statistical Computing* [R]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
271. Ramsar. (2019). *Aulnaie de Aïn Khiair, Service d'information sur les Sites Ramsar*. <https://rsis.ramsar.org/fr/ris/1293>
272. Rangel, J. H. D. A., & Gardiner, C. P. (2009). Stimulation of wool growth by *Desmanthus* spp. As a supplement to a diet of Mitchell grass hay. *Tropical Grasslands*, 43(2), 106-111.
273. Rao, K. P. C., Verchot, L. V., & Laarman, J. (2007). Adaptation to Climate Change through Sustainable Management and Development of Agroforestry Systems. *Journal of SAT Agricultural Research*, 4(1), Article 1.

274. Ravetto Enri, S., Probo, M., Renna, M., Caro, E., Lussiana, C., Battaglini, L. M., Lombardi, G., & Lonati, M. (2020). Temporal variations in leaf traits, chemical composition and *in vitro* true digestibility of four temperate fodder tree species. *Animal Production Science*, 60(5), 643. <https://doi.org/10.1071/AN18771>
275. Reddy, D. V., & Elanchezhian, N. (2008). Evaluation of tropical tree leaves as ruminant feedstuff based on cell contents, cell wall fractions and polyphenolic compounds. *Livestock Research for Rural Development*, 20(5). <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd20/5/redd20077.htm>
276. Reed, J. D. (1995). Nutritional toxicology of tannins and related polyphenols in forage legumes. *Journal of Animal Science*, 73(5), 1516-1528. <https://doi.org/10.2527/1995.7351516x>
277. Rekik, F., Bentouati, A., & Aidoud, A. (2014). Contribution to the evaluation of fodder potentialities of a steppic rangeland dominated by *Salsola vermiculata* L. in Tébessa region, Algeria. *Livestock Research for Rural Development*, 26. <http://www.lrrd.org/lrrd26/12/reki26231.html>
278. Rigueiro-Rodríguez, A., McAdam, J., & Mosquera-Losada, M. R. (Éds.). (2009). *Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects* (Vol. 6). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8272-6>
279. Rira, M. (2019). *Les tanins hydrolysables et condensés : Une piste pour la réduction de la production du méthane entérique par les ruminants en milieu tropical* [Phdthesis, Université Clermont Auvergne [2017-2020]]. <https://theses.hal.science/tel-02861917>
280. Rogosic, J., Estell, R. E., Ivankovic, S., Kezic, J., & Razov, J. (2008). Potential mechanisms to increase shrub intake and performance of small ruminants in mediterranean shrubby ecosystems. *Small Ruminant Research*, 74(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2007.07.006>
281. Rojas Hernández, S., Olivares Pérez, J., Elghandour, M. M. M. Y., Cipriano-Salazar, M., Ávila-Morales, B., Camacho-Díaz, L. M., Salem, A. Z. M., & A Cerrillo Soto, M. (2015). Effect of polyethylene glycol on *in vitro* gas production of some non-leguminous forage trees in tropical region of the south of Mexico. *Agroforestry Systems*, 89(4), 735-742. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9796-8>
282. Romero-Pérez, G. A., Ominski, K. H., McAllister, T. A., & Krause, D. O. (2011). Effect of Environmental Factors and Influence of Rumen and Hindgut Biogeography on Bacterial Communities in Steers. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(1), 258-268. <https://doi.org/10.1128/AEM.01289-09>

283. Rouag, R. (2015). *Approche fonctionnelle de l'écologie de deux espèces de Reptiles Lacertidés insectivores (Psammmodromus algirus et Acanthodactylus erythrurus) et d'un reptile chélonien phytophage (Testudo graeca graeca), dans un maquis dunaire du parc national d'El-Kala (Wilaya d'El-Tarf)* [Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar, Annaba]. <https://dspace.univ-annaba.dz/handle/123456789/1169>
284. Rouag, R., & Benyacoub, S. (2006). Inventaire et écologie des reptiles du Parc national d'El Kala (Algérie). *Bulletin de la société herpétologique de France*, 117, 25-40.
285. Rubanza, C. D. K., Shem, M. N., Otsyina, R., Bakengesa, S. S., Ichinohe, T., & Fujihara, T. (2005). Polyphenolics and tannins effect on *in vitro* digestibility of selected Acacia species leaves. *Animal Feed Science and Technology*, 119(1-2), 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.12.004>
286. Sahi, S., Ouennes, H., Bayoud, A., & Boukraa, M. (2022). Effect of incorporating holm oak acorn in the feed of « Saanen » breed dairy goats in the wilaya of Batna. *Livestock Research for Rural Development*, 34. <http://www.lrrd.org/lrrd34/10/3496same.html>
287. Salem, A. Z. M., Robinson, P. H., El-Adawy, M. M., & Hassan, A. A. (2007). *In vitro* fermentation and microbial protein synthesis of some browse tree leaves with or without addition of polyethylene glycol. *Animal Feed Science and Technology*, 138(3-4), 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.11.026>
288. Salem, A.-F. Z. M. (2005). Impact of season of harvest on *in vitro* gas production and dry matter degradability of Acacia saligna leaves with inoculum from three ruminant species. *Animal Feed Science and Technology*, 123-124, 67-79. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.04.042>
289. Sarr, O., Diatta, S., Gueye, M., Ndiaye, P., Guisse, A., & Akpo, L. (2013). Importance des ligneux fourragers dans un système agropastoral au Sénégal (Afrique de l'ouest). *Revue de Médecine Vétérinaire*, 164(1), 2-8.
290. Sawadogo, S. (2006). *Influence du mode de séchage et de stockage sur la valeur nutritive de quelques ligneux fourragers* [Mémoire de fin de cycle de DEA]. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso.
291. Schnitzer, S. A., Kuzee, M. E., & Bongers, F. (2005). Disentangling above- and below-ground competition between lianas and trees in a tropical forest. *Journal of Ecology*, 93(6), 1115-1125. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01056.x>
292. Schnitzer, S. A., & Van Der Heijden, G. M. F. (2019). Lianas have a seasonal growth advantage over co-occurring trees. *Ecology*, 100(5), e02655. <https://doi.org/10.1002/ecy.2655>

