



HAL
open science

Sylvopastoralisme. Vers l'identification des essences d'arbres d'intérêt fourrager pour les ruminants et adaptées au climat auvergnat de 2050

Anna Wielemans

► **To cite this version:**

Anna Wielemans. Sylvopastoralisme. Vers l'identification des essences d'arbres d'intérêt fourrager pour les ruminants et adaptées au climat auvergnat de 2050. [Stage] France. Université Clermont Auvergne (UCA), FRA. 2019, 21 p. + annexes. hal-02790228

HAL Id: hal-02790228

<https://hal.inrae.fr/hal-02790228v1>

Submitted on 5 Jun 2020

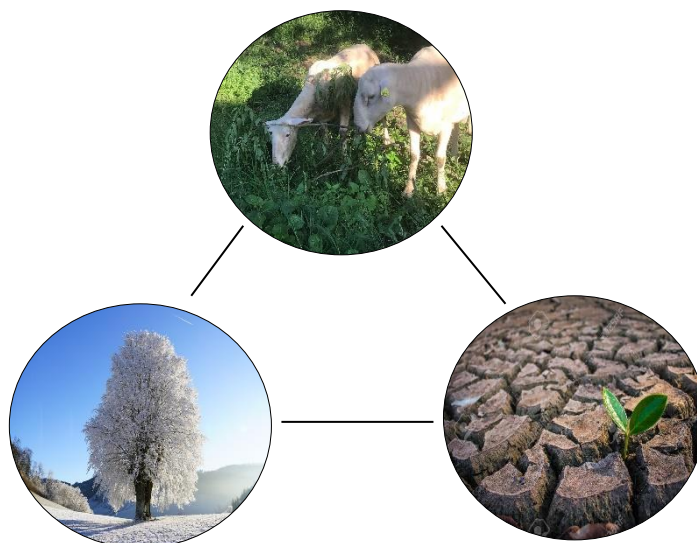
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sylvopastoralisme

Vers l'identification des essences d'arbres d'intérêt fourrager pour les ruminants et adaptées au climat auvergnat de 2050

Stage de fin d'étude du 8 avril au 29 août 2019



INRA, UMR PIAF, Site de Crouël



Rapport présenté par : Wielemans Anna

Tuteur-entreprise : Ngao Jérôme

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrant et co-encadrant Jérôme Ngao et Mickaël Bernard pour m'avoir permis d'intégrer ce projet et réaliser mon stage de fin d'étude au sein de l'INRA. Je les remercie du temps qu'ils m'ont consacré et de leurs conseils afin de mener à bien ce stage et son rapport, tout particulièrement Jérôme pour la patience dont il a fait preuve face à mes questions récurrentes sur les statistiques. Merci aussi de m'avoir permis de découvrir le monde de la recherche dans un domaine qui me passionne.

Je souhaite également remercier toute l'équipe du PIAF pour son accueil souriant et sa bienveillance. Merci à Christophe Serre et Julien Cartallier pour leur apprentissage et leur aide technique et à tous ceux qui ont participé au bon déroulement dans les manipulations en me prodiguant leurs conseils dans les laboratoires ou lors des pauses cafés. Une pensée pour Loïc Gaillard et son aide précieuse dans la récolte des feuilles du prunellier égayée par ses conversations, à Ludovic Martin pour sa relecture et ses conseils dans la mise en page. Sans oublier Dominique Tiziani et Norbert Frizot pour leur accompagnement administratif et informatique.

Enfin, j'adresse un grand merci à tous les stagiaires sans qui le déroulé de ce stage n'aurait pas été le même, pour leur aide et leur amitié. Il me restera un souvenir chaleureux de ce laboratoire où règne la bonne humeur depuis les bureaux jusque sur le terrain en passant par les laboratoires, les temps de pauses et le club musique.

Liste des abréviations

ADF : Acid Detergent Fiber

ADL : Acid Detergent Lignin

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

LT50 : Lethal Temperature 50%

MAT : Matière Azotée Totale

MEA : Micro-Environnement et Arbre

MM : Matière Minérale

MS : Matière Sèche

NDF : Neutral Detergent Fiber

ORECC : Observation Rhône-Alpes des Effets du Changement Climatique

PIAF : Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant

PDI : Protéines Digestibles de l'Intestin

PLC : Percent loss of conductivity

UFL : Unité Fourragère Lait

UFV : Unité Fourragère Viande

UMR : Unité Mixte de Recherche

Sommaire

Présentation du laboratoire d'accueil	p 1
<u>I- Introduction et contexte de l'étude</u>	p 2
1-L'agroforesterie dans les pratiques agricoles	p 2
2-Les enjeux du sylvopastoralisme dans le cadre du changement climatique	p 3
3-Ecophysiologie de l'arbre	p 4
4-Objectifs et démarche suivis	p 5
<u>II-Matériels et méthodes</u>	p 5
1-L'étude de la valeur alimentaire des fourrages	p 5
2-Prélèvements des échantillons	p 7
3-Mesure de la résistance au gel : la LT50	p 7
4- Mesure de la résistance à la sécheresse : la P50	p 9
<u>III- Résultats</u>	p 10
1- Les catégories de fourrages ligneux selon leur valeur nutritive	p 10
2- La résistance au gel des espèces d'intérêt	p 11
3- La résistance à la sécheresse des espèces d'intérêt	p 13
4- Identification des espèces montrant le meilleur compromis entre leurs valeurs nutritives et écophysiologiques	p 14
<u>IV- Discussion</u>	p 15
1- Les limites dans la détermination de la valeur nutritive et le choix des espèces d'intérêt	p 15
2- Les limites dans la caractérisation de la résistance au gel	p 17
3- Les limites dans la caractérisation de la résistance à la sécheresse	p 17
4- Perspectives de l'étude	p 18
Conclusion	p 19
Références bibliographiques	p 20
Annexes	

Présentation du laboratoire d'accueil

Ce stage a été effectué au sein de deux unités. La première, le laboratoire de Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant, appelé plus couramment le PIAF, unité mixte de recherche (UMR) implantée sur le site de Crouël. La seconde, l'Herbipôle, unité expérimentale de l'INRA située sur le site de Theix implantée dans la commune de Saint-Genès-Champanelle.

Le PIAF travaille en interdisciplinarité qui vise à étudier l'arbre sous toutes ses échelles : des approches de physiologies cellulaires et moléculaires, d'écophysiologie, du physique du vivant et bioclimatologie permettent d'étendre les recherches du gène à l'arbre entier dans son environnement. Les travaux de l'unité portent principalement sur les réponses des arbres aux facteurs physiques de l'environnement affectés par le bouleversement climatique (ressource en eau, température ...) et déterminant leur acclimatation ou survie, conformément à la mission initiale de l'INRA « comment nourrir la France », créée après la deuxième guerre mondiale afin d'améliorer les techniques agricoles. Ainsi le PIAF se propose de mener des recherches afin d'identifier des espèces plus résistantes aux changements climatiques ou élaborer des modes de conduites afin d'améliorer la durabilité des systèmes agricoles. Afin de répondre à ces objectifs, l'unité se divise en plusieurs équipes dont l'équipe Micro Environnement et Arbres (MEA) dans laquelle s'intègre ce travail. L'équipe MEA centre ses travaux sur des enjeux finalisés comme la gestion des bioagresseurs, l'acclimatation des arbres au froid, le rôle des arbres sur le climat thermique urbain ou la vulnérabilité des systèmes arborés au changement climatique.

La plateforme expérimentale de l'Herbipôle quant à elle porte ses recherches sur l'optimisation et la durabilité des systèmes d'élevage des herbivores en zone de montagne. Ses objectifs lui confèrent également une approche interdisciplinaire de recherche sur les herbivores et les prairies à différentes échelles de temps et d'espace (approche régionale, nationale et européenne), afin de répondre à des défis tant économiques qu'environnementaux.

A la croisée des deux unités et de leurs missions respectives, ce stage s'inscrit dans le cadre du challenge 1 du projet CAP20-25 de l'I-site clermontois dont l'objectif est d'optimiser l'intégration des systèmes agricoles dans leur environnement et territoire, en partie par l'introduction d'arbres afin d'étudier leur impact sur les prairies et herbivores.

Tableau 1. La répartition des activités agroforestières en France.

Recensement effectué en 2008. Données issues de [4]

SYSTÈMES TRADITIONNELS	RÉGIONS	SURFACES ESTIMÉES (ha)	NOMBRE AGRICULTEURS CONCERNÉS
Pré-vergers	Bretagne, Basse-Normandie, Haute-Normandie, Pays de Loire, Lorraine, Alsace, Rhône-Alpes	140 000	40 000
Cultures intercalaires en noyeraies double-fin	Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées, Aquitaine	15 000 dont 4 000 ha avec cultures intercalaires	1 000
Cultures intercalaires en peupleraies	Nord-Pas-de-Calais, Champagne-Ardenne, Pays de Loire, Poitou-Charente, Midi-Pyrénées	6 000	1 000
Oliviers et cultures intercalaires	Provence-Alpes-Côtes-d'Azur, Languedoc-Roussillon	3 000	1 500
Truffiers et lavande ou vigne	Rhône-Alpes	2 000	400
Cultures intercalaires dans vergers fruitiers	Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes, Guadeloupe, Martinique, Réunion	2 000	700
TOTAL Agroforesterie traditionnelle	FRANCE	168 000 ha	44 600

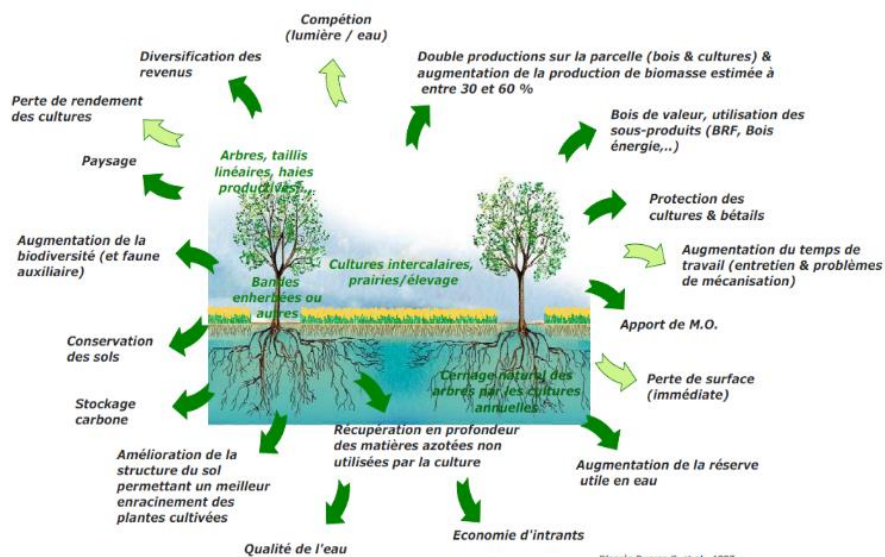


Figure 1. Représentation schématique des bénéfices et inconvénients de l'agroforesterie

Les avantages de l'agroforesterie sont représentés par des flèches vertes foncées et les inconvénients par des flèches vertes claires. Données issues de [8].

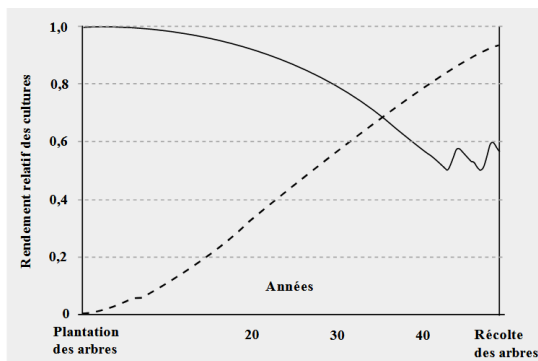


Figure 2. Exemple d'évolution du rendement des cultures intercalaires et production de bois dans un système agroforestier

La parcelle étudiée associe des noyers hybrides de 60 individus par hectare récoltés à l'âge de 50 ans après une éclaircie à 8 ans à 50 noyers par hectare. La courbe en pointillés représente les récoltes de bois en m³/ha et les traits plein les rendements des cultures, exprimés tels que 1 correspond au rendement d'une culture/plantation pure. Données issues de [10].

I- Introduction et contexte de l'étude

1- L'agroforesterie dans les pratiques agricoles

Alors que la mécanisation du XX siècle a engendré une uniformisation des terres cultivables afin de permettre une intensification des systèmes de production, la mise en place d'une agriculture durable requiert aujourd'hui une remise en question des pratiques qui s'orientent vers l'agroécologie. L'agroforesterie est l'association délibérée d'arbres avec une production agricole, culture ou élevage, sur une même parcelle ou une même entité d'exploitation [1]. L'agroforesterie... ou plutôt devrait-on dire, les agroforesteries ! En effet, il y a mille et une façon de pratiquer l'agroforesterie : que ce soit la pratique de cultures intercalaires de noyer dans le Dauphiné, de peupliers combinés à la production de maïs, ou encore les pré-vergers [2], technique très ancienne qui consiste à faire pâturer les animaux en présence d'arbres fruitiers, appelé aujourd'hui sylvopastoralisme. Le sylvopastoralisme décrit l'association de l'arbre et de la pâture : que ce soit l'ouverture d'une éclaircie dans une parcelle forestière, ou la plantation d'espèces ligneuses dans une prairie... En ce sens, c'est un mode de gestion durable qui concilie les objectifs forestiers, et pastoraux [3]. La répartition des activités agroforestières est décrite par le tableau 1.

De fait ces dernières années l'arbre retrouve une place dans les prairies, justifiée par des arguments écologiques. Les pratiques empiriques et intuitives d'agriculture extensives d'autrefois sont aujourd'hui soutenues par des informations d'ordre scientifique et l'arbre reprend la place qu'il occupait naguère. D'ailleurs, force est de constater les conséquences écologiques de la suppression des espèces ligneuses de nos cultures : perte de biodiversité, érosion hydrique et éolienne impactant la fertilité de sols et leur structure avec la formation en cas de fortes précipitations de coulées de boue (arrachement des plants dans les ravines et accumulation de terre en bas de parcelle) [5]. Le modèle de productivité au dépens de la durabilité trouve depuis quelques années ses limites et la présence de l'arbre concomitant de la production agricole fait partie des stratégies possibles de la transition agricole. Ainsi les espèces ligneuses arborent de multiples compétences au service de la durabilité des systèmes, que l'on appelle aussi services écosystémiques. On peut citer par exemple la redistribution de la ressource en eau par le système racinaire qui facilite la pénétration de l'eau dans le sol en le décompactant. De plus les arbres sont capables de « remonter » de l'eau en profondeur et la remettre à disposition des strates herbacées : on parle d'ascenseur hydraulique [6]. Ou encore, la réduction significative de la lixiviation des ions, pouvant atteindre 80% pour les nitrates selon Lacombe [7]. Le panel des différents avantages et inconvénients de l'agroforesterie est présenté par la figure 1.

A ces arguments écologiques, les opposants de l'agroforesterie répondent par la perte de rendement sous-jacente causés par la compétition qui peut se mettre en place entre l'arbre et la production de cultures ou prairies. La relation semble en réalité plus complexe puisque certaines études montrent une modification de la valeur alimentaire du fourrage récolté sous les arbres [9], soulevant de nouveau la question de la qualité au dépens de la quantité. L'impact de l'arbre sur les espèces herbacées dépend de nombreux facteurs comme l'âge des individus, la densité d'implantation, la nature des espèces, qu'il est indispensable de prendre en compte avant toute conclusion. De plus en intégrant un système, l'arbre devient une ressource. Dupraz précise « *Quand on fait de l'agroforesterie, on fait du bois [...] c'est de l'agro environnemental qui rapporte* » [2] (figure 2).

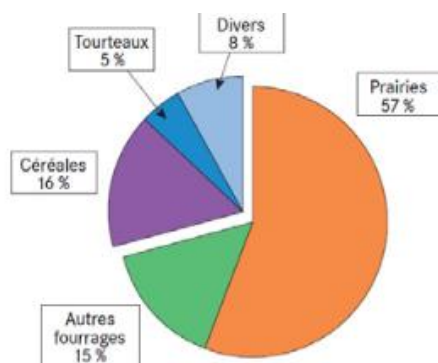


Figure 3. Part des prairies dans l'alimentation des animaux d'élevage

Données issues de [12]

Tableau 2. Exemple de calcul de croissance de l'herbe

La croissance de l'herbe est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Croissance} = (\text{Hauteur 2} - \text{Hauteur 1}) * \text{densité} / \text{Nombre jours}$$

Les valeurs de croissance sont calculées généralement pour une densité de 250 kilogrammes de matière sèche par hectare et par centimètre (kg MS/ha/cm), valeur moyenne admise. Données issues de [14].

Date mesure	Hauteur (cm, mesurée à l'herbomètre)	Densité de l'herbe (kg MS/ha/cm)	Croissance sur la période (kg MS/ha/jour)
15 mai	8	220 (franche comté)	47
22 mai	9.5		

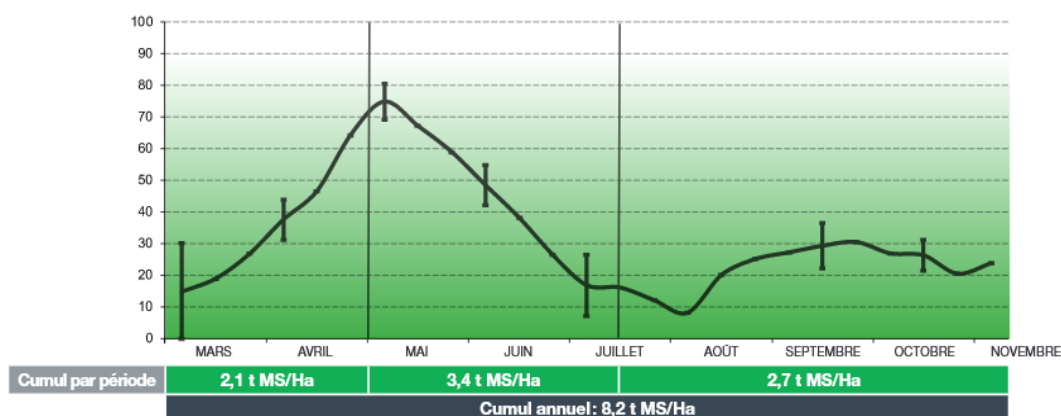


Figure 4. Evolution de la croissance moyenne annuelle de l'herbe (en tonnes de matière sèche par hectare et par jour) en Pays de la Loire

Données issues de [13].

2- Les enjeux du sylvopastoralisme dans le cadre du changement climatique

Impossible de ne pas constater que le siècle dernier a connu un réchauffement sans précédent: diminution de la couverture neigeuse des glaciers en montagne ou bien modifications phénologiques avec des dates de débourrement et floraison de plus en plus précoces sont des exemples parmi tant d'autres et les projections climatiques à court et moyen terme sont plutôt pessimistes. A ce réchauffement global du climat, viennent s'ajouter une diminution des précipitations en période estivale s'accompagnant de la hausse du nombre de jours de sécheresse, et une accentuation des aléas climatiques extrêmes. Ainsi la France pourrait voir son climat évoluer avec des périodes de fortes pluies en fin de saison hivernale, suivie de longues périodes sans apport d'eau. Les agroécosystèmes sont parmi les plus impactés par ce changement qui sous-entend une baisse du confort hydrique des cultures, une baisse des réserves d'eaux sous-terraines, une augmentation de la sécheresse édaphique, une modification de la phénologie (événements du développement saisonniers) des végétaux dépendant en grande partie des températures obligeant une adaptation des calendriers culturaux ... [11]. Le changement global oblige une adaptation des systèmes agricoles faisant appel à plusieurs stratégies complémentaires, à raisonner en fonction de chaque exploitation [11], dont on peut citer quelques exemples : repenser les variétés cultivées, mettre en place des associations culturales, etc.

