

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان  
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN  
كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de  
l'Univers  
Département d'agronomie



## MÉMOIRE

Présenté par

**HACHEMI Mouhamed Ilyes et AISSAOUI Ahmed Anes**

En vue de l'obtention du

**Diplôme de MASTER**

En production végétale

**Mise en culture de l'azolla (*Azolla pinnata* R.Br) .  
Une fougère aquatique utilisée en aliment de la  
volaille.**

Soutenu le 21 octobre 2024, devant le jury composé de :

M. KADDOUR H.A      Maître assistant      université de Tlemcen      Président

Mme. ADJIM Z.      Maître de conférences B      université de Tlemcen      Encadrante

Mme. BENABADJI N.      Maître de conférences B      université de Tlemcen      Examinatrice

**Année universitaire 2023/2024**

# Remerciement

Nous inclinons humblement nos cœurs reconnaissants vers Allah, dont la grâce et les bénédictions ont illuminé chacun de nos pas sur ce chemin.

Sans Sa guidance infinie, nous ne serions pas ce que nous sommes aujourd'hui. Sa présence bienveillante a été notre réconfort constant, nous inspirant à persévérer malgré les défis rencontrés.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mme. Zouleykha ADJIM. Ce fut un honneur de l'avoir comme encadrante. Son expertise, Sa renommée, ainsi que son soutien ont été des éléments cruciaux pour nous tout au long de ce projet.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos précieux partenaires de recherche, notamment Mr. Aïssa MEKIDECH de Maghnia, ainsi que Mr. Bachir de Hennaya, qui ont été d'une aide précieuse, leur expertise et leur dévouement ont été essentiels à la bonne réalisation de ce travail,

Nous exprimons une gratitude sincère et émue.

Leur générosité désintéressée a été notre bouclier dans les tempêtes de la recherche, nous permettant de poursuivre notre quête scientifique avec détermination.

Enfin, nous honorons tous les enseignants qui ont croisé notre chemin académique, portant la flamme du savoir et de la passion pour l'enseignement. Leur dévouement infatigable a nourri notre soif de connaissance et façonné notre parcours intellectuel et personnel avec bienveillance.

# *Dédicaces*

Je dédie ce monde et ce travail à ceux qui ont façonné mon parcours et illuminé mon chemin,

À ma mère, source infinie d'amour et de douceur, dont la patience a été mon refuge et la force tranquille qui m'a porté dans les moments les plus difficiles. Chaque mot, chaque geste, chaque sourire a été pour moi une ancre, un rappel constant que l'amour peut tout surmonter. C'est grâce à toi que j'ai pu rêver, persévérer, et finalement, atteindre ce qui semblait autrefois impossible. Pour tout ce que tu es, et tout ce que tu m'as donné, je te serai toujours reconnaissant.

À mon père, dont la foi en moi a été une lumière constante, éclairant même les chemins les plus sombres. Ton soutien indéfectible, tes encouragements silencieux mais puissants, m'ont donné la force de me surpasser. Chaque pas que j'ai fait, chaque victoire que j'ai remportée, a été porté par ta confiance inébranlable en mes capacités. C'est à toi que je dois ce parcours.

À mon frère Toufik et à mes sœurs, compagnons de vie et de cœur, qui ont été à mes côtés à chaque étape de ce voyage. Votre soutien indéfectible, vos encouragements constants, et cette complicité unique qui nous unit ont été des forces invisibles mais puissantes, m'accompagnant dans chaque pas. Dans les moments de doute comme dans ceux de réussite, vous avez été là, présents et aimants, et pour cela, je vous en suis profondément reconnaissant.

À ma fiancée ASH, qui a été bien plus qu'un simple soutien. Sa présence à mes côtés est une bénédiction, un phare qui m'a guidé vers l'avant et m'a donné la force de continuer même lorsque les vents étaient contraires.

À mes amis Charaf, Aymen, Fethi, et Adel, dont l'amitié précieuse a illuminé mes jours et réchauffé mes nuits.

À mon cousin Zohir, dont les sages conseils resteront gravés dans mon cœur, une source d'inspiration que je chérirai toujours.

Merci à vous tous, de croire en moi, de m'encourager, et de m'aimer avec tant de passion et de constance. Ce chemin que j'ai parcouru, je l'ai partagé avec vous, et c'est aussi grâce à vous que je me tiens là aujourd'hui.

***HACHEMI Mouhamed Ilyes***

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail À mon paradis, ma lune, la prunelle de mes yeux et la source de ma joie "maman"

A mon roi, mon support qui était toujours à mes côtés, la source de vie et

d'Amour "papa رحمة الله عليه "

Qui m'ont éclairé le chemin de la vie par leurs grands soutiens et leurs encouragements, par leurs dévouements exemplaires et les énormes sacrifices qu'ils m'ont consentis durant mes études

A mes chères sœurs : Sanaa / Fatima / Meriem

A mes amis : Oussama / Boumediene/ Salim/ Ilyes Cherifi / Fethi et bien sur mon binôme Ilyes

À tous mes amis et les étudiants de la promotion de master production végétale

2023/2024

**AISSAOUI Ahmed Anes**



## Résumé

L'*Azolla pinnata* une fougère aquatique. Grâce à son coût réduit et son riche apport en protéine, en l'occurrence avec l'appauvrissement en plantes fourragères. Dans nos régions, elle est récemment utilisée comme aliment de la volaille.

Le présent travail, vise simplement la mise en culture de l'azolla. Sur des bassins installés dans différent gradient d'ensoleillement : ensoleillé, mi-ensoleillé, ombragée, on a enregistré des observations de couleurs, de morphologie ainsi que de rendements indiquant l'échec ou la réussite de la culture. Nous avons installé la culture en mois de juillet 2024 et durant trois semaines.

Les meilleurs résultats été celle de la culture en bassin mi-ensoleiller avec un apport des éléments nutritives qui a enregistré une moyenne de rendement de 109 gr/m<sup>2</sup>/jour. Avec une couleur vive, témoignant une bonne santé de la culture. Les cultures des autres bassins ont échoué.

**Mots clés** : *Azolla pinnata*, mise en culture, ensoleillement, observations morphologiques, rendement, *Anabaina-azolla*

## Liste des abréviations

MS Matière sèche

ADF Fibre de détergent acide

NPK st un acronyme utilisé en agriculture pour désigner les trois principaux éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes (N : azote, P : phosphore, K : Potassium)

NDF Fibre de détergent neutre

OGM Organisme génétiquement modifié

NSP Polysaccharides non amylacés

NFE Extrait azoté

FCR Taux de conversion alimentaire

BFN Processus unique des procaryotes

FW Fresh weight (Poids frais)

DW dry weight (Poids sec)

RGR Taux de croissance relatif

## Liste des figures

<b>FIGURE 1: LE BLÉ WHEAT (GENERAL) (CREDITS: ANDREW GUSTAR)</b> .....	5
<b>FIGURE 2 : L' AVOINE (PEER SCHILPEROORD)</b> .....	6
<b>FIGURE 3: GRAINS DE MAÏS (HEUZE ET AL, 2017)</b> .....	7
<b>FIGURE 4: LE SORGHO (HEUZE ET AL, 2015)</b> .....	8
<b>FIGURE 5: FOURRAGE DE SORGHO (HEUZE ET AL, 2015)</b> .....	9
<b>FIGURE 6 : GRAINS D'ORGES (HEUZE ET AL, 2016)</b> .....	10
<b>FIGURE 7: LE POIS FOURRAGER (WWW.GERMINEO.COM)</b> .....	11
<b>FIGURE 8 : BLUE LUPIN (LUPINUS ANGUSTIFOLIUS) SEEDS (CREDITS: KRZYSZTOF ZIARNEK, KENRAIZ)</b> .....	12
<b>FIGURE 9: BLUE LUPIN (LUPINUS ANGUSTIFOLIUS)</b> .....	12
<b>FIGURE 10: MORINGA (MORINGA OLEIFERA ) (CREDITS: FOREST &amp; KIM STARR/ FOREST &amp; KIM STARR)</b> .....	13
<b>FIGURE 11: VERS DE FARINE (TENEBRIO MOLITOR) (CREDITS : TIIA MONTO)</b> .....	14
<b>FIGURE 12: LES CAVITES DORSALES DES FEUILLES D'AZOLLA ABRITENT L'ANABAENA. FIGURE MODIFIEE D'APRES CARRAPIÇO (2010)</b> .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>FIGURE 13: SCHEMA DE LA REPRODUCTION SEXUEE ET VEGETATIVE D'AZOLLA PAR ANTHONY NTENDELE BIKELA</b> .....	19
<b>FIGURE 14: ASPECT DES SPORES DE L' AZOLLA ET LEUR EVOLUTION</b> .....	20
<b>FIGURE 15: AZOLLA FRAICHE (AKHILESH KUMAR)</b> .....	24
<b>FIGURE 16: AZOLLA ENSILEE (DIVKOLAIE ET AL., 2018</b> .....	24
<b>FIGURE 17: SECHAGE DE L' AZOLLA AU SOLEIL (PAR RIDHA BERGAOUI)</b> .....	25
<b>FIGURE 18: L' AZOLLA PINNATA</b> .....	50
<b>FIGURE 19: LE MATERIEL UTILISE POUR LA MISE EN PLACE DES BASSINS</b> .....	51
<b>FIGURE 20: MISE EN PLACE DES BRIQUES</b> .....	51
<b>FIGURE 21: EMLACEMENT DES CARTONS</b> .....	51

<b>FIGURE 22:</b> EMPLACEMENT DE LA BACHE .....	52
<b>FIGURE 23:</b> LE TAMISAGE DU SOL.....	52
<b>FIGURE 24:</b> PREPARATION DU MELANGE .....	52
<b>FIGURE 25:</b> REMPLISSAGE DES BASSINS PAR LE MELANGE .....	52
<b>FIGURE 26:</b> REMPLISSAGE LES BASSINS PAR L'EAU .....	53
<i>FIGURE 27: L'ENLEVEMENT DES PARTICULES</i> .....	53
<b>FIGURE 28:</b> ETAT FINAL APRES LA PREPARATION.....	54
<b>Figure 29:</b> : le sac de purin bouse de vache	58
<b>FIGURE 30:</b> AZOLLA PREMIER PHASE APRES L'ADAPTAION .....	58
<b>FIGURE 31:</b> ETAT ET LA DENSITE DE L'AZOLLA APRES 20 JOURS DE LA PLANTATION .....	58
<b>FIGURE 32:</b> CHANGEMENT DANS LA COULEUR DE L'EAU .....	59
<b>FIGURE 33:</b> ETAT DES RACINES .....	60
<b>FIGURE 34:</b> UNE PHOTO REPRESENTE DES POULETS SE NOURRISSANT D'AZOLLA .....	60
<b>FIGURE 35:</b> RESULTAT DE BASSIN 2.....	61
<b>FIGURE 36:</b> PHOTO QUI MONTRE LA DENSITE ET L'ETAT DES RACINES DE BASSIN 2.....	62
<b>FIGURE 37 :</b> RESULTAT DU BASSIN 4 .....	62
<b>FIGURE 38:</b> RESULTAT DU BASSIN 4 .....	62

## Liste des tableaux

<b>TABLEAU 1:</b> COMPOSITION CHIMIQUE DU GRAIN DE BLE (FEILLET, 2000).....	6
<b>TABLEAU 2:</b> COMPOSITION CHIMIQUE DE L'AZOLLA SECHEES (TRAN ET AL., 2015). ....	22
<b>TABLEAU 3:</b> COMPOSITION CHIMIQUE DE L'AZOLLA FRAICHES (TRAN ET AL., 2015).....	22
<b>TABLEAU 4:</b> LES MINERAUX PRESENTS DANS L'AZOLLA FRAICHES (TRAN ET AL., 2015).....	23
<b>TABLEAU 5:</b> LES PRINCIPAUX ACIDES AMINES PRESENTS DANS L'AZOLLA FRAICHES (TRAN ET AL., 2015).....	23
<b>TABLEAU 6:</b> TAUX DE DIMINUTION DE LA CROISSANCE D'AZOLLA DANS LES CONDITIONS DE CARENCE (MANDAL, ET AL .2013).....	28
<b>TABLEAU 7:</b> COMPOSITION EN INGREDIENTS (KG) DE L'ALIMENT EXPERIMENTAL. <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>	
<b>TABLEAU 8:</b> POIDS CORPOREL MOYEN HEBDOMADAIRE DES LAPINS (G) DANS LES DIFFERENTS GROUPES DE TRAITEMENT .....	47
<b>TABLEAU 9:</b> CONSOMMATION QUOTIDIENNE MOYENNE D'ALIMENTS (G) POUR LES LAPINS DES DIFFERENTS GROUPES DE TRAITEMENT .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>TABLEAU 10:</b> COMPOSITION DES INGREDIENTS ET DES NUTRIMENTS (%) DU REGIME STANDARD POUR CANARDS PONDEURS ET DE L'AZOLLA.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>TABLEAU 11:</b> EFFET DE L'ALIMENTATION AVEC DE L'AZOLLA (AZOLLA PINNATA) SUR LES PERFORMANCES DES CANARDS PONDEURS WHITE PEKIN.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>TABLEAU 12:</b> EFFET DE L'ALIMENTATION AVEC DE L'AZOLLA (AZOLLA PINNATA) SUR LES CARACTERISTIQUES DE QUALITE DES ŒUFS DES CANARDS PONDEURS WHITE PEKIN .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>

## **TABLE DES MATIERE**

<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>2</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>3</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>5</b>
<b>TABLE DES MATIERE</b> .....	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>2</b>
<b>CHAPITRE 1 : LES RESSOURCES FOURRAGERES</b> .....	<b>5</b>
I- Les matières premières utilisées dans l'alimentation animale : .....	5
I-1- les aliments riches en énergies : .....	5
I-2-les matières riches en protéines : .....	10
II-synthèse bibliographique sur azolla comme plante fourragère : .....	14
II-1- Généralités sur l'Azolla :.....	14
II -1-2-Historique et origine de l'Azolla :.....	15
II-1-3- La morphologie de l'Azolla :.....	16
II-1-4- Les Sous-genres et espèces de l'Azolla :.....	18
II-1-5- Type de reproduction de l'Azolla :.....	18
II-1-6-La composition chimique de l'Azolla : .....	20
II-1-7- Les différentes formes fourragère de l'Azolla :.....	24
III- Exigences culturelles de l'Azolla et ses multiples utilisations : .....	25
III-1-Ecophysiologie de l'Azolla : .....	25
III-2- Le procédé de culture de l'Azolla :.....	28
III-3- Importance de l'azolla :.....	30
<b>Chapitre 02 : Les analyses d'articles</b> .....	<b>32</b>
I- liste des articles : .....	33
I-1- Des articles sur la caractérisation agronomique de l'azolla :.....	33
I-2- Des articles sur l'azolla et l'alimentation animale : .....	35
II- Analyses des articles : .....	37
II-1- Analyses d'articles sur la caractérisation agronomique de l'azolla : .....	37
II-2- Analyses d'articles sur l'azolla et l'alimentation animale : .....	45
<b>Chapitre 03 : Matériels et Méthodes</b> .....	<b>49</b>
3-1-Zone et durée de l'étude: .....	50
3-2- Le matériel utilisé : .....	50
3-3- Le Matériel utilisé pour la mise en place des bassins : .....	50
3-4- Le protocole expérimental : .....	51

3-4-1- Premier partie : construction et préparation des bassins : .....	51
3-4-2-Deuxième partie : plantation de l'Azolla dans les bassins :.....	53
3-5-Déroulement de l'expérience : .....	55
3-5-2-l'observation quotidienne .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>64</b>
<b>Les références bibliographiques.....</b>	<b>66</b>
<b>Les références bibliographiques :.....</b>	<b>67</b>





# Introduction

## INTRODUCTION GENERALE

Face à l'instabilité croissante du secteur agricole en Algérie et à l'augmentation des prix de la viande blanche et des œufs, les autorités compétentes identifient plusieurs facteurs contributifs, notamment la hausse des coûts des matières premières, en particulier le maïs et le soja, qui constituent une part essentielle de l'alimentation des volailles. Pour pallier cette situation, des initiatives sont en cours pour développer la culture de céréales, telles que l'orge, le maïs et le soja, dans le sud de l'Algérie, afin de réduire la dépendance aux importations. Cependant, selon les experts en agronomie, cette transition ne s'avère pas aussi simple qu'il y paraît (ALGERIE PRESSE SERVICE 16 OCTOBRE 2022 ).

L'aviculture est l'élevage d'oiseaux, principalement des volailles. Cette activité agricole englobe une grande variété d'espèces, allant des poules pondeuses et des poulets de chair aux dindes, oies, canards et autres oiseaux d'ornement. Étant donné l'importance stratégique de l'aviculture dans l'économie nationale et sa contribution à l'autosuffisance alimentaire, il est crucial de porter une attention particulière à ces animaux à cycle court.

L'azolla cette petite fougère aquatique, recèle un potentiel immense pour révolutionner l'agriculture, et plus particulièrement l'aviculture. Riche en protéines et en nutriments essentiels avec sa croissance rapide, sa richesse en nutriments et ses faibles coûts de culture, se présente comme une solution économique prometteuse pour améliorer l'alimentation animale. Ce qui rend cette plante unique, c'est sa symbiose avec la bactérie *Anabaena-azollae*, qui habite dans les cavités de ses feuilles. Grâce à cette symbiose, l'Azolla peut fixer de grandes quantités de diazote atmosphérique, rendant cette plante non seulement intéressante sur le plan biologique, mais aussi potentiellement précieuse en tant que source d'azote dans l'agriculture (BECKING, 1979).

Le but de notre choix de la plante Azolla était sa facilité de production, sa reproduction rapide, sa valeur nutritionnelle et son prix par rapport aux aliments importés.

Ce travail vise simplement à la mise en culture de l'azolla dans quatre bassins chacun de 4 m<sup>2</sup>. Les quatre bassins sont installés dans différents gradients d'ensoleillement. A savoir, ensoleillé, mi ensoleillé, ombragée et mi ensoleillé avec absence d'élément nutritif. Les résultats escomptés sont d'ordre descriptif seulement, à savoir, augmentation de la quantité de la culture et les indication de la couleur de la culture. Cette mise en culture a été réalisée pendant trois semaines à partir du mois de juillet 2024, à notre maison.

Le premier chapitre dans ce manuscrit, concerne une recherche bibliographique sur les matières premières utilisées dans l'alimentation animale, mettant l'accent sur la richesse en nutriments et en protéines de l'azolla par rapport aux autres aliments. Le deuxième chapitre, est consacré à l'analyse d'articles originaux qui traitent la caractérisation agronomique de l'azolla ainsi que leur influence sur l'alimentation animale. Le troisième chapitre, expose le matériel et méthodes utilisés lors de la culture de l'azolla. Le dernier chapitre, donne les résultats et la discussion du travail.

# Chapitre 01 : Les ressources fourragères

## CHAPITRE 1 : LES RESSOURCES FOURRAGERES

### I- Les matières premières utilisées dans l'alimentation animale :

Les matières premières utilisées dans l'alimentation animale sont l'ensemble des ingrédients qui composent les aliments destinés aux animaux d'élevage. Ces ingrédients peuvent être d'origine végétale (céréales, légumineuses, tourteaux, etc.), animale (farines de viande, de poisson, etc.), minérale (sels, vitamines, oligo-éléments) ou encore des sous-produits industriels (déchet de brasserie, etc.)