293. Schoeneberger, M. M. (2009). Agroforestry : Working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry Systems*, 75(1), 27-37. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9123-8>
294. Schofield, P., Mbugua, D. M., & Pell, A. N. (2001). Analysis of condensed tannins : A review. *Animal Feed Science and Technology*, 91(1-2), 21-40. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00228-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00228-0)
295. Selmi, H., Hasnaoui, M., Bahri, A., Abbes, C., Dallali, S., Jedidi, S., & Rouissi, H. (2020). Chemical properties, antioxidant activities and *in vitro* fermentation profiles of some shrubs of North Western Tunisia. *Indian Journal of Animal Research*, 54(7), 851-855. <https://doi.org/10.18805/ijar.B-953>
296. Selmi, H., Hasnaoui, M., Tibaoui, G., Askri, H., Bahri, A., Boussaidi, F., Aloui, F., & Rouissi, H. (2018). Ruminal fermentation and chemical analysis of some shrubs in Northern of Tunisia. *Journal of New Sciences*, 15(Numéro spécial), 3379-3385.
297. Selmi, H., Rouissi, H., Dhifallah, A., Abidi, S., Jedidi, S., & Abbes, C. (2022). Activités biologiques et potentiel nutritionnel de *Rubia peregrina* et *Malva sylvestris* chez les ovins et les caprins. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 10(1). https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/1134
298. Shah, M. K., Tamang, B. B., Dhakal, B., Chaudhary, P., Shrestha, S., & Chhetri, N. (2019). Nutritive values of fodders at different seasons and altitudes in Gandaki River Basin of Nepal. *Journal of Agriculture and Natural Resources*, 2(1), 109-126. <https://doi.org/10.3126/janr.v2i1.26051>
299. Sharrow, S. H., Brauer, D., & Clason, T. R. (2009). Silvopastoral Practices. In *North American Agroforestry : An Integrated Science and Practice* (p. 105-131). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/2009.northamericanagroforestry.2ed.c6>
300. Shelton, H., & Dalzell, S. (2007). Production, economic and environmental benefits of *Leucaena* pastures. *Tropical Grasslands*, 41.
301. Si Ziani, Y., & Boulberhane, D. (s.d.). Bilan fourrager 1998 : Comparaisons offre/besoins. *1er atelier national Sur le développement des fourrages en Algérie*, 20-26.
302. Silue, N., Fofana, I., Silue, S., Nafan, D., Kouassi, A., & Kouakou, E. (2014). Identification des especes ligneuses utilisees dans l'alimentation des bovins dans la region du Poro (nord de la Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 26, 217-229.
303. Smith, A. H., Zoetendal, E., & Mackie, R. I. (2005). Bacterial Mechanisms to Overcome Inhibitory Effects of Dietary Tannins. *Microbial Ecology*, 50(2), 197-205. <https://doi.org/10.1007/s00248-004-0180-x>

304. Soares, S., Sousa, A., Mateus, N., & De Freitas, V. (2012). Effect of Condensed Tannins Addition on the Astringency of Red Wines. *Chemical Senses*, 37(2), 191-198. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjr092>
305. Soni, M. L., Subbulakshmi, V., Yadava, N. D., Tewari, J. C., & Dagar, J. C. (s. d.). Silvopastoral agroforestry systems : Lifeline dry regions. In *Agroforestry research developments* (p. 245-305). Nova Publishers.
306. Spears, J. W. (1994). Mineral in forages. In: G.C. FAHEY, Jr et al (éd): *Forage quality, Evaluation and utilization*, WI. American society of agronomy, Madison, 281-317. <http://doi.wiley.com/10.2134/1994.foragequality.c7>
307. Stavi, I., & Lal, R. (2013). Agroforestry and biochar to offset climate change : A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 81-96. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0081-1>
308. Sultan, J. I., Rahim, I., Nawaz, H., Yaqoob, M., & Javed, I. (2008). Nutritional evaluation of fodder tree leaves of northern grasslands of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 40(6), 2503-2512.
309. Sz wajkowska-Michalek, L., Przybylska-Balcerek, A., Rogoziński, T., & Stuper-Szablewska, K. (2020). Phenolic Compounds in Trees and Shrubs of Central Europe. *Applied Sciences*, 10(19), 6907. <https://doi.org/10.3390/app10196907>
310. Thapa, S. K., De Jong, J. F., Subedi, N., Hof, A. R., Corradini, G., Basnet, S., & Prins, H. H. T. (2021). Forage quality in grazing lawns and tall grasslands in the subtropical region of Nepal and implications for wild herbivores. *Global Ecology and Conservation*, 30, e01747. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01747>
311. Thornton, P. K., & Herrero, M. (2010). Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(46), 19667-19672. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912890107>
312. Torquebiau, E. F. (2000). A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series III - Sciences de La Vie*, 323(11), 1009-1017. [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(00\)01239-7](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)01239-7)
313. Toubal, O. S. (1986). *Phytoécologie, biogéographie et dynamique des principaux groupements végétaux du massif de l'Edough (Algérie Nord orientale)*. Cartographie au 1/25000 USTM [Thèse de doctorat]. Université Joseph Fourier. Grenoble.
314. Ugbogu, E. A., Elghandour, M. M. M. Y., Ikpeazu, V. O., Buendía, G. R., Molina, O. M., Arunsi, U. O., Emmanuel, O., & Salem, A. Z. M. (2019). The potential impacts of dietary