Dans les systèmes d'élevage, la pérennité des prairies est en enjeu majeur et leur future gestion se doit de considérer les points précédents pour garantir leur durabilité. En effet, les prairies, qu'elles soient permanentes ou temporaires, sont non seulement pâturées, mais également fauchées afin de constituer un fourrage hivernal et de compléter l'herbe en cas de période estivale difficile. Aussi, l'herbe pâturée et les fourrages qui en sont issus constituent la majeure partie de la ration des herbivores, complétés par d'autres types de fourrages et des concentrés [12], qu'ils s'agissent de production laitière ou de viande (figure 3). Ainsi, c'est la disponibilité de la ressource prairiale qui a conditionné la mise en place du système d'élevage, principalement bovin, tel que nous le connaissons aujourd'hui, tant dans la charge des troupeaux, que dans l'organisation temporelle et spatiale de leur mise à l'herbe, gestion des apports d'aliments complémentaires, fertilisations azotées, etc. La conduite du pâturage se doit d'être raisonnée afin de valoriser au mieux son exploitation en adaptant la gestion du troupeau et les fauches à la croissance de l'herbe. Ses caractéristiques avec les méthodes de calcul de croissance et son évolution à l'année sont présentées par le tableau 2 et la figure 4. La croissance de l'herbe en France est régie par des variations intra-saisonnières qui dépendent essentiellement des températures et de la disponibilité en eau selon 3 cycles végétatifs définis pour le ray-grass anglais de février à novembre [13]. Selon les modèles d'évolution du climat prévoyant une augmentation des températures et des périodes de sécheresse, la croissance de la ressource en herbe va s'en trouver fortement impactée. Entre autre, on peut facilement s'attendre à une diminution de la biomasse disponible impactant la consommation dans les pâtures et les récoltes fourragères hivernales. A ceci s'ajoute un risque d'obligation, pour compenser le manque d'herbe, de fournir du fourrage en quantité importante au cours de l'été, et au cours des autres périodes de pénuries pouvant avoir lieu lors des épisodes climatiques extrêmes dont la fréquence va augmenter. Le changement climatique engendrera donc une diminution de la ressource prairiale et des réserves fourragères hivernales qui en sont issues, conséquentes pour la survie économique de l'exploitation.

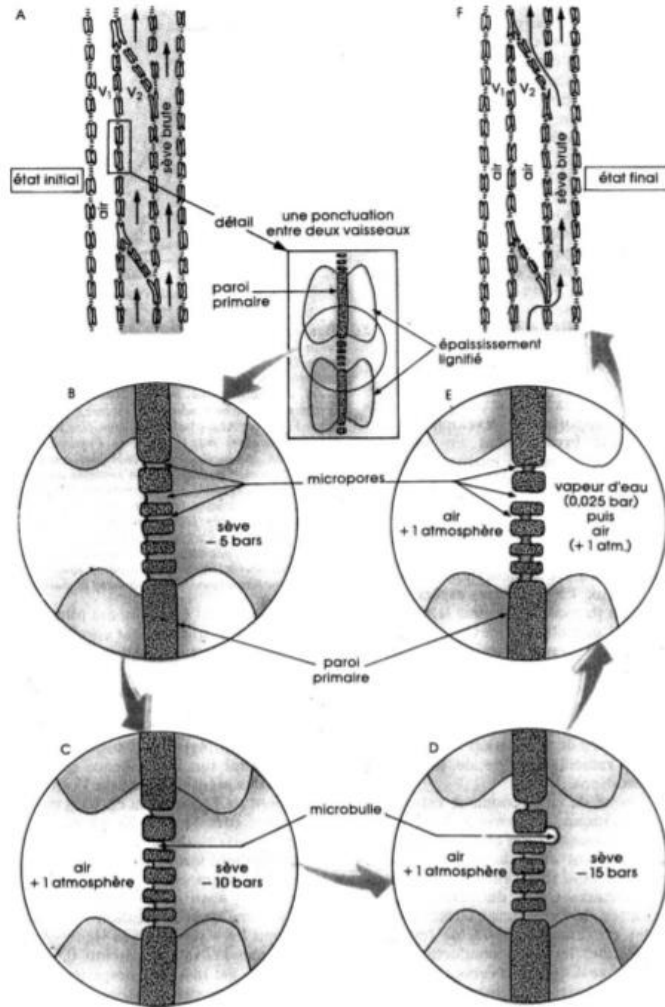


Figure 5. Formation de bulles d'air à l'origine de la cavitation des vaisseaux du xylème au niveau des ponctuations

Au niveau des ponctuations assurant la connexion entre les différents vaisseaux conducteurs des ménisques air-sève peuvent se former entre un vaisseau V1 rempli d'air et un vaisseau V2 fonctionnel (A). Si la tension de la colonne d'eau augmente, une bulle apparaît (c) et embolise le vaisseau V2 (F).

Données issues de [17].

L'obtention d'une ressource durable, disponible et rentable pour l'exploitant requiert une remise en cause indispensable de la ressource fourragère et de la gestion des prairies. Parmi les innovations proposées afin d'économiser la ressource en eau et faire face à l'augmentation des températures, on peut trouver l'allongement de la saison de pâturage avec des prairies présentant une meilleure pousse automnale et hivernale, faire pâturer une céréale en fin d'hiver avant l'épiaison afin de ne pas empêcher la moisson, des associations d'espèces nouvelles ou des surfaces additionnelles (vignes)... C'est dans ce contexte que l'arbre s'inscrit, malgré des contraintes liées à la protection des jeunes arbres et un temps de valorisation assez long qui ont fait du sylvopastoralisme une pratique peu commune [15]. En effet, par souci de trouver des adaptations de nos systèmes prairiaux à l'évolution du climat, et à la conservation de la ressource herbacée et fourragère, les ligneux représentent une solution parmi d'autres visant à maintenir la durabilité des systèmes agricoles, là où les conditions environnementales forceront à un déstockage des réserves fourragères hivernales. Pourquoi alors ne pas considérer les feuilles des arbres et arbustes comme ressource complémentaire à la nutrition des animaux d'élevage, rappelant certaines pratiques traditionnelles (élevage caprin) utilisant les feuilles comme fourrage ?

3-Ecophysiologie de l'arbre

Il est nécessaire de s'interroger sur les facteurs abiotiques influençant la production foliaire et sur l'écophysiologie de l'arbre, c'est-à-dire sa réponse physiologique aux modifications de son environnement. A l'interface du sol et de l'atmosphère, l'arbre puise dans ces deux compartiments pour assurer la production de nouveaux organes, faisant ainsi appel à des processus carbonés et hydrique nécessaires à sa survie et croissance. Ces processus sont sous l'influence de facteurs environnementaux, parmi lesquels les contraintes thermiques selon les exigences de chaque espèce. Ainsi, les températures négatives entraînent des dégâts visibles sur les végétaux, se traduisant à plus petite échelle par l'éclatement des cellules végétales (lyse cellulaire) et la formation de cristaux dans le milieu extracellulaire déformant les parois [16]. Pour s'en protéger, les plantes ont développé différentes stratégies de résistance comme l'augmentation de la concentration en solutés intracellulaire pour éviter toute cristallisation, la synthèse de protéines spécifiques de stabilisation membranaires (déhydrines), des modifications dans la composition en lipides membranaires permettant d'accroître la fluidité des membranes, etc [16].

Des températures élevées associées aux sécheresses prédites plus fréquentes par les modèles climatiques, induisent quant à elles un stress hydrique par l'obstruction des vaisseaux conducteurs des végétaux. En effet, la circulation de l'eau dans les plantes se fait grâce à un appareil conducteur appelé xylème, dont les éléments conducteurs sont des vaisseaux formés de cellules mortes rigides [17]. Les connexions latérales entre les vaisseaux se font par des ponctuations. Composée de l'eau du sol et des éléments minéraux, l'ascension de la sève brute jusqu'aux feuilles est permise grâce à la transpiration au niveau des feuilles. En effet, une fois arrivée dans les parties foliaires, l'eau s'évapore vers l'atmosphère par les stomates, structures assurant une ouverture contrôlée sur le milieu extérieur. Les surfaces d'évaporation forment des ménisques dont la courbure génère une force motrice à l'origine d'un gradient de tension depuis ces ménisques jusqu'à l'eau du sol. De par la continuité de la colonne d'eau, toute l'eau du vaisseau se retrouve sous tension (pression négative) tirée vers le

le haut de la plante. Ce modèle de circulation de l'eau dans les plantes est appelé théorie de tension-cohésion [17]. En cas de sécheresse, la plante est soumise à un stress hydrique, c'est-à-dire que la pression à laquelle est soumise la colonne d'eau, devient fortement négative. Des ménisques air-eau se forment également au niveau des ponctuations. Une fois atteinte la limite de leur résistance, une bulle d'air se forme : c'est la cavitation (figure 5). Ce bouchon d'air empêche le vaisseau ainsi embolisé d'assurer son rôle conducteur de sève. Si l'embolie s'étend à une partie importante de l'appareil conducteur du végétal, elle peut conduire à la mort de l'individu par dessèchement.

4- Objectifs et démarche suivis

A l'horizon d'un réchauffement du climat auvergnat moyen compris entre 2.5 et 3°C d'ici 30 ans selon l'ORECC [18] les recherches menées par l'INRA ont pour objectif d'identifier des essences arborescentes et arbustives présentant un intérêt fourrager pour les ruminants et adaptées aux évolutions climatiques auvergnates. Ainsi la mise en place du sylvopastoralisme dans les exploitations agricoles et le choix des espèces ligneuses à implanter doit prendre en compte différents critères et de passer au travers de différents cribles d'analyse :

- L'évaluation de la **valeur alimentaire** de leurs feuilles afin de permettre une maîtrise de la qualité de l'alimentation apportée aux animaux.
- L'étude de leur **capacité de survie** dans un contexte d'augmentation en intensité et en fréquence des périodes de canicules, une diminution de la pluviométrie et une amplification des variations saisonnières, en conservant des périodes de gel.

L'identification d'espèces d'intérêt fera appel dans un premier temps à une recherche bibliographique dont la revue des critères déterminant la qualité nutritive d'un fourrage permettra de recenser un pool d'espèces ligneuses soit déjà présentes en Auvergne, soit issues du climat méditerranéen mais susceptibles de s'implanter en Auvergne au vue des prédictions climatiques. Par la suite, les caractéristiques écophysologiques (réponse physiologique de l'organisme aux variations de l'environnement) à la base de leur capacité de survie en Auvergne en 2050 : résistance aux périodes de gel et à la sécheresse seront évaluées à partir des échantillons. Parallèlement des prélèvements de feuilles seront envoyés au laboratoire afin de compléter expérimentalement les valeurs alimentaires issues de la recherche bibliographique (données fournies ultérieurement au stage). Le croisement de ces données permettra de rendre compte des espèces présentant le meilleur compromis entre qualité nutritive et capacité à être exploitées dans l'Auvergne de 2050.

II- Matériels et méthodes

1- La valeur alimentaire des fourrages

- **Recherche bibliographique**

Sélectionner une série d'espèces qui feront l'objet d'analyses nutritives en laboratoire et d'une caractérisation a nécessité la consultation d'approximativement 50 références bibliographiques (tableau fourni en annexe 1). La recherche a été effectuée par des moteurs de recherches tels Google Scholar, ProdINRA (archives ouvertes des ressources éditoriales électroniques qui recense les productions de l'INRA) et Web of

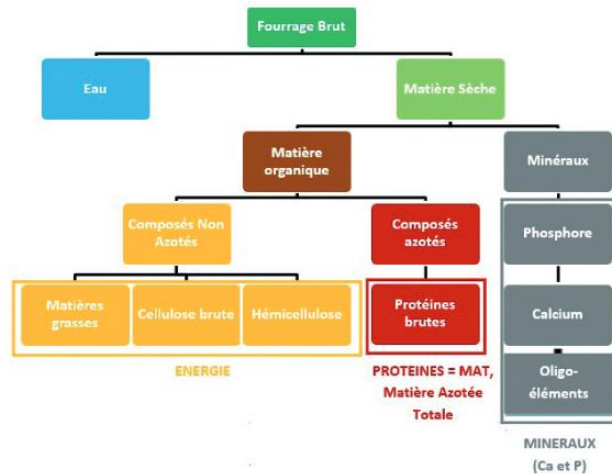


Figure 6. Les différents constituants d'un fourrage

Le fourrage est constitué d'une partie d'eau et de MS. La MS se décompose en matière organique (marron) et minérale (gris). La matière organique comprend une fraction azotée (rouge) et non azotée énergétique (jaune).
Données issues de [20]

Valeur énergétique		
$UFL = \frac{ENL}{1700}$	$UFV = \frac{ENEV}{1820}$	
Énergie nette pour la lactation ENL = EM x kl Énergie nette pour l'entretien et la production de viande ENEV = EM x kmf		
avec kl = efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable (EM) pour la lactation kmf = efficacité d'utilisation de l'EM pour l'entretien et la production de viande		
$Énergie\ métabolisable\ EM = EB \times dE \times \frac{EM}{ED}$		
avec EB = énergie brute de l'aliment dE = digestibilité de l'énergie : fonction de la dMO de l'aliment EM/ED = rend compte des pertes d'énergie sous formes de gaz et dans les urines, fonction de la composition chimique de l'aliment et du niveau de l'alimentation		
Valeur azotée		
PDIN = PDIA + PDIMN PDIE = PDIA + PDIME		
avec PDIA = protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire PDIMN = protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne, limitées par l'azote dégradable (PDIMN), par l'énergie fermentescible (PDIME).		
$PDIA = 1,11 \times MAT \times (1 - DT) \times dr$ $PDIMN = 0,64 \times MAT \times (DT \cdot 0,10)$ $PDIME = 0,093 \times MOF$		
avec MAT = matières azotées totales de l'aliment DT = dégradabilité théorique des MAT de l'aliment dans le rumen dr = digestibilité réelle des acides aminés alimentaires dans l'intestin grêle MOF = matière organique fermentescible de l'aliment		
Valeur d'encombrement		
Fourrage		
$UEM = \frac{75}{QIM}$	$UEB = \frac{90}{QIG}$	$UEL = \frac{140}{QIVL}$
avec UEM, UEB et UEL : unité d'encombrement mouton, bovins, et lait respectivement QIM, QIG et QIVL : ingestibilité mouton, génisse et vache laitière respectivement		
Concentrés : $UE_{concentré} = Sg \times UE_{fourrage}$		
avec Sg : taux de substitution global de l'aliment concentré		

Figure 7. Principe des calculs de la valeur des aliments par Préalim

Données issues de [20].

science. Ainsi la plupart des données recensées sont issues d'articles scientifiques publiés en France et à l'étranger mais certaines sont également issues de site web renseignant les valeurs alimentaires des fourrages comme les tables alimentaire INRA sur le site www.feedtables.com. Quelques valeurs ont été directement transmises par des chercheurs de l'INRA, issues des bases de données propres au laboratoire. Les références ont ensuite été enregistrées et éditées au format conventionnel par le biais du logiciel endnote.

- **Définition de la valeur alimentaire d'un fourrage**

La valeur alimentaire d'un fourrage dépend principalement de deux facteurs : sa valeur nutritive et son ingestibilité qui est la quantité volontairement ingérée par l'animal [19]. Il existe plusieurs méthodes d'analyses chimiques reproductibles permettant de déterminer les différents paramètres de la valeur nutritive schématisée par la figure 6 [20]. La mesure de l'ingestibilité est peu maîtrisée et les facteurs de variations en sont par conséquent moins bien connus [19], elle ne sera pas prise en compte dans le cadre de ce travail.

Pour déterminer la valeur nutritive, plusieurs informations sont nécessaires : (i) la Matière Sèche (MS), intéressante puisque la proportion d'eau restant dans les plantes peut constituer une ressource hydrique pour les animaux, surtout pour l'utilisation de ce fourrage alternatif dans les périodes de pénurie, où les herbacées viennent à manquer au même titre que l'eau ; (ii) la Matière Azotée Totale (MAT ou Crude protein en anglais) ; (iii) la Matière Minérale (MM) souvent déficitaire dans les fourrages classiques ; la teneur en fibre des fourrages avec (iv) la NDF (neutral detergent fiber) ou fibres insolubles dans les détergents neutres représentent la teneur en fibres totales (constituants totaux des parois cellulaires : cellulose, hémicellulose, lignine), (v) l'ADF (acid detergent fiber) ou fibres insolubles dans les détergents acides qui équivaut aux parois peu digestibles, c'est-à-dire l'hémicellulose et la lignine et enfin (vi) l'ADL (acid detergent lignin) qui correspond à la fraction totalement indigestible des parois : la lignine ; (vii) la digestibilité est le facteur principal déterminant la valeur énergétique d'un fourrage. Elle dépend essentiellement de la teneur en parois végétales et de la digestibilité de celles-ci [21]. En effet on peut représenter la plante en deux composantes : une métabolique (contenu cellulaire) complètement digestible, et une structurale (les parois) à digestibilité variable. Entre autre, plus la proportion de lignine au sein des NDF d'un fourrage augmente, plus sa digestibilité diminue. Si sa détermination in vivo est complexe de part tous les facteurs qu'elle implique (rations, besoins, ingestion...), une approche in vitro par l'introduction de sachet de nylon (digestibilité *in sacco*) remplis de fourrages dans le rumen permettent d'en estimer la valeur.

- **Détermination de la valeur nutritive**

La valeur nutritive d'une espèce végétale donnée peut être déterminée en connaissant sa composition et en utilisant le module Préalim du logiciel INRAtion. Les compositions chimiques moyennes issues de la recherche bibliographique ont permis de recalculer les valeurs nutritives des espèces recensées et décrivant au mieux leur potentiel fourrager, en se basant sur les équations préexistantes de INRAtion (figure 7) [22]. La valeur nutritive est décrite principalement à travers la valeur énergétique et la valeur azotée. La valeur énergétique est retranscrite par les Unité fourragères (UF) qui permettent de décrire l'énergie nette apportée par un aliment en comparaison avec une valeur de référence : l'orge [23]. L'INRA a établi des tables de références définissant des



Site	Coordonnées	Altitude (m)	Espèces (noms latins)	Espèces (noms vernaculaires)
1	45.714105 , 3.019678	851.68	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Erable sycomore
2	45.714371 , 3.01852	859.05	<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne
3	45.713554 , 3.024624	841.73 m	<i>Prunus spinosa</i> , <i>Rosa canina</i>	Prunellier, églantier
4	45.714401 , 3.027757	835.3 m	<i>Prunus spinosa</i> , <i>Rosa canina</i>	Prunellier, églantier
5	45.714363 , 3.028583	833.88 m	<i>Sambucus nigra</i>	Sureau noir
6	45.714948 , 3.028776	826.56 m	<i>Crataegus monogyna</i> , <i>ribes alpinum</i> , <i>corylus avellana</i>	Aubépine, groseillier des Alpes, noisetier
7	45.715813 , 3.029113	806.67 m	<i>Alnus glutinosa</i>	Aulne glutineux
8	45.715034 , 3.022117	853.48 m	<i>Populus nigra</i>	Peuplier noir
9	45.719435 , 3.014743	886.43 m	<i>Tilia cordata</i>	Tilleul
10	45.717817 , 3.018874	872.73 m	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Robinier
11	45.719247 , 3.016954	886.74 m	<i>Juglans regia</i>	Noyer
12	Site externe	Site externe	<i>Morus Alba</i>	Murier blanc



Les numéros associés aux prélèvements sont ceux reportés sur les captures d'écrans.

Données issues site Géoportail.gouv.fr.