#### I-1- les aliments riches en énergies :

##### I-1-1-le blé :

Le grain de blé *Triticum aestivum* (Fig.01) est un aliment polyvalent, largement utilisé dans l'alimentation des animaux de ferme. Toutefois, il est crucial de l'administrer avec précaution aux ruminants et aux chevaux en raison de sa teneur élevée en glucides, qui peut entraîner des troubles digestifs (BLAIR, 2011 ; GNIS, 2011). La composition chimique du blé, illustrée dans le tableau 1, est sujette à des variations en fonction de divers facteurs tels que l'espèce cultivée, les méthodes de culture, les conditions climatiques et la fertilité du sol (ZIJLSTRA ET AL. 1999). Selon FEILLET (2000), le grain de blé se compose principalement d'amidon (environ 70%) et de protéines (environ 15%), ainsi que de traces de lipides, de cellulose, de sucres libres, de minéraux et de vitamines.

**Figure 1:** le blé Wheat (general) (Credits: Andrew Gustar)



<b>Les composants</b>	<b>% de MS</b>
<b>Amidon</b>	<b>Environ 70%</b>
<b>Protéines</b>	<b>Environ 15%</b>
<b>Cellulose</b>	<b>Environ 4%</b>
<b>Pentosanes</b>	<b>Environ 10%</b>
<b>Sucres libres</b>	<b>Environ 3%</b>
<b>Lipides</b>	<b>Environ 3%</b>
<b>Minéraux</b>	<b>Environ 2%</b>

*Tableau 1: Composition chimique du grain de blé (Feillet, 2000).*

***1-1-2-l'avoine :***

L'avoine *Avena sativa* (Fig.02) est un choix prisé dans l'alimentation animale en raison de sa haute valeur énergétique, surpassant largement les autres céréales telles que le maïs avec une énergie brute de 19,5 MJ/kg contre 18,7 MJ/kg de matière sèche. Cette supériorité énergétique découle principalement de sa teneur en huile relativement élevée, oscillant entre 3,5% et 7,5% de matière sèche. Bien que ses niveaux de protéines (8-15% de MS) soient inférieurs à ceux du blé et de l'orge, ils restent compétitifs par rapport au maïs. De plus, l'avoine se distingue par un profil d'acides aminés favorable, avec une concentration élevée en lysine (4,3% contre 2,9% pour le blé) ainsi qu'une bonne représentation des acides aminés soufrés, de la thréonine et du tryptophane. Comparativement au maïs, l'avoine présente une teneur réduite en amidon, et affiche des niveaux d'ADF de 16% avec une faible teneur en lignine, selon les recherches de MACLEOD ET AL. (2008) et BOYLES ET JOHNSON (2006).

**Figure 2 : L'avoine (PEER SCHILPEROORD)**



### I-1-3-le maïs :

Le maïs *Zea mays* (Fig.03) occupe une place centrale et inestimable dans le domaine agricole, tant pour l'alimentation du bétail que pour celle des êtres humains. En tant que culture polyvalente, il offre une source précieuse d'énergie, de nutriments et de revenus pour les agriculteurs du monde entier. Pour le bétail, le maïs représente un aliment de base, riche en amidon (72%MS) et en énergie, essentiel pour la croissance, la production laitière et la santé des animaux d'élevage. Sa composition équilibrée en fait un choix optimal pour répondre aux besoins nutritionnels variés des différentes espèces. De même, dans l'alimentation humaine, le maïs est omniprésent, que ce soit sous forme de grains entiers, de farine, de sirop de maïs ou d'une multitude d'autres produits dérivés. Il constitue une source importante de glucides et de (80 %) des cendres et des lipides du grain, de fibres, de vitamines (B12) et de minéraux (20%) contribuant ainsi à une alimentation équilibrée et variée. (LUVEN P ; 1993)

**Figure 3:** Grains de maïs (HEUZE ET AL, 2017)



### ***I-1-4-le sorgho:***

Le sorgho *Sorghum bicolor* (Fig.04) avec son profil nutritionnel exceptionnel, se dresse comme un pilier de l'alimentation animale. Riche en glucides complexes, en fibres et en protéines de 9 à 13 % MS, il offre une source énergétique soutenue, idéale pour les animaux à croissance rapide ou à forte

activité physique. Sa teneur en minéraux essentiels tels que le calcium, le phosphore (70 %) (SAUVANT ET AL, 2004) et le fer en fait un aliment complet, favorisant la santé osseuse et la vitalité générale. De plus, sa digestibilité élevée en fait un choix optimal pour maximiser l'absorption des nutriments, contribuant ainsi à une croissance saine et à une performance optimale chez les animaux d'élevage. En somme, le sorgho se distingue comme un atout précieux dans la nutrition animale, offrant une combinaison équilibrée de nutriments essentiels pour répondre aux besoins de nos compagnons à quatre pattes.

Bien que productive, requiert une gestion avisée des engrais NPK, tenant compte de leur impact potentiel sur la santé des sols et des eaux souterraines. Pourtant, dans des contextes économiques tendus, le sorgho peut être intégré dans une rotation culturale bénéfique, notamment avec des légumineuses qui enrichissent le sol en azote. Après la récolte, un labour dans les chaumes du sorgho peut contribuer à restaurer la matière organique du sol et à prévenir l'érosion (SELON HEUZE ET AL).

Sa plantation en rangs espacés de 20 cm offre une barrière efficace contre l'érosion des sols. De plus, en tant qu'espèce résistante à la sécheresse, le sorgho optimise l'utilisation de l'eau, tout en maintenant des rendements satisfaisants, ce qui en fait un choix judicieux pour l'alimentation des bovins laitiers.

**Figure 4:** Le sorgho (HEUZE ET AL, 2015).



**Figure 5:** Fourrage de sorgho (HEUZE ET AL, 2015).



### ***I-1-5-l'orge :***

L'orge *Hordeum vulgare* (Fig.06) se distingue comme un ingrédient alimentaire de premier choix pour de nombreuses espèces de bétail, souvent en compétition avec le blé et le maïs. Aux États-Unis, par exemple, l'orge est un pilier essentiel de l'engraissement des bovins de boucherie (OCDE, 2004). En Europe, le blé et l'orge dominent également les rations alimentaires des volailles et des porcs (BERGH ET AL, 1999).

Comparativement au maïs et au blé, l'orge présente une teneur en amidon légèrement inférieure, oscillant entre 55 et 63 % de matière sèche. Toutefois, sa teneur en protéines, variant autour de 11 à 12 % (avec des valeurs entre 9,5 et 13 % en matière sèche), dépasse celle du maïs et rivalise avec celle du blé. Sa richesse en fibres, avec des taux de fibres brutes atteignant 4 à 6 % et de NDF entre 18 et 24 %, lui confère une valeur nutritive moins élevée pour les espèces animales sensibles à ces fibres (FEEDIPEDIA, 2011).

Diverses variétés d'orge présentent un intérêt certain pour l'alimentation animale. Les variétés sans coque, par exemple, offrent une digestibilité accrue et une densité nutritionnelle supérieure grâce à une réduction de la teneur en fibres et une légère augmentation de la teneur en protéines (CDC, 2003). Certaines variétés à faible teneur en phytates contribuent à limiter l'excrétion de phosphore (GAYLORD ET AL, 2010). Des types d'orges spécifiques, comme les orges cireuses riches en amylopectine, peuvent présenter des avantages ou des inconvénients selon l'espèce animale et nécessitent une gestion adaptée, notamment en termes d'enzymes chez les porcs et d'éviction chez la volaille (CDC, 2003). Enfin, la structure physique de l'amidon de l'orge peut influencer sa digestibilité en interaction avec d'autres composants, tels que les lipides et les protéines, nécessitant une prise en compte attentive dans la formulation des rations animales (SVIHUS ET AL, 2005 ; BERGH ET AL, 1999).

**Figure 6 :** Grains d'orges (HEUZE ET AL, 2016).



## **I-2-les matières riches en protéines :**

### ***I-2-1-le pois :***

Les graines de *pois Pisum sativum* (Fig.07) sont reconnues pour leur richesse en protéines et en énergie. Elles constituent une source précieuse de protéines pour l'alimentation animale, affichant généralement une teneur en protéines élevée, oscillant entre 22 et 24 % de matière sèche, ce qui les place entre les céréales et les tourteaux oléagineux (CASTELL ET AL, 1996 ; FEEDIPEDIA, 2011). Les pois d'hiver ont tendance à contenir davantage de protéines que les pois de printemps, et les variétés à graines ridées affichent une teneur en protéines plus élevée que celles à graines lisses (GATEL ET AL, 1990).

En tant qu'alternative à la farine de soja, les pois présentent un profil en acides aminés bien équilibré, en particulier en lysine, comparable à celui de la farine de soja et supérieur à celui des céréales, notamment du maïs. Ainsi, ils peuvent être utilisés comme complément protéique dans les régimes à base de céréales (DURANTI ET AL, 1997). Cependant, ils sont déficients en tryptophane et en acides aminés soufrés, notamment la méthionine, qui sont essentiels pour certaines espèces animales (DIXON ET AL, 1992).

Dans le contexte de l'élevage biologique, où l'utilisation de sources conventionnelles telles que la farine de soja et les acides aminés synthétiques est restreinte en raison de préoccupations liées aux organismes génétiquement modifiés (OGM), les pois représentent une source de protéines précieuse (SCHUMACHER ET AL, 2011 ; MARTINI ET AL, 2008).

**Figure 7:** Le pois fourrager ([www.germineo.com](http://www.germineo.com))



***1-2-2- le lupin :***

Les graines de lupin bleu *Lupinus* présentent une richesse en protéines notable, allant de 27 à 44 % de matière sèche, surpassant ainsi les pois et la féverole. Leur teneur en matières grasses est également plus élevée, oscillant entre 4 et 8 % de matière sèche, comparativement à ces mêmes légumineuses. Toutefois, elles sont moins riches en protéines que les variétés de lupin blanc et jaune. Sur le plan lipidique, leur contenu est similaire à celui du lupin jaune, mais moindre que celui du lupin blanc.

Les lupins se distinguent par leurs propriétés glucidiques singulières : une faible teneur en amidon, bien que les méthodes d'analyse polarimétrique puissent parfois surestimer jusqu'à 10 %, des niveaux élevés de NSP (polysaccharides non amylacés) solubles et insolubles, ainsi que des taux élevés d'oligosaccharides de raffinose. Ces caractéristiques peuvent influencer l'utilisation de l'énergie et la digestion d'autres nutriments dans l'alimentation des animaux (van Barneveld, 1999). Contrairement à d'autres espèces de lupin, le rendement en graines de *Lupinus angustifolius* n'est pas négativement corrélé à sa teneur en protéines (Berk et al, 2008).

Particulièrement prisées des ruminants, les graines de lupin bleu constituent l'alimentation principale des moutons en Australie (Nelson et al, 2000). Leur haute teneur en protéines en fait une alternative précieuse à la farine de soja, bien que leur contenu protéique puisse varier davantage que celui des lupins blanc et jaune.

**Figure 8 :** Blue lupin (*Lupinus angustifolius*) seeds (CREDITS: KRZYSZTOF ZIARNEK, KENRAIZ)



**Figure 9:** Blue lupin (*Lupinus angustifolius*)



### ***I-2-3- le moringa :***

Les feuilles de Moringa *Moringa oleifera* sont souvent reconnues comme une source de protéines, bien que leur teneur puisse varier considérablement, allant de 15 % à plus de 30 % de matière sèche. Cette variation dépend largement du stade de maturité ainsi que des proportions de folioles, de pétioles et de tiges. Ces dernières, moins riches en protéines, contribuent à cette diversité de composition. De même, la quantité de fibres dans les feuilles de Moringa varie grandement selon les sources, avec des taux de fibres brutes allant de 8 % à plus de 30 % de matière sèche. Quant à la lignine, elle oscille entre 2 % et plus de 10 % de matière sèche. Les feuilles de Moringa sont également une source notable de minéraux, comme le calcium et le fer, représentant environ 10 % de leur poids sec. Elles renferment également une palette variée de vitamines, incluant le  $\beta$ -carotène, la vitamine C, les vitamines B1, B6 et la niacine ( PRICE, 2007 ; REYES SANCHEZ, 2004 ), ainsi que des flavonoïdes tels que la

quercétine et le kaempférol, reconnus pour leur puissant effet antioxydant ( YANG ET AL., 2006 ; SIDDHURAJU ET AL., 2003 ).

Concernant les graines de Moringa, les tourteaux dégraissés obtenus par solvant présentent une teneur élevée en protéines, environ 60 % de matière sèche, avec des quantités limitées de fibres (9 % de matière sèche) et de matières grasses (moins de 1 %). Leur profil en acides aminés est caractérisé par une abondance d'acides aminés soufrés, notamment la méthionine et la cystine, représentant 6,1 % des protéines, mais une faible teneur en lysine, inférieure à 1,5 % des protéines.

Les feuilles de Moringa peuvent efficacement compléter les régimes alimentaires de qualité médiocre pour les animaux, améliorant ainsi leurs performances. Cependant, lorsqu'elles remplacent les concentrés habituels dans l'alimentation des ruminants, comme les tourteaux commerciaux, de tournesol ou de soja, les performances des animaux ont tendance à diminuer.

Traditionnellement données fraîches aux ruminants, les feuilles de Moringa ont également été utilisées en ensilage, seules ou en mélange avec de l'herbe Napier ou de la canne à sucre, afin d'en augmenter la valeur nutritionnelle ( MENDIETA-ARAICA ET AL., 2009 ).

**Figure 10:** Moringa (*Moringa oleifera* ) (CREDITS: FOREST & KIM STARR/ FOREST & KIM STARR)



#### ***I-2-4-les vers de farine :***

Les larves de *Mea Tenebrio molitor* représentent une source alimentaire hautement nutritive. Leur composition est remarquable, avec des taux élevés de protéines (45 à 60 % de matière sèche) et de graisses (30 à 45 % de matière sèche). Fraîches, elles contiennent environ 60 % d'eau. Leur faible teneur en cendres (moins de 5 % de matière sèche) les rend peu riches en minéraux, tel le calcium, typique des insectes, avec un rapport Ca:P très bas ( KLASING ET AL., 2000 ). Il convient de noter que leur composition peut varier considérablement selon leur alimentation, notamment en ce qui concerne le calcium, qui peut être ajusté à travers des régimes enrichis.

Les vers de farine séchés, intégrés jusqu'à 10 % de la matière sèche totale de l'alimentation des poulets de chair au stade de démarrage, n'ont démontré aucun effet néfaste sur la consommation alimentaire, le gain de poids ou l'efficacité alimentaire. Aucun rejet n'a été signalé en raison de leur texture, de leur appétence ou de leur niveau d'inclusion dans l'alimentation ( RAMOS-ELORDUY ET AL., 2002 ).

Dans une étude portant sur des poulets de chair femelles, l'augmentation de la proportion de farine de vers de farine de 5 % à 15 % dans l'alimentation a entraîné une amélioration du poids corporel et de la consommation alimentaire, bien que cela ait partiellement affecté l'efficacité alimentaire. Des bénéfices ont été observés sur les caractéristiques des carcasses et les paramètres hématochimiques, sans effet négatif sur la morphologie intestinale ni les résultats histologiques ( BIASATO ET AL., 2017 ).

**Figure 11:** Vers de farine (*Tenebrio molitor*) (CREDITS : TIIA MONTO)



## **II-synthèse bibliographique sur azolla comme plante fourragère :**

### **II-1- Généralités sur l'Azolla :**

L'Azolla, un mets peu conventionnel, se présente sous la forme d'une fougère aquatique flottant librement sur les surfaces des eaux calmes. Elle appartient à la famille des Azollacées, faisant partie de l'ordre des Pteridophytes. Avec six espèces différentes, l'Azolla prospère principalement dans les régions tropicales, trouvant son habitat naturel dans les eaux stagnantes des drains, canaux, étangs et marécages. Ce qui rend cette plante unique, c'est sa symbiose avec la bactérie *Anabaena-azollae*, qui habite dans les cavités de ses feuilles. Grâce à cette symbiose, l'Azolla peut fixer de grandes quantités

de diazote atmosphérique, rendant cette plante non seulement intéressante sur le plan biologique, mais aussi potentiellement précieuse en tant que source d'azote dans l'agriculture (BECKING, 1979).

### **II-1-1 La classification de l'*Azolla* :**

Selon Lumpkin et Plucknett (1982), l'*Azolla* est classé comme suit :

- Embranchement : Ptéridophytes.
- Classe : Filicophytes.
- Ordre : Salviniiales.
- Famille : Azollacées.
- Genre : *Azolla*.

Espèce : *Azolla pinnata*

Il est important de noter que le genre *Azolla* est le seul représentant de la famille des Azollacées (KONAR ET KAPOOR, 1974 ; LUMPKIN ET PLUCKNETT, 1982). Cependant, HILLS ET GOPAL (1967) ont classé l'*Azolla* dans la famille des Salviniacées, qu'ils estiment comprendre deux genres : *Azolla* et *Salvinia*.

### **II -1-2-Historique et origine de l'*Azolla* :**

#### **II-1-2-1-Historique :**

L'*azolla* a joué un rôle significatif dans l'agriculture au fil de l'histoire. Depuis des temps immémoriaux, elle a été saluée comme une précieuse alliée dans le sud de la Chine et le nord du Vietnam. Utilisée comme un biofertilisant et un engrais vert pour le riz, elle a fait ses preuves grâce à sa capacité unique à fixer l'azote, comme l'ont démontré les recherches de Van Hove et ses collègues en 1996. En outre, l'*azolla* était autrefois une source de nourriture pour les volailles, attestant de sa polyvalence dans les pratiques agricoles traditionnelles. ( VAN HOVE ET AL., 1996 ).

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, en plein cœur du Pérou, les premières traces de l'utilisation d'*azolla* émergent dans les écrits de Feuillée en 1725. Cependant, ce n'est que bien plus tard, dans les années 1960, que la Chine et le Vietnam ont vivement encouragé sa production, amorçant ainsi une expansion fulgurante dans ces régions. Cette montée en flèche a captivé l'attention internationale dans les années 1970, principalement en raison de la crise pétrolière et de l'envolée des prix des engrais azotés, étroitement liés aux combustibles fossiles.

L'*azolla* est rapidement devenue un substitut prometteur à ces produits, portant l'espoir d'améliorer la production de riz dans de nombreux pays tropicaux. Cependant, cet engouement a peu à peu perdu de son éclat dans les années 1980, laissant place à une période de scepticisme. La production d'*azolla* en

Chine et au Vietnam a fléchi, peut-être en raison de l'essor de l'agriculture alimentaire sur ces terres. Parallèlement, le déploiement de l'azolla à l'échelle mondiale n'a pas répondu aux attentes initiales, entravé par des contraintes majeures telles que la disponibilité en eau, les défis d'entretien et de manipulation, ainsi que les exigences élevées en main-d'œuvre. De plus, les connaissances limitées sur les besoins spécifiques de chaque espèce d'azolla ont constitué un obstacle majeur (VAN HOVE ET AL., 1996).

### **II-1-2-2 - L'origine de l'Azolla :**

D'après CHEVALIER (1926), la Chine et ses voisins semblent avoir été le foyer de nombreuses cultures uniques et de pratiques culturelles avancées. Ces dernières ont souvent atteint des niveaux de perfectionnement inégalés en Europe. Par exemple, l'utilisation des mares pour la culture de plantes aquatiques, particulièrement en Chine et en Indochine, a été poussée à un niveau d'excellence remarquable. Certaines plantes, bien que présentes partout, ne sont cultivées que dans ces régions (comme l'Azolla).