- plant natural products on the sustainable mitigation of methane emission from livestock farming. *Journal of Cleaner Production*, 213, 915-925. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.233>
315. Vallejo, V. E., Roldan, F., & Dick, R. P. (2010). Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest of Colombia. *Biology and Fertility of Soils*, 46(6), 577-587. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0466-8>
316. Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional Ecology of the Ruminant*. Cornell University Press. <https://doi.org/10.7591/9781501732355>
317. Van Soest, P. J., 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. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
318. Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C. A., Beckers, Y., Claessens, H., & Bindelle, J. (2018a). Agroforestry for ruminants: A review of trees and shrubs as fodder in silvopastoral temperate and tropical production systems. *Animal Production Science*, 58(5), 767. <https://doi.org/10.1071/AN16434>
319. Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C. A., Marche, C., Decruyenaere, V., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2018b). Behaviour and browse species selectivity of heifers grazing in a temperate silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 92(3), 705-716. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0041-x>
320. Varsha, K. M., Raj, A. K., Kurien, E. K., Bastin, B., Kunhamu, T. K., & Pradeep, K. P. (2019). High density silvopasture systems for quality forage production and carbon sequestration in humid tropics of Southern India. *Agroforestry Systems*, 93(1), 185-198. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0059-0>
321. Vasta, V., Daghighi, M., Cappucci, A., Buccioni, A., Serra, A., Viti, C., & Mele, M. (2019). Invited review : Plant polyphenols and rumen microbiota responsible for fatty acid biohydrogenation, fiber digestion, and methane emission : Experimental evidence and methodological approaches. *Journal of Dairy Science*, 102(5), 3781-3804. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14985>
322. Verma, S., Taube, F., & Malisch, C. S. (2021). Examining the Variables Leading to Apparent Incongruity between Antimethanogenic Potential of Tannins and Their Observed Effects in Ruminants A Review. *Sustainability*, 13(5), 2743. <https://doi.org/10.3390/su13052743>

323. Vitti, D. M. S. S., Abdalla, A. L., Bueno, I. C. S., Filho, J. C. S., Costa, C., Bueno, M. S., Nozella, E. F., Longo, C., Vieira, E. Q., Filho, S. L. S. C., Godoy, P. B., & Mueller-Harvey, I. (2005). Do all tannins have similar nutritional effects ? A comparison of three Brazilian fodder legumes. *Animal Feed Science and Technology*, 119(3-4), 345-361. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.06.004>
324. Vogels, G. D., Hoppe, W. F., & Stumm, C. K. (1980). Association of methanogenic bacteria with rumen ciliates. *Applied and Environmental Microbiology*, 40(3), 608-612. <https://doi.org/10.1128/aem.40.3.608-612.1980>
325. Waghorn, G. (2008). Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production—Progress and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, 147(1-3), 116-139. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.013>
326. Wieleman, A., Bernard, Macheboeuf, D., Gaillard, L., Serre, C., Cartailier, J., Charrier, G., Moulia, B., Ngao, J., & Torres-Ruiz, J. M. (2020). Vers l'identification d'arbres pouvant servir de ressource fourragère complémentaire pour les ruminants dans les conditions climatiques de l'Auvergne en 2050. *Fourrages*, 242, 61-69.
327. Williams, C. M., Eun, J.-S., MacAdam, J. W., Young, A. J., Fellner, V., & Min, B. R. (2011). Effects of forage legumes containing condensed tannins on methane and ammonia production in continuous cultures of mixed ruminal microorganisms. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 364-372. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.025>
328. World Agroforestry Centre. (2008). Transforming lives and landscapes : Strategy 2008-2015. *CIFOR-ICRAF*. <https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/33472/>
329. Yaakoub, F. (2006). *Evaluation in vitro de la dégradation des principaux fourrages des zones arides* [Mémoire de Magister]. Université El-Hadj Lakhdar Batna.
330. Yagoubi, Y., Joy, M., Ripoll, G., Mahouachi, M., Bertolín, J. R., & Atti, N. (2018). Rosemary distillation residues reduce lipid oxidation, increase alpha-tocopherol content and improve fatty acid profile of lamb meat. *Meat Science*, 136, 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.10.007>
331. Yerou, H., Belhadj Slimen, I., Zoghlami, M., Najar, T., & Chniter, M. (2023). Potentialité phytochimique et nutritionnelle des arbustes utilisés dans le système alimentaire extensif caprin en subéraie semi aride Algérienne : Cas de Pistacia lentiscus, Calycotome spinosa et Olea europaea subsp sylvestris. *Livestock Research for Rural Development*, 35. <http://www.lrrd.org/lrrd35/10/3595hour.html>

Annexes

Annexe 1 : Sortie numérique des groupes de variables issue de l'AFM

```
> # 1. Matrices de similarité entre les groupes

> cat("1.1. Matrice des Lg\n")
1.1. Matrice des Lg
> print(round(res.mfa$group$Lg, 2))
```

	Saison	Categorie	Composition chimique
Saison	2.00	0.07	0.63
Categorie	0.07	3.00	0.10
Composition chimique	0.63	0.10	1.13
Composition parietale	0.10	0.03	0.17
Composition phenolique	0.29	0.07	0.25
Fermentation	0.27	0.09	0.43
MFA	0.62	0.14	0.95

```
> print(round(res.mfa$group$Lg, 2))
```

	Composition parietale	Composition phenolique
Saison	0.10	0.29
Categorie	0.03	0.07
Composition chimique	0.17	0.25
Composition parietale	1.16	0.16
Composition phenolique	0.16	1.20
Fermentation	0.15	0.18
MFA	0.79	0.86

```
> print(round(res.mfa$group$Lg, 2))
```

	Fermentation	MFA
Saison	0.27	0.62
Categorie	0.09	0.14
Composition chimique	0.43	0.95
Composition parietale	0.15	0.79
Composition phenolique	0.18	0.86
Fermentation	1.10	0.89
MFA	0.89	1.68

```
> cat("\n1.2. Matrice des RV\n")

1.2. Matrice des RV
> print(round(res.mfa$group$RV, 2))
```

	Saison	Categorie	Composition chimique
Saison	1.00	0.03	0.42
Categorie	0.03	1.00	0.05
Composition chimique	0.42	0.05	1.00
Composition parietale	0.07	0.02	0.15
Composition phenolique	0.19	0.04	0.21
Fermentation	0.18	0.05	0.38
MFA	0.34	0.06	0.69

```
> print(round(res.mfa$group$RV, 2))
```