Figure 8. Coordonnées Gps et altitude des différents lieux d'échantillonnage sur le site de Theix.

catégories d'unité fourragères, dont deux fournies par le module INRAtion, qui distinguent les Unités Fourragères Lait (UFL) calculées pour des ruminants en entretien et femelles en lactation qui correspond à une énergie de 1700Kcal des Unités Fourragères Viande (UFV) calculées pour les ruminants à l'engraissement correspondant à une énergie de 1820 Kcal.

La valeur azotée est quant à elle décrite en France par le système PDI : Protéines Digestibles dans l'Intestin. En effet, chez les ruminants la digestion est réalisée dans la panse grâce à l'action des micro-organismes qu'elle héberge. Ce microbiote reçoit et dégrade les aliments ingérés par l'animal, en consomme une partie pour le développement de ses propres populations microbiennes qui sont également capables de synthétiser leurs propres protéines. Le système PDI décrit alors la quantité d'acides aminés réellement absorbés par l'intestin [21]. La valeur azotée de chaque aliment se décompose en plusieurs valeurs comme les PDIA, les protéines digestibles d'origine alimentaire, les PDIM correspondant aux protéines digestibles synthétisées par le microbiote colonisant le rumen, les PDIE, teneur en PDI en fonction de l'énergie fermentescible (valeur de PDI si l'aliment est inclus dans une ration où l'énergie est le facteur limitant de la synthèse microbienne) et enfin les PDIN correspondant à la teneur en PDI en fonction de l'azote dégradable (valeur de PDI si l'aliment est inclus dans une ration déficitaire en azote dégradable).

Le module INRAtion permet d'apporter également d'autres informations, certaines relatives à l'ingestibilité. Elle s'exprime en Unité d'encombrement (UE) qui décrivent le temps de séjour d'un aliment dans l'appareil digestif de l'animal et ainsi sa capacité à en ingérer en quantité plus ou moins importante. Une valeur idéale doit refléter un compromis entre un temps suffisamment élevé pour limiter les risques de diarrhées et un temps trop élevé qui retarde trop la digestion.

2- Prélèvement des échantillons

Les espèces sélectionnées au préalable sur la base de leur valeur nutritive ont été prélevées sur le site de Theix, commune de Saint-Genès-Champanelle (63), qui est représentatif des conditions de moyenne montagne et de l'environnement sylvopastorale. Le site se situe à une quinzaine de kilomètres au Sud-Ouest de Clermont-Ferrand, à une altitude moyenne de 887 mètres. Les prélèvements ont été effectués sur et dans un rayon de 2km autour du site Intrabois de l'INRA. La totalité des espèces arbustives et quelques arborescentes ont été échantillonnées en bordure de chemins situés en zones forestière, prairiale (haie), ou peri-urbaine (espaces verts). Les lieux de prélèvements sont présentés sur la figure 8, excepté l'échantillonnage du mûrier blanc implanté à une dizaine de kilomètres de Theix chez un particulier. Les différentes mesures réalisées sur le pool d'intérêt ont nécessité plusieurs récoltes débutant pour les premières lors du mois d'avril et pour les dernières dans le cadre de ce stage au mois d'août, retranscrits dans le tableau 3. Certaines informations relatives à la phénologie des espèces prélevées observées sur le terrain sont décrites par l'annexe 3.

3- Mesure de la résistance au gel : la LT 50

La technique du LT50 (Lethal Temperature 50%) permet de décrire la résistance au gel d'échantillons par la méthode de fuite des électrolytes. Après passage au gel, les cellules végétales endommagées placées en solution libèrent leur contenu cellulaire. En mesurant la conductivité électrique de la solution dans laquelle elles

Tableau 3. Calendrier des prélèvements réalisés et manipulations expérimentales associées.

Prélèvement	Date	Mesure associée
1	22/04/19, 15/05/19 et 20/05/19 (débourement tardif)	LT 50
3	10/06/19	P 50
4	15/07/19	Valeur nutritive
5	19/08/19	Valeur nutritive

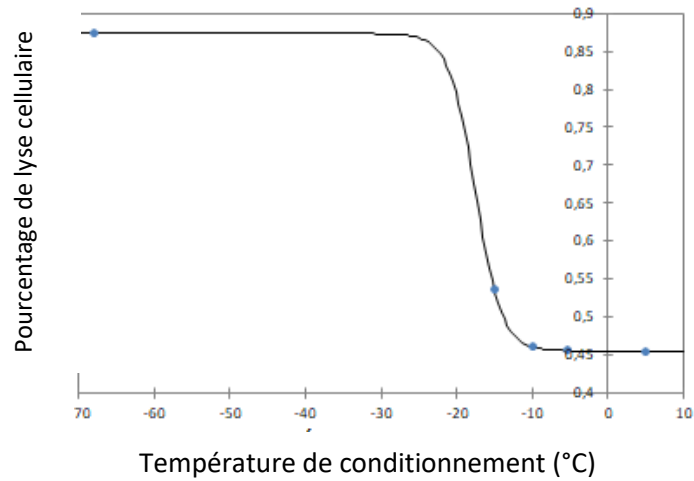


Figure 9. Modélisation du pourcentage de lyse cellulaire en fonction de la température sur un rameau de sureau

La courbe en trait plein représente l'ajustement proposé par la régression linéaire et les points bleus sont les points expérimentaux.

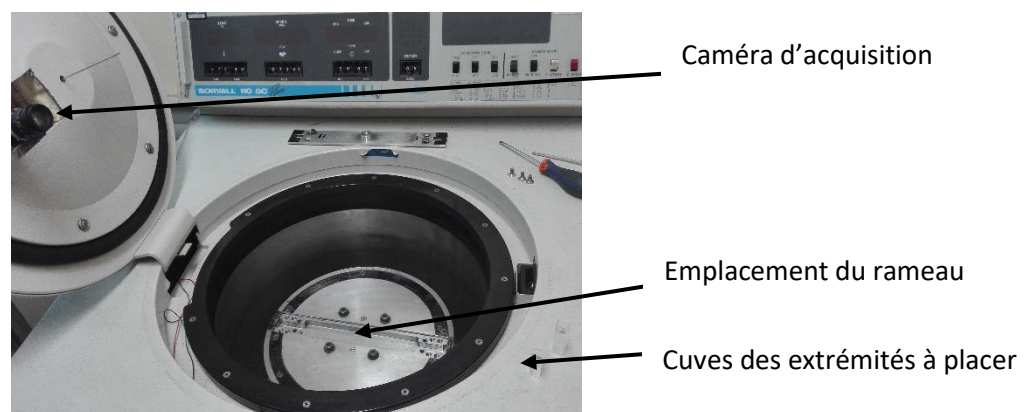


Figure 10. Le cavitrion

Photo personnelle.

baignent il est possible d'estimer le pourcentage de lyse cellulaire causé par la baisse de température [16]. La LT50 est la température engendrant 50% de lyse.

- **Préparation du matériel à tester**

Pour ce faire les rameaux et bourgeons de 5 individus par espèce sont prélevés, deux organes stratégiques pour la survie de l'individu (croissance de l'année ou résilience à moyen terme). Chaque rameau est découpé en 6 échantillons conditionnés chacun à des températures différentes. En effet, le laboratoire dispose d'une chambre froide à 5°C, d'un congélateur à -80°C et de 4 chambres de conditionnement permettant de définir 4 autres températures. Les 4 autres températures -3°C, -7°C, -11°C et -16°C sont des paliers intermédiaires choisis afin d'optimiser l'ajustement non linéaire de la relation entre pourcentage de lyse et température, afin de déterminer la LT50. Pour des raisons d'occupation du matériel, le robinier et le tilleul prélevés le 15 mai 2019 ont été exposés à -2°C, -6°C, -10°C et -15°C. Les chambres sont programmées pour diminuer leur température de 5°C par heure [16] jusqu'à la température souhaitée maintenue 1h avant de remonter à 5°C jusqu'à l'arrivée du manipulateur et arrêt de la machine. Des thermocouples cuivre-constantan sont placés dans les enceintes et sur les échantillons afin de contrôler la température réelle, mesurant les températures toutes les minutes et enregistrées sur une centrale d'acquisition [16]. Une fois le cycle thermique terminé, chaque échantillon de chaque température est découpé en petites sections de 3mm d'épaisseur environ à l'aide d'un sécateur et placé dans un tube à essai attitré, rempli de 15ml d'eau ultrapure (système de purification milli Q185) dont la conductivité est quasi-nulle. Les bourgeons subissent le même traitement, en étant découpés en morceaux à l'aide d'une lame de rasoir. La quantité de matière déposée dans les tubes est évaluée visuellement. Une fois tous les tubes fermés hermétiquement et stabilisé sur un portoir, le portoir est disposé sur un plateau oscillant afin d'agiter le contenu des tubes et permettre ainsi au contenu de libérer dans l'eau pure leur contenu cellulaire. L'ensemble est disposé en chambre froide à 5°C pendant 24h environ.

- **Mesure de la conduction et obtention de la LT 50**

Une fois les tubes sortis de la chambre froide et revenus à température ambiante, la conductivité électrique (micro siemens/m) de la solution, valeur C1 de chaque tube est mesurée à l'aide d'un conductimètre (Held Meter LF340, TetraCon® 325). La conductivité est proportionnelle à la concentration en électrolytes issus du matériel végétal découpé. Plus la température diminue, plus il y a de dégâts cellulaires, et plus la concentration en électrolytes et donc la conductivité augmentent. Afin de calculer un taux de lyse malgré la variabilité de la quantité de matériel présente dans les tubes, ces derniers sont passés à l'autoclave et font l'objet d'une deuxième mesure de conductivité C2 correspondant à 100% de lyse cellulaire. L'indice de mortalité est calculé de la manière suivante : ***Indice de mortalité = (C1÷C2) X 100***

Une fois les indices de mortalité calculés pour chacune des températures de conditionnement, les valeurs de LT50 sont obtenues par une régression non linéaire dont l'ajustement suit un coefficient de détermination (R²) supérieur à 0.9 dans 99.98% des cas, indiquant la fiabilité des valeurs de LT50 ainsi obtenue (figure 9). La LT50 correspond alors à la température pour laquelle on obtient 50% de lyse cellulaire. La démarche statistique réalisée afin d'analyser les données expérimentales est présentée par l'annexe 4.

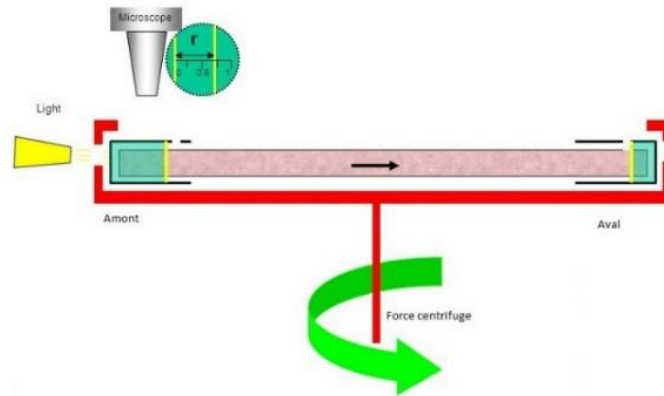


Figure 11. Circulation d'eau g n r e par la force centrifuge dans la cavitron

La portion rectiligne rose représente l'emplacement du rameau avec aux deux extrémités les cuves emplies d'eau (bleues). La flèche noire schématise le sens du trajet de l'eau imposé par la force centrifuge. Données issues de [23]

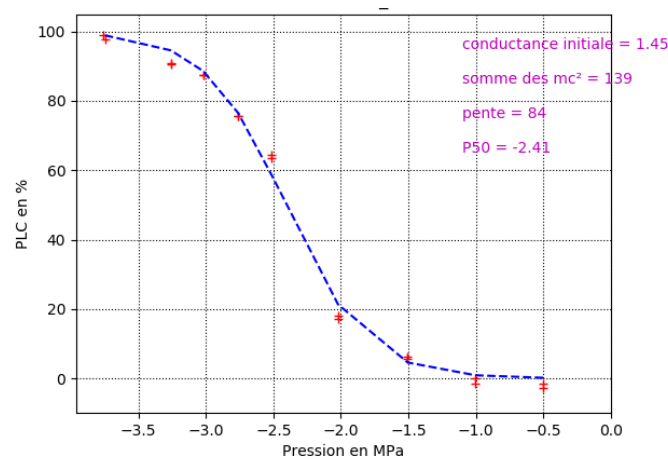


Figure 12. Courbe de vulnérabilité d'un échantillon de Tilleul

La courbe en pointill e correspond à l'ajustement selon les points expérimentaux de la PLC en fonction de la pression appliqu e.

4- Mesure de la résistance à la sécheresse : la P50

- **Provoquer la cavitation : le cavitron**

Le cavitron vise à recréer artificiellement les bulles d'air se formant dans les vaisseaux responsables de l'embolie en imposant une tension par rotation [24]. Le prototype présenté par la figure 10, de fabrication artisanale, recycle une centrifugeuse modifiée afin de placer en son centre le plateau-rotor qui accueille le rameau de l'espèce étudiée. La force centrifuge simule la tension croissante à laquelle est soumise la colonne d'eau des vaisseaux en cas de sécheresse. Chaque extrémité de l'échantillon est placée préalablement dans deux cuves remplies d'eau dont les niveaux diffèrent par des trous percés à des hauteurs arbitraires. Cette différence de niveau d'eau entre les deux extrémités génère lors de la rotation un gradient hydrostatique assurant la mise en circulation d'un flux d'eau à l'intérieur du rameau ainsi positionné [24], comme représenté par la figure 11. Une caméra repère la vitesse de déplacement du niveau d'eau dans la cuve en amont, visible sous la forme d'un ménisque mobile alors que le ménisque en aval reste fixe. La vitesse de déplacement du ménisque en amont est proportionnelle à la conductivité hydraulique du rameau. Au fur et à mesure que la vitesse de rotation augmente, le cavitron simule une tension croissante et provoque l'embolie une quantité croissante dans un nombre croissant de vaisseaux induisant une diminution de conductivité. Il est alors possible, en augmentant progressivement la tension provoquée, de réaliser la courbe de vulnérabilité de l'échantillon en place, comme l'exemple présenté par la figure 12. En effet, l'évolution de la conductivité hydraulique avec la pression caractérise la résistance à la sécheresse de l'échantillon. On définit arbitrairement la P50 afin de décrire l'espèce, comme la pression induisant 50% de perte de conductivité (PLC). Plus cette pression est grande, plus l'arbre est résistant.

- **Prérequis, prélèvement, préparation des échantillons et mesure**

L'utilisation du cavitron nécessite que la longueur des vaisseaux soit suffisamment petite chez l'espèce étudiée afin de ne pas être sectionnés de part et d'autres lors de leur prélèvement ou préparation. En effet, le rotor accueillant le rameau est de dimension finie (20 à 40 cm selon l'appareil). Si la longueur des vaisseaux dépasse cette limite, lors de la préparation, le xylème est alors « ouvert ». Aussi, il a été nécessaire pour ce projet, de vérifier d'abord que les espèces sélectionnées étaient compatibles avec le cavitron. Pour ce faire, deux échantillons par espèce ont été mesurés au préalable au cavitron suivant le protocole standard (voir ci-après). Si la dynamique de variation de la PLC était correcte, les mesures sur les autres échantillons de la même espèce étaient poursuivies. Sinon, elles étaient interrompues.

Une fois coupé sur le terrain, le rameau doit être rapidement dépourvu de ses feuilles afin de limiter au maximum l'évapotranspiration et conserver au mieux l'humidité de l'échantillon, ensuite placé dans un sac avec son extrémité coupée enroulée dans du papier humide, et placé en chambre froide à 5°C jusqu'à son étude. Cette technique de conservation a permis, dans le cadre de ce stage de conserver correctement les échantillons prélevés toute une semaine durant, mais elle peut garantir leur fiabilité jusqu'à deux voire trois semaines selon les renseignements apportés par Julien Cartallier, technicien de l'équipe SUREAU du PIAF, spécialiste des mesures hydrauliques.

Tableau 4– Paramètres issus de la bibliographie décrivant la valeur nutritive des espèces ligneuses d'intérêt

La valeur nutritive se décrit par la Matière Sèche (MS), Matière Minérale (MM), Matière Azotée Totale (MAT), les fibres insolubles dans les détergents neutres (NDF) ou acides (ADF), la lignine (ADL), en pourcentage de MS et les digestibilité in vitro et in sacco (%).

Espèces	MS	MM	MAT	NDF	ADF	ADL	Digestibilité in vitro	Digestibilité in sacco
Luzerne témoin	28,40	8,50	18,80	54,96	37,43	9,10		62,11
Ray grass anglais témoin			15,70	42,80	21,00	2,10		83,30
Fraxinus excelsior	40,59	9,20	16,14	32,27	20,87	10,71	70,60	64,00
Corylus avellana	43,80	6,10	13,32	37,73	21,32	10,83	61,75	44,00
Morus alba	45,29	88,95	18,57	28,40	22,36	6,15	81,90	71,30
Juglans regia	52,90	6,40	13,28	34,24	16,73	9,00	67,92	47,00
Robinia pseudo accacia	48,58	6,30	19,30	38,07	42,28	12,87	51,15	38,00
Crataegus monogyna	45,18	15,53	10,84	32,91	19,16	11,45	76,18	
rosa canina	45,50	7,10	11,98	34,83	15,30	4,28	80,3	
prunus spinosa	52,60	8,50	12,10	45,00	16,20	9,30	80,20	
Acer pseudoplatanus		10,40	13,77	36,73	15,03	6,90	75,37	
Ribes alpinum								
Alnus glutinosa	37,95	5,10	19,05	36,30	23,20	11,40	72,45	51,00
Populus nigra		8,77	17,03	32,47	20,90	5,90	74,37	
sambucus nigra		9,33	21,37	26,07	16,50	6,61	86,13	

Tableau 5– Données retenues du logiciel Prévalim décrivant au mieux la valeur alimentaire des espèces d'intérêt

Digestibilité de la Matière Organique (DMO), la Digestibilité Théorique des protéines dans le rumen (DT) et Digestibilité de l'Intestin (Dr), en pourcentages. Unités Fourragères Lait et Viande (UFL et UFV), Energie Brute (EB), Energie Métabolisable (EM) en Kilocalories (Kcal/kg de MS), Protéines Digestibles de l'Intestin (PDI) en grammes (g/kg de MS) et Unité d'Encombrement chez le mouton, vache laitière et génisse (UEM, UEL et UEB).

Données des témoins issues de [23] pour une luzerne déshydratée à 16-18% de protéines sur sec, et du ray grass anglais de première pousse de l'année.