### **II-1-3- La morphologie de l'Azolla :**

Absolument ! L'Azolla est une plante aquatique fascinante, et sa morphologie est étroitement liée à ses fonctions.

#### **Morphologie générale de l'Azolla**

L'Azolla est une petite fougère flottante, caractérisée par :

**Petite taille:** Elle forme des tapis denses à la surface de l'eau, atteignant généralement quelques centimètres de hauteur.

**Tige ramifiée:** Sa tige est fine et ramifiée, lui permettant de s'étendre rapidement.

**Feuilles minuscules:** Les feuilles sont très petites, divisées en deux lobes : un lobe supérieur vert, contenant les cyanobactéries symbiotiques, et un lobe inférieur plus clair, assurant la flottaison.

**Racines courtes:** De courtes racines se développent à partir de la tige, ancrant légèrement la plante dans l'eau. (CARRAPIÇO, F. 2010)

**Symbiose avec les cyanobactéries:** Le point clé de la morphologie de l'Azolla réside dans sa symbiose avec les cyanobactéries du genre *Anabaena*. Ces bactéries vivent dans des cavités situées dans les feuilles supérieures de la fougère et fixent l'azote atmosphérique.

Cavités aérifères: Les feuilles d'*Azolla* contiennent des cavités remplies d'air, facilitant leur flottaison (CARRAPIÇO, F. 2010)

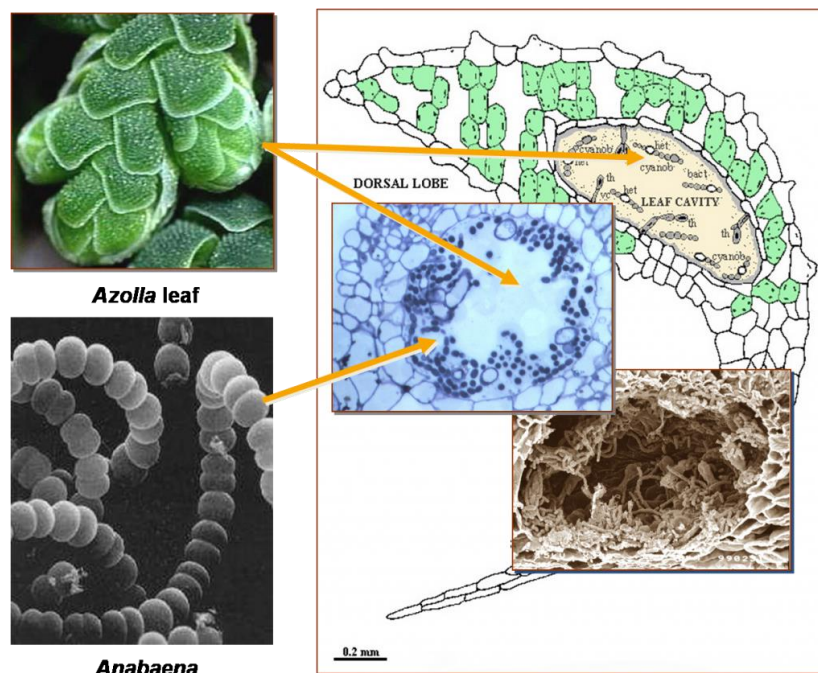
La morphologie de l'*Azolla* est une adaptation remarquable à son mode de vie aquatique et à sa fonction de fixateur d'azote. Cette morphologie lui permet :

De former des tapis denses: Couvrant la surface de l'eau, elle limite la pénétration de la lumière et peut ainsi influencer la composition de la communauté algale.

De fixer l'azote: Grâce à sa symbiose avec les cyanobactéries, l'*Azolla* enrichit le milieu en composés azotés, jouant un rôle important dans les écosystèmes aquatiques.

D'être utilisée en agriculture: Ses propriétés fertilisantes en font un engrais vert intéressant. (CARRAPIÇO, F. 2010)

**Figure 12 :** Les cavités dorsales des feuilles d'*Azolla* abritent l'*Anabaena*. Figure modifiée d'après CARRAPIÇO (2010)



#### **II-1-4- Les Sous-genres et espèces de l'Azolla :**

L'Azolla, également connue sous le nom de fougère flottante, est un genre de plantes aquatiques comprenant plusieurs sous-genres et espèces. Le genre Azolla comprend six espèces réparties en deux sections ou sous-genres : Euzolla et Rhizosperma. Ces deux sections se distinguent par le nombre de flotteurs de mégaspores (MOORE, 1969).

##### ***II-1-4-1-Sous-genre Azolla ou Euzolla :***

La classification des sous-genres d'Azolla est basée sur des caractéristiques morphologiques et génétiques des plantes. Ce sous-genre regroupe les espèces d'Azolla présentant des caractéristiques morphologiques similaires, telles que des feuilles flottantes, des racines pendantes et une reproduction végétative. Les frondes sont généralement vertes à rougeâtres, avec une forme typiquement flottante en surface. Les feuilles sont divisées en deux lobes, ce qui donne l'apparence d'une petite échelle. Elles possèdent des racines pendantes, souvent ramifiées, qui leur permettent de se fixer dans l'eau. La reproduction se fait principalement par sporulation végétative. (KANAMOTO, H.ET AL (2003).

Selon ( KRAMER, ET AL (1990) les 05 espèces du sous genre Azolla sont :

- Azolla filiculoides Lam : Fougère flottante européenne
- Azolla japonica Franch : Fougère flottante japonaise
- Azolla mexicana C. Presl : Fougère flottante mexicaine
- Azolla microphylla Kaulf : Fougère flottante à petites feuilles
- Azolla nilotica Decne : Fougère flottante du Nil

##### ***II-1-4-2-Sous-genre Rhizosperma :***

La classification du sous-genre Rhizosperma est basée sur des caractéristiques morphologiques et génétiques distinctes des autres sous-genres d'Azolla. Le sous-genre Rhizosperma regroupe les espèces d'Azolla qui se distinguent par des caractéristiques morphologiques particulières, notamment la structure de leurs racines. Les plantes de ce sous-genre ont des racines plus développées que celles des autres sous-genres, souvent avec des ramifications importantes. Les frondes peuvent varier en taille et en forme, mais elles sont généralement flottantes. La sporulation végétative est également le principal mode de reproduction de ce sous-genre. (MOGENSEN, H. L. (1981).

Selon ( KRAMER, ET AL (1990) elle comprend deux espèces :

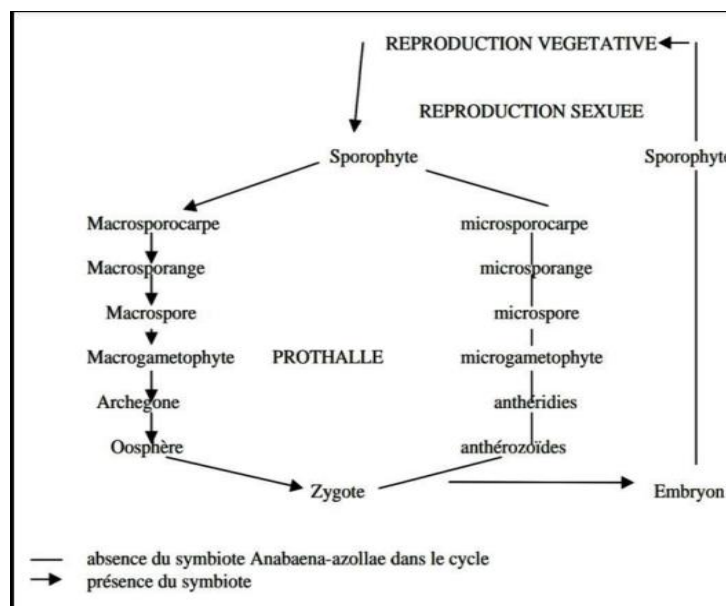
- Azolla caroliniana Willd : Fougère flottante de Caroline
- Azolla pinnata R. Br : Fougère flottante à feuilles pennées

#### **II-1-5- Type de reproduction de l'Azolla :**

L'Azolla se reproduit principalement de manière végétative, mais elle possède également une forme de reproduction sexuée. Selon LUMPKIN ET PLUCKNETT (1982), "L'Azolla se reproduit rapidement par fragmentation, avec de petites pousses se formant à partir des branches latérales des plantes mères,

puis se séparant pour former de nouvelles colonies." (p. 57). De plus, "L'*Azolla* produit des sporanges sur les feuilles spécialisées appelées sporocarpes. Ces sporanges contiennent des spores qui, une fois libérées dans l'eau, peuvent germer pour former des gamétophytes mâles et femelles." (LUMPKIN & PLUCKNETT, 1982, P. 57). Enfin, "Les gamétophytes mâles et femelles produisent des gamètes qui se fusionnent pour former un zygote, qui se développe ensuite en une nouvelle sporophyte qui devient une nouvelle plante d'*Azolla*." (LUMPKIN & PLUCKNETT, 1982, P. 57).

**Figure 12:** Schéma de la reproduction sexuée et végétative d'*Azolla* par Anthony NTENDELE BIKELA

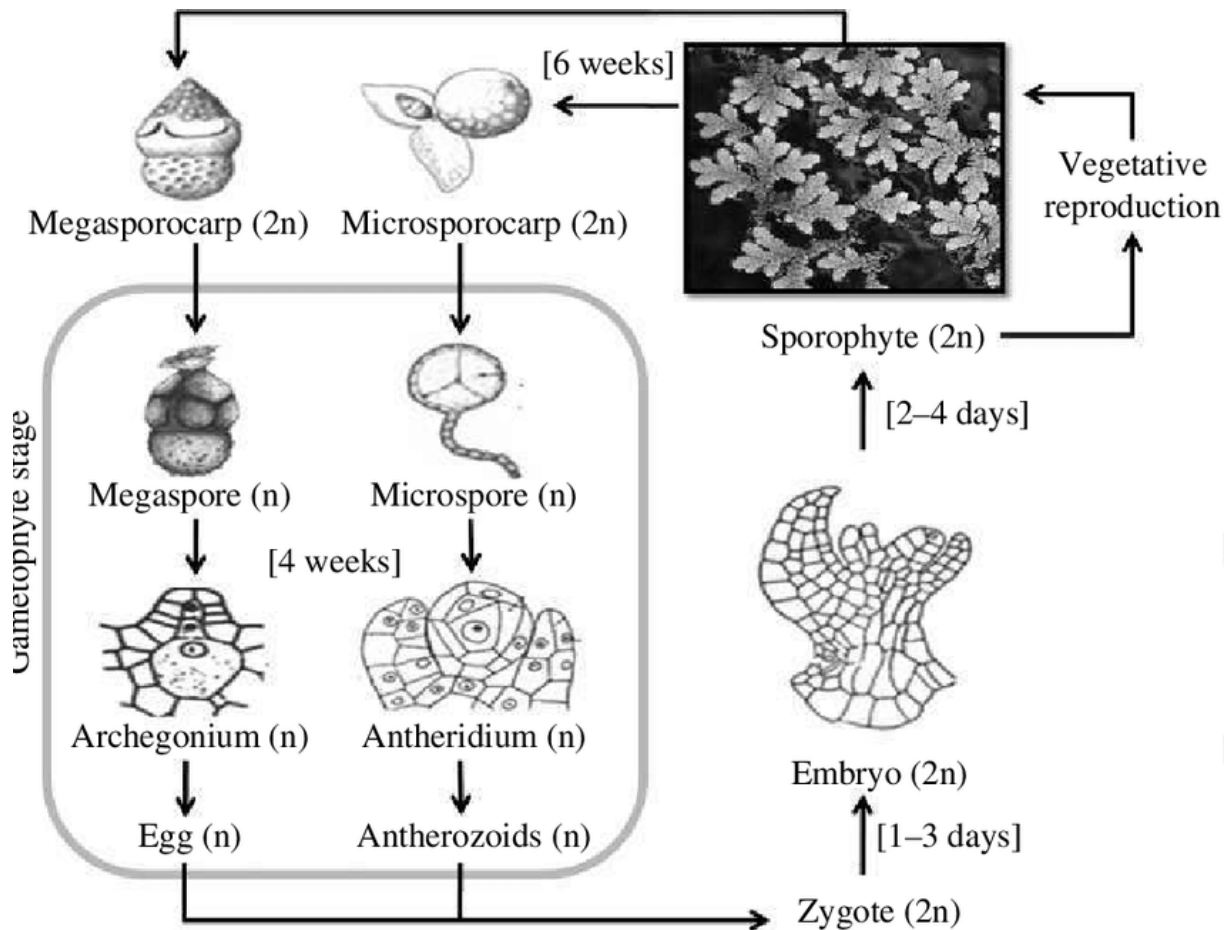


L'*Azolla* présente une forme d'hétérosporie, avec deux types de spores distincts : les microspores, qui donnent naissance aux prothalles mâles, et les macrospores, qui donnent naissance aux prothalles femelles. Cette symbiose est maintenue tout au long du cycle sexuel ( fig.13 ).(ASHTON ETWALMSLEY,1976 ; PETERS ET AL., 1982).

Les sporocarpes sont visibles au niveau du lobe inférieur de la feuille. Les microsporocarpes matures sont de forme globulaire. Lors de leur maturation, ils libèrent des massulae qui peuvent être emportées sous l'eau. Les microspores germent à l'intérieur des massulae, permettant ainsi aux anthérozoïdes flagellés de se déplacer à travers les massules gélatinisées pour féconder les oospores à l'intérieur des archégonies. Les mégasporocarpes sont nettement plus petits que les microsporocarpes et contiennent chacun une seule mégaspore. Ces mégaspores germent sous l'eau pour former des prothalles qui produisent des archégonies. Les anthérozoïdes fécondent ensuite l'unique ovule présent dans chaque archégone (BRAUN-HOWLAND ET NIERZWICKI-BAUER, 2018). Après la fécondation de l'oosphère, un zygote se forme et se développe en sporophyte, avec son algue associée (RAHAGARISON, 2005). Pendant le cycle de reproduction, les cellules d'*Anabaena*, notamment les

akinètes (akinétospores), sont enfermées à l'intérieur des macrosporocarpes. Elles sont logées dans une cavité sous le chapeau de l'indusie du macrosporangé, assurant ainsi la continuité symbiotique (RAHAGARISON, 2005).

**Figure 13:** Aspect des spores de l'Azolla et leur évolution



### II-1-6-La composition chimique de l'Azolla :

Azolla est constituée de tissus non structurels et métaboliquement actifs, ce qui lui confère une valeur nutritionnelle élevée. La majeure partie de la photosynthèse est dédiée à la production de protéines et d'acides nucléiques. En général, azolla sont riches en protéines et en minéraux et pauvres en fibres. Cependant, leur composition chimique varie en fonction de l'âge de la plante, de la température et de la teneur en éléments nutritifs de l'eau. La composition nutritionnelle dépend davantage de la concentration des minéraux dans le milieu de croissance que de l'espèce ou de la situation géographique (HASAN ET AL., 2009).

La teneur en protéines brutes d'azolla varie de 7 à 45 % de matière sèche, selon la disponibilité en azote (CULLEY ET AL., 1981). Dans des conditions optimales, azolla peuvent contenir une quantité significative de protéines, de graisses, d'amidon et de minéraux. Cultivées dans des eaux enrichies en

minéraux ou des effluents provenant de lagunes de déchets agricoles et municipaux, leur teneur en protéines peut atteindre 30 à 40 % de matière sèche (CHANG ET AL., 1977; HILLMAN ET AL., 1978; CULLEY ET AL., 1973; RUSOFF ET AL., 1977; RUSOFF ET AL., 1978). Cependant, celles provenant d'eaux naturelles ont une teneur en protéines plus basse, entre 7 et 20 % de matière sèche (BHANTHUMNAVIN ET AL., 1971; TAN, 1970). Les conditions de croissance lente, la famine et le vieillissement peuvent réduire la teneur en protéines jusqu'à 7 % de matière sèche (LANDOLT ET AL., 1987). Les azolla sont modérément riches en lysine, avec environ 4 % de la protéine, bien qu'une valeur plus élevée de 6 % ait été rapportée pour un extrait de protéine de feuille (DEWANJI, 1993).

Bien que moins riches en fibres que les plantes terrestres, les azolla contiennent des quantités importantes de fibres brutes. Leur teneur en fibres brutes est généralement plus faible (7 à 10 % de matière sèche) dans une eau riche en nutriments que dans une eau pauvre en nutriments (11 à 17 % de matière sèche). La teneur en minéraux des azolla est très variable, atteignant parfois plus de 30 % de matière sèche et étant directement liée à la quantité de minéraux disponibles dans l'eau. Elles peuvent contenir des quantités relativement importantes de potassium et de calcium (LENG ET AL., 1995). Les azolla ont également des concentrations élevées de pigments et de xanthophylles, ce qui en fait un complément précieux pour le bétail, en particulier la volaille, lorsque ces pigments contribuent à la couleur de la peau et du jaune. Les teneurs en carotène rapportées varient entre 600 et 1 000 mg/kg (DEWANJI, 1993; MWALE ET AL., 2013).

La grande variabilité de la teneur en protéines et en minéraux explique souvent les différences observées dans les essais d'alimentation et les estimations de la digestibilité et des valeurs énergétiques. Dans certains cas, les azolla riches en protéines peuvent rivaliser avec la farine de soja et d'autres sources de protéines de qualité. Cependant, dans d'autres cas, une teneur élevée en minéraux et une faible teneur en protéines peuvent être préjudiciables à la valeur énergétique, à la digestibilité et aux performances, limitant ainsi les taux d'inclusion. Il est donc recommandé d'évaluer la teneur en éléments nutritifs des azolla avant de les donner au bétail.