	Composition parietale	Composition phenolique
Saison	0.07	0.19
Categorie	0.02	0.04
Composition chimique	0.15	0.21
Composition parietale	1.00	0.14
Composition phenolique	0.14	1.00
Fermentation	0.13	0.16
MFA	0.57	0.61

```
> print(round(res.mfa$group$RV, 2))
```

	Fermentation	MFA
Saison	0.18	0.34
Categorie	0.05	0.06

```

Composition chimique      0.38 0.69
Composition parietale     0.13 0.57
Composition phenolique    0.16 0.61
Fermentation              1.00 0.66
MFA                       0.66 1.00
>
> # 2. Coordonnées, contributions et cosinus carrés des groupes
>
> cat("\n2.1. Coordonnées des groupes sur les axes factoriels\n")

2.1. Coordonnées des groupes sur les axes factoriels
> print(round(res.mfa$group$coord, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Composition chimique    0.83  0.02  0.13  0.03  0.22
Composition parietale    0.24  0.63  0.10  0.33  0.01
Composition phenolique   0.25  0.75  0.27  0.01  0.02
Fermentation             0.76  0.02  0.14  0.10  0.13
>
> cat("\n2.2. Contributions des groupes aux axes factoriels\n")

2.2. Contributions des groupes aux axes factoriels
> print(round(res.mfa$group$contrib, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Composition chimique   39.76  1.10 19.77  6.93 59.42
Composition parietale  11.64 44.73 15.73 70.01  1.46
Composition phenolique 11.88 52.68 42.45  1.37  4.17
Fermentation           36.72  1.49 22.05 21.69 34.95
>
> cat("\n2.3. Cosinus carrés des groupes sur les axes factoriels\n")

2.3. Cosinus carrés des groupes sur les axes factoriels
> print(round(res.mfa$group$cos2, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Composition chimique    0.60  0.00  0.01  0.00  0.04
Composition parietale    0.05  0.34  0.01  0.09  0.00
Composition phenolique   0.05  0.46  0.06  0.00  0.00
Fermentation             0.53  0.00  0.02  0.01  0.02
>
> # 3. Résultats supplémentaires
>
> cat("\n3.1. Coordonnées des groupes supplémentaires\n")

3.1. Coordonnées des groupes supplémentaires
> print(round(res.mfa$group$coord.sup, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Saison     0.45  0.03  0.25  0.04  0.06
Categorie  0.03  0.02  0.13  0.04  0.08
>
> cat("\n3.2. Cosinus carrés des groupes supplémentaires\n")

3.2. Cosinus carrés des groupes supplémentaires
> print(round(res.mfa$group$cos2.sup, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Saison     0.1   0   0.03   0   0
Categorie  0.0   0  0.01   0   0
>

```

```

> # 4. Distances et corrélations
>
> cat("\n4.1. Distances au carré des groupes\n")

4.1. Distances au carré des groupes
> print(round(res.mfa$group$dist2, 2))
[1] 1.13 1.16 1.20 1.10
>
> cat("\n4.2. Corrélations des groupes avec les axes\n")

4.2. Corrélations des groupes avec les axes
> print(round(res.mfa$group$correlation, 2))

```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Composition chimique	0.91	0.13	0.44	0.20	0.85
Composition parietale	0.49	0.80	0.37	0.88	0.11
Composition phenolique	0.54	0.87	0.75	0.08	0.20
Fermentation	0.88	0.26	0.43	0.37	0.66

Annexe 2 : Sortie numérique des variables quantitatives issue de l'AFM

```

> # 1. Coordonnées des variables quantitatives
>
> cat("1. Coordonnées des variables quantitatives\n")
1. Coordonnées des variables quantitatives
> print(round(res.mfa$quantitative$coord, 2))

```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
MS	0.68	0.14	-0.14	0.23	-0.19
MO	0.79	0.10	0.38	0.08	0.32
MM	-0.79	-0.10	-0.38	-0.08	-0.32
MAT	-0.65	-0.03	-0.13	-0.13	0.58
NDF	0.52	-0.73	0.17	0.18	0.01
ADF	0.45	-0.79	0.25	0.12	0.03
ADL	0.39	-0.69	0.38	-0.34	0.08
CB	0.16	-0.28	-0.20	0.85	-0.09
PPT	0.36	0.86	0.23	0.10	0.06
TT	0.31	0.84	0.30	0.06	-0.07
TC	0.52	0.23	-0.64	0.02	0.15
ABT	0.71	0.11	-0.41	-0.34	0.07
CH4	-0.51	0.00	-0.13	0.36	0.57
Gaz_Total	-0.82	0.12	0.24	0.16	-0.14
dMO	-0.79	0.17	0.37	0.08	0.02

```

>
> # 2. Contributions des variables quantitatives
>
> cat("\n2. Contributions des variables quantitatives\n")

2. Contributions des variables quantitatives
> print(round(res.mfa$quantitative$contrib, 2))