Espèces	Données												
	DMO	DT	Dr	UFL	UFV	EB	EM	PDIA	PDIN	PDIE	UEM	UEL	UEB
	%	%	%			Kcal/kg	Kcal/kg	g/kg	g/kg	g/kg			
Fraxinus excelsior	74,20	69,30	85,50	1,02	0,96	4754,00	2847,00	47,00	108,00	108,00	0,83	0,90	0,86
Corylus avellana	68,60	66,80	82,80	0,87	0,80	4475,00	2473,00	41,00	89,00	94,00	0,89	0,92	0,91
Morus alba	81,30	71,40	88,10	1,00	0,97	4210,00	2743,00	52,00	125,00	110,00	0,74	0,84	0,78
Juglans regia	72,50	66,80	82,80	0,93	0,88	4461,00	2616,00	41,00	89,00	98,00	0,80	0,88	0,83
Robinia pseudo accacia	62,00	71,70	88,50	0,77	0,68	4565,00	2243,00	53,00	128,00	100,00	0,84	0,90	0,87
Crataegus monogyna	77,70	64,30	80,40	0,92	0,88	4007,00	2531,00	34,00	72,00	89,00	0,83	0,90	0,86
rosa canina	80,30	65,60	81,60	1,05	1,02	4407,00	2869,00	37,00	80,00	100,00	0,80	0,88	0,84
prunus spinosa	80,20	65,70	81,70	1,01	0,98	4346,00	2785,00	38,00	81,00	100,00	0,76	0,86	0,80
Acer pseudoplatanus	77,20	67,30	83,30	0,96	0,92	4289,00	2661,00	42,00	93,00	100,00	X	X	X
Ribes alpinum	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Alnus glutinosa	75,40	71,70	88,60	0,99	0,94	4621,00	2772,00	53,00	129,00	112,00	0,81	0,89	0,84
Populus nigra	76,60	70,10	86,40	0,97	0,93	4417,00	2714,00	49,00	114,00	107,00	X	X	X
sambucus nigra	83,90	73,40	91,10	1,10	1,08	4471,00	3004,00	58,00	145,00	121,00	X	X	X
Tilia cordata	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Luzerne témoin	60,60	67,70	X	0,73	0,65	X	2100,00	50,00	X	X	X	X	X
Ray-grass témoin	X	X	X	0,96	0,99	X	X	X	117,00	95,00	X	X	X

Le rameau prélevé est coupé à une longueur de 20cm au laboratoire et se voit retirer sécateur ou à la lame de rasoir les rameaux secondaires afin d'obtenir une portion la plus rectiligne possible. Les manipulations ont lieu dans un bac rempli d'eau afin de ne provoquer une éventuelle embolie. Une fois prêt, le rameau dont on a mesuré le diamètre de chaque extrémité, est placé dans la centrifugeuse avec son extrémité la plus épaisse dans la cuve présentant le trou le plus haut (amont), et l'extrémité la plus fine dans la cuve avec le trou le plus bas (aval), ce qui permet de mimer ainsi lors de la rotation la circulation naturelle de la sève, vers la partie supérieure du rameau. La centrifugeuse doit alors être refermée et une pipette permettant d'injecter de la solution dans les cuves au cours de la manipulation est placée en son centre. La solution utilisée pour mimer la sève brute est préparée à partir de 2.98g de chlorure de potassium (KCl) et 0.444g de chlorure de calcium (CaCl₂) pour 4L d'eau ultrapure et qui a été préalablement dégazée grâce à une pompe à vide avant chaque journée de manipulation.

L'échantillon mis en place, il faut lancer le logiciel Cavisoft permettant de prendre les mesures et contrôler la vitesse de rotation du cavitron, dont l'interface est présentée par l'annexe 5. Sa configuration demande de renseigner les diamètres mesurés sur l'échantillon afin de calculer le débit du fluide en circulation. Les mesures peuvent alors être faites en augmentant de manière progressive la pression induite par la machine jusqu'à une perte de conductivité de 100%. Un protocole d'utilisation du logiciel est fourni en annexe 6. Une fois les PLC acquise pour chaque tension appliquée, un modèle mathématique de régression non linéaire permet l'ajustement des valeurs et le calcul de la P50 correspondant à la pression appliquée engendrant 50% de perte de conductivité. La démarche statistique appliquée afin d'analyser les données expérimentales est présentée par l'annexe 4.

III- Résultats

1- Les catégories de fourrages ligneux selon leur valeur nutritive

Les tableau 4 et 5 présentent les moyennes de différents paramètres de la valeur nutritive recensés lors de la recherche bibliographique dans le cadre de l'étude et les UF et PDIA déduits de l'utilisation de Préalim pour les espèces ligneuses sélectionnées (tableau complet en annexe 1). Une première étape d'identification d'espèces d'arbres et d'arbustes d'intérêt fourrager dans lequel s'inscrit ce stage se base sur les valeurs énergétiques et azotées décrites par les UF et PDI décrites précédemment. En ne considérant que les espèces où les deux valeurs ont pu être renseignées, les espèces relevées dans la bibliographie ont pu être classées selon trois catégories comme représentées sur la figure 13 :

Catégorie 1 : Espèces dont UFV < 0.80, valeur en dessous de laquelle plusieurs espèces semblent isolées, comme il est possible de le voir sur la figure 12. Un groupe de 10 espèces (cytise, arroches, robinier, orme, chêne rouge, bignone, châtaignier, houx, pistachier) présente des unités fourragères dont les valeurs sont inférieures à 0.80, seuil au-delà duquel se situe la majeure partie des espèces. Il est alors possible de supposer que la valeur énergétique de ces espèces est trop faible pour présenter le meilleur potentiel fourrager.

Catégorie 2 : Espèces dont PDIA < 35g, valeur permettant d'isoler 5 espèces qui lui sont inférieures (aubépine, chêne kermès, troène et lilas communs, myrte). La valeur nutritive des fourrages étant également dépendante de la valeur azotée qu'ils sont susceptibles d'apporter, il est possible de juger la valeur azotée trop faibles.

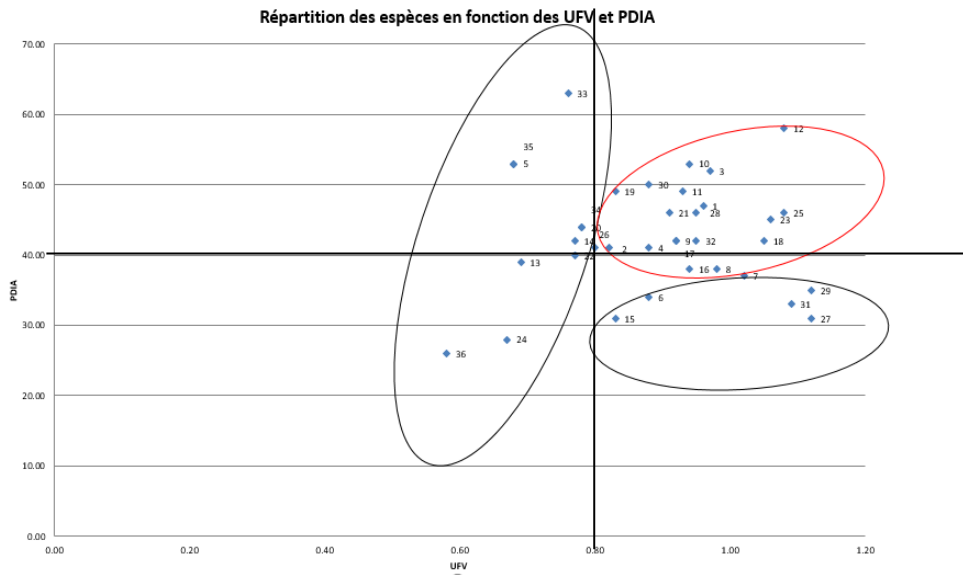


Figure 13. Répartition des espèces étudiées en fonction de leur PDI (g) et UFV

Les valeurs seuils de 40g de PDIA et 0.80 UFV sont représentés par les traits pleins.

Tableau 6. Les espèces sélectionnées dans le cadre du projet

Les numéros associés à chaque espèce sont les numéros représentés sur la figure 12.

Catégorie	Numéro	Espèce
3	1	Frêne
3	2	Noisetier
3	3	Murier B.
3	4	Noyer
1	5	Robinier
2	6	Aubépine
3	7	Eglantier
3	8	Prunellier
3	9	Erable S.
3	10	Aulne G.
3	11	Peuplier N.
3	12	Sureau N.
X	X	Groseillier A.
X	X	Tilleul

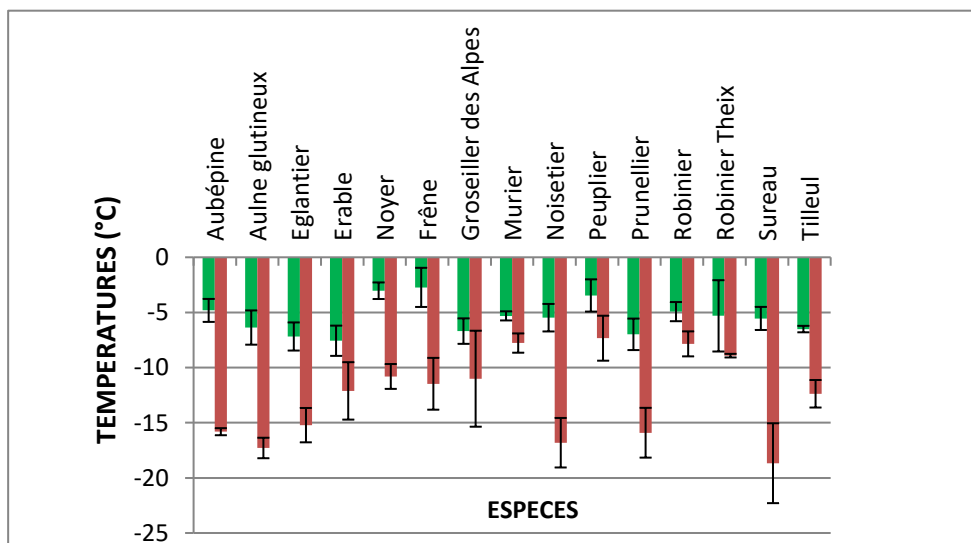


Figure 14. Représentation des LT50 des rameaux et bourgeons des espèces de l'étude

Les LT50 des bourgeons sont représentées en vert et des rameaux représentées en marrons.

Catégorie 3 : Un troisième groupe d'espèces peut être défini, présentant des valeurs en unités fourragères supérieures à 0.80 et des PDIA supérieures à 40g. Ces espèces représentent ainsi un compromis entre valeur énergétique et azotée intéressant en comparaison avec les échantillons des deux autres groupes.

Ainsi au vue de la répartition des espèces selon la figure 13, les espèces avec les valeurs nutritives les plus intéressantes dans l'objectif d'une application sylvopastorale (résumées dans le tableau 6) se placent dans la troisième catégorie qui a été définie à l'aide des valeurs de PDIA et UFV. Bien que cette caractérisation ait été nécessaire afin de sélectionner des espèces, il faut noter qu'elle reste arbitraire et catégorique : d'autres critères viennent influencer et contrebalancer ces valeurs comme des UE faibles pour certaines espèces qui les rendent intéressantes selon les besoins animaux. Deux des espèces sélectionnées pour l'étude sont présentes selon les données retenues dans les catégories de fourrages qui ont été écartées selon les caractéristiques de leur valeur alimentaire. C'est le cas du robinier (n°5) et de l'aubépine (n°6) qui ont intégré le projet car présentant des digestibilités intéressantes lors de la recherche bibliographique au moment de laquelle les premiers prélèvements ont débuté et qui étaient présentes sur le site de prélèvement. De plus, on remarque qu'une des espèces de l'étude, le groseillier des Alpes n'est pas présente dans la recherche préalablement effectuée à la sélection du pool. Son intégration à l'étude résulte d'une erreur de d'identification de l'aubépine lors des prélèvements réalisés dans le cadre des mesures de résistances au gel. Ses résultats à la LT50 ont permis de la considérer dans le cadre du stage, bien que sa valeur nutritive ne soit pas encore renseignée dans la bibliographie, son analyse chimique permettra de juger sa potentialité fourragère. De même le tilleul a intégré l'étude car présent sur le terrain à un stade phénologique idéal pour réaliser les mesures de LT50.

2- La résistance au gel des espèces d'intérêt

- **Statistiques descriptives**

La figure 14 propose une représentation des moyennes de LT50 obtenues pour chacune des espèces étudiées. Ainsi, en considérant les rameaux, l'aulne glutineux, l'érable, l'églañtier, le noisetier, prunellier et le sureau semblent avoir de meilleurs résistances au gel avec une LT50 de -18.67°C atteinte pour le sureau. Les rameaux du peuplier quant à eux sont les moins résistants avec une LT50 à -7.34°C. Les bourgeons les plus résistants sont ceux de l'érable présentant une LT50 de -7.57°C, à l'opposé du frêne (-2.73°C). Les températures de gel des bourgeons semblent nettement inférieures à la température de gel des rameaux. Pourtant la représentation des écarts types montre des chevauchements possibles entre les mesures faites sur les échantillons, visibles dans le cas des deux organes du groseillier des Alpes par exemple. Les différences significatives décrites peuvent être remise en cause et ont fait l'objet d'une étude statistique.

Le test de Kruskal-Wallis à deux facteurs (espèces, type d'organe) permet de conclure que les valeurs de LT50 proviennent de populations différentes, autrement dit, le test met en évidence des différences significatives entre les différentes LT50, avec une p-value inférieure au seuil de significativité défini à 5%. Cependant, les comparaisons multiples par paire selon le test de Dunn, visible avec l'annexe 7, permettent de définir trois groupes d'échantillons comprenant chacun les deux types d'organes (rameaux du groseillier des Alpes avec les bourgeons du murier blanc par exemple) : le groupe A avec 4 échantillons, le groupe AB avec 21 échantillons et le groupe B de 3 échantillons. Le nombre important d'échantillons dans le second groupe limite

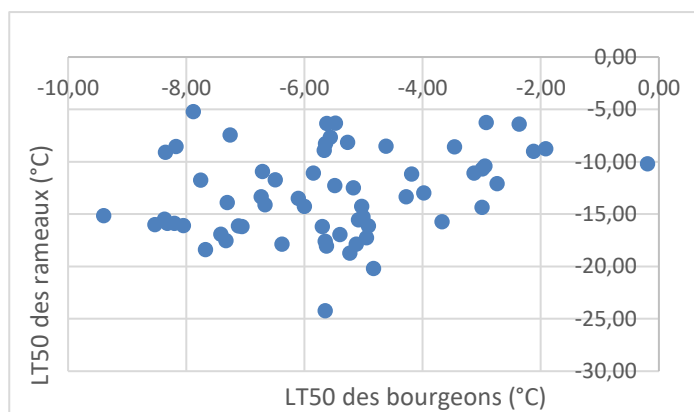


Figure 15. Représentation de la LT50 des rameaux en fonction de la LT50 des bourgeons

Tableau 7. Résultats des comparaisons multiples par paires suivant la procédure Conover-Iman pour la LT50 des bourgeons

Echantillon	Effectif	mme des ran	Moyenne des rangs	Groupes		
Erable	5	63,000	12,600	A		
Eglantier	5	81,000	16,200	A		
Prunellier	5	94,000	18,800	A	B	
Tilleul	4	81,000	20,250	A	B	
Groseiller	5	104,000	20,800	A	B	
Aulne	4	99,000	24,750	A	B	C
Robinier	3	92,000	30,667	A	B	C
Noisetier	5	169,000	33,800	A	B	C
Sureau	5	175,000	35,000	A	B	C
Murier	5	182,000	36,400	A	B	C
Aubépine	3	118,000	39,333	A	B	C
Peuplier	4	204,000	51,000		B	C
Frêne	4	216,000	54,000			C
Franquette	5	275,000	55,000			

Tableau 8. Groupes d'espèces définies par Kruskal-Wallis et LT50 (°C) moyennes associées selon l'étude des bourgeons (a.) ou l'étude des rameaux (b.)

a.

Espèces	Groupe	LT50
Erable	A	-7,38
Eglantier		
Prunellier		
Tilleul	AB	-6,73
Groseiller		
Aulne	ABC	-5,47
Robinier		
Noisetier		
Sureau		
Murier		
Aubépine		
Peuplier	BC	-3,46
Frêne	C	-2,88
Franquette		

b.

Espèces	Groupe	LT50
Aulne	A	-17,98
Sureau		
Noisetier	AB	-16,81
Prunellier	ABC	-15,91
Aubépine	ABCD	-15,52
Eglantier		
Tilleul	BCDE	-12,37
Erable	CDE	-12,12
Frêne	DE	-11,10
Groseiller		
Franquette		
Robinier		
Murier		
Peuplier	E	-8,01

fortement la discrimination entre espèces et organes pouvant servir à la sélection d'espèces d'intérêt fourrager. Aussi, la réalisation de ce test amène à conclure que la comparaison simultanée de l'effet du type organes d'espèces sur les valeurs de LT50 ne permet pas de conduire à une classification des ligneux d'intérêt, il semble notamment peu judicieux de comparer la température de gel d'un bourgeon d'une espèce donnée avec la température de gel d'un rameau d'une autre espèce. Ces conclusions amènent à repenser le test statistique à utiliser dans le cadre de l'étude. Il convient alors de réaliser un test de Kruskal-Wallis en ne considérant en tant que variable explicative, non pas deux facteurs mais seule l'espèce, en cherchant à étudier son effet soit sur la LT50 des bourgeons, soit sur la LT50 des rameaux qui semblent indépendantes l'une de l'autre comme le montre la figure 15. La distribution des données ne permet pas d'établir une relation entre les deux.

Les tests de Kruskal-Wallis sont réalisés suivis des comparaisons par paires effectuées cette fois-ci selon la procédure de Conover-Iman qui correspond à un test de Student (comparant les moyennes des échantillons) réalisé sur les rangs et qui propose des résultats de meilleure puissance statistique que la procédure de Dunn appliquée aux nouvelles modalités du test. Le nouveau test de Kruskal-Wallis sur les valeurs de LT50 des bourgeons montre des différences significatives entre les échantillons (p-value de 0.1%). Les comparaisons par paires permettent de définir 5 groupes d'espèces, avec un nombre d'espèces plus équitablement réparties entre les groupes que lors du test précédent (tableau 7). La nature des espèces, leur répartition et les moyennes des LT50 associées sont récapitulées par le tableau 8a. Le test permet de classer les espèces selon une température croissante de LT50 de leurs bourgeons, témoignant d'une résistance au gel de plus en plus faible, avec l'érable et l'églantier présentés au sein du groupe le plus résistant avec une LT50 de -7.38°C en moyenne, et le frêne et le noyer commun franquette correspondant au moins résistants avec une LT50 de -2.88°C . Un autre test Kruskal-Wallis de comparaison des espèces est réalisé sur les valeurs LT50 des rameaux. Une différence significative est mise en évidence (p-value = 0.01%). Le test de Conover-Iman regroupe les espèces en 8 catégories selon la résistance de leurs rameaux, en décrivant l'aulne et le sureau comme étant les plus résistants avec une LT50 moyenne de -17.98°C , très inférieure au robinier, murier et peuplier avec une LT50 de -8.01°C .

Considérer la résistance des bourgeons ou la résistance des rameaux conduit à l'obtention de groupes différents, à raison de 5 groupes d'espèces dans un cas contre 8 groupes d'espèces dans l'autre cas, comme le montre la comparaison faite avec les tableaux 8. Des similitudes peuvent être retrouvées entre ces classifications, comme l'appartenance à un même groupe du l'aulne ou du sureau, ou bien une résistance peu élevée dans les deux cas du peuplier présentant la LT50 la plus faible pour ses rameaux, et une LT50 de -3.46°C pour ses bourgeons. Ces divergences entre organes rendent difficile la prise en compte des deux organes afin de discriminer les espèces d'intérêt. En effet, l'érable et le frêne sont diamétralement opposés au niveau de la LT50 des bourgeons, alors qu'ils sont classés dans des groupes successifs en étudiant la LT50 de leur rameau. Ces constatations forcent à faire le choix de ne considérer que l'un ou l'autre des deux organes afin de caractériser l'écophysiologie du pool d'espèces sélectionnées.