Les tableaux suivants présentent les composants d'Azolla:

Analyse principale	Unité	Moy.	Dakota du Sud	Min.	Max.	Nb
Matière sèche	% tel que nourri	80,2	28,8	5.1	97,8	16
Protéine brute	% MS	27,8	5.6	15,5	35,6	18
Fibre brute	% MS	13.1	4.0	8.7	20,0	8
ACNP	% MS	40.3	11.1	22,5	57.4	9
FAD	% MS	23.9	2.9	20.3	28,9	7
Lignine	% MS	2.3		1.3	3.3	2
Extrait d'éther	% MS	4.0	1.0	2.2	5.1	9
Cendre	% MS	18.9	8.0	3.8	35,6	17
Énergie brute	MJ/kg MS	17.1	1.1	15,5	17.8	4

**Tableau 2:** Composition chimique de l'Azolla séchées (TRAN ET AL., 2015).

Analyse principale	Unité	Moy.	Dakota du Sud	Min.	Max.	Nb
<u>Matière sèche</u>	% tel que nourri	5.6	1.0	4.6	7.9	13
<u>Protéine brute</u>	% MS	29.1	4.3	24.9	38,6	15
<u>Fibre brute</u>	% MS	12,5	4.6	6.9	18.7	9
<u>ACNP</u>	% MS	40.1	8.2	33,9	58.2	8
<u>FAD</u>	% MS	18,5	4.5	12.4	23.4	4
<u>Lignine</u>	% MS	5.7	4.3	3.2	10.6	3
<u>Extrait d'éther</u>	% MS	6.1	3.6	2.2	13.8	9
<u>Cendre</u>	% MS	15.9	3.9	9.5	23.3	14
<u>Énergie brute</u>	MJ/kg MS	18.2				

**Tableau 3:** Composition chimique de l'Azolla fraîches (TRAN ET AL., 2015).

Minéraux	Unité	Moy.	Dakota du Sud	Min.	Max.	Nb
<u>Calcium</u>	g/kg MS	23.3	14.2	7.1	33.1	3
<u>Phosphore</u>	g/kg MS	5.7	0,7	4.9	6.2	3
<u>Potassium</u>	g/kg MS	42,9				1
<u>Sodium</u>	g/kg MS	1.4				1
<u>Manganèse</u>	mg/kg MS	1723				1
<u>Zinc</u>	mg/kg MS	75				1
<u>Cuivre</u>	mg/kg MS	20				1
<u>Fer</u>	mg/kg MS	0				1

**Tableau 4:** Les minéraux présents dans l’Azolla fraîches (TRAN ET AL., 2015)

Acides aminés	Unité	Moy.	Dakota du Sud	Min.	Max.	Nb
<u>Alanine</u>	% de protéines	4.3	0,5	3.8	4.6	3
<u>Arginine</u>	% de protéines	4.4	0,7	3.8	5.3	3
<u>L'acide aspartique</u>	% de protéines	6.8	1.0	5.6	7.6	3
<u>Acide glutamique</u>	% de protéines	7.1	1.2	5.8	8.0	3
<u>Glycine</u>	% de protéines	3.6	0,5	3.0	4.0	3
<u>Histidine</u>	% de protéines	1.7	0,5	1.2	2.2	3
<u>Isoleucine</u>	% de protéines	3.6	0,4	3.1	3.9	3
<u>Leucine</u>	% de protéines	6.6	0,7	5.8	7.2	3
<u>Lysine</u>	% de protéines	3.9	0,5	3.4	4.3	3
<u>Méthionine</u>	% de protéines	0,8	0,0	0,8	0,9	3
<u>Phénylalanine</u>	% de protéines	4.1	0,4	3.6	4.5	3
<u>Proline</u>	% de protéines	2.9	0,4	2.4	3.3	3
<u>Sérine</u>	% de protéines	2.6	0,3	2.3	2.8	3
<u>Thréonine</u>	% de protéines	3.1	0,5	2.6	3.5	3
<u>Tyrosine</u>	% de protéines	2.7	0,5	2.2	3.1	3
<u>Valine</u>	% de protéines	4.3	0,7	3.5	5.0	3

**Tableau 5:** Les principaux acides aminés présents dans l’Azolla fraîches (TRAN ET AL., 2015).

## **II-1-7- Les différentes formes fourragères de l'Azolla :**

### ***II-1-7-1- l'Azolla fraîche :***

L'Azolla fraîche se compose de petites plantes flottantes vertes, généralement récoltées à la surface de l'eau. Elle est utilisée comme engrais vert dans l'agriculture, notamment dans les rizières, pour fournir de l'azote et d'autres nutriments essentiels aux cultures (SMITH, J., & JONES, A. (2022)).

**Figure 14:** Azolla fraîche (AKHILESH KUMAR).



### ***II-1-7-2- l'Azolla ensilée :***

L'Azolla ensilée est produite en fermentant les plantes fraîches d'Azolla avec des acides organiques, souvent dans des silos ou des contenants hermétiques (RAHAGARISON, 2005). Ce processus de conservation permet de préserver les nutriments de la plante tout en réduisant sa teneur en eau. (LI, ET AL. (2017) L'ensilage d'Azolla peut être utilisé comme aliment pour le bétail ou comme engrais organique dans l'agriculture (RAHAGARISON, 2005).

**Figure 15:** Azolla ensilée (DIVKOLAIE ET AL., 2018



Selon VAN HOVE (1989), pour procéder à l'ensilage de la fougère, celle-ci doit être propre et légèrement fanée (à 60% d'eau). Ensuite elle sera entassée par piétinement dans des silos de ciment ou des sacs en plastique. Quand la couche atteint 3 cm, il faudra étaler 5 g de sel et 50g de farine de maïs pour chaque 1 kg d'Azolla. La farine de maïs est ajoutée afin de fournir davantage de sucres pour les bactéries anaérobies. Le silo est ensuite couvert, et la fermentation prend moins d'un mois. Ainsi, il serait possible de la conserver pendant 2 ans (VAN HOVE, 1989; RAHAGARISON, 2005).

#### **II-1-7-2- l'Azolla séchée:**

L'Azolla séchée est obtenue en faisant sécher les plantes fraîches, généralement par exposition au soleil ou par des méthodes de séchage artificielles. Elle est utilisée comme aliment pour le bétail, comme engrais organique ou comme matière première pour la fabrication de suppléments alimentaires. (CHEN, ET AL. 2019).

**Figure 16:** Séchage de l'Azolla au soleil (PAR RIDHA BERGAOUI)



### **III- Exigences culturales de l'Azolla et ses multiples utilisations :**

L'Azolla, une fougère aquatique, est un aliment non conventionnel qui peut être intégré dans l'alimentation animale pour améliorer la consommation et la digestibilité des aliments. Selon KATHIRVELAN ET AL. (2015), l'Azolla verte (*Azolla pinnata*) offre une alternative au fourrage vert et constitue une source supplémentaire de protéines pour les animaux en raison de son goût élevé et de son rendement accru.

Cette plante est considérée comme très prometteuse en raison de sa facilité de culture, de sa faible consommation d'eau et de sa productivité élevée, ainsi que de sa bonne valeur nutritive. En l'incorporant dans leur alimentation, les animaux peuvent bénéficier d'une ration plus riche en nutriments, ce qui peut conduire à une meilleure croissance et à une meilleure santé générale.

#### **III-1-Ecophysiologie de l'Azolla :**

L'Azolla est une plante aquatique flottante qui présente des caractéristiques uniques lui permettant de prospérer dans divers habitats aquatiques. Sa capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à sa

symbiose avec des cyanobactéries lui confère un avantage écologique significatif, réduisant ainsi la dépendance des plantes à l'égard des engrais azotés externes (GONZALEZ & BASHAN, 2000). De plus, l'*Azolla* possède des structures spéciales appelées trichomes, qui sont des poils riches en chlorophylle et en pigments photosynthétiques, lui permettant de capturer efficacement la lumière du soleil et de réaliser la photosynthèse dans des conditions de faible luminosité (RAO ET AL., 2002).

Cette plante est également caractérisée par sa capacité à former des tapis denses à la surface de l'eau, ce qui réduit l'évaporation, prévient la croissance des mauvaises herbes et fournit un habitat pour divers organismes aquatiques (SINGH & REDDY, 2011). De plus, l'*Azolla* peut moduler sa croissance en réponse à des facteurs environnementaux tels que la température, la lumière et la disponibilité des nutriments, ce qui lui permet de s'adapter à une gamme de conditions de croissance variables (SCULTHORPE, 1967).

En étudiant l'écophysiologie de l'*Azolla*, les chercheurs peuvent mieux comprendre comment cette plante contribue aux écosystèmes aquatiques et comment elle pourrait être utilisée de manière plus efficace dans des applications agricoles et environnementales

#### ***III-1-1 - Besoin en eau :***

Selon VAN HOVE ET AL. (1983), l'*Azolla* prospère dans une couche d'eau peu profonde, idéalement entre 5 et 10 cm, favorisant ainsi une meilleure nutrition minérale grâce à la proximité des racines avec le sol. L'eau est un élément essentiel pour la croissance et la multiplication de l'*Azolla*, cette plante étant extrêmement sensible au manque d'eau (RAJESH, 2020). Par conséquent, maintenir un niveau d'eau adéquat est crucial pour son développement. Cependant, l'*Azolla* ne peut pas survivre dans des milieux aquatiques tels que les grands lacs ou les eaux turbulentes, car l'effet des vagues et de la turbulence entraîne une fragmentation excessive des frondes, ce qui entrave sa croissance (ASHTON ET WALMSLEY, 1976). En résumé, pour une croissance optimale, l'*Azolla* nécessite une couche d'eau peu profonde, constante et calme.

#### ***III-1-2-Taux d'humidité :***

Selon HUA ET AL. (2019), l'*Azolla* prospère dans des conditions d'humidité élevée, idéalement autour de 80 à 90%. Cette humidité est essentielle pour maintenir la santé et la croissance de la plante, en favorisant notamment son développement végétatif et sa capacité à fixer l'azote atmosphérique. Une humidité insuffisante peut entraîner un ralentissement de la croissance et des problèmes de santé pour l'*Azolla*. En conséquence, il est recommandé de surveiller et de maintenir un niveau d'humidité adéquat pour assurer le succès de la culture de l'*Azolla*.

#### ***III-1-3 -La Salinité :***

Selon MANDAL ET AL. (2013), l'*Azolla* est sensible à la salinité de l'eau et sa croissance est optimale dans des conditions où la salinité ne dépasse pas 1 à 2 ppt. Au-delà de ce seuil, une salinité

plus élevée peut entraîner un ralentissement de la croissance et même la mort de la plante. Il est donc important de maintenir une salinité faible pour assurer le succès de la culture d'*Azolla*.

#### ***III-1-4 - Température :***

Selon SINGH ET REDDY (2011), l'*Azolla* montre une croissance optimale dans une plage de température comprise entre 20°C et 30°C. Des températures plus élevées peuvent entraîner une réduction de la croissance et des dommages à la plante, tandis que des températures plus basses peuvent ralentir la croissance ou même entraîner l'arrêt de sa croissance. Il est donc recommandé de maintenir l'*Azolla* dans des conditions où la température se situe dans cette plage pour une croissance optimale.

#### ***III-1-5-La lumière :***

Selon WANG ET AL. (2018), l'*Azolla* prospère dans des conditions de lumière vive mais indirecte. Une exposition directe à la lumière solaire intense peut entraîner une surchauffe de la plante et des dommages aux frondes. Cependant, un manque de lumière peut également ralentir la croissance de l'*Azolla*. Par conséquent, il est recommandé de fournir une lumière suffisante mais tamisée pour assurer une croissance optimale de l'*Azolla*.

Et d'après LUMPKIN ET AL. (1980). L'*Azolla* pousse mieux dans des conditions d'ombre partielle, recevant entre 25 et 50 % de la lumière directe du soleil. Une ombre plus importante, inférieure à 1500 lux, réduit rapidement sa croissance, tandis qu'une exposition à plus de 50 % de la lumière directe du soleil peut également diminuer sa photosynthèse. En résumé, un équilibre entre lumière directe et ombre partielle est crucial pour la croissance optimale de l'*Azolla*.

#### ***III-1-6- Le pH :***

Selon WANG ET AL. (2018), l'*Azolla* prospère dans une plage de pH située entre 5,5 et 7,5. Des valeurs de pH en dehors de cette plage peuvent affecter négativement sa croissance et sa santé. Un pH trop acide ou trop bas peut inhiber l'absorption des nutriments, tandis qu'un pH trop alcalin ou trop élevé peut entraîner des perturbations dans son métabolisme. Ainsi, maintenir un pH optimal dans cette plage est essentiel pour assurer une croissance saine de l'*Azolla*.

#### ***III-1-7- Les besoins nutritionnels de l'Azolla :***

Selon MANDAL ET AL. (2013), l'*Azolla* a des besoins nutritionnels importants en azote, phosphore, potassium et d'autres éléments nutritifs essentiels pour sa croissance. En plus de ces macronutriments, elle nécessite également des micronutriments tels que le fer, le zinc, le manganèse et le cuivre pour maintenir son métabolisme et sa santé. Une carence en l'un de ces éléments peut entraîner un ralentissement de la croissance de l'*Azolla* et des anomalies physiologiques. Ainsi, un approvisionnement adéquat en nutriments est crucial pour assurer une croissance saine et une productivité élevée de l'*Azolla*.

<b>Nutriment</b>	<b>Taux de diminution de la croissance</b>
Azote	50%
Phosphore	40%
Potassium	30%
Fer	20%
Zinc	25%
Manganèse	35%
Cuivre	30%

**Tableau 6:** Taux de diminution de la croissance d’Azolla dans les conditions de carence (MANDAL, ET AL .2013)

### **III-2- Le procédé de culture de l’Azolla :**

#### 1. Choix du site:

- Sélectionnez un site avec une exposition solaire adéquate et une eau peu profonde. L'Azolla préfère les eaux calmes et peu profondes, exposées à la lumière du soleil pour une croissance optimale (SINGH & REDDY, 2011). Assurez-vous également que le site est protégé des vents forts qui pourraient perturber la culture.

#### 2. Préparation du bassin :

- Préparez un bassin peu profond, d'environ 5 à 15 cm de profondeur, propre et exempt de contaminants. Nivelez le sol si nécessaire pour éviter les fuites d'eau (SOOD ET AL., 2019). Le revêtement du fond du bassin avec une bâche imperméable peut aider à prévenir les fuites et à maintenir une bonne étanchéité.

#### 3. Inoculation :

- Introduisez une culture initiale d'Azolla dans le bassin. Vous pouvez obtenir cette culture à partir de sources commerciales ou en prélevant des plantes dans des habitats naturels où l’Azolla est présente (SINGH & REDDY, 2011). Assurez-vous que la culture est saine et exempte de maladies.

#### 4. Gestion de l'eau:

- Maintenez un niveau d'eau constant dans le bassin. Contrôlez la qualité de l'eau pour éviter les contaminations et les déséquilibres chimiques. Renouvelez l'eau si nécessaire pour maintenir sa propreté (SOOD ET AL., 2019). Utilisez de l'eau propre et non chlorée pour éviter les effets nocifs sur la croissance de l'Azolla.

#### 5. Fertilisation :

- Ajoutez des engrais selon les besoins de la plante. Les analyses de l'eau peuvent guider le choix des engrais pour assurer un apport adéquat en nutriments. Les engrais à base d'azote, de phosphore et de potassium sont souvent utilisés (SOOD ET AL., 2019). Des sources organiques comme le fumier de volaille peuvent également être utilisées comme engrais.

#### 6. Contrôle de la lumière :

- Assurez-vous que l'Azolla reçoive une quantité adéquate de lumière du soleil. Si nécessaire, utilisez des filets d'ombrage pour éviter une exposition excessive au soleil, ce qui peut entraîner un stress thermique (SOOD ET AL., 2019). Mesurez la quantité de lumière reçue à différents moments de la journée pour ajuster le placement des filets d'ombrage si nécessaire.

#### 7. Récolte :

- Récoltez l'Azolla lorsque les tapis flottants sont bien développés. Utilisez un filet fin pour récupérer les plantes tout en évitant de perturber la culture. Prélevez environ la moitié de la culture pour maintenir sa croissance continue (CHAKRABARTI ET AL., 2018). Laissez une partie de la culture pour assurer la régénération.

#### 8. Entretien:

- Surveillez régulièrement la santé de la culture. Éliminez les mauvaises herbes et les organismes indésirables. Réalisez des ajustements de fertilisation et de gestion de l'eau au besoin pour maintenir des conditions optimales (SOOD ET AL., 2019). Effectuez des analyses périodiques de l'eau pour surveiller les niveaux de nutriments et d'autres paramètres.

### ***III-2- 1-Précautions à adopter lors de la réalisation du procédé de culture de l'Azolla :***

Selon DEVI LAL DHAKER ET AL. (2021), plusieurs précautions doivent être prises lors de la réalisation du procédé de culture de l'Azolla :

- Il est primordial de maintenir une culture pure exempte de toute contamination pour garantir un rendement optimal.
- La récolte régulière de l'Azolla est nécessaire pour éviter la surpopulation dans le bassin de culture.
- La température joue un rôle crucial dans la croissance de l'Azolla. Elle doit idéalement se situer autour de 35 degrés Celsius. Dans les régions plus froides, il est recommandé de couvrir la parcelle de fourrage avec une feuille de plastique pour atténuer l'impact du froid.
- Il est préférable de choisir des endroits où la lumière du soleil est directe et suffisante. Les endroits ombragés peuvent entraîner un rendement moindre.
- Le pH du milieu doit être maintenu entre 5,5 et 7 pour assurer des conditions de croissance optimales.
- Des apports en nutriments appropriés, tels que le lisier de bouse de vache et les micronutriments, doivent être complétés lorsque nécessaire pour soutenir la croissance de l'Azolla.

### **III-3- Importance de l'azolla :**

L'azolla est largement utilisée dans les champs de riz, soit en culture pure soit en tant qu'interculture, où elle est incorporée dans le sol pour enrichir l'humus et la nutrition du sol. Sa décomposition rapide favorise une libération rapide de l'azote, ce qui en fait une source efficace pour les plantes de riz en raison de sa prolifération rapide et de son potentiel de décomposition. Ainsi, elle est devenue un composant essentiel des pratiques d'engrais vert et de biofertilisant dans l'agriculture du riz. Par exemple, une application de 10 à 12 tonnes/ha d'azolla en tant qu'engrais de base peut améliorer la teneur en azote du sol de 50 à 60 kg/ha, réduisant ainsi les besoins en engrais azotés de 30 à 35 kg pour la culture de riz.

En ce qui concerne la fixation de l'azote atmosphérique, l'urée appliquée sur le sol inondé présente des inconvénients, notamment une faible efficacité et des pertes d'azote dans l'atmosphère. L'azolla peut fixer l'azote atmosphérique dans l'eau, le mettant à disposition des plantes de riz pendant leur croissance ou le libérant lors de la décomposition de la biomasse. Par rapport à d'autres méthodes, l'utilisation d'azolla conduit à une absorption plus élevée d'azote par le riz et à une augmentation de la production de matière sèche. De plus, la symbiose avec d'autres organismes peut améliorer la rétention d'eau du sol et sa capacité d'échange de cations.

Pour minimiser la volatilisation de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), l'utilisation d'azolla s'est révélée efficace. Contrairement à d'autres méthodes coûteuses ou difficiles à mettre en œuvre, l'azolla utilise l'azote atmosphérique pour la culture de riz et abaisse le pH du milieu, réduisant ainsi la perte de  $\text{NH}_3$ . En outre, l'azolla peut absorber l'excès d'azote pendant l'application d'urée et le libérer progressivement pendant la décomposition de la biomasse, ce qui améliore l'efficacité de l'engrais.

Concernant la réhabilitation des sols problématiques, l'azolla a montré sa capacité à réduire la salinité du sol et à désaliniser rapidement les sols. De plus, elle peut réduire la conductivité électrique, acidifier le pH du sol et augmenter sa teneur en calcium.

En ce qui concerne la bio-restauration des métaux lourds, certaines espèces d'azolla ont été trouvées capables d'éliminer des métaux tels que le fer et le cuivre de l'eau contaminée. Elles peuvent également collecter d'autres métaux lourds ainsi que des éléments nutritifs à partir de polluants ou d'eaux usées.

Enfin, l'azolla peut servir de répulsif contre les moustiques en inhibant leur reproduction lorsqu'elle forme un tapis dense à la surface de l'eau.

En somme, l'utilisation de l'azolla dans l'agriculture offre de multiples avantages, allant de l'amélioration de la fertilité des sols à la réduction des pertes d'azote et à la restauration des sols problématiques, tout en fournissant des solutions écologiques pour la gestion des ressources naturelles. (VERMA, G., ET AL 2022)

Chapitre 02 : analyses d'articles  
originaux sur l'azolla.

## **Chapitre 02 : analyses d'articles originale porte sur l'azolla.**

### **I- liste des articles :**

#### **I-1- Des articles sur la caractérisation agronomique de l'azolla :**

Article 01: "Implications et perspectives futures d'Azolla en tant qu'apport organique à faible coût en agriculture."

LA CITATION DE CET ARTICLE : VERMA, G., PRAKRITI, K. A., BABU, S., SINGH, R., GUDADE, B. A., BHATT, M., ... & YADAV, N. C. (2022). Implications and future prospects of Azolla as a low-cost organic input in agriculture. *Agricolation*, 2.