```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
MS	8.58	0.56	1.23	4.42	3.58
MO	11.66	0.26	8.79	0.52	10.63
MM	11.66	0.26	8.79	0.52	10.63
MAT	7.86	0.02	0.97	1.47	34.58
NDF	4.86	13.98	1.59	2.63	0.02
ADF	3.58	16.23	3.55	1.08	0.07
ADL	2.75	12.43	8.22	9.25	0.59

```

CB          0.45  2.08  2.37 57.06  0.78
PPT         3.07 25.76  4.05  0.96  0.55
TT          2.23 25.12  7.13  0.35  0.59
TC          6.58  1.81 31.27  0.05  3.03
ABT         8.96  0.34  9.77  8.98  0.45
CH4         4.70  0.00  0.95 10.09 32.50
Gaz_Total  11.98  0.37  3.43  2.12  1.95
dMO        11.08  0.77  7.89  0.50  0.06
>
> # 3. Cosinus carrés des variables quantitatives
>
> cat("\n3. Cosinus carrés des variables quantitatives\n")

3. Cosinus carrés des variables quantitatives
> print(round(res.mfa$quanti.var$cos2, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
MS        0.48  0.02  0.02  0.06  0.04
MO        0.65  0.01  0.15  0.01  0.10
MM        0.65  0.01  0.15  0.01  0.10
MAT       0.44  0.00  0.02  0.02  0.34
NDF       0.28  0.55  0.03  0.03  0.00
ADF       0.21  0.64  0.06  0.01  0.00
ADL       0.16  0.49  0.15  0.12  0.01
CB        0.03  0.08  0.04  0.74  0.01
PPT       0.13  0.75  0.05  0.01  0.00
TT        0.10  0.73  0.09  0.00  0.00
TC        0.28  0.05  0.41  0.00  0.02
ABT       0.52  0.01  0.17  0.12  0.00
CH4       0.27  0.00  0.02  0.13  0.33
Gaz_Total 0.69  0.01  0.06  0.03  0.02
dMO       0.64  0.03  0.14  0.01  0.00
>
> # 4. Corrélations des variables quantitatives avec les axes
>
> cat("\n4. Corrélations des variables quantitatives avec les axes\n")

4. Corrélations des variables quantitatives avec les axes
> print(round(res.mfa$quanti.var$cor, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
MS        0.69  0.15 -0.15  0.24 -0.19
MO        0.80  0.10  0.39  0.08  0.32
MM       -0.80 -0.10 -0.39 -0.08 -0.32
MAT       -0.66 -0.03 -0.13 -0.14  0.58
NDF       0.53 -0.74  0.17  0.19  0.01
ADF       0.45 -0.80  0.25  0.12  0.03
ADL       0.40 -0.70  0.38 -0.35  0.08
CB        0.16 -0.29 -0.21  0.86 -0.09
PPT       0.36  0.87  0.23  0.10  0.06
TT        0.31  0.85  0.31  0.06 -0.07
TC        0.53  0.23 -0.64  0.02  0.15
ABT       0.72  0.12 -0.42 -0.34  0.07
CH4       -0.52  0.00 -0.13  0.36  0.58
Gaz_Total -0.83  0.12  0.25  0.17 -0.14
dMO       -0.80  0.17  0.38  0.08  0.02
>

```

Annexe 3 : Sortie numérique des variables qualitatives supplémentaires issue de l'AFM

```
> # 1. Coordonnées des variables qualitatives supplémentaires
>
> cat("1. Coordonnées des variables qualitatives supplémentaires\n")
1. Coordonnées des variables qualitatives supplémentaires
> print(round(res.mfa$quali.var.sup$coord, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Arbres    -0.25 -0.19 -0.56 -0.14  0.23
Arbustes   1.29  0.30  0.46 -0.08 -0.16
Lianes    -0.96 -0.13 -0.01  0.17 -0.02
Automne   -0.12 -0.22 -0.39  0.04 -0.06
Ete        0.26  0.17  0.09  0.17 -0.21
Hiver      0.30  0.11 -0.16 -0.27  0.03
Printemps -0.30 -0.01  0.36 -0.05  0.23
>
> # 2. Cosinus carrés des variables qualitatives supplémentaires
>
> cat("\n2. Cosinus carrés des variables qualitatives
supplémentaires\n")

2. Cosinus carrés des variables qualitatives supplémentaires
> print(round(res.mfa$quali.var.sup$cos2, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Arbres      0.10  0.05  0.49  0.03  0.08
Arbustes    0.83  0.04  0.10  0.00  0.01
Lianes      0.84  0.02  0.00  0.03  0.00
Automne     0.05  0.17  0.52  0.00  0.01
Ete         0.30  0.12  0.04  0.13  0.20
Hiver       0.28  0.04  0.08  0.22  0.00
Printemps   0.27  0.00  0.39  0.01  0.17
>
> # 3. V-tests des variables qualitatives supplémentaires
>
> cat("\n3. V-tests des variables qualitatives supplémentaires\n")

3. V-tests des variables qualitatives supplémentaires
> print(round(res.mfa$quali.var.sup$v.test, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Arbres     -0.70 -0.62 -2.82 -0.84  1.49
Arbustes   4.21  1.17  2.70 -0.57 -1.24
Lianes     -3.46 -0.57 -0.05  1.32 -0.15
Automne    -0.33 -0.75 -1.93  0.22 -0.40
Ete        0.73  0.56  0.47  1.00 -1.39
Hiver      0.59  0.27 -0.57 -1.11  0.16
Printemps  -0.87 -0.03  1.88 -0.29  1.62
>
> # 4. Coordonnées partielles des variables qualitatives
supplémentaires
>
> cat("\n4. Coordonnées partielles des variables qualitatives
supplémentaires\n")

4. Coordonnées partielles des variables qualitatives supplémentaires
> print(round(res.mfa$quali.var.sup$coord.partiel, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Arbres.Composition chimique  -0.81 -0.06 -0.71 -0.17  0.16
Arbres.Composition parietale -0.10  0.22  0.01 -0.43  0.04
```

```

Arbres.Composition phenolique      0.06 -0.93 -1.48 -0.13  0.33
Arbres.Fermentation                 -0.17  0.04 -0.07  0.16  0.37
Arbustes.Composition chimique       2.59  0.39  1.31  0.94 -0.03
Arbustes.Composition parietale      0.43 -0.85  0.56 -0.38  0.13
Arbustes.Composition phenolique     0.61  1.74  0.67  0.27  0.03
Arbustes.Fermentation               1.52 -0.10 -0.70 -1.16 -0.78
Lianes.Composition chimique        -1.72 -0.30 -0.65 -0.71 -0.09
Lianes.Composition parietale       -0.32  0.59 -0.50  0.64 -0.14
Lianes.Composition phenolique      -0.58 -0.88  0.45 -0.15 -0.26
Lianes.Fermentation                -1.22  0.07  0.67  0.91  0.43
Automne.Composition chimique       -0.47 -0.03 -0.62 -0.01 -0.42
Automne.Composition parietale       0.01  0.02 -0.11  0.29 -0.04
Automne.Composition phenolique     -0.18 -0.82 -0.63 -0.13  0.08
Automne.Fermentation               0.17 -0.05 -0.17  0.00  0.13
Ete.Composition chimique            0.36  0.05 -0.01  0.21 -0.66
Ete.Composition parietale           0.19 -0.38  0.06  0.45 -0.02
Ete.Composition phenolique          0.37  1.01  0.33  0.16  0.04
Ete.Fermentation                   0.13 -0.01  0.00 -0.14 -0.20
Hiver.Composition chimique          0.16  0.00  0.30 -0.03  0.20
Hiver.Composition parietale        -0.22  0.40 -0.11 -0.30  0.00
Hiver.Composition phenolique        0.06  0.13  0.01  0.02  0.00
Hiver.Fermentation                 1.20 -0.08 -0.84 -0.76 -0.06
Printemps.Composition chimique      0.02 -0.01  0.43 -0.17  0.88
Printemps.Composition parietale    -0.07  0.11  0.11 -0.52  0.06
Printemps.Composition phenolique   -0.21 -0.24  0.27 -0.04 -0.11
Printemps.Fermentation             -0.93  0.10  0.61  0.53  0.10
>
> # 5. Inertie intra-classe des variables qualitatives supplémentaires
>
> cat("\n5. Inertie intra-classe des variables qualitatives
supplémentaires\n")

5. Inertie intra-classe des variables qualitatives supplémentaires
> print(round(res.mfa$quali.var.sup$within.inertia, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Arbres      1.62  2.13  5.26  0.74  0.57
Arbustes   13.73 12.05  9.75 12.71  5.25
Lianes       6.37  4.40  6.93  9.76  3.16
Automne      0.86  1.31  0.87  0.39  1.46
Ete          0.16  2.83  0.28  0.73  2.35
Hiver       2.52  0.21  1.50  0.93  0.19
Printemps   2.25  0.23  0.55  2.61  5.03
>
> # 6. Inertie partielle intra-classe des variables qualitatives
supplémentaires
>
> cat("\n6. Inertie partielle intra-classe des variables qualitatives
supplémentaires\n")

6. Inertie partielle intra-classe des variables qualitatives
supplémentaires
> print(round(res.mfa$quali.var.sup$within.partial.inertia, 2))
      Dim.1 Dim.2 Dim.3 Dim.4 Dim.5
Arbres.Composition chimique      1.14  0.04  0.08  0.00  0.03
Arbres.Composition parietale      0.09  0.44  1.21  0.35  0.28
Arbres.Composition phenolique     0.36  1.51  3.10  0.00  0.09
Arbres.Fermentation               0.03  0.13  0.88  0.39  0.17
Arbustes.Composition chimique     7.92  0.03  3.31  5.46  0.18