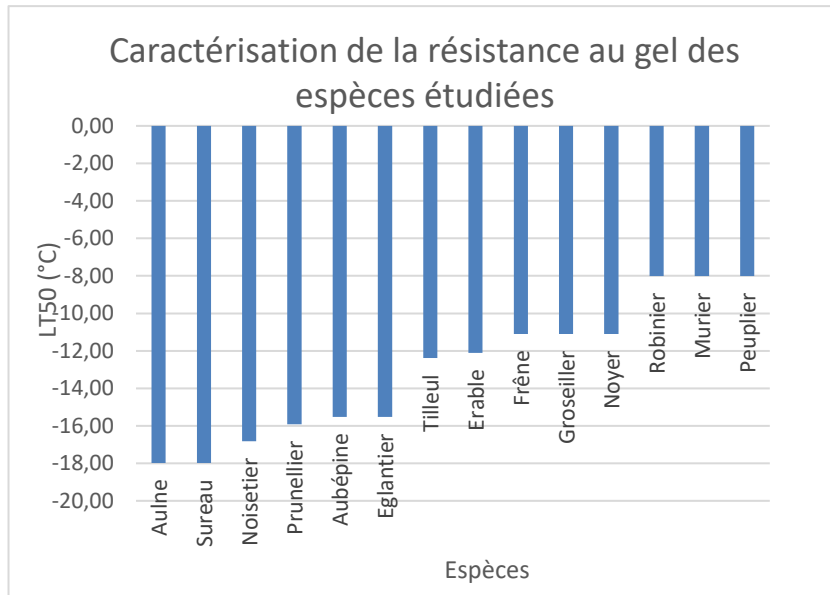


Figure 16. Comparaison de la résistance au gel des rameaux des espèces étudiées

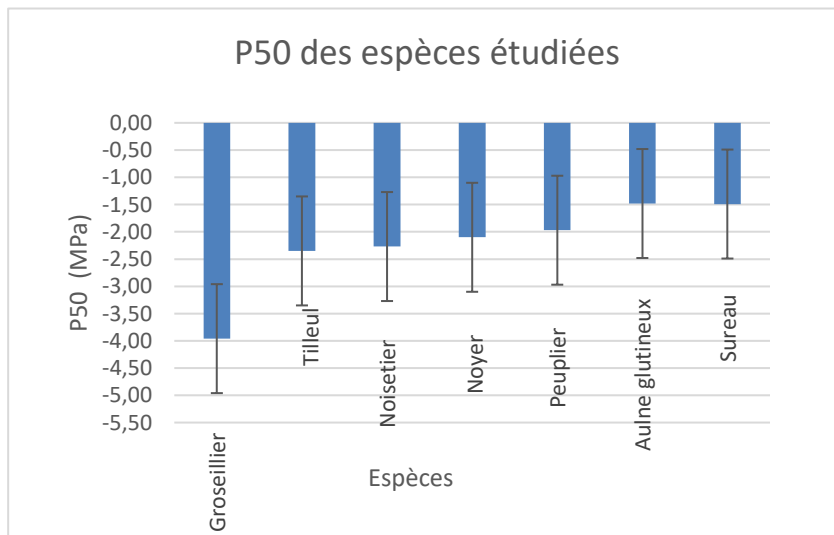


Figure 17. Représentation des P50 mesurées sur les espèces d'intérêt compatibles au cavitrone

- **Classification du pool d'espèces selon leur résistance au gel**

Afin de choisir quel organe prendre en compte dans le but de mieux caractériser l'espèce face au risque gélif, il est essentiel de revenir sur les conséquences physiologiques du gel sur les deux organes. En effet, le gel d'une partie des bourgeons d'un individu conduit à réduire le développement foliaire qui en serait issu. Or c'est ce même développement foliaire qui conditionne l'intérêt porté aux espèces potentiellement fourragères. La gelée des bourgeons en place stimule la réactivation des bourgeons latents afin de garantir la formation de feuille pour l'année. En plus, les végétaux présentent des propriétés de dédifférenciation assurant la formation de nouveaux méristèmes et bourgeons à partir par exemple de cellules corticales anciennes. Afin de reconstituer le potentiel végétatif perdu par le gel la plante doit puiser dans ses réserves et nutriments du sol une nouvelle fois lors de la reprise de la végétation. La mise en place d'un projet sylvopastoral en Auvergne souhaitant intégrer les pratiques agroforestières à la ration alimentaire d'un troupeau aurait donc tout intérêt à privilégier des espèces dont les bourgeons présentent de bonnes résistances au gel afin de garantir la productivité de l'essence choisie.

Cependant le gel de rameaux plus anciens fait intervenir la dédifférenciation de cellules de parties plus anciennes, processus plus coûteux pour la plante et impactant plus sa capacité de survie que la gelée d'organes nouveaux. Ainsi le gel des rameaux anciens impacte bien plus la survie même de l'individu que le gel de ses bourgeons. Dans le cadre du sylvopastoralisme, la survie des essences implantées est un critère essentiel assurant la durabilité du projet de l'exploitation des ligneux. La prise en compte seule des données de LT50 des bourgeons dans le cadre de cette étude semble moins pertinente que l'étude des rameaux qui ont des conséquences moindres sur le matériel végétal puisque touchant des organes déjà formés l'année précédente. Le choix de l'organe à prendre en compte est influencé également par d'autres critères, notamment l'ensemble des biais et limites associées aux mesures qui sont décrits plus loin. Suivant ces biais, le choix a été fait dans cette présente étude de ne prendre en compte que la température de gel des rameaux afin de conclure sur le comportement des espèces d'intérêt face aux épisodes de gel printanier tardif pouvant survenir en Auvergne. La figure 16 décrit les espèces selon leur résistance au gel.

2- La résistance à la sécheresse des espèces d'intérêt

A l'issue de la première phase test, 7 espèces se sont révélées compatibles à l'utilisation du cavitron et ont pu faire l'objet de mesures répétées dont la liste est la suivante : aulne glutineux, groseillier des Alpes, noisetier, noyer, peuplier, sureau et tilleul. L'étude de la résistance au gel du pool d'intérêt n'a pu porter que sur les valeurs obtenues de ces 7 espèces.

- **Statistiques descriptives**

La figure 17 représente les moyennes des valeurs de P50 obtenues pour chaque espèce qui a pris part aux manipulations. Le groseillier des Alpes se présente comme l'espèce la plus résistante puisque c'est la seule espèce dont la P50 est inférieure à -3.50 MPa. Le noisetier, le noyer, le peuplier et le tilleul ont des valeurs qui les placent dans un même ensemble, avec des P50 comprises entre -1.97 et -2.35 MPa, plus résistant que l'aulne et le sureau qui ont montré des valeurs inférieures à -1.50 MPa, démontrant un taux d'embolie élevé à de faibles tensions au cavitron. Ces mesures rejoignent les valeurs de travaux antérieurs recensés dans la

Tableau 9. Résultats des comparaisons par paires des P50 des espèces suivant la procédure de Dunn

Echantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
Groseillier	4	10,000	2,500	A	
Tilleul	5	52,000	10,400	A	B
Noisetier	5	55,000	11,000	A	B
Noyer	4	63,500	15,875	A	B
Peuplier	5	95,500	19,100	A	B
Aulne glutin	3	75,500	25,167		B
Sureau	4	114,000	28,500		B
Aulne glutin	2	62,500	31,250		B

Tableau 10. Regroupement d'espèces selon la procédure de Dunn et moyenne des P50 de chaque espèce associée.

Espèces	Groupe	P50
Groseillier	A	-3,96
Tilleul	AB	-2,35
Noisetier	AB	-2,27
Noyer	AB	-2,10
Peuplier	AB	-1,97
Aulne glutineux	B	-1,48
Sureau	B	-1,49

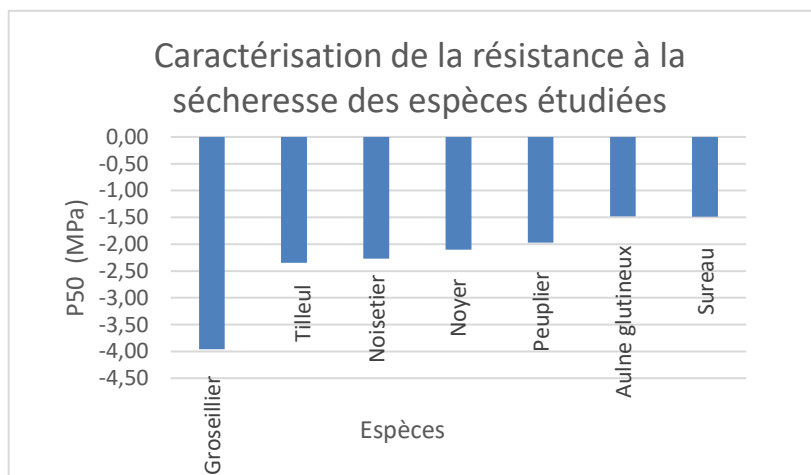


Figure 18. Comparaison de la résistance à la sécheresse des espèces étudiées compatibles avec l'utilisation du cavitron.

bibliographie avec des P50 de -2.22MPa pour le noisetier, -2.58MPa pour le peuplier ou encore -1.52MPa pour le sureau par exemple [24bis]. Ces premières approximations ont dû être complétées par une étude statistique afin d'étudier les différences significatives entre les données. Le résultat d'un test de Kruskal-Wallis montre des différences significatives entre les espèces avec une p-value nulle : il existe bien un effet de l'espèce sur la valeur de P50 indiquant des différents niveaux de résistance au stress hydrique.

- **Hiérarchisation de la résistance à la sécheresse des espèces d'intérêt**

Le test de comparaison multiples par paires selon la procédure de Dunn, présenté par le tableau 9, définit 3 groupes d'espèces en fonction des différences significatives existant entre les moyennes de chaque rang. Le tableau 10 met en relation les groupes proposés par les résultats et les moyennes des P50 des échantillons de chaque espèce. Ainsi la comparaison par rang propose un classement dans l'ordre croissant des P50, or plus la valeur est faible, plus l'échantillon est résistant : les groupes sont classés selon une résistance décroissante à la sécheresse. Le groseillier des Alpes montre une résistance bien supérieure aux autres groupes avec une P50 de -3.96MPa. Un deuxième groupe rassemble le tilleul, noisetier, le noyer et le peuplier et un troisième l'aulne et le sureau (voir figure 18). Malgré certaines espèces incompatibles, l'utilisation du cavitron a permis de fournir des courbes de vulnérabilité et valeurs de P50 pour 7 des espèces sélectionnées dans le cadre de cette étude. Il serait intéressant d'approfondir les renseignements manquants par d'autres méthodes disponibles, comme la méthode optique, qui n'a pas pu être utilisée dans le cadre de ce stage pour des soucis logistiques.

3- Identification des espèces montrant le meilleur compromis entre leurs valeurs nutritives et écophysologiques

L'étude des UF et PDIA pour chacune des espèces issues de l'analyse bibliographique a permis de sélectionner 14 espèces présentant le meilleur compromis entre leur valeur énergétique et azotée, et qui plus est étant présentes sur le site de l'étude à un stade phénologique compatible avec les mesures écophysologiques. Parmi ces espèces, et d'après le tableau 4 précédent, les espèces présentant les valeurs d'UF et PDIA les plus élevées si l'on considère arbitrairement les essences avec des UF supérieures à 1 et des PDIA supérieures ou égales à 50 sont les suivantes : le sureau, le murier blanc et le frêne, dont les deux derniers ont déjà en plein centre du projet parasol [24] travaillant sur les ressources fourragères ligneuses. Selon les données obtenues de Prévalim, en considérant comme critère de hiérarchisation uniquement la valeur des UFL, les espèces se classent selon l'ordre présenté par le tableau 11. La valeur énergétique ne décrit pas pour autant la valeur azotée du fourrage puisque le classement défini selon les PDIA diffère du premier. En effet si le sureau conserve sa première position, constituant donc un fourrage très intéressant, d'autres espèces comme l'églantier présentent des UF élevées par rapport aux autres mais des PDIA plutôt faibles. Dans le cadre d'une application, le choix de espèces à planter dépendra donc de la caractéristique à exploiter : apport azoté ou énergétique, en parallèle des caractéristiques écophysologiques afin de faire le compromis le plus pertinent. Les informations apportées par l'étude écophysologique rend encore plus complexe une hiérarchisation figée des espèces d'intérêt, puisque les classements en fonction des résistances au gel et à la

Tableau 11. Classement des espèces d'intérêt selon les UFV, le PDIA, la LT50 et la P50

Données issues des mesures expérimentales, tableau 4, [17].

Classement	Selon UFV	Selon PDIA	Selon P50	Selon LT50
1	Sureau	Sureau	Groseillier	Aulne
2	Ray-grass témoin	Aulne glutineux	Ray grass Témoin	glutineux
3	Eglantier	Robinier	Noisetier	Sureau
4	Frêne	Murier	Tilleul	Noisetier
5	Prunellier	Luzerne témoin	Noyer	Prunellier
6	Murier	Peuplier noir	Peuplier noir	Aubépine
7	Aulne glutineux	Frêne	Aulne glutineux	Eglantier
8	Peuplier noir	Erable	Sureau	Tilleul
9	Erable	Noyer		Erable
10	Noyer	Noisetier		Frêne
11	Aubépine	Prunellier		Groseillier
12	Noisetier	Eglantier		Noyer
13	Robinier	Aubépine		Robinier
14	Luzerne témoin			Murier
				Peuplier noir

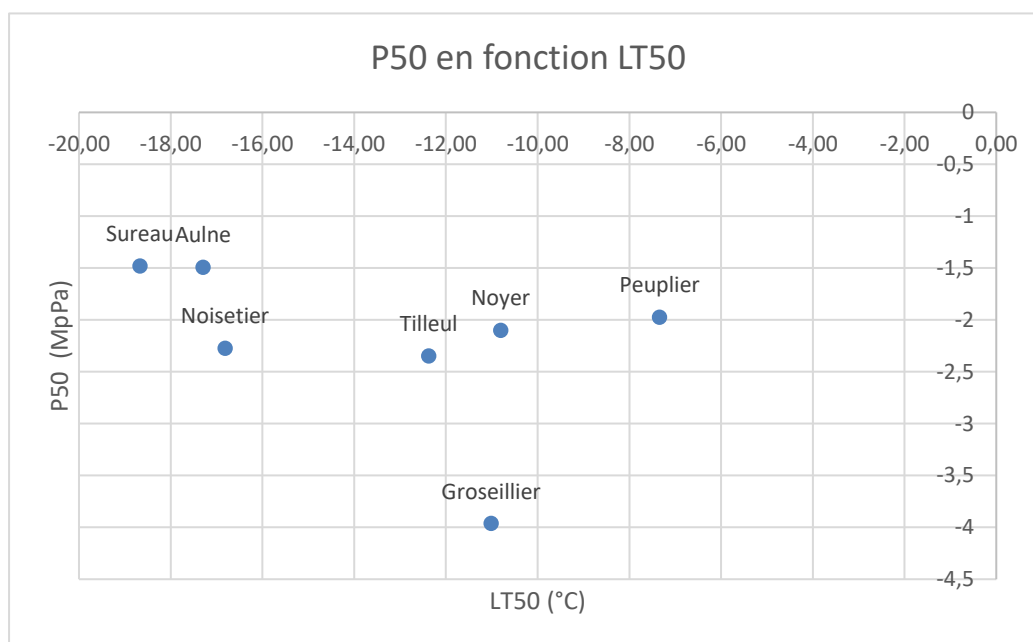


Figure 19 – Représentation de la P50 en fonction des LT50 des espèces ligneuses de l'étude

sécheresse différent des classements proposés par l'étude alimentaire. Ainsi, si le sureau présente une bonne valeur énergétique, azotée et fait partie des espèces les plus résistantes au gel parmi celles étudiées, son cavitron l'a classé parmi les moins résistantes à la sécheresse dans le lot d'espèces ayant fourni des résultats. Le noisetier quant à lui ne présente pas la valeur alimentaire la plus intéressante du pool d'intérêt, mais se place parmi les espèces les plus résistantes à la fois au gel et à la sécheresse et représente un bon compromis face à ces deux facteurs environnementaux conditionnant la survie et le développement de l'espèce dans le milieu. Le Tilleul présente lui aussi des résultats intermédiaires qui lui confèrent une bonne capacité d'adaptation à ses deux critères abiotiques. Le murier dont le potentiel fourrager a déjà fait l'objet d'autres recherches, appartient aux espèces les moins résistantes au gel. Bien qu'il n'ait pas donné de résultats dans la mesure de sa P50, il est possible de supposer qu'il s'agit d'une espèce résistant aisément à la sécheresse de par sa présence originelle dans le climat méditerranéen.

L'étude de la valeur nutritive, de la résistance à la sécheresse et de la résistance au gel ne permet pas de mettre en avant quelques espèces qui présenteraient les meilleurs résultats sous tous les angles, mais rend compte au contraire de la nécessité de considérer chaque espèce de façon plus globale. Le choix des espèces à planter dépend de plusieurs facteurs en fonction des besoins des éleveurs avec par exemple des espèces plus susceptibles de couvrir les carences en azotes de certaines parcelles en fonction des espèces herbacées présentes, ou au contraire des besoins de valoriser la valeur énergétique des fourrages ligneux. Parallèlement les caractéristiques écophysiologiques doivent elles aussi faire l'objet de compromis puisque des espèces adaptées à la sécheresse, généralement issues de climat méditerranéen ne sont pas forcément celles qui résistent le mieux au gel (figure 19). Le choix des espèces à planter doit donc être raisonné au cas par cas, en fonction des besoins et microclimats de chaque exploitant et parcelles. Ces microclimats ne doivent en effet pas être négligés avec des petites variations d'altitude qui peuvent parfois suffire à conditionner la formation de gel à la fin du printemps par exemple.

IV- Discussion

1- Les limites dans la détermination de la valeur nutritive et le choix des espèces d'intérêt

Si la première phase de recherche bibliographique a permis de sélectionner un pool d'espèce d'intérêt sur lesquelles poursuivre l'étude écophysiologique, elle a aussi permis de mettre en évidence l'ensemble des approximations et raccourcis nécessaires pour ce choix et ainsi l'exhaustivité des situations dont il a été fait abstraction. En effet, bien qu'il ait fallu attribuer une valeur absolue à la qualité de chaque espèce, de nombreuses études issues de cette recherche bibliographique, ont mis en évidence une certaine variabilité de la valeur nutritive. En effet, la qualité d'un fourrage dépend non seulement de l'espèce considérée mais varie d'une saison à l'autre, comme démontré lors des mesures faites au cours du projet Parasol [25] sur le frêne dont la digestibilité in vitro de plants conduits en têtard peut varier de presque 10% entre juin et octobre, données qui plus est différentes pour des plants dont la conduite a été menée en haut-jet. Si l'étude Parasol démontre une diminution de la digestibilité pour le frêne de juin à octobre, celle du murier blanc quant à elle augmente de presque 10% entre ces mêmes dates. Ces constatations sont d'ailleurs mieux renseignées pour les espèces herbacées qui ont fait l'objet de davantage d'études à ce sujet, puisque caractériser la valeur nutritive de la

ressource prairiale dans ses dimensions temporelle et spatiale est un objectif majeur pour assurer la durabilité des systèmes d'exploitation étant donné la part de cette ressource dans l'alimentation des troupeaux. Carrère a ainsi montré que l'effet du stade de développement représente la plus grande source de variabilité de la valeur nutritive de prairies de moyenne montagne [26], considération qu'il est important de se rappeler bien que la variabilité des valeurs alimentaires des feuilles puisse être plus faible que celle des herbacées. L'étude a également mis en évidence des variations interspécifiques dues à la précocité des espèces décrivant par exemple les espèces les plus précoces comme ayant la digestibilité la plus élevée au stade végétatif mais ayant également la réduction de digestibilité la plus rapide avec l'avancement du stade phénologique. Ces variations au cours du développement s'expliquent par les modifications morphologiques et chimiques que subissent les plantes notamment lors de la formation de l'épi avec la mise en place de tissus de soutien. D'autres études ont également montré une variation de certains paramètres décrivant la valeur nutritive pour une même espèce, à la même époque, mais dans des zones géographiques différentes, comme c'est le cas des recherches menées par Salem sur l'arroche nummulaire dont le taux d'ADL fait plus que doubler entre des échantillons d'Espagne ou d'Australie [27] (données disponibles dans l'annexe 1).