#### **Résumé :**

Azolla est une fougère flottante qui pousse dans les climats tempérés et tropicaux. Comme les feuilles dorsales de la cavité de la fougère sont spécialisées pour stocker l'azote atmosphérique (N), les cyanobactéries fixent l'azote dans l'atmosphère. Elle est soit mélangée au sol avant la transplantation, soit plantée en interculture avec le riz. Sa interculture améliore également l'efficacité de l'application d'engrais azotés. Azolla est souvent utilisée dans les rizières comme biofertilisant et engrais vert. Elle est maintenant utilisée comme composant alimentaire pour les ruminants et les non-ruminants (frais ou séché). Azolla, la "mine d'or verte" de la nature, est utilisée comme antibiotique, purificateur d'eau, alimentation humaine et pour la production de biogaz, en plus d'être un biofertilisant et une alimentation animale. En raison de la sensibilité d'Azolla aux températures élevées et à l'intensité lumineuse, ainsi que de la nature difficile de sa production, son utilisation en agriculture est limitée. En raison de sa dépendance aux ressources naturelles et de son utilité pour la production de riz inondé, l'utilisation d'Azolla est avantageuse.

Article 02 : "Une étude sur la valeur nutritive de *Azolla pinnata*"

La citation de cet article : PRASAD, R. M. V., JAGADEESWARARAO, S., JAYALAXMI, P., & KUMAR, D. S. (2014). A study on the nutritive value of *Azolla pinnata*.

#### **Résumé :**

Azolla est une bonne source de protéines et contient presque tous les acides aminés essentiels, ainsi que des minéraux tels que le fer, le calcium, le magnésium, le potassium, le phosphore, le manganèse, etc., en plus de quantités appréciables de précurseur de vitamine A, le bêta-carotène, et de vitamine B12. Compte tenu de ces faits, l'expérience présente a été entreprise pour explorer la valeur nutritive de *Azolla pinnata* en tant qu'aliment. L'Azolla a été cultivée, récoltée et séchée au soleil. Un

échantillon d'*Azolla* séchée au soleil a été analysé pour ses principes proximaux. La teneur en matière sèche (MS) de la farine d'*Azolla* séchée au soleil était de 89,73 pour cent. Elle contenait 75,73 pour cent de matière organique, 23,49 pour cent de protéines brutes, 14,7 pour cent de fibres brutes, 3,7 pour cent d'extrait éthéré, 24,26 pour cent de cendres totales, 7,94 pour cent de cendres insolubles dans l'acide, 2,58 pour cent de calcium et 0,26 pour cent de phosphore.

Article 03 : "Conditions de croissance optimales pour *Azolla pinnata* R. Brown : Impacts de l'intensité lumineuse, de l'apport en azote, du contrôle du pH et de l'humidité"

La citation de cet article : DA SILVA, M. E. J., MATHE, L. O. J., VAN ROOYEN, I. L., BRINK, H. G., & NICOL, W. (2022). Optimal growth conditions for *Azolla pinnata* R. Brown: Impacts of light intensity, nitrogen addition, pH control, and humidity. *PLANTS*, 11(8), 1048.

### **Résumé :**

La pollution azotée de l'agriculture est un défi majeur auquel notre société est confrontée aujourd'hui. La fixation biologique de l'azote est essentielle pour lutter contre les dommages causés par l'azote synthétique. Les espèces d'*Azolla* sont des candidats idéaux pour une fixation rapide de l'azote. Cette étude visait à enquêter sur les conditions optimales de croissance pour *Azolla pinnata* R. Brown. Les conditions de croissance examinées comprenaient le type et la concentration du milieu de croissance, l'intensité lumineuse, la présence/absence d'azote dans le milieu, le contrôle du pH et l'humidité. Des intensités lumineuses plus élevées ont augmenté la croissance des plantes de 32 % en moyenne. L'humidité la plus élevée (90 %) a donné des valeurs de taux de croissance plus élevées que les valeurs d'humidité plus faibles (60 % et 75 %). La présence d'azote dans le milieu n'a eu aucun effet significatif sur le taux de croissance des plantes. Le contrôle du pH était critique dans les conditions de croissance rapide de haute intensité lumineuse et d'humidité élevée, et il a réduit la croissance des algues (d'après l'observation visuelle). Le taux de croissance optimal atteint était de  $0,321 \text{ jour}^{-1}$ , avec un temps de doublement de 2,16 jours. Cela a été réalisé en utilisant une solution de Hoagland à 15 % de concentration, une forte intensité lumineuse (20 000 lx), de l'azote présent dans le milieu et un contrôle du pH à 90 % d'humidité. Ces conditions optimisées pourraient améliorer les systèmes existants de phytoremédiation d'*Azolla pinnata* et contribuer à la lutte contre la pollution azotée synthétique.

Article 04 : "Croissance et contenu ionique cellulaire d'un système symbiotique sensible au sel *Azolla pinnata*–*Anabaena azollae* sous stress au NaCl."

La citation de cet article : RAI, V., SHARMA, N. K., & RAI, A. K. (2006). Growth and cellular ion content of a salt-sensitive symbiotic system *Azolla pinnata*–*Anabaena azollae* under NaCl stress. *JOURNAL OF PLANT PHYSIOLOGY*, 9(163), 937-944.

### **Résumé :**

La salinité, à une concentration de 10 mM de NaCl, a affecté la croissance de l'association *Azolla pinnata*-*Anabaena azollae* et est devenue létale à 40 mM. Les plantes exposées jusqu'à 30 mM de NaCl ont présenté des racines plus longues que le témoin, surtout au début de l'incubation. Le nombre moyen de racines chez les plantes exposées à 10 et 20 mM de NaCl est resté presque le même que dans le témoin. Une augmentation supplémentaire de la concentration en NaCl à 30 mM a réduit le nombre de racines, et les racines ont été rejetées à 40 mM de NaCl. La présence de NaCl dans la solution nutritive a augmenté le Na<sup>+</sup> cellulaire de l'association intacte en montrant une accumulation différentielle par les partenaires individuels, tandis qu'elle a réduit le niveau de Ca<sup>2+</sup> cellulaire. Cependant, la teneur en K<sup>+</sup> cellulaire n'a pas montré de changement significatif. Le Na<sup>+</sup> cellulaire basé sur le poids frais des partenaires individuels respectifs (tissus hôtes et cyanobiontes) est resté plus élevé dans les tissus hôtes que dans le cyanobionte, tandis que l'inverse était vrai pour les contenus en K<sup>+</sup> et Ca<sup>2+</sup>. La contribution d'*A. azollae* dans le contenu ionique cellulaire total de l'association était faible en raison de la contribution maigre de la masse cyanobionte (19-21%). La sensibilité élevée au sel du complexe *Azolla*-*Anabaena* est due à l'incapacité de l'association à maintenir un faible niveau de Na<sup>+</sup> et un niveau élevé de Ca<sup>2+</sup> cellulaires. & 2005 Elsevier GmbH. Tous droits réservés.

### **I-2- Des articles sur l'azolla et l'alimentation animale :**

Article 05 : L'effet de l'alimentation supplémentaire en azolla sur les performances de croissance des lapins de chair.

La citation de cet article : ANHITA, K. C., RAJESHWARI, Y. B., PRABHU, T. M., VIVEK PATIL, M., SHILPA SHREE, J., & ANUPKUMAR, P. K. (2016). Effect of supplementary feeding of azolla on growth performance of broiler rabbits. *ARNP JOURNAL OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL SCIENCE*, 11, 30-36.

### **Résumé :**

L'étude a été menée pour rechercher des alternatives aux concentrés, ce qui nous a conduits à une merveilleuse plante, l'azolla, qui promet de fournir une alimentation durable pour le bétail. L'objectif de l'étude est d'étudier l'effet de l'alimentation supplémentaire en azolla séchée au soleil

(*Azolla pinnata*) sur les performances de croissance des lapins de chair. Trente lapins sevrés pesant entre 410 et 420g de poids corporel comparable ont été sélectionnés et répartis en trois groupes (T1, T2 et T3), de sorte que chaque groupe comprenait dix lapins (six mâles et quatre femelles). T1 servait de témoin, T2 contenait 1,5 % d'azolla séchée (30 % d'azolla frais), T3 contenait 3,0 % d'azolla séchée (60 % d'azolla frais) et les animaux étaient logés dans des cages individuelles. Les résultats ont révélé des gains de poids corporel non significatifs dans tous les groupes de traitement. Les résultats ont indiqué que les lapins du groupe témoin avaient une efficacité alimentaire significativement plus élevée dans le groupe T1 (5,30) par rapport aux groupes T2 (6,00) et T3 (6,03). Par conséquent, il pourrait être suggéré que l'alimentation en azolla sous forme séchée a entraîné une différence non significative dans les performances des lapins. Cependant, des études supplémentaires sur la digestibilité étaient nécessaires pour étudier l'utilisation appropriée de l'azolla.

Article 06 : "Effet de l'alimentation à l'Azolla (*Azolla pinnata*) sur la performance des canards de Pekin blancs en ponte."

La citation de cet article : SWAIN, B. K., NAIK, P. K., SAHOO, S. K., MISHRA, S. K., & KUMAR, D. (2018). Effect of feeding Azolla (*Azolla pinnata*) on the performance of White Pekin laying ducks.

### **Résumé :**

Une étude a été réalisée pour étudier l'effet de l'alimentation en azolla fraîche (*Azolla pinnata*) sur les performances des canes pondeuses de Pekin blanc (60 individus, 56 semaines) réparties en trois groupes (chaque groupe comprenait quatre répétitions avec cinq canes pondeuses par répétition) et ont été alimentées de manière aléatoire avec trois régimes, à savoir T1 - régime témoin (régime standard pour canards pondeuses (SDLD)), T2 (SDLD réduit de 10 % + azolla fraîche à raison de 100 g/cane/jour) et T3 (SDLD réduit de 20 % + azolla fraîche à raison de 200 g/cane/jour). L'azolla contenait 4,74 % de matière sèche (MS) ; 24,93 % de protéines brutes (PB) ; 3,48 % d'extrait éther (EE) ; 13,80 % de fibres brutes (FB), 16,84 % de cendres totales (CT) et 40,95 % d'extrait azoté (NFE). La production d'œufs et le poids des œufs ont augmenté de manière significative ( $P < 0,05$ ) grâce à l'alimentation en azolla aux deux niveaux. La consommation d'aliments était significativement ( $P < 0,05$ ) plus élevée pour le groupe T2. Le taux de conversion alimentaire (FCR), l'indice d'efficacité de performance et l'indice de forme des œufs ont été significativement améliorés pour les canes alimentées en azolla. Les caractéristiques de qualité des œufs telles que le score de l'unité Haugh, l'indice de l'albumen, l'indice du jaune et l'épaisseur de la coquille avec ou sans membrane coquillière (mm) étaient similaires pour les canes témoins et celles alimentées en azolla. La couleur du jaune des œufs des canes alimentées en azolla était d'un orange profond comparé au groupe témoin. On peut conclure que l'alimentation en azolla fraîche à raison de 200 g/cane/jour en remplacement de 20 % de l'aliment concentré chez les canes pondeuses de Pekin blanc était bénéfique en termes d'amélioration

du FCR, de l'indice d'efficacité de performance, de la production d'œufs, du poids des œufs avec un meilleur indice de forme des œufs et une couleur de jaune enrichie.

## **II- Analyses des articles :**

### **II-1- Analyses d'articles sur la caractérisation agronomique de l'azolla :**

#### **Article 01 :**

Nous concluons de l'article ce qui suit :

#### **Morphologie :**

##### 1. Description physique :

- La feuille de l'Azolla est appelée une fronde. Sa taille varie de 1 cm à 2,5 cm pour les espèces plus petites comme *Azolla pinnata*, jusqu'à plus de 15 cm pour les espèces plus grandes comme *Azolla nilotica*.

- Elle possède un rhizome principal qui se ramifie en rhizomes secondaires, tous portant de petites feuilles alternées.

##### 2. Racines :

- De nombreuses racines adventives non ramifiées émergent des nœuds sur les surfaces ventrales des rhizomes.

- Les racines acquièrent les nutriments directement dans l'eau, et dans une eau peu profonde, elles peuvent également entrer en contact avec le sol pour absorber les nutriments.

##### 3. Feuilles :

- Chaque feuille a deux lobes distincts :

- Un lobe dorsal chlorophyllien aérien.

- Un lobe ventral légèrement immergé qui est incolore, en forme de coupe, et qui assure la flottabilité de la plante.

- Chaque lobe dorsal a une cavité foliaire contenant l'*Anabaena azolla* symbiotique.

##### 4. *Anabaena azollae* symbiotique :

- Cette bactérie symbiotique est présente dans la cavité foliaire du lobe dorsal.

- La surface intérieure de chaque cavité foliaire est recouverte d'une enveloppe mucilagineuse, enrobée de filaments d'*Anabaena azollae* et pénétrée par des poils multicellulaires de transfert.

En résumé, la structure de l'Azolla est bien adaptée à son mode de vie aquatique. Ses feuilles et ses racines sont spécialement conçues pour maximiser l'absorption de nutriments et assurer sa flottabilité. La présence de l'*Anabaena azollae* symbiotique dans les cavités foliaires joue un rôle crucial dans la fixation de l'azote atmosphérique, contribuant ainsi à la nutrition de la plante.

#### **Exigence nutritionnelle :**

Cette analyse met en lumière plusieurs aspects importants de la culture de l'Azolla et de son interaction avec d'autres plantes, en particulier le riz. Voici une analyse détaillée des principaux points abordés :

##### 1. Fixation biologique de l'azote (BFN) :

- L'Azolla est capable de répondre à ses besoins en azote grâce à la BFN, un processus unique des procaryotes.
- Les cellules hétérocystiques spécialisées réduisent l'azote atmosphérique en ammoniac, essentiel pour la croissance des plantes.
- L'activité de la nitrogenase, enzyme impliquée dans ce processus, est influencée par divers facteurs environnementaux tels que la lumière, l'humidité, la température, la salinité et la disponibilité en oxygène et en nutriments.

##### 2. Exigences en nutriments :

- Outre l'azote, l'Azolla nécessite des macronutriments (P, K, Ca, Mg) et des micronutriments (Fe, Mo, Zn) pour un développement adéquat.
- Des niveaux adéquats de phosphore améliorent le développement des plantes, mais un excès d'azote peut affecter négativement la fixation d'azote, la teneur en sucre et en chlorophylle.

##### 3. Conditions de croissance optimales :

- L'Azolla se développe mieux dans un pH acide (4,5-7,0) et à des températures moyennes (25-30 °C).
- L'activité de réduction de l'acétylène est maximale avec une certaine combinaison de lumière et d'obscurité.
- Une salinité élevée peut réduire la croissance et l'activité de la nitrogenase, mais l'ajout de fumier de ferme peut atténuer cet effet.

##### 4. Interaction avec le riz :

- L'Azolla peut être utilisée comme engrais vert pour le riz, contribuant à sa croissance en fournissant de l'azote.

- La BFN peut contribuer jusqu'à 200 kg N ha<sup>-1</sup> chaque année pour la culture du riz.
- La décomposition de l'Azolla fournit une quantité considérable d'azote, contribuant jusqu'à 28 % des besoins en azote de la culture du riz.
- Des pratiques spécifiques telles que la plantation en double rangée étroite et le maintien d'une faible profondeur d'eau favorisent la prolifération de l'Azolla et augmentent les rendements du riz.

#### 5. Multiplication et utilisation :

- Une quantité spécifique d'inoculum est nécessaire pour la multiplication et la fertilisation de l'Azolla.
- Une densité excessive de couverture de riz peut limiter les effets de l'inoculum, il est donc recommandé d'utiliser des méthodes de plantation qui minimisent cet effet d'ombrage.

En résumé, l'Azolla offre un potentiel significatif en tant qu'engrais vert, en particulier pour les cultures de riz, grâce à sa capacité unique de fixation de l'azote et à ses interactions bénéfiques avec d'autres plantes. Cependant, son efficacité dépend de divers facteurs environnementaux et de gestion.

#### **Article 02 :**

D'après cet article nous concluons la méthode optimale de culture d'Azolla :

##### 1. Préparation des fosses :

- Trois fosses de dimensions spécifiques ont été creusées avec une profondeur de 0,3 mètre.
- Un soin particulier a été pris pour assurer l'uniformité du fond des fosses.
- Les racines et autres particules indésirables ont été enlevées et des précautions ont été prises pour maintenir un niveau d'eau uniforme.
- Des feuilles de Silpaulin ont été utilisées pour couvrir les fosses et une fine couche de terre légère a été répandue sur chaque fosse pour éviter les contaminants.

##### 2. Préparation de l'eau et du sol :

- De l'eau a été ajoutée aux fosses jusqu'au trois quarts de la hauteur.
- Du fumier frais de buffle dissous dans de l'eau, du superphosphate et un mélange minéral ont été ajoutés au sol.
- Le pH de la matière organique du fond et de l'eau en surface a été testé régulièrement pour assurer des conditions optimales.

### 3. Inoculation et entretien :

- Chaque fosse a été inoculée avec de la culture d'azolla fraîche et pure.
- Un arrosage régulier a été effectué.
- Tous les 15 jours, une application de fumier de buffle, de superphosphate et de mélange minéral a été réalisée pour favoriser la croissance de l'azolla et prévenir les carences en nutriments.
- En cas de contamination par des ravageurs ou des maladies, une nouvelle inoculation a été effectuée après élimination de la biomasse précédente.

### Analyse :

- Méthode systématique : La méthode décrite est méthodique et bien organisée, montrant une bonne compréhension des besoins de croissance d'Azolla.
- Utilisation de ressources locales : L'utilisation de fumier de buffle et de méthodes peu coûteuses montre une utilisation efficace des ressources locales pour la culture d'Azolla.
- Contrôle de qualité : Le contrôle régulier du pH et l'application régulière de nutriments indiquent une volonté de maintenir des conditions optimales pour la croissance d'Azolla.
- Réponse aux problèmes : La méthode décrit également des mesures à prendre en cas de contamination par des ravageurs ou des maladies, montrant une préparation pour répondre aux problèmes potentiels.
- Potentiel de reproductibilité : La méthode décrite semble reproductible dans d'autres contextes similaires, en particulier dans les régions où les ressources sont limitées mais où l'accès aux ressources organiques est possible.

En conclusion, l'approche décrite semble être une méthode bien pensée et systématique pour la culture d'Azolla, adaptée à un contexte agricole localisé, et pourrait être bénéfique pour la production animale dans la région.

### **Article 03 :**

D'après cet article nous concluons les facteurs affectant la croissance de l'azolla :

#### Le protocole expérimental :

Plante : Azolla pinnata

Milieu de culture :

Deux solutions nutritives ont été testées - la solution Hoagland et la solution IRR2, à différentes concentrations (1%, 5%, 10%, 15% pour Hoagland et 100%, 500% pour IRR2).

Intensité lumineuse :

trois niveaux ont été utilisés : lumière faible (5 000 lx), lumière moyenne (10 000 lx) et lumière élevée (20 000 lx).

Présence d'azote :

Des expériences ont été réalisées avec et sans azote dans le milieu.

Contrôle du pH :

Pour certaines expériences, le pH de la solution a été maintenu à 6,5, tandis que d'autres n'ont pas été contrôlés (pH initial entre 5,5 et 6).

Humidité :

Trois niveaux ont été testés : 60 %, 75 % et 90 %.