```

Arbustes.Composition parietale	3.40	4.41	0.04	0.45	0.86
Arbustes.Composition phenolique	2.16	7.07	0.21	0.66	0.37
Arbustes.Fermentation	0.25	0.54	6.19	6.14	3.84
Lianes.Composition chimique	3.05	0.11	2.18	4.61	0.06
Lianes.Composition parietale	2.18	2.00	1.26	1.27	0.18
Lianes.Composition phenolique	0.77	2.14	1.10	0.61	0.68
Lianes.Fermentation	0.37	0.15	2.39	3.26	2.24
Automne.Composition chimique	0.47	0.10	0.21	0.01	1.00
Automne.Composition parietale	0.06	0.16	0.27	0.26	0.00
Automne.Composition phenolique	0.01	0.98	0.22	0.11	0.16
Automne.Fermentation	0.31	0.08	0.17	0.01	0.30
Ete.Composition chimique	0.03	0.04	0.04	0.01	1.58
Ete.Composition parietale	0.02	0.80	0.00	0.33	0.28
Ete.Composition phenolique	0.04	1.91	0.20	0.00	0.49
Ete.Fermentation	0.07	0.08	0.03	0.39	0.00
Hiver.Composition chimique	0.04	0.02	0.45	0.14	0.13
Hiver.Composition parietale	0.58	0.13	0.00	0.00	0.01
Hiver.Composition phenolique	0.13	0.00	0.06	0.20	0.01
Hiver.Fermentation	1.77	0.06	0.98	0.59	0.04
Printemps.Composition chimique	0.40	0.00	0.02	0.06	3.62
Printemps.Composition parietale	0.21	0.04	0.24	1.01	0.26
Printemps.Composition phenolique	0.03	0.15	0.03	0.00	0.99
Printemps.Fermentation	1.61	0.04	0.26	1.54	0.16

>

Annexe 4 : Sortie numérique des individus issue de l'AFM

```
> # 1. Coordonnées des individus
>
> cat("1. Coordonnées des individus\n")
1. Coordonnées des individus
> print(round(res.mfa$ind$coord, 2))
```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
R_per_Pr	-0.22	1.45	0.42	-0.03	-0.71
R_per_Ete	0.61	1.56	-0.73	-0.34	-0.75
C_cir_Aut	-3.31	0.26	-0.80	-1.02	0.68
C_cir_Hiv	-1.00	-1.18	-0.93	1.00	-0.38
C_cir_Pr	-2.53	0.05	-0.35	-0.17	-0.56
S_asp_Aut	-0.05	-1.90	0.11	1.23	-0.09
S_asp_Hiv	-0.26	0.03	-0.22	1.02	0.02
S_asp_Pr	-0.31	-1.71	0.44	0.48	-0.45
S_asp_Ete	-1.45	-0.60	0.00	0.84	-0.41
R_ulm_Aut	-1.52	0.60	0.15	0.34	0.53
R_ulm_Hiv	-1.14	2.22	0.57	0.01	0.85
R_ulm_Pr	-2.59	1.93	0.40	1.02	1.74
R_ulm_Ete	-0.36	0.73	0.81	0.28	0.20
H_hel_Aut	0.02	-1.34	-0.47	-0.22	-0.38
H_hel_Hiv	-0.40	-1.43	-0.30	-1.59	-0.02
H_hel_Pr	-1.12	-1.42	0.36	0.10	-0.08
H_hel_Ete	-0.69	-1.44	0.41	-0.01	-0.50
Q_coc_Aut	2.54	-0.28	-0.74	0.66	-0.16
Q_coc_Pr	2.30	-0.04	-0.24	0.54	0.27
Q_coc_Ete	1.78	0.16	-0.04	0.96	-0.60
P_med_Aut	0.76	-1.40	1.13	-0.03	0.22
P_med_Hiv	0.81	-0.18	0.64	-0.22	-0.13
P_med_Pr	-0.09	-0.99	0.92	-0.33	0.09
P_med_Ete	0.40	-0.53	0.81	0.05	-0.42
M_com_Aut	1.42	1.36	-0.38	0.85	-1.07