Ces variations rappellent qu'il est indispensable de garder en mémoire le caractère exploratoire de la présente étude pour l'identification d'espèces ligneuses à potentiel fourrager. En effet de multiples variables sont capables d'influer sur les caractéristiques fourragères des espèces : il vient d'être évoqué pour une même espèce l'effet des saisons, de la zone géographique, de la conduite d'exploitation, mais il est également possible de supposer les effets de facteurs édaphiques pour des sols plus ou moins riches, des variations pour un même individu selon son âge et son état de santé, etc. Ainsi, afin de mieux qualifier les variations inter-saisonniers affectant la qualité de la valeur nutritive des espèces de l'étude, plusieurs vagues de prélèvements ont été prévues afin d'effectuer une analyse chimique en laboratoire. Si le présent rapport présente les données issues du prélèvement effectué au cours du mois de juillet, en plein milieu de l'été, des prélèvements ultérieurs auront lieu au cours du mois d'août et à la fin du mois de septembre afin de compléter ces informations et qualifier l'évolution de la valeur nutritive des essences ligneuses d'intérêt fourrager.

A ces variations dont il a fallu faire abstraction, il faut ajouter les méthodes ayant permis de définir pour chaque espèce des valeurs d'UF et PDIA sur lesquelles se base la sélection d'un pool d'essences d'intérêt. La valeur accordée à ces données est à modérer étant donné qu'elles ont été obtenues via un ensemble d'équations préalablement définies à partir des tables INRA préexistantes adaptées à des fourrages herbacés. Il a donc fallu calculer des valeurs d'unités fourragères de ligneux en appliquant des coefficients mis au point pour des espèces herbacées qui ne sont pas forcément les plus justes. De plus, la définition même des UF et des PDI fait appel à des approximations puisqu'il s'agit d'unité de références théorique. Par exemple, les UF sont calculées à partir de l'énergie métabolisable (figure 6), c'est-à-dire réellement utile pour l'organisme consommateur, seulement, cette énergie sera différente en fonction de l'espèce animale considérée. Il en va de même pour les unités de la valeur azotée, qui ne sont pas des valeurs uniquement intrinsèques au fourrage. Il faut rajouter à cela que seule la valeur nutritive des espèces a été prise en compte dans la caractérisation de leur potentialité fourragère, mais la valeur alimentaire est également décrite par l'ingestibilité, dont les difficultés d'estimations expliquent qu'elle n'ait pas été prise en compte lors de l'étude.

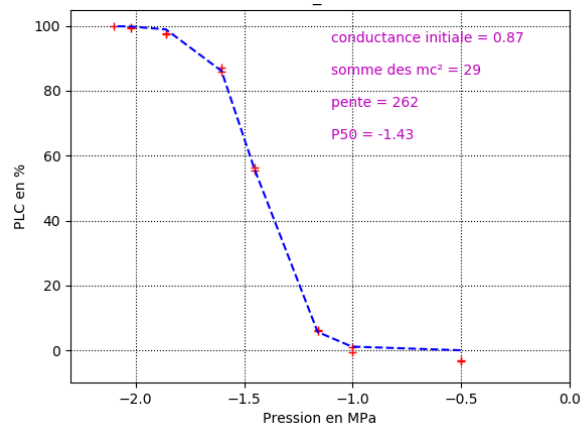
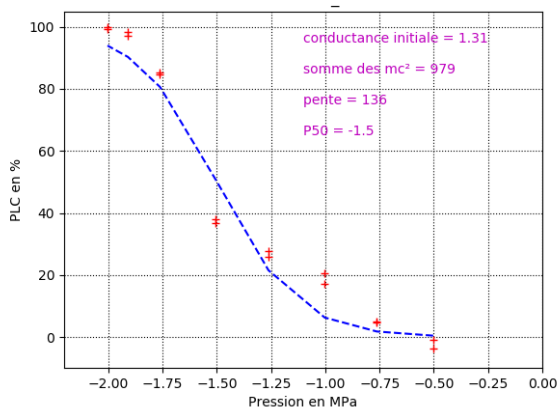


Figure 20. Courbe de vulnérabilité et paramètres caractéristiques d'un sureau (gauche) et d'un aulne glutineux (droite)

Les traits en pointillés représentent l'ajustement fait par le modèle non linéaire par rapport aux points expérimentaux, de la PLC en fonction de la pression, avec la somme des mc^2 : somme des moindres carrés.

La sélection des essences d'intérêt est basée essentiellement sur leurs caractéristiques nutritives, mais d'autres raisons ont orienté leur choix. Les essences devaient pouvoir être prélevées sur le site de Theix, présentant les conditions abiotiques caractéristiques des zones de moyenne montagne où les activités sylvopastorales sont les mieux représentées et doivent être récoltées sur une surface suffisamment restreintes pour garantir un minimum de variations dans les conditions de croissance des individus. Il a été également nécessaire de prendre en considération les manipulations auxquelles devaient prendre part les essences sélectionnées, notamment par l'étude de leur résistance au gel par la technique de fuite des électrolytes qui demande de travailler sur des échantillons en cours de débourrement seulement. Aussi les espèces dont le débourrement a été précoce avec un développement foliaire trop avancé au moment des prélèvements ont dû être écartées dans le cadre de ce stage mais pourront faire l'objet d'une étude ultérieure.

2- Les limites dans la caractérisation de la résistance au gel

Si le choix de ne considérer que la température de résistance des rameaux afin de décrire la résistance au gel des espèces étudiées a été en partie orienté par les conséquences physiologiques qui y sont associées, il a également été influencé par les biais sous-jacent aux données relatives aux bourgeons. En effet, la mesure de la LT50 afin de comparer au mieux les résultats se doit d'être réalisée avec des échantillons provenant d'individu présentant idéalement le même stade de développement phénologique. Or, comme visibles en annexe 3, le prélèvement des bourgeons n'a pu respecter de manière très précise cette condition pour des raisons calendaires au début du stage et des prélèvements. Les valeurs ont été sur des bourgeons en cours de débourrement pour certaines espèces et des jeunes feuilles déjà formées pour d'autres, les résultats s'en trouvant fortement impactés

3- Les limites dans la caractérisation de la résistance à la sécheresse

La technique de détermination de la P50 nécessite certaines précautions susceptibles de venir modifier les résultats. Lors des prélèvements, un soin tout particulier a été apporté afin de défolier les feuilles le plus rapidement possible et les extrémités des rameaux ont été roulées dans du papier humide puis les échantillons placés en chambre froide dès l'arrivée au laboratoire. Ces précautions visaient à limiter toutes les éventuelles pertes en eau lors des prélèvements et transport, causées par exemple par les phénomènes d'évapotranspiration via les feuilles.

A cela s'ajoute les erreurs d'estimations possibles du modèle mathématique appliqué afin de déterminer les P50, utilisant la méthode des moindres carrés qui permet d'appliquer la fonction qui reproduit au mieux les données brutes. La justesse de l'ajustement peut être appréciée par la somme des moindres carrés. La somme des moindres carrés associée à chacun des échantillons étudiés présentent des variations entre des valeurs approximativement comprises entre 30 et 980. Cette valeur est calculée en additionnant les carrés des écarts présents entre les points expérimentaux et la courbe ajustée. Si des valeurs faibles témoignent d'un très bon ajustement, des valeurs élevées rendent compte d'un ajustement moins proche des valeurs expérimentales à cause de la façon dont elles sont distribuées. La figure 20 montre l'exemple des deux échantillons étudiés bornant les valeurs des sommes des moindres carrés obtenus au cours des expérimentations et les ajustements semblent tous deux exploitables. Les échantillons mesurés ont ainsi fait

l'objet d'une validation arbitraire sous les conseils d'un technicien expérimenté lors de la construction des courbes d'ajustement. Les valeurs de la somme des carrés des écarts se répartissent cependant selon une médiane de 131, et les trois quarts d'entre elles se situent sous la valeur de 277. Ces renseignements statistiques ont été calculé à partir des données expérimentales excluant un échantillon de noyer présentant une somme des moindres carrés de 12160 considéré comme une donnée aberrante

4- Perspectives de l'étude

L'identification d'espèces à potentiel fourrager a fait appel dans le cadre de ce stage à considérer les caractéristiques nutritives, de résistance au gel et à la sécheresse qui à elles seules rende le choix d'espèces à planter complexes. Il ne faut toutefois pas négliger de considérer le projet dans sa globalité et il est important de préciser que les objectifs de ce stage s'inscrivent dans ses étapes initiales. En effet, d'autres paramètres sont à prendre en compte afin d'affiner l'identification. Ainsi les axes de recherche dans la poursuite de l'étude devront également s'orienter vers d'autres critères pouvant avoir une incidence importante dans l'utilisation des ressources ligneuses en tant que fourrage additionnel. Il conviendra par exemple d'approfondir ces points :

Productivité : définie par la plupart des auteurs par la quantité de biomasse produite par unité de surface et unité de temps.

La phénologie et disponibilité dans le temps : la phénologie décrit l'apparition des évènements cycliques du développement des végétaux, rythmés par l'enchaînement des saisons (débourrement, expansion foliaire...). Il faudra alors veiller à ce que la phénologie de l'espèce garantisse une production foliaire accessible au bétail, l'idéal étant que la ressource fourragère prenne la relève de la ressource herbacée en période estivale.

Appétibilité : On peut supposer que certaines espèces sont choisies préférentiellement, dans ces cas-là, il sera peut-être possible de rechercher un lien, ou en supposer un sur l'origine de ces choix : existe-t-il une relation entre la valeur nutritive ou la composition chimique des feuilles et les préférences alimentaires des animaux ?

Faculté de régénération : les espèces sélectionnées ont pour vocation d'être implantées dans les pâtures où elles subiront un abrutissement constant par les animaux d'élevage. Afin de constituer une ressource durable et non pas occasionnelle, elles devront présenter de bonne capacité de régénération en étant capables de reproduire leur biomasse foliaire après exfoliation.

Conclusion

La première étape de recherche bibliographique a permis de dégager certaines espèces présentant un fort potentiel nutritif comme le murier ou le frêne, espèces sur lesquelles des études similaires ont déjà été menées. Le sureau, avec les UF et PDIA les plus élevées, présente l'avantage d'être déjà implanté en Auvergne, notamment grâce à sa forte capacité de survie aux gelées. Cependant il présente la plus faible résistance à la sécheresse, pouvant compromettre sa survie d'ici 2050... Cet exemple rend compte de la complexité du processus du choix des espèces pour lesquelles un compromis doit être fait entre ces différents critères. Ces derniers présentés dans une étude exploratoire ne sont pas exhaustifs pour autant, ils doivent être complétés par la caractérisation d'autres espèces ligneuses et d'autres facteurs influençant leur potentialité fourragère (ingestibilité par exemple). De plus, les résultats de l'étude présentent certaines limites liées à la phénologie des espèces ou propres aux techniques utilisées. Ainsi, l'utilisation du cavitron n'a pas permis de déterminer la P50 de toutes les espèces du pool bibliographique, les LT50 des rameaux sont différents des LT50 déterminées sur les bourgeons, la description de la valeur azotée par les PDIA peut différer d'une description basée sur d'autres types de PDI... autant de choix et de limites qui forcent à considérer avec prudence les résultats de cette étude et qui nécessitent un approfondissement ultérieur. Cependant les mesures ont permis de dégager un pool d'espèces d'intérêt nutritif ou écophysologique : le sureau et le murier pour leur valeur nutritive, le groseillier des Alpes pour sa résistance à la sécheresse, le noisetier présentant une bonne résistance intermédiaire à la sécheresse et au gel tout comme le tilleul, l'églantier possédant une forte valeur énergétique. Les caractéristiques nutritives de chacune peuvent alors déterminer le choix des espèces à planter dans le cadre d'une application sylvopastorale, à raisonner au cas par cas en fonction des besoins et des exploitations. Bien que loin d'être complets, ces premiers résultats ouvrent la porte sur de prochaines études permettant de préciser l'identification d'espèces ligneuses d'intérêt fourrager dans l'Auvergne de 2050.

Références bibliographiques

1. Dupraz, C., & Fabien, L. (2008). *Agroforesterie, des arbres et des cultures*.
2. Agravalor. (2006). Quand les arbres font leur retour dans les champs. *Agra Valor*(141), 4-13.
3. Gautier, D., Launay, F., Sajdak, G., & Guérin, G. (2011). Recherche d'un développement local équilibré fondé sur le sylvopastoralisme : valoriser des massifs forestiers et installer des systèmes d'élevage innovants *Innovations Agronomiques*, 17, 163-173.
4. Liagre F. (2008). L'Agroforesterie en France : l'agroforesterie est-elle une idée moderne ? *Agroforesterie, la revue française des arbre ruraux*(1), 7-10.
5. Van Lerberghe, P. (2012). L'agroforesterie, qu'es aquò ? [Dossier : L'agroforesterie ou comment réconcilier l'arbre et l'agriculture]. *Forêt-entreprise*, 205(Juillet 2012), 16-20.
6. Dupraz, C. (2009). *L'ascenseur hydraulique, on comment les arbres redistribueraient l'eau du sol* (Vol. 2).
7. Lacombe, S. (2007). *Diminution des pertes du nitrate par lixiviation et augmentation de la diversité microbienne dans les systèmes agroforestiers*. Unpublished Mémoire maître ès sciences, Université de Sherbrooke.
8. Brootcorne, N. (2011). Analyse des facteurs d'adoption ou de rejets de l'agroforesterie dans le cadre d'un projet en région Wallone. Université de Liège – Département des sciences et environnement
9. Gagnon, L. M. (2015). Performance des fourrages en système de culture intercalaire au Québec(M.Sc.) (Ed.) (pp. 81 p.): Université de Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique.
10. de Montard, F., X. (1998). Compétition racinaire et utilisation de la réserve en eau dans une association de noisetier et de dactyle. *Ann. Zootech.*, 47(5-6), 511.
11. Denhartigh, C. (2014). *Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques - Recueil d'expériences territoriales*: Réseau action climat France.
12. Graux, A.-I. (2011). *Modelling climate change impacts on grassland ecosystems. Ways to adapt forage systems*. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
13. Chambres d'agriculture Pays de la Loire,. (2012). *Référentiel de production des prairies en pays de la Loire*: Chambre d'agriculture Pays de la Loire.
14. Defrance, P., Delaby, L., & Seuret, J. M. (2004). *Mieux connaître la densité de l'herbe pour calculer la croissance, la biomasse d'une parcelle et le stock d'herbe disponible d'une exploitation* (Vol. 11).
15. Emile, J. C., Barret, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., & Novak, S. (2017). Trees: a source of forage for grazing daily cows? [Article]. *Fourrages*(230), 155-160.
16. Poirier, M. (2008). *Ecophysiological study of frost hardening in trees*. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II. Université d'Auvergne - Clermont-Ferrand I.
17. Lens F., P.Cochard C., E.L. Delmas C., Signarbieux C., Buttler A., Cochard H., Jansen S., Chauvin T., C. Doria C., D. Arco M., Delzon S. (2016). Herbaceous Angiosperms Are Not More Vulnerable to Drought-Induced Embolism Than Angiosperm Trees. *Plant physiology* 172(2) : 661-667.
18. ORCAE, A. (2018). Le changement climatique en Auvergne-Rhône-Alpes. Profil climat territorial - Territoire : CC du Genevois. In Document (Ed.) ORCAE Auvergne-Rhône-Alpes.

19. Demarquilly, C., Chenost, M., Aubry, J., Chevalier, D., & Jailler, M. (1969). Etude de la digestion des fourrages dans le rumen par la méthode des sachets de nylon, liaisons avec la valeur alimentaire. *Ann. Zootech.*, 18(4), 419-430.
20. IKARE., RITA Guyane. (2015). Fiche C2 : La valeur alimentaire des fourrages.
21. Baumont, R., Aufrère, J., Niderkorn, V., Andueza, D., Surault, F., Peccatte, J. R., et al. (2008). *La diversité spécifique dans le fourrage : conséquences sur la valeur alimentaire* (Vol. 194).
22. Baumont, R., Champciaux, P., Agrabriel, J., Andrieu, J., aufrère, J., Michalet, B., Demarquilly, C. (1999). Une démarche intégrée pour prévoir la valeur des aliments pour les ruminants : PrévAlim pour INRAtion. *Productions Animales* 3 (12), 183-194.
23. Baumont, R., Dulphy, J. P., Sauvant, D., Meschy, F., Aufrère, J., & Peyraud, J.-L. (2007). Valeur alimentaire des fourrages et des matières premières : tables et prévision *Alimentation des ruminants. Besoins des animaux et valeur des aliments* (pp. np): Editions Quae.
24. Delzon, S., & Cochard, H., H. (2016). Le Cavitron fait tourner la tête des plantes. *Jardins de France*, -641 (mai_juin 2016), 16-18.
25. Béral, C., Andueza, D., Ginane, C., Bernard, M., Liagre, F., Girardin, N., et al. (2018). *Agroforesterie en système d'élevage ovin : étude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.* : ADEME.
26. Carrère P., da S. Pontes L., Andueza D., Louault F., Rosseel D., Taini E., Pons B., Toillon S., Soussana J.-F. (2010) : Evolution de la valeur nutritive de graminées prairiales au cours de leur cycle de développement, *Fourrages*, 201, 27-35
27. Salem, A. Z. M. (2012). Oral administration of leaf extracts to rumen liquid donor lambs modifies in vitro gas production of other tree leaves. *Animal Feed Science and Technology*, 176(1), 94-101.