Les chercheurs ont suivi le taux de croissance d'*Azolla pinnata* en mesurant le poids des plantes sur une période de 7 jours. Ils ont également observé la couleur des plantes à la recherche de signes de stress.

Sur la base des résultats, les chercheurs ont conclu que :

La solution Hoagland à 15 % était le milieu de croissance optimal pour une *Azolla pinnata* saine.

L'intensité lumineuse avait une corrélation positive avec le taux de croissance. Une intensité lumineuse plus élevée a entraîné des taux de croissance plus élevés.

La présence d'azote dans le milieu n'a pas affecté de manière significative le taux de croissance, ce qui indique que la fixation de l'azote par *Azolla pinnata* n'était pas un facteur limitant dans les conditions testées.

Le contrôle du pH s'est avéré bénéfique pour la croissance, en particulier en cas de forte intensité lumineuse et d'humidité élevée. Un pH incontrôlé pourrait entraîner la croissance d'algues et entraver la croissance d'*Azolla pinnata*.

Une humidité modérée (60 % ou 75 %) était préférable à une humidité élevée (90 %) pour éviter de favoriser la croissance de moisissures et d'algues.

Les résultats :

L'étude a mis le point sur les conditions de croissance optimales de l'*Azolla pinnata*, une fougère utilisée pour la phytoremédiation. Voici un résumé des résultats :

**Composition du milieu :** Parmi les milieux testés, la solution Hoagland à 15 % a fourni une croissance optimale, comparable à la solution à 100 % IRR2. Cependant, la solution Hoagland à 15 % a donné des plantes plus saines (couleur verte) par rapport à l'IRR2 (couleur rouge-brun indiquant un stress).

**Intensité lumineuse :** Une intensité lumineuse plus élevée (jusqu'à 20 000 lux) a entraîné des taux de croissance plus élevés. Cependant, certaines plantes sont devenues rouges sous une lumière intense et sans azote, ce qui indique un stress.

**Présence d'azote :** La présence d'azote dans le milieu n'a pas affecté de manière significative la croissance, ce qui indique une fixation efficace de l'azote par les bactéries symbiotiques d'*Azolla pinnata*.

**Contrôle du pH :** le maintien du pH à 6,5 grâce à des ajustements quotidiens a entraîné une meilleure croissance par rapport au pH non contrôlé. Le pH non contrôlé avait tendance à augmenter avec la présence d'azote et à diminuer sans azote.

**Humidité :** Une humidité modérée (60 % et 75 %) a donné des résultats similaires avec une croissance légèrement meilleure à 60 %. Une humidité élevée (90 %) a augmenté la croissance mais a également favorisé la croissance des algues, nuisant à *Azolla pinnata*.

L'étude met en évidence l'importance de conditions contrôlées pour maximiser la croissance d'*Azolla pinnata* pour les applications de phytoremédiation.

#### **Article 04 :**

Dans cet article il décrit en détail les procédures utilisées pour cultiver, traiter et analyser les plantes d'*Azolla pinnata* var. *imbricata* R. Br. ainsi que pour isoler le cyanobionte *A. azollae* et évaluer son impact sur la plante hôte.

**1. Matériel végétal et conditions de croissance :** Les plantes ont été cultivées dans des récipients spécialement conçus avec une solution nutritive de Hoagland stérile. Les conditions de croissance comprenaient une température de  $26 \pm 1^\circ\text{C}$ , un cycle lumière-obscurité de 16 et 8 heures respectivement, et une illumination à un flux de photons de  $95 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

**2. Traitement au sel :** Les plantes ont été soumises à différents niveaux de concentration de NaCl pour étudier leur réponse au stress salin. Les plantes sans ajout de NaCl ont servi de témoin.

**3. Estimation de la croissance :** Le poids frais (FW) et le poids sec (DW) des plantes ont été mesurés pour estimer le taux de croissance relatif moyen (RGR).

4. Nombre et taille des racines : Le nombre total de racines ainsi que la taille moyenne des racines ont été mesurés.

5. Isolement du cyanobionte : Le cyanobionte *A. azollae* a été isolé des plantes *Azolla* en utilisant la méthode du "rouleau doux".

6. Détermination de la contribution du cyanobionte : La teneur en phycocyanine a été utilisée pour quantifier la contribution du cyanobionte à l'association.

7. Mesure de la concentration ionique cellulaire : Les concentrations de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  ont été mesurées dans les plantes intactes ainsi que dans les partenaires individuels après incubation dans différentes concentrations de  $\text{NaCl}$ .

8. Analyse statistique : Toutes les valeurs sont des moyennes de six réplicats par traitement et les données ont été analysées par corrélation de Pearson.

Cette méthode offre une approche complète pour étudier l'interaction entre *Azolla* et le cyanobionte *A. azollae*, ainsi que la réponse de la plante hôte au stress salin, en fournissant des mesures quantitatives pour évaluer la croissance, la morphologie des racines, la contribution du cyanobionte et la composition ionique des cellules.

L'analyse des résultats fournit des informations détaillées sur l'effet de la salinité sur la croissance, le rendement, la longueur des racines et la concentration ionique cellulaire ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ) dans une culture de plantes. Voici une analyse détaillée des principales conclusions :

#### 1. Effet de la salinité sur la croissance et le rendement des plantes :

- La salinité a inhibé la croissance des plantes, réduisant le rendement à mesure que la concentration de  $\text{NaCl}$  augmentait.
- À partir de 40 mM de  $\text{NaCl}$ , les plantes ont montré des signes de décomposition en brun après 9 jours, indiquant une toxicité du sel.
- Les plantes exposées à 10-30 mM de  $\text{NaCl}$  ont montré une récupération partielle de la toxicité du sel après une période prolongée d'incubation.
- Les valeurs du taux de croissance relative (RGR) ont diminué en réponse au traitement au sel, avec une récupération partielle chez les plantes exposées à 10-30 mM de  $\text{NaCl}$  après 21 jours.

#### 2. Nombre de racines et longueur moyenne des racines :

- L'exposition au  $\text{NaCl}$  a entraîné une augmentation significative de la longueur moyenne des racines, en particulier au début de l'incubation.

- Les concentrations de 10 et 20 mM de NaCl ont favorisé une augmentation de la longueur moyenne des racines.

- La salinité a eu un effet variable sur le nombre total de racines, avec une augmentation observée à un stade ultérieur de la croissance due à la propagation végétative.

### 3. Concentration ionique cellulaire :

- La concentration intracellulaire de Na<sup>+</sup> a augmenté avec la concentration croissante de NaCl dans le milieu, avec des effets similaires observés dans les tissus hôtes et le cyanobionte.

- Le niveau de K<sup>+</sup> a montré une augmentation dans le cyanobionte mais pas dans les tissus hôtes, contribuant ainsi à l'augmentation globale de K<sup>+</sup> dans l'association exposée à la salinité.

- La concentration cellulaire en Ca<sup>2+</sup> a diminué avec la concentration croissante de NaCl dans le milieu, mais le cyanobionte a maintenu des niveaux plus élevés de Ca<sup>2+</sup> par rapport aux tissus hôtes.

### 4. Corrélations entre les paramètres :

- La croissance était positivement corrélée avec la concentration cellulaire en Ca<sup>2+</sup> et négativement corrélée avec la concentration cellulaire en Na<sup>+</sup>.

- Le nombre total de racines était positivement corrélé avec la concentration cellulaire en Ca<sup>2+</sup> et négativement corrélé avec la concentration cellulaire en Na<sup>+</sup>.

- Le K<sup>+</sup> cellulaire n'a montré aucune corrélation significative avec les paramètres testés.

En résumé, les résultats indiquent que la salinité affecte négativement la croissance et le rendement des plantes, modifiant également la concentration ionique cellulaire. Le cyanobionte semble jouer un rôle important dans le maintien des niveaux de K<sup>+</sup> et de Ca<sup>2+</sup> dans l'association, malgré l'impact de la salinité.

Cet extrait fournit une analyse détaillée des effets de la salinité sur la croissance et le développement d'*Azolla pinnata*, en se concentrant sur différents aspects physiologiques et biochimiques de la plante et de son symbiote, *Anabaena (A. azollae)*. Voici une synthèse des principales conclusions et analyses:

#### 1. Tolérance à la salinité :

- *A. pinnata* montre une faible tolérance à la salinité, ne pouvant pas tolérer des concentrations de NaCl dépassant 30 mM.

- D'autres espèces d'*Azolla*, comme *A. filiculoides* et *A. caroliniana*, présentent une grande tolérance au sel.

## 2. Taux de croissance relatif (RGR) :

- La salinité diminue le RGR d'*A. pinnata*, mais la plante montre une capacité de récupération après une exposition au sel.
- Cette récupération est attribuée à la capacité des plantes à limiter le déséquilibre ionique dans les cellules.

## 3. Adaptations morphologiques :

- Les racines les plus longues observées à des concentrations de NaCl plus faibles pourraient être une adaptation pour surmonter le déficit hydrique.
- Cependant, à des concentrations plus élevées, la diminution du nombre, de la longueur et de la ramification des racines entraîne une réduction de l'absorption d'eau et de nutriments, conduisant à une croissance réduite voire à la mort de la plante.

## 4. Composition ionique :

- La salinité entraîne une accumulation de Na<sup>+</sup> dans les cellules, au détriment de la diminution de Ca<sup>2+</sup>.
- Cette diminution de Ca<sup>2+</sup> est attribuée au remplacement du Ca<sup>2+</sup> par le Na<sup>+</sup> dans l'apoplaste et les membranes, compromettant leur intégrité.

## 5. Relations symbiotiques :

- La corrélation entre l'accumulation de Na<sup>+</sup> et la diminution de Ca<sup>2+</sup> suggère que la sensibilité au stress salin chez *A. pinnata* - *A. azollae* est due à leur incapacité à maintenir des niveaux de Na<sup>+</sup> bas et de Ca<sup>2+</sup> élevés.
- La croissance est limitée par l'épuisement en Ca<sup>2+</sup> plutôt qu'en K<sup>+</sup> sous stress salin.

## 6. Conclusion :

- *A. pinnata* - *A. azollae* semble manquer de mécanismes efficaces de régulation du transport ionique, en particulier du Na<sup>+</sup> et du Ca<sup>2+</sup>, lorsqu'ils sont exposés au sel.

En résumé, l'étude met en évidence les mécanismes physiologiques et biochimiques sous-jacents à la sensibilité d'*A. pinnata* à la salinité, soulignant l'importance de la régulation ionique pour la croissance et le développement des plantes dans des environnements salins.

## **II-2- Analyses d'articles sur l'azolla et l'alimentation animale :** **Article 05 :**

Cet article traite de l'efficacité de l'Azolla comme alternative dans l'alimentation des lapins et de son effet sur leur poids.

## **Introduction**

En Inde, où l'agriculture et l'élevage constituent les principales activités de la majorité de la population, le coût élevé du fourrage pose un défi majeur. Cette situation a conduit à la recherche d'alternatives, comme l'Azolla, une plante aquatique facile à cultiver et riche en nutriments.

## **Matériel et Méthodes**

Étude sur l'impact de l'alimentation complémentaire d'Azolla sur la croissance des lapins broyeurs dans Département de la production animale et de la gestion du Collège vétérinaire de Bangalore.

L'expérience comprenait un essai d'alimentation visant à comparer la performance de croissance de Trente lapins sevrés de poids corporels comparables de 410 à 420 g ont été sélectionnés et divisés en trois groupes (T1, T2 et T3) chaque groupe composé de dix lapins (six mâles et quatre femelles).

Chaque lapin avait libre accès à l'eau fournie dans des abreuvoirs. La pièce où étaient logés les lapins était maintenue hygiéniquement.

Le T1 a servi de témoin

le T2 contenait 1,5% d'azolla séchée (30% d'azolla fraîche)

le T3 contenait 3,0% d'azolla séchée (60% d'azolla fraîche)

Les lapins étaient identifiés individuellement par marquage des oreilles.

- **Durée** : 12 semaines
- **Distribution de la nourriture** : 2 fois par jour (11h et 15h)
- **Eau** : Disponible en permanence
- **Mesures** :
  - **Consommation d'aliments** : Quantité d'aliments pesée avant et après distribution
  - **Apport en matières sèches** : Analyse de la matière sèche du fourrage avant l'expérience
  - **Croissance** : Pesée des lapins chaque semaine
- **Analyse statistique** : ANOVA avec "animal" et "traitement" comme effets principaux (logiciel GraphPad Prism version 5.1)

- **Test de comparaison multiple de Tukey** : Utilisé pour identifier les différences significatives entre les groupes

## **CONCLUSION**

À partir de cette étude, on peut conclure que l'azolla peut être incluse à 1,5 et 3,0 pour cent n'a pas entraîné de changements significatifs dans les gains de poids corporel et les performances de croissance. Toutefois, des études de plus longue durée ainsi qu'au-delà de l'âge de 12 semaines jusqu'à l'époque de commercialisation ou à son âge adulte sont nécessaires pour étudier l'effet d'azolla sur les performances de croissance chez les lapins. En outre, l'utilisation appropriée de l'azolla dans le système doit être explorée par des essais digestifs.

### **Article 06:**

Dans cet article ont déterminé si l'Azolla peut être une alternative efficace dans l'alimentation des canards pondeurs :

#### **Introduction**

L'étude examine l'effet de l'alimentation avec de l'Azolla (*Azolla pinnata*) sur les performances de reproduction, la qualité des œufs et les coûts alimentaires des canards pondeurs White Pekin. L'Azolla est ajoutée à différents niveaux dans le régime alimentaire des canards, et les effets sur la production d'œufs, la consommation d'aliments et la qualité des œufs sont évalués. L'objectif est de déterminer si l'Azolla peut être une alternative efficace dans l'alimentation des canards pondeurs, offrant des avantages économiques tout en maintenant ou améliorant les performances de reproduction et la qualité des œufs.

#### **Matériel et Méthodes**

L'expérience est réalisée en divisant les canards pondeurs en trois groupes, chacun recevant un régime alimentaire différent : un groupe témoin (Tableau 1) avec le régime standard pour canards pondeurs (SDL), un groupe avec une réduction de 10% du SDL et de l'Azolla fraîche à raison de 100g/canard/jour (Tableau 2), et un groupe avec une réduction de 20% du SDL et de l'Azolla fraîche à raison de 200g/canard/jour (Tableau 3). Les performances des canards sont évaluées pendant une période de 56 jours, avec des enregistrements hebdomadaires de la consommation d'aliments, de la production d'œufs et du poids des œufs. Les paramètres de qualité des œufs sont également mesurés chaque semaine. Les données sont analysées statistiquement pour déterminer les différences significatives entre les groupes.

#### **Résultats**

Les résultats montrent une diminution significative de la consommation d'aliments chez les canards recevant de l'Azolla dans leur régime, en particulier dans le groupe T3 avec une réduction de 20% du SDLD et 200g/canard/jour d'Azolla. Cependant, la production d'œufs augmente de manière significative avec la supplémentation en Azolla, avec une amélioration de l'indice de forme chez les canards du groupe T3. Les paramètres de qualité des œufs tels que l'indice d'albumen, l'indice de jaune et l'épaisseur de la coquille ne montrent pas de différences significatives entre les groupes.

### **Discussion**

Les résultats suggèrent que l'Azolla peut être une option économique pour l'alimentation des canards pondeurs, en réduisant la consommation d'aliments tout en maintenant ou améliorant la production d'œufs et la qualité des œufs. L'effet positif de l'Azolla sur les performances de reproduction et les coûts alimentaires est prometteur pour son utilisation future dans l'industrie avicole. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les effets à long terme de l'alimentation à l'Azolla sur la santé des canards et sur la qualité des produits finaux pour garantir sa viabilité à grande échelle.

### **Conclusion**

En conclusion, l'alimentation avec de l'Azolla peut être bénéfique pour les canards pondeurs en termes de performances de reproduction et de coûts alimentaires. Les résultats de cette étude fournissent des informations précieuses pour les producteurs avicoles cherchant à optimiser l'alimentation de leurs troupeaux. L'utilisation de l'Azolla comme complément alimentaire peut potentiellement conduire à des économies significatives tout en maintenant des niveaux élevés de production d'œufs et de qualité des œufs.

# **Chapitre 03 : Matériels et Méthodes**

## Chapitre 03 : MATERIELS ET METHODES

Ce travail vise simplement la mise en culture de l'azolla dans quatre bassins chacun de 4 m<sup>2</sup>. Les quatre bassins sont installés dans différents gradients d'ensoleillement. A savoir, ensoleillé, mi ensoleillé, ombragée et mi ensoleillé avec absence d'élément nutritif. Les résultats escomptés sont d'ordre descriptif seulement, à savoir, augmentation de la quantité de la culture et indication de la couleur de la culture.

### 3-1-l'installation de la culture :

La mise en place des quatre bassins a été installée le début juillet 2024 à la terrasse au niveau de notre maison située à la commune de REMCHI. Le suivi de la culture a duré 3 semaines.

### 3-2- Le matériel végétal :

L'espèce : *Azolla pinnata* (fig. 18) ,

Nous avons fourni ces plantes chez un éleveur de lapin, au même temps un producteur de l'azolla. Ce producteur exerce son métier au niveau de la commune de HENNAYA.

**Figure 17:** une photo représentative de l'espèce *Azolla pinnata* (Photographie réalisée par Ilyes)



### 3-3- Le Matériel utilisé pour la mise en place des bassins :

Sol fertile, bouse de vache, cartons, des briques, bâche imperméable, pèle, bidons, passoire, caisses pour la récolte, NPK 20.20.20, terreau. (fig.19)

**Figure 18:** Le Matériel utilisé pour la mise en place des bassins(*Photographie réalisée par Ilyes*)



### 3-4- Le protocole expérimental :

#### 3-4-1- Construction et préparation des bassins :

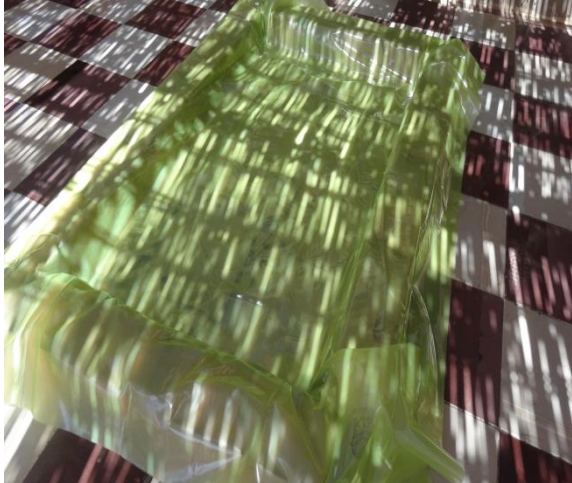
Les bassins ont chacun 2 m de largeur, 2 m de longueur, superficie de 4 m<sup>2</sup> soit une superficie totale de 16m<sup>2</sup> en additionnant les quatre bassins. Les briques (Fig.20) qui jouent un rôle de support pour délimiter les bassins, il mesure 10 cm de largeur, 30 cm de longueur et 20 cm de hauteur. Au total 112 briques ont été utilisées pour la construction des quatre bassins. Une fois que le placement des briques a été effectué et que les bordures des bassins ont été formées, des cartons ont été placés à la surface des bassins (Fig.21). Puis on recouvre le bassin d'une bâche ( fig.22) .

**Figure 19:** Mise en place des briques

**Figure 20:** emplacement des cartons



**Figure 21:** emplacement de la bâche



**Figure 22:** le tamisage du sol



- Après avoir recouvert les bassins d'une bâche, nous ajoutons du sol afin de recouvrir les bassins sur une hauteur de 3 à 4cm. Ceci afin d'apporter des nutriments à l'azolla. Ce sol a été filtré et tamisé afin d'éliminer les impuretés telles que les cailloux. Pour éviter le risque de trous la bâche et causer une fuite d'eau (fig. 23).