M_com_Hiv	1.47	2.05	-0.34	-0.73	-0.47
M_com_Pr	-0.10	2.82	1.45	-0.61	-0.14
M_com_Ete	0.07	2.67	1.26	0.71	-0.70
E_arb_Aut	1.62	-0.23	0.78	-0.48	0.21
E_arb_Hiv	2.62	-0.73	-0.54	-1.36	0.37
E_arb_Pr	1.01	-0.38	1.08	-0.69	0.09
E_arb_Ete	2.74	0.14	1.10	-0.57	0.03
S_alb_Aut	-0.80	0.15	-1.50	-0.47	-0.89
S_alb_Pr	0.99	0.25	-0.79	-0.82	0.98
S_alb_Ete	0.70	0.39	-1.20	-0.74	0.38
A_glu_Aut	0.25	0.04	-0.77	-0.68	0.25
A_glu_Pr	0.34	-1.88	1.24	0.44	1.12
A_glu_Ete	0.31	-0.92	-0.06	0.15	0.63
F_ang_Aut	-2.89	0.27	-0.64	-0.60	-0.78
F_ang_Pr	-2.35	-0.99	0.90	-0.78	0.03
F_ang_Ete	-1.51	-0.52	0.02	-0.02	-1.06
Q_can_Aut	0.54	-0.16	-1.51	0.85	0.75
Q_can_Pr	0.81	0.78	-1.19	0.23	0.65
Q_can_Ete	0.57	0.38	-1.26	0.72	0.64

```

> # 2. Contributions des individus
>
> cat("\n2. Contributions des individus\n")
2. Contributions des individus
> print(round(res.mfa$ind$contrib, 2))

```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
R_per_Pr	0.05	3.35	0.64	0.00	3.08
R_per_Ete	0.41	3.89	1.88	0.56	3.42
C_cir_Aut	11.94	0.11	2.24	5.03	2.82
C_cir_Hiv	1.10	2.24	3.03	4.82	0.88
C_cir_Pr	6.96	0.00	0.43	0.13	1.89
S_asp_Aut	0.00	5.78	0.05	7.34	0.05
S_asp_Hiv	0.07	0.00	0.17	4.99	0.00
S_asp_Pr	0.10	4.69	0.69	1.13	1.24
S_asp_Ete	2.30	0.58	0.00	3.45	1.01
R_ulm_Aut	2.51	0.57	0.08	0.57	1.69
R_ulm_Hiv	1.42	7.93	1.14	0.00	4.46
R_ulm_Pr	7.30	5.99	0.56	5.06	18.49
R_ulm_Ete	0.14	0.85	2.31	0.39	0.25
H_hel_Aut	0.00	2.90	0.79	0.22	0.90
H_hel_Hiv	0.17	3.29	0.33	12.27	0.00
H_hel_Pr	1.37	3.22	0.45	0.05	0.04
H_hel_Ete	0.53	3.33	0.60	0.00	1.51
Q_coc_Aut	7.06	0.13	1.93	2.08	0.15
Q_coc_Pr	5.75	0.00	0.20	1.40	0.45
Q_coc_Ete	3.47	0.04	0.01	4.49	2.21
P_med_Aut	0.62	3.16	4.51	0.00	0.29
P_med_Hiv	0.72	0.05	1.45	0.23	0.11
P_med_Pr	0.01	1.57	2.97	0.54	0.05
P_med_Ete	0.17	0.45	2.31	0.01	1.07
M_com_Aut	2.21	2.95	0.51	3.46	7.05
M_com_Hiv	2.37	6.76	0.41	2.55	1.32
M_com_Pr	0.01	12.76	7.38	1.78	0.12
M_com_Ete	0.00	11.41	5.65	2.45	2.98
E_arb_Aut	2.85	0.09	2.17	1.09	0.28
E_arb_Hiv	7.51	0.86	1.03	8.92	0.83
E_arb_Pr	1.12	0.23	4.09	2.27	0.05
E_arb_Ete	8.17	0.03	4.28	1.56	0.01