Annexes

Table des Annexes

Annexe 1 – Tableau de la composition chimique de l'ensemble des espèces tirées de la bibliographie

Annexe 2 – Références bibliographiques associées au tableau de composition chimique

Annexe 3 – Description des stades phénologiques des espèces lors des prélèvements

Annexe 4 – Démarche statistique appliquée aux données expérimentales

Annexe 5 – Interface du logiciel Cavisoft

Annexe 6 - Protocole d'utilisation du cavitron

Annexe 7 – Résultats des comparaisons multiples par paires des données de LT50 mixant les deux types d'organes, suivant la procédure de Dunn

Annexe 1 – Tableau de la composition chimique de l'ensemble des espèces tirées de la bibliographie

• Extrait 1

Remarques	Espèces	MS	MM	MO	MAT	NDF	ADF	ADL	Digz (%) IVDMS	In situ/in sacco	Espèces in sacco	Référence bibliographique
	Unité	z MS	z MS	z MS	z MS	z MS	z MS	z MS	z	z		
	Fragaria vesca	35,1			14,8				63,9			1'
		43,3	3,2		14,7	34,8	21,8	3,2	74,6			2'
		37,6			14,5	27,3			75	64	Cow	3'
	<i>Printemps</i>			31,3	20	25,3	15	6,3	83,6			4'
	<i>Début été</i>			31,3	14,8	26	16,3	1,4	76,3			4'
	<i>Fin été</i>			30,4	14,5	25,3	16,3	7,3	75,8			4'
					10,3	23						5'
	<i>(foin)</i>	30,54			12,56	31,67	23,26	10,76				6'
		33,3			12,1	29,3	14	11,7				7'
					17,3	44,2	38,1	18,2	55,9			8'
					17,4	40,83	22,15	14,21	41,8			9'
					51,2	40,1	20,7					10'
	<i>(haut jet - juin)</i>	23,6			6,3				72,8			
	<i>(haut jet - août)</i>	37,8			7,4				69,5			
	<i>(haut jet - octobre)</i>	41,6			7,6				75,1			
	<i>(tôtard - juin)</i>	25,5			17,2				65,3			
	<i>(tôtard - août)</i>	31,8			16,7				71,3			
	<i>(tôtard - octobre)</i>	40,3			14,3				74,3			
		40,585455	3,2	31,4	16,135	32,27	20,868	10,709	70,6	64		
	<i>(foin)</i>	83,86			14,4	28,37	10,31	3,24				5'
		41			14,6	33,4	28,3	16,1		75	rabbit	11'
		43,1			2,26	45,45	26,05	17,58				12'
		57,386667			10,42	37,14	22,42	12,307		75		
	Corallorhiza innata				48,3		10,2		47,5			23'
		45,6	6,1		14,8	46,3	24	12,3	52,9			2'
	<i>(printemps)</i>			31	18,8	28,2	14,3	6,7	85,3			4'
	<i>(début été)</i>			31,2	3,7	23,5	16,7	3,4	67,4			4'
	<i>(fin été)</i>			31	8,3	30,6	16,8	3,5	64,4			4'
		42			14,4	32,4			53	44	cow	3'
					47,6	34,2	16,3					10'
	Tilia cordata	43,8	6,1	31,067	13,32	37,73	21,32	10,833	61,75	44		
					40,3	30,5	11,6					10'
	Castanea sativa				12,3	35,3	24	7,6	34			8'
		42,6			11,8	34			68	42	cow	3
		36,6	4,6		15,3	50,2	27,5	3,2	62			2'
					10,2		48,4	11,4	42,1			13'
		39,6	4,6		12,7	40,03	33,3	11,4	51,525	42		
		18,6				24,6	20,8	8,1	82,1	82,1	steer	14'
		37,1	14		16,5	30	14,8	5	83,2			2'
	<i>(sans druid)</i>	83,20		31,5	17,8	26,3			57,3			15'
	<i>(foin)</i>	82,65			25,33	24,34	13,29	4,58		78,22	goat (fecès)	16'
		83,43			24,84	21,85	17,23	4,29		76,8	goat (fecès)	16'
		33,6			22,13	36,35	31,52			63,33	rabbit	17'
		30,3			16,2	30,2	26,8	4,88		61,3	sheep (fecès)	18'
		31,8			18,7	41,7	30,4	8,4				19'
		25			23	26,2	16,02	7,2		30,2	buffalo bull	20'
	<i>printemps</i>	64,3			17,6	26	22,8	5,4		63,8		21'
	<i>hiver</i>	60,3			13,7	28	22,2	5,6		77,74		

• Extrait 2

Remarques	Espèces	MS	MM	MO	MAT	NDF	ADF	ADL	Digz (%) IVDMS	In situ/in sacco	Espèces in sacco	Référence bibliographique
	Morus alba	36,3			24	17,4			89	70		3'
						33	28,1	8		43,4	steers	22'
		19,8		86,4	22,3	31,1	18,3			71,8	sheep	23'
	<i>(en têtard - juin)</i>	26,8			15,3				30,1			
	<i>(en têtard - août)</i>	32,3			12,1				84,2			
	<i>(en têtard - octobre)</i>	37,3			11,4				82,3			
	<i>(haut jet juin)</i>	22,5			21,9				84,6			1'
	<i>(haut jet août)</i>	32,2			15,1				83,2			
	<i>(haut jet octobre)</i>	34,5			16,4				82,6			
		45,286316	14	88,95	18,572	28,4	22,355	6,145	81,9	71,3		
	Morus latifolia	30,4			17,87	23,82	18,45	3,16		74,38	sheep	24'
		30,4			17,87	23,82	18,45	3,16		74,38		
	Morus nigra	42,2			16,06	22,08	19,46		71,28			25'
		42,2			16,06	22,08	19,46		71,28			
	Prunus avium	40,4			12,6					67,8		1'
	Quercus rubra	47,3			14,2	40			61	37	cow	3'
		46,3	3,3		13,5	51,6	27,5	13,6	56,8			2'
		47,1	3,3		13,85	45,8	27,5	13,6	58,9	37		
	Quercus suber	53,8	3,5		10,1	55	34,3	16,6	53,3			2'
		35			9,5	54,1	37,7					26'
		44,4	3,5		9,8	54,55	36,3	16,6	53,3			
	Quercus ilex	54,4			7,8	58	38,3	14,3	46,7			26'
	<i>(sede végétatif)</i>	64,2			7,5							
	<i>(sede débourement)</i>	46,5			12,5							6'
	<i>(sede floraison)</i>	50,3			10,3							
	<i>(sede fruit)</i>	52,2			7,6							
		53,52			9,26	58	38,3	14,3	46,7			
	Quercus coccifera	43,3	7,42		3,45	53,41	44,52	21,17				6'
					3,2	50,6	38,7					27'
												28'
		53,16	3,75		3,625							29'
		54,53	5,585		9,425	52,01	41,61	21,17				
	Quercus robur				31,3	19,6	30,3	7,8	2,6	36,6		4'
					34,2	10,6	37,3	18,6	10,3	62,1		4'
					33,7	14,4	38,3	20,3	10,4	63,8		4'
	60°C	34,78			4,14	51,45	46,51					33'
		34,78	6,3333	33,067	12,185	39,64	23,303	7,3667	74,16666667			
	Acer pseudoplatanus	31,1			19,4	32,2	12,8	4,8	35,4			4'
	<i>printemps</i>				83,9	12,2	33,6	17,5	7,6	66,7		4'
	<i>début été</i>				87,8	3,7	38,4	14,8	8,3	64		4'
	<i>fin été</i>											
					10,4	89,6	13,767	36,73	15,033	6,9	75,36666667	
	Acer campestre	51,5			13,4	28,6			64	47	cow	3'
	<i>printemps</i>				30,5	19,4	32,3	10,1	6	83,5		4'
	<i>début été</i>				30,7	12,6	36,5	18,3	9,8	63,3		4'
	<i>fin été</i>				30,5	9,3	34,1	16,8	10,7	64,2		4'

- Extrait 3

Remarques	Espèces	MS	MM	MO	MAT	NDF	ADF	ADL	Digz (%) IVOMS	In situ in sacco	Espèces in sacco	Référence bibliographique
	Acer campestre	54,3	6,4		11,7	33,7	21,7	9,5	58			2'
		52,9	6,4	90,567	13,28	34,24	16,725	9	67,92	47		
	Juglans regia	33,5	7		13,8	28,9						5'
		33,5	7		13,95	34,1	24,3	9,4	75,6			2'
(mai)	Juglans Nigra				12,6	51,4	27,2	1,61				
(Juin)					15,4	43,3	23,4	1,84				30'
(Juillet)					15	46,1	25,9	2,83				
					12,7	23,3						5'
					13,925	41,03	25,5	2,0933				
	Robinia pseudo accacia	33,8			20,4	27,8			49	38	cow	3'
		36,9	6,3		20,6	43,1	28,9	13,7	52,8			2'
						43,2		6,6	57,8			31'
					15,8	32,4						5'
						49,1	32,8	17,3		35,7	steers	22'
		46,5				21,09	76,1					32'
printemps		61,9			23,3	37,7	24,5	6,4		74,19	goat	21'
hiver		57,8			14,5	44,2	27,9	8,8		65,66	goat	
					20,6		63,5	24,4	45			13'
		48,58	6,3		19,3	38,07	42,283	12,867	51,15	38		
	Tilia platyphyllos	36,5			21,1	23,2			70	50	cow	3'
		36,5			21,1	23,2			70	50		
	Alnus glutinosa	37,3			13,7	23,6			77	51	cow	3'
		38,6	5,1		18,4	4,3	23,2	11,4	67,3			2'
		37,95	5,1		19,05	36,3	23,2	11,4	72,45	51		
	Alnus cordata	36,9			17	35,8			69	52	cow	3'
		41,2	6		17,3	44	31,2	21	60,8			2'
		39,05	6		17,15	39,9	31,2	21	64,9	52		
	Ulmus minor x resistia	42,1			14,5	41,4			67	48	cow	3'
		46,3	13		14,8	33,1	15,2	5,9	64,1			2'
		44,2	13		14,65	40,25	15,2	5,9	65,55	48		
	Ficus carica	31,5	14,3		18,8	32,1	20,4	5,4	78,5			2'
		87,9	16,55		12,81	30,6	17,21	15,01				2'
		59,7	15,425		15,805	31,35	18,805	10,205	78,5			
	Crataegus monogyna	48,5	8,2		12,6	33,7	17,4	8,5	68,8			2'
		41,86	22,86		7,42	47,47	34,82	16,15				6'
printemps				32,4	12,1	21	12,8	10,4	87,2			4'
début été				32,8	11	26,9	14,9	11	77			4'
fin été				31,9	11,1	23,5	15,3	11,2	71,7			28'
		45,18	15,53	32,367	10,844	32,91	19,164	11,45	76,175			
	Crataegus azarolus	44,75	5,43		9,77							29'
(végétatif)		68,7			6,1							
(débourrement)		51,6			7,2							34'
(floraison)		52,2			9,4							
(fruit)		58,7			10,1							

- Extrait 4

Remarques	Espèces	MS	MM	MO	MAT	NDF	ADF	ADL	Digz (%) IVOMS	In situ in sacco	Espèces in sacco	Référence bibliographique
	camphis radicans	27,9	5,7		13,1	44	27,9	11	60			2'
		27,9	5,7		13,1	44	27,9	11	60			
mai	Rosa canina	45,5	7,1		17,7	31,2	15,3	6	80,3		sheep	2'
juillet					17,6	34		2,8	87,5			
novembre					12,7	41,9		3	85,7			35'
					5,9	32,2		5,3	85,7			
		45,5	7,1		11,975	34,83	15,3	4,275	80,3			
	Passiflora edulis	60	13,8		15,2	22,5	14,1	4,4	87,4			2'
		60	13,8		15,2	22,5	14,1	4,4	87,4			
	Ilex aquifolium	40,2	5,4		8,6	51,4	36,8	14	51,5			2'
		40,2	5,4		8,6	51,4	36,8	14	51,5			
	Jasminum nudiflorum	37,6	6,9		15,3	28,9	16,7	8,5	84,2			2'
		37,6	6,9		15,3	28,9	16,7	8,5	84,2			
	Actinidia deliciosa	31,3	13,9		13,4	41,6	24,5	3,8	70,5			2'
		31,3	13,9		13,4	41,6	24,5	3,8	70,5			
	Syringa vulgaris	36,5	6,7		3,7	25,7	15,6	8,1	86,5			2'
		36,5	6,7		3,7	25,7	15,6	8,1	86,5			
	Prunus spinosa	52,6	8,5		15,6	33,7	16,2	3,3	80,2			2'
					8,6	56,3						5'
		52,6	8,5		12,1	45	16,2	9,3	80,2			
	Rubus fruticosus	50,3	3,9		12,5	37,3	17,2	5	73,1			2'
		41,45			18,76	46,11	27,97	13,04				6'
		45,875	3,9		15,63	41,71	22,285	9,02	73,1			
	Ligustrum vulgare	43,6	4,5		11,2	26,1	17,7	12,1	84,1			2'
		43,6	4,5		11,2	26,1	17,7	12,1	84,1			
	Vitis X	30,6	5,6		17,5	36,4	27,3	13,1	67,9			2'
		30,6	5,6		17,5	36,4	27,3	13,1	67,9			
	Vitis vinifera	34,6			10,6	13,3			80	57	cow	3'
		34,6			10,6	13,3			80	57		
	Myrtus communis	43			7	38,9	23,9					26'
stade végétatif		44,1	3,38		16,25	40,95	33,94	20,39				6'
débourrement		72,1			3,2							
floraison		61,6			10,3							34'
fruit		60,4			11,5							
		65,7			3,8							
		54,6	4		8,28							29'
		57,357143	6,69		10,333	33,93	28,92	20,39				
printemps	Populus nigra			31,8	17,7	28,7	17,2	7,4	86,9			4'
début été				31,1	17,7	34,1	22,4	3,3	70,8			4'
fin été				30,8	15,7	34,6	23,1	1	65,4			4'
				8,7667	31,233	17,033	32,47	20,9	5,9	74,36666667		
	Populus Tremula	83,64			14,79							4'

• Extrait 5

Remarques	Espèces	MS	MM	MO	MAT	NDF	ADF	ADL	Digz (%) IVDMS	In situ/in sacco	Espèces in sacco	Référence bibliographique
	Leucaena leucocephala (faux mimosa)	29,9			23,3	40,9	25,4	10,8				36'
					21	56,3	22,4	6,8		84,1	(48h in sacco)	37'
												37'
	Salix mastudana x alba	29,9			22,15	48,6	23,9	8,8		84,1		
		36,4							85,8			
		36,4							90,8			
	salix kinuyanagi	36,4							88,3			38'
		17,1							68			
		17,1							71,5			
		17,1							69,75			
printemps début été	Sambucus nigra			90,4	15,2	23,8	12	3,7		91		4'
				31,1	25,9	27,2	18,7	8		85,5		4'
fin été				90,5	23	27,2	18,8	8,12		81,9		4'
		9,3333	90,667	21,367	26,07	16,5	6,6067	86,13333333				
printemps début été	Cornus sanguinea			88,3	17,9	26,9	11,8	4,7		84,1		4'
				86,7	11,9	28,2	3,3	5,1		75,6		4'
fin été				85,2	12,3	25,7	10	6,1		76,3		4'
		13,267	86,733	14,033	26,93	10,367	5,3	78,66666667				
printemps été	Medicago arborea			15,5	43,3			9		65		39'
		27,7			21,3	39,8	23,8	7				40'
		43,7			13,6	39,7	21,2	7,1				40'
		35,7			16,8	40,93	22,5	7,7		65		40'
	Chamaecystis			17,4	43,8			7,7		64		39'
		90,74 (sun dried)	6,11	93,89	23,95	39,81	21,86	6,32		58,5		41'
	Atriplex halimus				14,6	31,2		13,1		75		39'
				80,5	15,36	36	18,1	5,99		75,5	71,6	24h incub. Sheep
From Tunisia				15,1	24,7	16,2	7,9			43		43'
		12,805	87,195	15,02	30,63	17,15	8,3967	64,5				39'
	Atriplex nummularia			22,1	36,9			13,7		75		39'
				25,2		15,5						44'
				17	44,7	28,5	9,8					44'
Saudi Arabia - Feuilles agnes - Feuilles et rameaux Australie				18,1	29,6	13,4	5,3			50,6		43'
		25		79,8	19,8	46,9	26	14,4		52,8		45'
		25	20,2	79,8	19,24	39,59	20,85	10,8		62,8		
	Pistacia lentiscus			6	43,3			24		52		39'
		43,1		93,5	9,3	44,7	27,2	13,8		33		45'
		49,1	6,5	93,5	7,65	44	27,2	18,9		42,5		
foin	Témoins Luzerne				19,2	58,3	37,2	9,2		61	goat (lactation)	
					19,9	60,5	36,7	8		62,3	goat (lactation)	
					18,3	54,6	40,8	9,8		62,5	goat (lactation)	46'
					21,8	50,4	35,5	8,4		63,4	goat (gestante)	
					16	61,5	43,5	10,5		57,9	goat (gestante)	

• Extrait 6

Remarques	Espèces	MS	MM	MO	MAT	NDF	ADF	ADL	Digz (%) IVDMS	In situ/in sacco	Espèces in sacco	Référence bibliographique
	Luzerne				17,1	55,6	42	9,8		60	goat (tarie)	
					17,2	54,9	33,3	8		63,8	goat (tarie)	
foin (prot 16-18%)		35,5	8,5		17,6	43,9	30,4					2'
		30,8	12		17	46,4	34,1	8,7				
		21,3			22,1					66	(sheep)	47'
		49,2	10,25		18,62	54,01	37,056	9,05		62,1125		84'
foin	Fétuques		8,1		9,6	66,2	31,5	3,7	53,4		(sheep)	49'
potirage cycle 1	Rag gras anglais				15,7	42,8	21	2,1		83,3	(sheep)	50'
potirage cycle 1	Dactyle				21,8	48,8	25,4	3,6		75,9	(sheep)	50'
	Sorbus aucuparia					28,5	26,9	9,5				51'

Annexe 2 – Références bibliographiques associées au tableau de composition

chimique

- 1'. Béral, C., Andueza, D., Ginane, C., Bernard, M., Liagre, F., Girardin, N., et al. (2018). *Agroforesterie en système d'élevage ovin : étude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.* : ADEME.
- 2'. Emile, J. C., Barret, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., & Novak, S. (2017). Trees: a source of forage for grazing daily cows? [Article]. *Fourrages*(230), 155-160.
- 3'. Emile, J. C., Delagarde, R., Barre, P., & Novak, S. (2016). *Nutritive value and degradability of leaves from temperate woody resources for feeding ruminants in summer.* Paper presented at the 3. European Agroforestry Conference (EURAF 2016).
- 4' Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C. A., Marche, C., Decruyenaere, V., Beckers, Y., & Bindelle, J. (2018). Behaviour and browse species selectivity of heifers grazing in a temperate silvopastoral system. [journal article]. *Agroforestry Systems*, 92(3), 705-716.
- 5'. Corleto, A., Cazzato, E., & Laudadio, V. (1995). Quantitative and qualitative evaluation of tree and shrubby pasture species in Southern Italy. *Cahiers Options Méditerranéennes (CIHEAM)*, 4, 129-134.
- 6'. Kadi, S. A., & Zirmi-Zembri, N. (2016). *Valeur nutritive des principales ressources fourragères utilisées en Algérie. 2- Les arbres et arbustes fourragers.*
- 7'. Masson, C., DECAEN, C., DELAMARCHE, F., & FAURIE, F. (1980). Composition chimique et valeur alimentaire des jeunes pousses de peuplier (*Populus*) et de frêne (*Fraxinus*). *Annales de zootechnie*, 29(2), 195-200.
- 8'. Jayanegara, A., Marquardt, S., Kreuzer, M., & Leiber, F. (2011). Nutrient and energy content, in vitro ruminal fermentation characteristics and methanogenic potential of alpine forage plant species during early summer. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(10), 1863-1870.
- 9'. Salem, A. Z. M. (2012). Oral administration of leaf extracts to rumen liquid donor lambs modifies in vitro gas production of other tree leaves. *Animal Feed Science and Technology*, 176(1), 94-101.
- 10'. Hejcmanová, P., Stejskalová, M., & Hejcman, M. (2014). Forage quality of leaf-fodder from the main broad-leaved woody species and its possible consequences for the Holocene development of forest vegetation in Central Europe. [journal article]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 23(5), 607-613.
- 11'. Djellal, F., Kadi, S. A., Madani, T., Khaled, A., Bannelier, C., & Gidenne, T. (2016). *Nutritive value of fresh ash (*fraxinus angustifolia*) leaves for growing rabbits.*
- 12'. Mebirouk-Boudechiche, L., Abidi, S., Cherif, M., & Bouzouraa, I. (2015). *Digestibilité in vitro et cinétique de fermentation des feuilles de cinq arbustes fourragers du nord est algérien* (Vol. 166).
- 13'. González-Hernández, M. P., & Silva-Pando, F. J. (1999). Nutritional Attributes of Understory Plants Known as Components of Deer Diets. *Journal of Range Management*, 52(2), 132-138.