**Figure 23:** préparation du mélange



**Figure 24:** Remplissage des bassins par le mélange



- Avant de recouvrir les bassins avec le sol tamisé, on le mélange avec le terreau (fig. 24).

Après avoir ajouté du sol (fig.24), nous le remplissons d'eau (une eau de robinet et une eau de source) jusqu'à une hauteur de 10 cm et surveillons l'évaporation due à la température élevée de la saison estivale (fig.25).

-Après avoir rempli les bassins et étaler le sol, laisser le tout reposer 24 heures, Ensuite enlever toutes les particules qui flottent à la surface (Fig.26). Ces particules peuvent compromettre le développement de l'Azolla après sa plantation.

**Figure 25:** Remplissage les bassins par l'eau

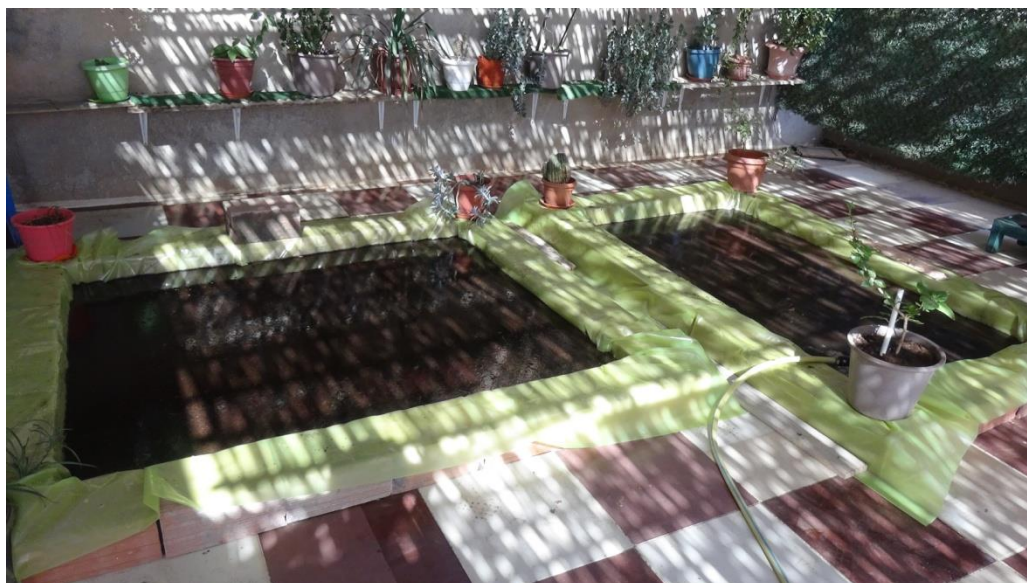
**Figure 26:** L'enlèvement des particules



### **3-4-2- Mise en culture de l'Azolla dans les bassins :**

Nous avons mis 400g d'Azolla dans chaque bassin. Un totale de 1.6kg d'Azolla a été mis dans tous les bassins. Dans chaque bassin, nous avons délimité un mètre carré avec une canne pour cultiver le 400g d'azolla (les normes sont de 400g/m<sup>2</sup>). Lors du déversement de l'azolla, il faut prendre une quantité et la frotter entre les mains, cette action facilite la propagation. (Fig.27). Ce processus est répété jusqu'à ce que toute la quantité soit mise à la surface de l'eau. Les mêmes étapes ont été effectuées dans les quatre bassins (Fig.28).

**Figure 27:** aspect final des bassins (*Photographie réalisée par Ilyes*)



Après avoir trouvé son nouveau foyer, l'Azolla se défait de ses anciennes racines pour en faire pousser de nouvelles, mieux adaptées à son nouvel environnement. Ce processus, qui dure généralement entre 10 et 15 jours, se conclut par l'apparition de racines brunes, signe d'un enracinement réussi.

L'Azolla nécessite des éléments nutritifs pour une croissance et une multiplication optimale. Pour cet essai on a utilisé le purin de bouse de vache (il doit être ancien) (Fig.29). Afin d'enrichir l'eau en nutriments, on introduit dans 3 bassins un sac en tissu contenant 3 kg de purin de vache. Ce procédé permet une libération lente et contrôlée des éléments nutritifs par dissolution.

**Figure 29 :** le sac de purin bouse de vache



### **3-4-3- Dispositif des bassins**

Bassin 1 : mi- ensoleillé en présence d'éléments nutritifs,

Bassin 2 : mi-ensoleillé avec **absence** d'élément nutritifs,

Bassin 3 : ensoleillé en présence d'éléments nutritifs,

Bassin 4 : ombragée en présence d'éléments nutritifs.

### **3-5-Suivi de la culture**

Nous effectuons un suivi quotidien pendant toute la durée de la culture. Nous contrôlons le volume d'eau dans les bassins afin de compenser les pertes d'évaporation. Un apport d'eau de 3 à 4 cm est réalisé tous les trois jours. Sachant, qu'une agitation légère de l'eau favorise la multiplication végétative de l'azolla.

Nous observant également la croissance de l'azolla et l'état de santé des plantes qui est indiquée par la couleur.

Un autre indicateur essentiel est celui de la transparence de l'eau, tant l'eau vire vers la transparence tant qu'il indique l'appauvrissement en matières nutritives pour l'azolla.

### **3-6-La mesure du rendement**

Nous avons mesuré le rendement de l'azolla par la formule suivante :

$$\text{Rendement (gr)} = \text{Quantité totale récoltée} - \text{Quantité initiale.}$$

## **Résultats et discussion**

## **CHAPITRE 04 : RESULTATS ET DISCUSSION**

Nous allons exposer les résultats d'observation et de rendement par numéro de bassin.

### **4 -1 Résultats du bassin 1 (mi ensoleiller) :**

Après avoir préparé les bassins et planté l'*Azolla* (Fig.30), nous avons optimisé les conditions de culture pour favoriser une croissance optimale. Selon Wang et al. (2018), une température comprise entre 20,2°C et 29,7°C est idéale. Nous avons donc maintenu la température de l'eau dans cette fourchette pour assurer un développement optimal de la plante.

Par ailleurs, nous avons ajusté le pH de l'eau conformément aux recommandations de la littérature scientifique, afin de fournir à l'*Azolla* un milieu de culture favorable. De plus, nous avons enrichi l'eau en éléments nutritifs essentiels, tels que ceux identifiés par Wang et al. (2018), pour stimuler la croissance végétative.

Comme l'a souligné Van Hove (1989), nous avons laissé à l'*Azolla* une période d'adaptation pour qu'elle puisse s'acclimater au nouveau milieu. Pendant cette phase, nous avons observé attentivement la plante pour détecter tout signe de stress ou de maladie.

Par la suite, nous avons mis en place un suivi quotidien de l'état général de l'*Azolla*, en particulier de sa croissance et de sa santé. De manière concomitante, nous avons procédé à un entretien régulier des bassins : aération de l'eau par brassage, élimination des impuretés et réalimentation en eau pour compenser les pertes par évaporation, notamment en période de forte chaleur.

#### 4-2-1 l'observation de l'azolla :

**Figure 30** : : bassin 1 en phase initiale



**Figure 28**: bassin 1 après 20 jours de mise en culture



**Figure 29**: changement dans la couleur de l'eau



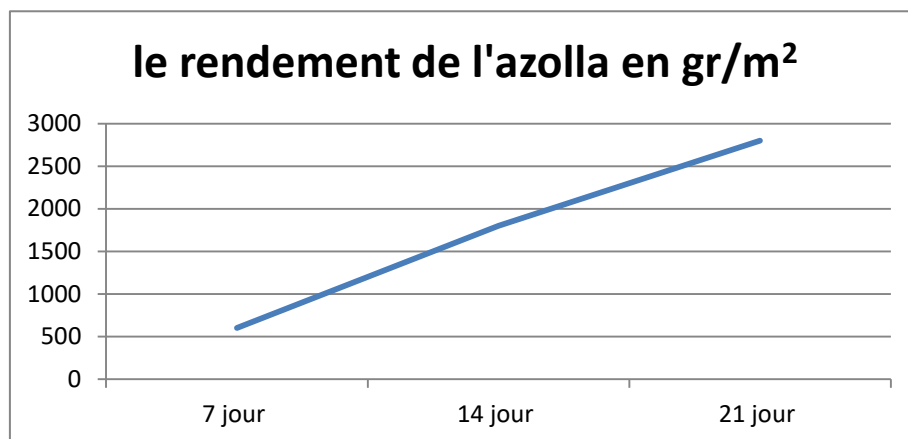
**Figure 33:** observation des racines après 20 jours



Dans le bassin 1 (mis ensoleiller), l'observation (Fig.31) montre une augmentation de la culture aussi un bon état sanitaire que témoignant la couleur vive de l'azolla. Les racines (Fig. 33) marque une bonne prolongation avec la couleur brune confirme l'adéquation du milieu au bon développement de la culture.

Nous observant aussi un changement progressif de la couleur de l'eau, passant du brun à une teinte plus claire(Fig.32), ce qui témoigne que la plante à absorber les substances nutritives dissoute dans l'eau. Cet indice de changement de couleur nous permettre de déterminer le besoin en approvisionnement nutritionnel au fil des jours, si la couleur devient claire.

#### 4-2-2 Le rendement de l'azolla



Courbe1 : une représentation du rendement d'Azolla (bassin 1)

La récolte a été effectuée 22 jours après la maturation de la plante. Le rendement a enregistré **2800 gr/m<sup>2</sup>** (courbe 1), couvrant entièrement le bassin après la propagation de la fougère, soit une croissance moyenne de **109 grammes par jour et par mètre carré**.

Si nous remplissons complètement un bassin, nous pouvons estimer une récolte de 9500 grammes en 22 jours. En comparaison avec les données bibliographique, une expérience a enregistré 1600 grammes récoltés sur 4 mètres carrés correspondent à une croissance moyenne de **436 grammes par jour et par mètres carrés**. Multiplier par 4 fois la croissance de notre culture ce qui signifie que notre milieu n'a pas encore atteint les conditions optimales.

Après avoir récolté et mesurer la culture d'azolla, nous avons eu l'idée de présenter la culture au poulet afin d'observer la consommation réelle. La figure 34, montre le regroupement des poules sur cette fougère.

**Figure 30:** Une photo représente des poulets se nourrissant d'Azolla fraîche (*Photographie réalisée par Ilyes*)



#### **4-2 Résultats du bassin 2 (mi- ensoleiller + absence du mélange du sol )**

##### **4-2-1 L'observation de l'azolla bassin 2**

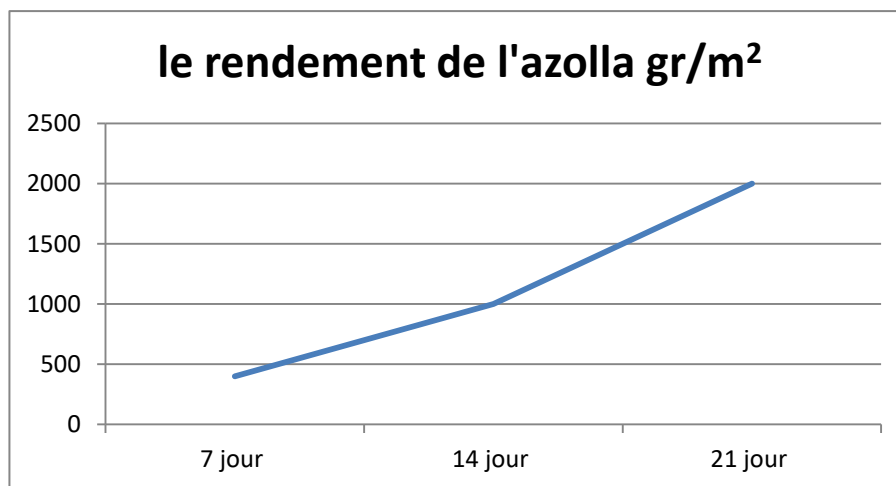
**Figure 31:** résultat de bassin 2 (*Photographie réalisée par Ilyes*)



**Figure 32:** photo qui montre la densité et l'état des racines de bassin 2 (Photographie réalisée par Ilyes)



#### 4-2-2 Le rendement de l'azolla bassin 2



Courbe 2 : montrant le développement d'Azolla dans le bassin 2

Dans les mêmes conditions de culture et après la phase d'adaptation, nous avons suivi sa croissance quotidiennement pendant 20 jours. La plante a bien répondu au milieu, différent du premier par l'absence de mélange de sol. Nous avons constaté un rendement inférieur à celui du premier milieu (fig. 35) environ 2000 g soit **95gr /m<sup>2</sup> par jour**, dû à un taux de reproduction plus faible et à une taille

plus petite de l'Azolla. De plus, la présence de quelques taches brunes et une faible densité végétale ont été observées. Les racines, également plus petites (fig. 36), témoignent d'un facteur limitant leur croissance.

Conclusion : pour optimiser la productivité, il est recommandé d'enrichir le bassin avec un mélange de sol fertile afin d'éviter une faible densité.

#### **4 -3- Résultats du bassin 3 (ensoleillé)**

Ce bassin était exposé au soleil toute la journée, en plus il se compose de tous les éléments nutritifs nécessaires.

##### **4-3-1 L'observation de l'azolla bassin 3 :**

**Figure 33:** résultat du bassin 3(*Photographie réalisée par Ilyes*)



Nous avons observé que l'Azolla n'a montré aucune réaction pendant la phase d'adaptation. Après quelques jours, nous avons constaté que les feuilles d'Azolla avaient rapetissé et noircit (fig. 37), et que les racines s'étaient atrophiées.

Les résultats de cette expérience, menée en conditions d'ensoleillement continu, confirment les conclusions de Wang et al. (2018) selon lesquelles l'Azolla est une plante fourragère sensible à la chaleur. En effet, nous avons observé que ce fourrage ne tolère pas les températures élevées et un ensoleillement excessif.

Aucun rendement n'a été enregistré.

#### 4 -4- Résultats du bassin 4 (ombrager) :

**Figure 34:** résultat du bassin 4



Dans ce bassin, nous avons placé l'Azolla dans une zone ombragée, à l'abri du soleil direct. Au cours des premiers jours, nous avons observé (fig38) une faible densité de la plante dans l'eau. Cependant, après une phase d'adaptation, l'Azolla a bruni et une prolifération d'algues a été constatée, altérant ainsi la qualité de l'eau.

Aucun rendement enregistré.

# Conclusion générale

## CONCLUSION GENERALE

Rappelons que l'objectif du présent travail, est la mise en culture de *l'Azolla pinnata* dans quatre situations différentes. Ces situations, sont en fonction du gradient d'ensoleillement, mais aussi de la présence absence des éléments nutritifs. On vise à évaluer le niveau de la réussite ou de l'échec de la culture d'une manière descriptive par la simple observation ainsi que par la mesure de rendement.

Nous avons ainsi étudié la plante sous trois conditions d'ensoleillement différentes : mis ensoleiller (bassin1), mis ensoleiller avec absence des nutriments (bassin 2), ensoleiller (bassin 3) et ombragée (bassin 4). Chaque bassin nécessitait un apport d'eau quotidienne et un nettoyage régulier pour éliminer les impuretés.

Les résultats montrent que l'Azolla s'est développée de manière remarquable dans un environnement offrant un ensoleillement modéré et un apport équilibré en nutriments (mélange de terreau et de purin de bouse de vache). Elle a atteint un rendement de 109 grammes par mètre carré par jour, avec une coloration et un enracinement sains. Le deuxième bassin, sans terreau, s'est révélé moins productif avec un rendement 95 g par jour, ni l'exposition excessive au soleil (bassin 3) ni son absence totale (bassin 4) n'ont permis à l'Azolla de prospérer. L'excès de lumière a provoqué des brûlures, tandis que l'obscurité totale a entraîné la mort de la plante, malgré des conditions nutritionnelles adéquates. Ces résultats soulignent l'importance d'un ensoleillement équilibré pour la croissance et la reproduction de l'Azolla.

Il est à noter que l'Azolla est une source alternative aux aliments de volaille que nous recommandons fortement dans l'alimentation animale en raison de sa forte teneur en protéines, sa multiplication croissante et sa méthode de culture moins coûteuse, moins exigeante en eau et en surface de culture comparée aux autres matières premières telle que le tourteau de soja. La culture de cette fougère soutient ainsi la notion de durabilité.

## Les références bibliographiques

## LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anhita, K. C., Rajeshwari, Y. B., Prabhu, T. M., Vivek Patil, M., Shilpa Shree, J., & Anupkumar, P. K. (2016). Effect of supplementary feeding of azolla on growth performance of broiler rabbits. *ARPJ Journal of Agricultural and Biological Science*, 11, 30-36.
2. Ashton P.J., Walmsley R.D., 1976. The aquatic fern Azolla and its Anabaena symbiot. *Endeavour* 35, (124):39-43.
3. Basak, B., Pramanik, M. A. H., Rahman, M. S., Tarafdar, S. U., & Roy, B. C. (2002). Azolla (*Azolla pinnata*) as a feed ingredient in broiler ration. *Int. J. Poult. Sci*, 1(1), 29-34.
4. Becking J. H., 1979. Environmental requirements of Azolla for use in tropical rice production, Nitrogen and Rice. International rice Research Institute . Los Banos, Laguna, Philippines, 345-374
5. Bergh, Missouri ; Razdan, A. ; Aman, P., 1999. Influence nutritionnelle des régimes alimentaires des poulets de chair à base d'orges couvertes normales, cireuses et riches en amylose avec ou sans supplémentation enzymatique. *Animé. Nourrir Sci. Technol.*, 78 (3-4) : 215-226.
6. Berk, A.; Bramm, A.; Böhm, H.; Aulrich, K.; Rühl, G. , 2008. The nutritive value of lupins in sole cropping systems and mixed intercropping with spring cereals for grain production. In: Palta, J. A.; Berger, J. D. (Eds.), *Lupins for Health and Wealth*, Proc. 12th Int. Lupin Conf., Fremantle, Western Australia, Int. Lupin Assoc., Canterbury, New Zealand: 66-70
7. Biasato, I. ; Gasco, L. ; De Marco, M. ; Renna, M. ; Rotolo, L. ; Dabbou, S. ; Capucchio, M. T. ; Biasibetti, E. ; Tarantola, M. ; Bianchi, C. ; Cavallarin, L. ; Gai, F. ; Pozzo, L. ; Dezzutto, D. ; Bergagn, 2017. Effects of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) inclusion in diets for female broiler chickens: implications for animal health and gut histology. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 234: 253-263
8. Blair R., 2011. *Nutrition et alimentation des bovins biologiques*. CAB Livres, CABI. 293 p
9. Calvert H. E., Pence M. K., Peters G. A., 1985. Ultrastructural ontogeny of leaf cavity trichomes in Azolla implies a functional role in metabolite exchange. *Protoplasma*, 129(1), 10-27.
10. Carrapiço, F. 2010. Azolla as a superorganism. Its implication in the symbiotic studies. In "Stress Biology". Seckbach, J. and Grube, M. (Eds). Published by Springer.
11. Castell, A. G. ; Guenter, W. ; Igbasan, F. A., 1996. Nutritive value of peas for nonruminant diets. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 60: 209-227