S_alb_Aut	0.69	0.03	7.94	1.06	4.84
S_alb_Pr	1.06	0.10	2.22	3.28	5.94
S_alb_Ete	0.53	0.24	5.09	2.62	0.91
A_glu_Aut	0.07	0.00	2.08	2.21	0.38
A_glu_Pr	0.13	5.68	5.43	0.95	7.61
A_glu_Ete	0.11	1.36	0.01	0.11	2.47
F_ang_Aut	9.09	0.12	1.46	1.73	3.68
F_ang_Pr	6.01	1.57	2.86	2.96	0.01
F_ang_Ete	2.48	0.43	0.00	0.00	6.93
Q_can_Aut	0.31	0.04	8.03	3.48	3.45
Q_can_Pr	0.71	0.97	5.03	0.25	2.60
Q_can_Ete	0.36	0.23	5.59	2.50	2.50

```
> # 3. Cosinus carrés des individus
>
> cat("\n3. Cosinus carrés des individus\n")
3. Cosinus carrés des individus
> print(round(res.mfa$ind$cos2, 2))
```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
R_per_Pr	0.02	0.66	0.06	0.00	0.16
R_per_Ete	0.08	0.52	0.11	0.02	0.12
C_cir_Aut	0.80	0.00	0.05	0.08	0.03
C_cir_Hiv	0.18	0.25	0.15	0.18	0.03
C_cir_Pr	0.89	0.00	0.02	0.00	0.04
S_asp_Aut	0.00	0.57	0.00	0.24	0.00
S_asp_Hiv	0.04	0.00	0.03	0.56	0.00
S_asp_Pr	0.02	0.69	0.05	0.06	0.05
S_asp_Ete	0.51	0.09	0.00	0.17	0.04
R_ulm_Aut	0.54	0.08	0.01	0.03	0.06
R_ulm_Hiv	0.17	0.63	0.04	0.00	0.09
R_ulm_Pr	0.43	0.24	0.01	0.07	0.19
R_ulm_Ete	0.05	0.21	0.26	0.03	0.02
H_hel_Aut	0.00	0.49	0.06	0.01	0.04
H_hel_Hiv	0.02	0.30	0.01	0.38	0.00
H_hel_Pr	0.25	0.40	0.03	0.00	0.00
H_hel_Ete	0.15	0.63	0.05	0.00	0.07
Q_coc_Aut	0.83	0.01	0.07	0.06	0.00
Q_coc_Pr	0.79	0.00	0.01	0.04	0.01
Q_coc_Ete	0.60	0.00	0.00	0.18	0.07
P_med_Aut	0.12	0.43	0.28	0.00	0.01
P_med_Hiv	0.24	0.01	0.15	0.02	0.01
P_med_Pr	0.00	0.45	0.38	0.05	0.00
P_med_Ete	0.08	0.14	0.33	0.00	0.09
M_com_Aut	0.29	0.27	0.02	0.10	0.17
M_com_Hiv	0.28	0.55	0.01	0.07	0.03
M_com_Pr	0.00	0.73	0.19	0.03	0.00
M_com_Ete	0.00	0.69	0.16	0.05	0.05
E_arb_Aut	0.65	0.01	0.15	0.06	0.01
E_arb_Hiv	0.61	0.05	0.03	0.16	0.01
E_arb_Pr	0.33	0.05	0.38	0.15	0.00
E_arb_Ete	0.75	0.00	0.12	0.03	0.00
S_alb_Aut	0.15	0.01	0.52	0.05	0.18
S_alb_Pr	0.22	0.01	0.14	0.15	0.22
S_alb_Ete	0.12	0.04	0.35	0.13	0.04
A_glu_Aut	0.02	0.00	0.21	0.16	0.02
A_glu_Pr	0.02	0.52	0.22	0.03	0.18
A_glu_Ete	0.05	0.48	0.00	0.01	0.23
F_ang_Aut	0.80	0.01	0.04	0.03	0.06

F_ang_Pr	0.55	0.10	0.08	0.06	0.00
F_ang_Ete	0.52	0.06	0.00	0.00	0.26
Q_can_Aut	0.06	0.01	0.46	0.15	0.11
Q_can_Pr	0.16	0.15	0.35	0.01	0.10
Q_can_Ete	0.08	0.03	0.37	0.12	0.09

```
> # 4. Inertie intra-classe des individus
>
> cat("\n4. Inertie intra-classe des individus\n")
4. Inertie intra-classe des individus
> print(round(res.mfa$ind$within.inertia, 2))
```

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
R_per_Pr	1.15	1.74	1.05	0.40	1.07
R_per_Ete	2.88	2.61	1.17	0.92	2.93
C_cir_Aut	5.16	6.34	4.59	5.95	2.37
C_cir_Hiv	2.26	0.90	1.77	6.86	0.60
C_cir_Pr	1.17	4.60	3.41	1.72	0.34
S_asp_Aut	2.59	3.38	1.88	6.15	0.05
S_asp_Hiv	1.37	0.12	1.45	1.34	0.20
S_asp_Pr	1.85	2.10	0.11	2.67	0.25
S_asp_Ete	1.61	0.38	1.38	3.87	1.57
R_ulm_Aut	0.45	2.98	2.30	0.91	3.05
R_ulm_Hiv	1.83	4.41	4.70	1.34	5.16
R_ulm_Pr	5.42	3.60	6.11	6.53	13.89
R_ulm_Ete	0.38	1.39	1.95	0.40	2.03
H_hel_Aut	3.37	1.07	1.17	0.46	1.02
H_hel_Hiv	6.22	1.06	3.21	1.86	1.66
H_hel_Pr	1.47	3.08	0.24	1.16	2.49
H_hel_Ete	1.62	1.59	0.76	0.41	2.18
Q_coc_Aut	2.45	1.52	3.30	7.37	0.66
Q_coc_Pr	4.16	0.42	3.72	4.25	1.52
Q_coc_Ete	1.96	0.81	0.70	5.72	1.68
P_med_Aut	2.34	2.69	0.89	0.69	0.56
P_med_Hiv	2.77	0.30	0.70	1.09	0.32
P_med_Pr	0.90	0.78	0.17	0.91	0.50
P_med_Ete	1.52	0.46	0.18	0.54	0.43
M_com_Aut	1.20	3.23	0.60	2.27	4.45
M_com_Hiv	4.80	3.47	2.51	3.42	0.98
M_com_Pr	3.57	7.36	3.36	5.05	0.97
M_com_Ete	4.62	7.39	4.54	0.08	0.58
E_arb_Aut	0.90	2.29	1.68	1.98	1.00
E_arb_Hiv	4.68	1.96	8.64	5.50	1.15
E_arb_Pr	1.02	0.52	0.87	1.41	1.84
E_arb_Ete	1.32	7.26	3.89	3.67	0.82
S_alb_Aut	1.36	1.82	0.97	0.04	7.12
S_alb_Pr	1.54	0.14	3.33	0.92	6.61
S_alb_Ete	1.59	0.26	3.08	0.74	1.08
A_glu_Aut	1.78	0.67	0.16	0.63	0.41
A_glu_Pr	4.09	4.27	1.14	0.60	5.34
A_glu_Ete	0.65	1.04	0.64	0.31	0.94
F_ang_Aut	1.94	5.91	5.88	3.17	1.97
F_ang_Pr	5.19	1.63	5.08	4.63	1.94
F_ang_Ete	0.62	1.73	2.90	0.22	1.68
Q_can_Aut	0.48	0.12	0.65	1.52	6.42
Q_can_Pr	1.35	0.43	2.45	0.14	0.72
Q_can_Ete	0.39	0.17	0.72	0.17	7.46