- 14'. Shayo, C. M. (1998). *Uses, yield and nutritive value of mulberry (Morus alba) trees for ruminants in the semi-arid areas of central Tanzania* (Vol. 31).
- 15'. Ly, J., Ty, C., Phiny, C., & Preston, T. R. (2001). Some aspects of the nutritive value of leaf meals of *Trichanthera gigantea* and *Morus alba* for Mong Cai pigs. *Livestock Research for Rural Development*, 13(article 23).
- 16'. Cláudia Josefina, D., Kleber Tomás de, R., Basaglia, R., Sugohara, A., Takahashi, R., Costa, R., et al. (2004). *Digestibilidade in vivo dos nutrientes de cultivares de amoreira (Morus alba L.) em caprinos* (Vol. 34).
- 17'. Deshmukh, S. V., Pathak, N. N., Takalikar, D. A., & Digraskar, S. U. (2010). *NUTRITIONAL EFFECT OF MULBERRY ("MORUS ALBA") LEAVES AS SOLE RATION OF ADULT RABBITS* (Vol. 1).
- 18'. Doran, M. P., Laca, E. A., & Sainz, R. D. (2007). Total tract and rumen digestibility of mulberry foliage (*Morus alba*), alfalfa hay and oat hay in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 138(3), 239-253.
- 19'. Khanal, R. C., & Subba, D. B. (2001). Nutritional evaluation of leaves from some major fodder trees cultivated in the hills of Nepal. *Animal Feed Science and Technology*, 92(1), 17-32.
- 20'. Cheema, U. B., Sultan, J. I., Javaid, A., Akhtar, P., & Shahid, M. (2011). *Chemical composition, mineral profile and in situ digestion kinetics of fodder leaves of four native trees* (Vol. 43).
- 21'. Arbabi, A., Khan, G., Ahmad, J., Ayaz, M., & Mirza, I. H. (2002). *Nutritional Evaluation of Fodder Tree Leaves with Goats* (Vol. 15).
- 22'. Singh, B., Makkar, H. P. S., & Negi, S. S. (1989). Rate and Extent of Digestion and Potentially Digestible Dry Matter and Cell Wall of Various Tree Leaves. *Journal of Dairy Science*, 72(12), 3233-3239.
- 23'. Vu, C. C., Verstegen, M. W. A., Hendriks, W. H., & Pham, K. C. (2011). The Nutritive Value of Mulberry Leaves (*Morus alba*) and Partial Replacement of Cotton Seed in Rations on the Performance of Growing Vietnamese Cattle. *Asian-Australas J Anim Sci*, 24(9), 1233-1242.
- 24'. Todaro, M., A, S., G, M., Alicata, M. L., & P, G. (2007). Palatability and In vivo Digestibility of Mulberry Leaves (*Morus latifolia* CV. Kokusou 21) in Sheep Feeding. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 6(4), 509-512.
- 25'. Güven, İ. (2012). *Effect of Species on Nutritive Value of Mulberry Leaves* (Vol. 18).
- 26'. Boubaker, A., Kayouli, C., & Buldgen, A. (2019). *Composition chimique et teneur en composés phénoliques des espèces arbustives du Nord-Ouest de la Tunisie*.
- 27'. Karabulut, A., Canbolat, Ö., Ozkan, C. O., & Kamalak, A. (2006). *Potential nutritive value of some mediterranean shrub and tree leaves as emergency food for sheep in winter* (Vol. 18).
- 28'. MEBIROUK-BOUDECHICHE, L., CHERIF, M., BOUDECHICHE, L., & SAMMAR, F. (2014). Teneurs en composés primaires et secondaires des feuilles d'arbustes fourragers de la région humide d'Algérie. *Revue Méd. Vét.*, 165(11-12), 344-352.




- 29'. Rouissi, H., & A., C. (1999). Composition chimique de la végétation naturelle des parcours en maquis et garrigues. *Annales de l'Institut National Agronomique*, 20(1-2), 76-82.
- 30'. L. Buegler, A., Fike, J., Burger, J., Feldhake, C. M., McKenna, J. R., & Teutsch, C. (2006). *Forage Nutritive Value in an Emulated Silvopasture* (Vol. 98).
- 31'. 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. [journal article]. *Agroforestry Systems*, 27(3), 269-282.
- 32'. Makkar, H. P. S., Blümmel, M., & Becker, K. (1997). In vitro rumen apparent and true digestibilities of tannin-rich forages. *Animal Feed Science and Technology*, 67(2), 245-251.
- 33'. Kiliç, Ü., boğa, M., & Guven, I. (2010). *Chemical Composition and Nutritive Value of Oak (Quercus robur) Nut and Leaves* (Vol. 38).
- 34'. Arbouche, H. S., & Arbouche, F. (2007). Évaluation de la valeur énergétique des espèces végétales prélevées par le Cerf de Barbarie (*Cervus elaphus barbarus*, Bennet 1833) dans la zone d'El ayoune (Parc National d'El kala, Algérie). *Revue d'écologie*, 62(4), 375-380.
- 35'. Ammar, H., López, S., Andrés, S., Ranilla, M. J., Bodas, R., & González, J. S. (2008). In vitro digestibility and fermentation kinetics of some browse plants using sheep or goat ruminal fluid as the source of inoculum. *Animal Feed Science and Technology*, 147(1), 90-104.
- 36'. <https://www.feedipedia.org/content/feeds?category=13591>. Tables valeurs nutritives *Feedipedia*. consulté le 29 avril 2019
- 37'. Abdulrazak, S. A., Nyangaga, J., & Fujihara, T. (2001). Relative Palatability to Sheep of Some Browse Species, their In sacco Degradability and In vitro Gas Production Characteristics. *Asian-Australas J Anim Sci*, 14(11), 1580-1584.
- 38'. Opong, S. K., Kemp, P. D., Douglas, G. B., & Foote, A. G. (2001). Browse yield and nutritive value of two *Salix* species and *Dorycnium rectum* in New Zealand. [journal article]. *Agroforestry Systems*, 51(1), 11-21.
- 39'. 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), 1-17.
- 40'. González-Andrés, F., & Ceresuela, J. L. (1998). Chemical composition of some Iberian Mediterranean leguminous shrubs potentially useful for forage in seasonally dry areas. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 41(2), 139-147.
- 41'. Becholie, D., Tamir, B., Terrill, T. H., Singh, B. P., & Kassa, H. (2005). Suitability of tagasaste (*Chamaecytisus palmensis* L.) as a source of protein supplement to a tropical grass hay fed to lambs. *Small Ruminant Research*, 56(1), 55-64.

- 42'. 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. [chemical composition; forage; gas production; in vitro digestibility; tannins]. *2012*, *10*(1), 11.
- 43'. Larbi, A., Khatib-Salkini, A., Bolus Jamal, P., & Iniguez, L. (2009). Shrub yield and fodder quality variations in a non-tropical dryland environment in West Asia. [journal article]. *Agroforestry Systems*, *75*(2), 147-155.
- 44'. Ben Salem, H., Norman, H. C., Nefzaoui, A., Mayberry, D. E., Pearce, K. L., & Revell, D. K. (2010). Potential use of oldman saltbush (*Atriplex nummularia* Lindl.) in sheep and goat feeding. *Small Ruminant Research*, *91*(1), 13-28.
- 45'. Ben Salem, H., Nefzaoui, A., & Ben Salem, L. (2000). Sheep and goat preferences for Mediterranean fodder shrubs. Relationship with the nutritive characteristics. In I. Ledin & P. Morand-Fehr (Eds.), *Sheep and goat nutrition: Intake, digestion, quality of products and rangelands* (Vol. 52, pp. 155-159): Zaragoza : CIHEAM.
- 46'. GIGER, S., SAUVANT, D., HERVIEU, J., & DORLEANS, M. (1987). Valeur alimentaire du foin de luzerne pour la chèvre. *Annales de zootechnie*, *36*(2), 139-152.
- 47'. DEMARQUILLY, C., & Andrieu, J. (1992). Composition chimique, digestibilité et ingestibilité des fourrages européens exploités en vert. *INRA Productions animales*, *5*(3), 213-221.
- 48'. https://feedtables.com/fr/content/table-feed-profile?feed_pr_id=12401. Les tables INRA. Consulté le 25 avril 2019
- 49'. Émile, J. C., Ghesquière, M., & Traineau, R. (1996). *Appétence et valeur alimentaire de foins de fétuque indemnes ou infestés par le champignon endophyte Acremonium coenophialum* (Vol. 45).
- 50'. GIOVANNI, R. (1988). Valeur alimentaire des associations graminées/trèfle blanc. *INRA Productions animales*, *1*(3), 193-200.
- 51'. Hejcman, M., Hejcmanová, P., Pavlů, V., & Thorhallsdottir, A. (2016). *Forage quality of leaf fodder from the main woody species in Iceland and its potential use for livestock in the past and present* (Vol. 71).

Annexe 3 – Stade phénologique des espèces lors des prélèvements réalisés pour les mesures de LT50

Espèce	Date	Site	Lieu	Stade phéno	Photo
Erable	22/04/2019	Theix - Lamartine	Bord de route	Stade 07-09 : éclatement des bourgeons - bout des feuilles sorti	
Noisetier	22/04/2019	Theix - Lamartine	Bord chemin, sous bois	Stade 11 - 10 % feuilles étalées	
Prunellier	22/04/2019	Theix - Lamartine	Bord de clairière, haie bord de chemin	Feuillaison : Stade 9 : bout des feuilles sorties Floraison stade 61: 10% fleurs	
Aubépine	22/04/2019	Theix - Lamartine	Haie, bord de chemin	> Stade 15 - Plus de 50% des feuilles étalées	
Eglantier	22/04/2019	Theix - Lamartine	Bord de clairière, chemin	> Stade 15 - Plus de 50% des feuilles sorties	
Groseiller Alpes	22/04/2019	Theix - Lamartine	Sous bois	> Stade 15 - Plus de 50% des feuilles sorties	

Espèce	Date	Site	Lieu	Stade phéno	Photo
Sureau	22/04/2019	Theix - Lamartine	Clairière, haie	> Stade 15 : > 50% feuilles sorties	
Robinier	22/04/2019	Crouël	Verger	> Stade 15 : > 50% feuilles	
Aulne glutineux	29/04/2019	Theix - Lamartine	Bord de ruisseau/chemin	Stade 11: 10% des feuilles sorties	
Robinier	15/05/2019	Saint-Genès-Champanelle	Bord de route	Stade 11: 10% des feuilles sorties	
Tilleul	15/05/2019	Saint-Genès-Champanelle	Bord parking	> Stade 15: Plus de 50% des feuilles sorties	
Murier	20/05/2019		?	Stade 7: éclatement des bourgeons	

Espèce	Date	Site	Lieu	Stade phéno	Photo
Frêne	20/05/2019	Theix - Lamartine	Prairie	Stade 9-11: bout des feuilles sorti - 10% des feuilles étalées	
Noyer franquette	20/05/2019	Saint-Genès-Champagnelle	Prairie/ bord de route	Stade 7: éclatement des bourgeons	
Peuplier noir	20/05/2019	Theix - Lamartine	Bord de chemin - Parking	Stade > 11: > 10% des feuilles étalées	

Annexe 4 – Démarche statistique appliquée aux données expérimentales

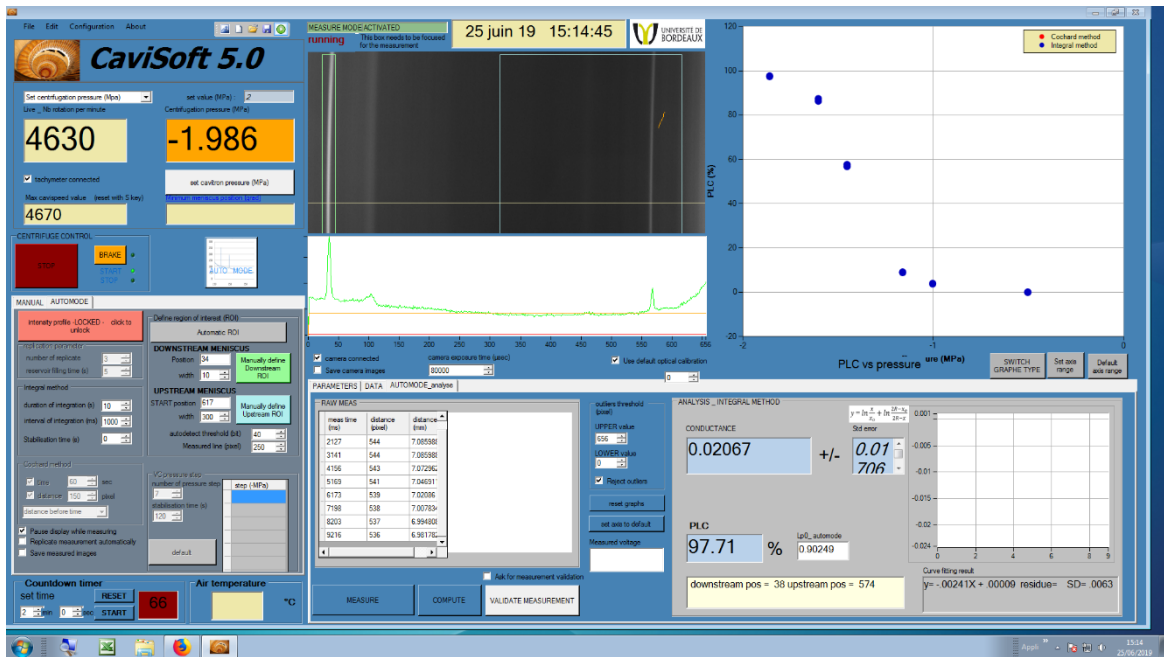
- **Analyse statistique des données expérimentales de LT50**

La comparaison des moyennes des différents échantillons nécessite la mise en place d'une analyse de variance à deux facteurs afin d'étudier l'effet du facteur espèce sur les variables quantitatives que sont les LT50 des rameaux et les LT50 des bourgeons et les interactions entre ces deux valeurs pour rendre compte d'une classification des espèces selon la résistance des rameaux et des bourgeons. Les tests sont réalisés à l'aide de l'outil XLStat. L'application d'un test de normalité sur les LT50 des bourgeons et rameaux montre que la variable ne suit pas une distribution normale, avec une p-value inférieure au seuil de significativité traditionnel de 5%. De plus, un test de comparaison de variances sur k échantillons appliqués aux LT50 mesurées conclut que les données ne présentent pas des variances homogènes. De par ces caractéristiques, les données ne remplissent pas les conditions d'utilisation d'un test ANOVA qui requiert une distribution normale et des variances homogènes. Le choix du test permettant de comparer les différences significatives (ou non) entre les moyennes des LT50 s'oriente alors vers un test non paramétrique, un test de Kruskal-Wallis qui permet de comparer un nombre infini d'échantillons indépendants, afin de déterminer si les échantillons diffèrent les uns des autres. Afin de comparer les effets simultanés de l'espèce et du type d'organes sur les LT50 mesurées, il convient de définir les paramètres du test de la façon suivante : les LT50 sont sélectionnées en tant que variables quantitative dépendante (données), et la nature de l'organe étudié et de l'espèce en tant que deux facteurs aussi appelé variable explicatives qualitatives. La réalisation d'un test complémentaire de comparaison multiples par paires permettra lors du test de comparer rang par rang les LT50 de l'ensemble du pool d'espèces d'intérêt. Parmi les possibilités, on choisit le test de Dunn afin de réaliser les comparaisons par paires.

- **Analyse statistique des données expérimentales**

La même démarche que pour la LT50 a été appliquée ici pour la seule valeur de P50, déterminée, elle, uniquement sur rameau. L'analyse statistique doit ici permettre la mise en évidence (ou non) des différences significatives entre les valeurs de P50 obtenues pour l'ensemble des échantillons d'une même espèce afin de comparer la résistance à la sécheresse des essences étudiées et de convenir de leur hiérarchisation selon ce critère. Répondre à cette question nécessite une analyse de variance à un seul facteur, c'est-à-dire une seule variable dépendante que sont les données de P50, afin d'étudier l'effet de l'espèce en tant que variable explicative sur la valeur de P50. La réalisation d'un test de normalité appliqué aux valeurs de P50 montre une p-value inférieure à 5% : les données ne suivent pas une distribution normale. En plus de quoi, s'intéresser à l'homoscédasticité par un test de comparaison des variances sur l'ensemble des mesures faites sur les 7 espèces apprend que les valeurs de P50 n'ont pas des variances homogènes. Les deux conditions permettant l'application d'un test ANOVA dans l'étude des différences significatives ne sont pas respectées et forcent l'utilisation d'un test non paramétrique comme précédemment pour les LT50 : un test de Kruskal-Wallis à un facteur. Le test est configuré de façon à définir les données de P50 en tant que variable dépendante quantitative et les espèces en tant que variable explicative qualitative. En parallèle une comparaison multiple par paire selon la procédure de Dunn est réalisée afin de comparer rang par rang les moyennes de P50 des échantillons du pool d'espèce dont les données ont été acquises. La réalisation d'un test complémentaire de comparaison multiples par paires selon la procédure de Dunn permettra lors du test de comparer rang par rang les P50 pour toutes les espèces.

Annexe 5 – Interface du logiciel Cavisoft



La centrifugeuse est couplée à un logiciel permettant de gérer la tension demandée et de mesurer l'évolution des conductivités hydraulique calculée grâce à la vitesse de déplacement du ménisque (niveau d'eau des cuves) visible à droite de l'image. L'évolution de la perte de conductivité est représentée graphiquement au fur et à mesure.

Annexe 6 – Protocole d'utilisation du cavitron (fourni par Julien Cartallier)

Dispositif

1) Préparer l'échantillon :

- Couper sous l'eau suivant le guide (correspond au rotor). Supprimer les nœuds et écorcer le bout, essuyer la tige
- Mesurer le diamètre de chaque extrémité
- Mettre l'échantillon sur le rotor et de l'eau dans les deux cuves. Refermer

2) Lancer Cavisoft :

- Sélectionner le cavitron et rotor puis rentrer le diamètre
- Connecter le tachymètre et la caméra
- Créer le fichier de sauvegarde
- Appuyer sur « Start » et « set cavitron press » pour rentrer la pression. Commencer à 0.5MPa
- Régler les fenêtres des ménisques (un fixe et un mobile) et la ligne de mesure au plus brillant dans l'onglet ROI
- Modifier les paramètres d'intégration, la durée de 10 à 60 secondes et l'intervalle de 1 à 10 secondes
- Activer la mesure et cliquer sur la fenêtre de mesure
- Rajouter de l'eau et lancer la mesure (flèche ↓ et espace)
- Faire la mesure plusieurs fois et attendre d'avoir deux mesures proches pour passer à la suivante. Si la droite d'intégration n'est pas linéaire, supprimer les points aberrants en allant dans l'onglet « Automode analyse », cocher la case « ask for measurement validation » et sélectionner les points à supprimer. Enfin appuyer sur « compute »
- Changer la pression. Ne pas aller trop vite et faire des paliers intermédiaires.
- Pour modifier la conductance initiale, aller dans le tableau « data » et rajouter une lettre (exemple : aa au lieu de a) ensuite appuyez sur « ctrl +w » et rentrer le nouveau nom. Enfin appuyer sur « compute »
- Les données sont dans l'onglet « data »
- Pour quitter, cliquer sur «file » et « exit »
- Ne pas oublier de sauvegarder

3) Ne pas oublier d'enlever l'eau dans la cuve du cavitron après chaque échantillon

Annexe 7 – Résultats des comparaisons multiples par paires des données de LT50 mixant les deux types d’organes, suivant la procédure de Dunn

La comparaison par paires des échantillons définis selon la nature de l’espèce et le type d’organe (bourgeons ou rameaux) considéré ne permet pas de classer de façon pertinente les espèces d’intérêt à partir des mesures de LT50 réalisées.

Echantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
R Aulne	4	39,000	9,750	A	
R Sureau	5	51,000	10,200	A	
R Noisetier	5	64,000	12,800	A	
R Prunellier	5	87,000	17,400	A	
R Aubépine	3	57,000	19,000	A	B
R Eglantier	5	107,000	21,400	A	B
R Tilleul	4	145,000	36,250	A	B
R Erable	5	188,000	37,600	A	B
R Frêne	5	203,000	40,600	A	B
R Franquett	5	213,000	42,600	A	B
R Robinier	3	152,000	50,667	A	B
R Groseiller	5	255,000	51,000	A	B
R Murier	5	330,000	66,000	A	B
B Erable	5	341,000	68,200	A	B
R Peuplier	4	292,000	73,000	A	B
B Eglantier	5	369,000	73,800	A	B
B Prunellier	5	384,000	76,800	A	B
B Tilleul	4	317,000	79,250	A	B
B Groseiller	5	401,000	80,200	A	B
B Aulne	4	336,000	84,000	A	B
B Robinier	3	271,000	90,333	A	B
B Noisetier	5	477,000	95,400	A	B
B Sureau	5	484,000	96,800	A	B
B Murier	5	493,000	98,600	A	B
B Aubépine	3	306,000	102,000	A	B
B Peuplier	4	455,000	113,750		B
B Frêne	4	468,000	117,000		B
B Franquett	5	590,000	118,000		B