12. Chakrabarti, T., Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S. N., & Mandal, L. N. (2018). Assessment of Azolla as biofertilizer for rice cultivation in saline-alkaline soils of Sundarbans. *Journal of Environmental Biology*, 39(5), 909-916.
13. Chen, L., Wang, S., & Liu, H. (2019). *Evaluation of Dried Azolla as Feed for Broiler Chickens*. *Poultry Science*, 98(5), 2345-2351.
14. Chevalier A., 1926. La culture des Azolla pour la nourriture des animaux de basse-cour et comme engrais vert pour les rizières. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 6(58) :356-360.
15. Da Silva, M. E. J., Mathe, L. O. J., Van Rooyen, I. L., Brink, H. G., & Nicol, W. (2022). Optimal growth conditions for *Azolla pinnata* R. Brown: Impacts of light intensity, nitrogen addition, pH control, and humidity. *Plants*, 11(8), 1048.
16. Devi Lal D., Rayapati K., Shivam M., 2021. Cultivation of Azolla- A Proteinaceous Fodder for Livestock. *Agriculture and environment*, (2) :50-52.
17. Dixon, R. M. ; Hosking, B. J., 1992. Nutritional value of grain legumes for ruminants. *Nutr. Res. Rev.*, 5: 19-43
18. Duranti, M. ; Gius, C., 1997. Legume seeds: protein content and nutritional value. *Field Crops Res.*, 53 (1/3): 31-45
19. Feillet, P. (2000). Le grain de blé: composition et utilisation. Editions Quae
20. Gatel, F; Grosjean, F., 1990. Composition and nutritive value of peas for pigs: A review of European results. *Livest. Prod. Sci.*, 26 (3): 155-175
21. Gaylord, TG ; Brouettes, FT ; Rawles, SD, 2010. Disponibilité apparente des acides aminés provenant des aliments pour animaux dans les régimes extrudés pour la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss* . *Aquaculture. Nutr.*, 16 (4) : 400-406.
22. Gonzalez, L. E., & Bashan, Y. (2000). Increased growth of the microalga *Chlorella vulgaris* when coimmobilized and cocultured in alginate beads with the plant-growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(4), 1527-1531.
23. Hasan, M. ; Chakrabarti, R., 2009. Utilisation d'algues et de macrophytes aquatiques comme aliments dans l'aquaculture à petite échelle : une revue. Document technique de la FAO sur les pêches et l'aquaculture, 531. FAO, Rome, Italie
24. Heuzé V., Tran G., Lebas F., 2017. Maïs grain. *Feedipedia*, un programme INRAE, CIRAD, AFZ.
25. Heuzé, V., Tran, G., & Lebas, F. (2015). Sorghum grain. *Feedipedia*, a program by INRA, CIRAD, AFZ and FAO.
26. Heuzé, V., Tran, G., Nozière, P., Noblet, J., Renaudeau, D., Lessire, M., & Lebas, F. (2016). Barley grain. *Feed. a Program. by INRA, CIRAD, AFZ FAO*.
27. Hills L.V. & B. Gopal., 1967. *Azolla primaeva* and its phylogenetic significance. *Can. Jour. Bot.* (45) :1179-1191.  
Van Hove, C. ; Lejeune, A., 1996. Does Azolla have any future in agriculture?. In: *Biological Nitrogen Fixation Associated with Rice Production* (Rahman M, Podder AK, Van Hove C, Begum ZNT, Heulin T and Hartmann A eds.) pp. 83-94. Kluwer Academic Publishers
28. Hua, C., Shao, H., Chu, L., & Hua, X. (2019). Effect of temperature and humidity on *Azolla* growth. *Aquaculture International*, 27(5), 1459-1471.
29. Ige, D. V., Kiarie, E., Akinremi, O. O., Rosnagel, B., Flatten, D., & Nyachoti, C. M. (2010). Energy and nutrient digestibility in a hullless low-phytate phosphorus barley fed to finishing pigs. *Canadian journal of animal science*, 90(3), 393-399.

30. Kanamoto, H., Yamashita, A., Asano, T., Tsuji, H., & Okada, K. (2003). Osmotic stress tolerance of transgenic *Azolla* expressing an *Escherichia coli* catalase gene. *Plant Science*, 165(5), 1205-1212.
31. Kathirvelan C., Banupriya S., Purushothaman M. R., 2015. *Azolla*-an alternate and sustainable feed for livestock. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 4(4):1153-1157.
32. Klasing, K. C. ; Thacker, P. ; Lopez, M. A. ; Calvert, C. C., 2000. Increasing the calcium content of mealworms (*Tenebrio molitor*) to improve their nutritional value for bone mineralization of growing chicks. *J. Zoo Wildlife Med.*, 31 (4): 512-517
33. Konar R.N. & Kapoor R.K., 1974. Anatomical studies of *Azolla pinnata*. *Phytomorphology*, (22): 211-223.
34. Kramer, K. U., Green, P. S., & Kubitzki, K. (1990). The families and genera of vascular plants. V. 1: Pteridophytes and gymnosperms.
35. Li, Q., Zhang, Z., & Wang, Y. (2017). *Silage fermentation and its potential application in improving the nutritive value of Azolla (Azolla caroliniana) for ruminants*. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), 57.
36. Lumpkin T.A. Plucknett D.L. 1982. *Azolla* as a Green Manure: Use Management in crops production. Westview Tropical Agriculture. Boulder, Colorado.
37. Lumpkin, T. A., & Plucknett, D. L. (1982). *Azolla*: botany, physiology, and use as a green manure. *Economic Botany*, 36(3), 295-311.
38. Luven P ;1993 : « le maïs dans la nutrition du poulet » Rome-Italie.
39. Mandal, S. M., Banerjee, M., Suresh, K. K., Kumar, K., & Mukherjee, A. (2013). Influence of different salinity levels on the growth and productivity of *Azolla*. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 3(1), 74-79.
40. Mandal, S. M., Banerjee, M., Suresh, K. K., Kumar, K., & Mukherjee, A. (2013). Influence of different salinity levels on the growth and productivity of *Azolla*. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 3(1), 74-79.
41. Martini, A. ; Migliorini, P. ; Lorenzini, G. ; Lotti, C. ; Belliere, S. R. ; Squilloni, S. ; Riccio, F. ; Giorgetti, A. ; Casini, M., 2008. Production of grain legume crops alternative to soya bean and their use in organic dairy production. In: Neuhoff et al., *Cultivating the future based on science*, Vol. 2. Proc. 2nd Sci. Conf. Int. Soc. Organic Agriculture Research (ISO FAR), 16th IFOAM Organic World Conference, Modena, Italy, 18-20 June, 2008: 156-159
42. Mendieta-Araica, B. ; Spordly, E. ; Reyes-Sánchez, N. ; Norell, L. ; Spordly, R., 2009. Silage quality when *Moringa oleifera* is ensiled in mixtures with Elephant grass, sugar cane and molasses. *Grass and Forage Sci.*, 64 (4): 364–373
43. Mogensen, H. L. (1981). The Biology of *Azolla*. *Botanical Review*, 47(2), 155-195.
44. Nelson, P.; Hawthorne, W. A., 2000. Development of lupins as a crop in Australia. In: Knight R. (ed.), *Linking Research and Marketing Opportunities for Pulses in the 21st Century*, Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture, Springer, Dordrecht, 34
45. OCDE, 2004. Document de consensus sur les considérations de composition pour les nouvelles variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.) : nutriments et antinutriments clés pour l'alimentation humaine et animale. Série sur la sécurité des nouveaux aliments destinés à l'alimentation humaine et animale, n° 12, réunion conjointe du comité des produits chimiques et du groupe de travail sur les produits chimiques, les pesticides et la biotechnologie, OCDE.
46. Peters G.A., Calvert H.E., Kaplan D., Ito O., Toia, R., 1982. The *Azolla*-*Anabaena* symbiosis: morphology, physiology and use. *Israel J. Botany*, (31) : 305-323.
47. Prasad, R. M. V., Jagadeeswara Rao, S., Jayalaxmi, P., & Kumar, D. S. (2014). A study on the nutritive value of *Azolla pinnata*.

48. Price, M. L., 2007. The Marango tree. Nota Tecnica, ECHO, 17391 Durrance road North fort Myers, FL 33917, USA
49. Rahagarison K., 2005. Etude bibliographique de l'Azolla ou la « ramilamina » plante fertilisatrice d'Azote (N<sub>2</sub>). Mada revues, 287-29 p.
50. Rai, V., Sharma, N. K., & Rai, A. K. (2006). Growth and cellular ion content of a salt-sensitive symbiotic system *Azolla pinnata*–*Anabaena azollae* under NaCl stress. *Journal of Plant Physiology*, 9(163), 937-944.
51. Ramos-Elorduy, J. ; Avila Gonzalez, E. ; Rocha Hernandez, A. ; Pino, J. M., 2002. Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens. *J. Econ. Entomol.*, 95 (1): 214-220
52. Rao, A. N., Reddy, M. S., & Kumar, T. G. (2002). Effect of environmental factors on growth, yield and quality of *Azolla*. *Plant Archives*, 2(1), 33-38.
53. Refaey, M. M., Mehrim, A. I., Zenhom, O. A., Areda, H. A., Ragaza, J. A., & Hassaan, M. S. (2023). Research Article Fresh *Azolla pinnata* as a Complementary Feed for *Oreochromis niloticus*: Growth, Digestive Enzymes, Intestinal Morphology, Physiological Responses, and Flesh Quality.
54. Reyes Sanchez, N., 2004. Marango: Cultivation and utilization in animal feeding. Guia tecnica n°5, Universidad Nacional Agraria, Por un desarrollo agrario integral y sostenible, 24 p.
55. Rusoff, LL ; Blakeney, EW Jr. ; Culley, DD Jr., 1980. Les azolla ( famille des Lemnaceae ) : une source potentielle de protéines et d'acides aminés. *J. Agric. Chimie alimentaire*, 28 (4) : 848-850
56. Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables INRA-AFZ de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : 2ème édition. ISBN 2738011586, pp.306.
57. Schilperoord, P. (2018). Plantes cultivées en Suisse—cinq nouvelles monographies. *Recherche agronomique suisse*, 9(1), 26-29.
58. Schumacher, H.; Paulsen, H. M.; Gau, A. E.; Link, W.; Jürgens, H. U.; Sass, O.; Dieterich, R., 2011. Seed protein amino acid composition of important local grain legumes *Lupinus angustifolius* L., *Lupinus luteus* L., *Pisum sativum* L. and *Vicia faba* L.. *Plant breeding*, 130 (2): 156-164
59. Sculthorpe, C. D. (1967). *The Biology of Aquatic Vascular Plants*. St. Martin's Press.
60. Siddhuraju, P. ; Becker, K., 2003. Antioxidant properties of various solvent extracts of total phenolic constituents from three different agroclimatic origins of drumstick tree (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. *J. Agric. Food Chem.*, 51 (8): 2144-2155
61. Singh, P. K., & Reddy, C. R. (2011). Impact of *Azolla* on aquatic biodiversity and biogeochemistry in rice fields. In *Azolla Biotechnology* (pp. 95-107). Springer, Dordrecht
62. Smith, J., & Jones, A. (2022). *Azolla: A Sustainable Green Manure for Rice Fields*. *Journal of Agricultural Science*, 78(2), 123-135.
63. Sood, A., Uniyal, P. L., & Joshi, H. (2019). *Azolla: An Anabaena azollae* symbiosis. In *The Wetland Book: II: Distribution, Description, and Conservation* (pp. 1-11). Springer, Dordrecht.
64. Svihus, B. ; Uhlen, AK ; Harstad, OM, 2005. Effet de la structure des granules d'amidon, des composants associés et de la transformation sur la valeur nutritive de l'amidon des céréales : une revue. *Animé. Nourrir Sci. Technol.*, 122 (3-4) : 303-320.

65. Swain, B. K., Naik, P. K., Sahoo, S. K., Mishra, S. K., & Kumar, D. (2018). Effect of feeding Azolla (*Azolla pinnata*) on the performance of White Pekin laying ducks.
66. van Barneveld, R. J., 1999. Understanding the nutritional chemistry of lupin (*Lupinus* spp.) seed to improve livestock production efficiency. *Nutr. Res. Rev.*, 12 (2): 203-230
67. Van Hove C., 1989. Azolla and its multiples uses with emphasis on Africa. Rome, Italy: FAO
68. Verma, G., Prakriti, K. A., Babu, S., Singh, R., Gudade, B. A., Bhatt, M., ... & Yadav, N. C. (2022). Implications and future prospects of Azolla as a low-cost organic input in agriculture. *Agricolation*, 2.
69. Verma, G., Prakriti, K. A., Babu, S., Singh, R., Gudade, B. A., Bhatt, M., ... & Yadav, N. C. (2022). Implications and future prospects of Azolla as a low-cost organic input in agriculture. *Agricolation*, 2.
70. Wang, C., Li, P., & Zhang, X. (2018). Nutritional Composition and Potential Feed Value of Granulated Azolla. *Aquaculture*, 223(4), 567-578.
71. Wang, C., Li, P., & Zhang, X. (2018). Nutritional Composition and Potential Feed Value of Granulated Azolla. *Aquaculture*, 223(4), 567-578.
72. Yang, R. Y. ; Tsou, S. C. S. ; Lee, T. C. ; Chang, L-C. ; Kuo, G. ; Lai, P-Y., 2006. Moringa, a novel plant rich in antioxidants, bioavailable iron, and nutrients. *Am. Chem. Soc. Symp. Series*, 925 (17): 224-239
73. Zijlstra R.T., De Lange C.F.M., Patience J., 1999. Valeur nutritionnelle du blé pour le porc en croissance : composition chimique et teneur énergétique digestible. *Boîte. J. Anim. Sci.*, 79(2): 187-194.
74. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377840198002818> consulter le 06/04/2024
75. <https://www.feedipedia.org/content/blue-lupin-lupinus-angustifolius-crop-poland> consulter le 12/06/2024
76. <https://www.feedipedia.org/node/227> consulter le 10/04/2024
77. <https://www.feedipedia.org/content/blue-lupin-lupinus-angustifolius-inflorescence-spain> consulter le 24/05/2024
78. [https://www.researchgate.net/figure/Transversal-section-of-an-Azolla-leaf-Adapted-from-Sevillano-et-al-1984-thtransfer\\_fig1\\_284652532](https://www.researchgate.net/figure/Transversal-section-of-an-Azolla-leaf-Adapted-from-Sevillano-et-al-1984-thtransfer_fig1_284652532) consulter le 18/05/2024
79. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842909700021X?via%3Dihub> consulter le 11/06/2024
80. [https://www.researchgate.net/figure/Life-cycle-of-Azolla-showing-various-developmental-stages-The-sporophyte-had-rhizome\\_fig2\\_351690982](https://www.researchgate.net/figure/Life-cycle-of-Azolla-showing-various-developmental-stages-The-sporophyte-had-rhizome_fig2_351690982) consulter le 13/05/2024
81. [https://www.memoireonline.com/02/13/7050/m\\_Essai-comparatif-de-la-qualite-fertilisante-d-Azolla-Cristata-et-d-autres-fumuresfiente-lisier-et2.html](https://www.memoireonline.com/02/13/7050/m_Essai-comparatif-de-la-qualite-fertilisante-d-Azolla-Cristata-et-d-autres-fumuresfiente-lisier-et2.html) consulter le 09/04/2024
82. <https://earth.google.com/web/search/Remchi/@35.11602375,-1.44048841,80.25562361a,824.07528056d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCZ9IQE6WMzRAEZ1IQE6WMzTAGVF7CT6NWkRAIfF3k1Qif07AOgMKATA> consulter le 07/04/2024
83. <https://www.feedipedia.org/search/node/bl%C3%A9> consulter le 1/04/2024
84. <https://www.oecd.org/> consulter le 21/04/2024
85. <https://www.feedipedia.org/node/227> consulter le 15/05/2024

## Résumé

*L'azolla pinnata* une fougère aquatique. Grâce à son coût réduit et son riche apport en protéine, en l'occurrence avec l'appauvrissement en plantes fourragères. Dans nos régions, elle est récemment utilisée comme aliment de la volaille.

Le présent travail, vise simplement la mise en culture de l'azolla. Sur des bassins installés dans différent gradient d'ensoleillement : ensoleillé, mi-ensoleillé, ombragée, on a enregistré des observations de couleurs, de morphologie ainsi que de rendements indiquant l'échec ou la réussite de la culture. Nous avons installé la culture en mois de juillet 2024 et durant trois semaines.

Les meilleurs résultats été celle de la culture en bassin mi-ensoleiller avec un apport des éléments nutritives qui a enregistré une moyenne de rendement de 109 gr/m<sup>2</sup>/jour. Avec une couleur vive, témoignant une bonne santé de la culture. Les cultures des autres bassins ont échoué.

**Mots clés :** *Azolla pinnata*, mise en culture, ensoleillement, observations morphologiques, rendement, *Anabaina-azolla*

## Abstract

As part of our study, we assessed the impact of various factors on the growth of *Azolla pinnata* over a 21-day period, monitoring the health of the plant, its roots, and the water under different climatic conditions and nutrient levels. We used two ponds: one exposed to sunlight and the other in complete shade. The most promising results were obtained in a temperate environment, where *Azolla pinnata* was grown in fresh water enriched with a cow dung bag and compost (pond 1, medium 1). This combination achieved excellent plant adaptation, yielding approximately 406 grams per day on a 4-square-meter area. The harvest was directly fed to chickens without drying, demonstrating *Azolla pinnata's* potential as a protein source for animal feed. Although the second pond showed lower productivity in terms of density, the third and fourth ponds were completely unproductive, with the plants dying. This study highlights *Azolla pinnata's* potential to reduce production costs and promote more sustainable agriculture, especially when used as a supplement to other animal feeds.

**Key words:** *Azolla pinnata*, Favorable environment, Daily observations, Plant health, Fresh water, Cow dung, Compost, Yield, Chickens, Proteins

## تلخيص

في إطار دراستنا، قمنا بتقييم تأثير عوامل مختلفة على *Azolla pinnata* على مدى 21 يوماً، من خلال متابعة يومية لصحة النبات وجذوره والمياه، تحت ظروف مناخية متنوعة وبمستويات مختلفة من العناصر الغذائية. استخدمنا حوضين: أحدهما معرض لأشعة الشمس، والآخر في ظل كامل. كانت النتائج الأكثر واعدة في بيئة معتدلة، حيث نمت الأزاليا بيناتاً في مياه عذبة مضاف إليها كيس من روث البقر وسماد عضوي (حوض 1، وسط 1). هذه التركيبة سمحت بتحقيق تكيف ممتاز للنبات، مع إنتاج حوالي 406 جرامات يومياً على مساحة 4 أمتار مربعة. تم تقديم المحصول مباشرة للدواجن دون تجفيفه، مما يبرهن على أهمية *Azolla pinnata* كمصدر للبروتينات في تغذية الحيوانات. على الرغم من أن الحوض الثاني أظهر إنتاجية أقل من حيث الكثافة، فإن الأحواض الثالثة والرابعة كانت غير مثمرة تماماً، حيث ماتت النباتات فيها. تسلط هذه الدراسة الضوء على إمكانيات *Azolla pinnata* في تقليل تكاليف الإنتاج وتعزيز الزراعة المستدامة، خاصة عند استخدامها كمكمل للأطعمة الأخرى للحيوانات.

**كلمات مفتاحية:** الأزاليا بيناتاً (*Azolla pinnata*)، بيئة مناسبة، ملاحظات يومية، صحة النبات، مياه عذبة، روث البقر، سماد عضوي، إنتاجية، دجاج، بروتينات.