
Etude des principaux facteurs de la production de l'armoise annuelle (*Artemisia Annua* L.) sur le domaine de l'organisation "Le Relais - Sénégal" à Yendane (région de Thies, Sénégal) : Effet de la densité et de la fertilisation

Auteur : Sougneux, Audrey

Promoteur(s) : Mergeai, Guy

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3005>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être
réalisé qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de
Gembloux Agro-Bio Tech

REMERCIEMENTS

J'aimerais avant tout remercier mon promoteur, Guy Mergeai, de m'avoir permis de réaliser ce TFE qui a été une expérience unique pour moi au Sénégal. Merci également d'avoir toujours été disponible et à l'écoute, que ce soit lors de la définition du sujet, du protocole, de sa réalisation et du suivi sur place mais aussi après dans l'analyse des résultats et lors des nombreuses relectures.

Je remercie également « Le Relais - Sénégal » de m'avoir permis de réaliser ce travail sans jamais manquer de moyen. Mes remerciements vont tout particulièrement à Amhad Reza Hosseini et Virginie Vyvermans. Merci beaucoup pour l'accueil si chaleureux dès le premier jour et les échanges très intéressants par la suite. Ils m'ont permis d'en apprendre et comprendre beaucoup sur le pays et la mise en place de projets.

Un énorme merci à Pierre Van Damme qui m'a encadré et aidé depuis la création du protocole jusqu'à la relecture du travail final. Merci d'avoir inlassablement répondu à mes questions et d'avoir si bien mis en place et encadré mes essais. Je n'aurais jamais pu gérer seule leur réalisation en champ comme il l'a fait l'année passée. Sa présence en tant que chef maraîcher et maître de stage m'a bien plus d'une fois soulagée, tant du point de vue humain et pratique que théorique.

Je tiens à remercier le responsable administratif du projet maraîcher, Babacar, et chaque ouvrier ayant pris part consciencieusement à ce travail : Martin, Edith, Dominique, Frédéric, Badou, Gaston, Raymonds, David, Robert, Assane, Sopey, Babacar, Sidy, Etienne et Casimir. Je vous remercie sincèrement à la fois pour votre aide dans la réalisation de ce projet et pour tout l'apprentissage personnel que vous m'avez apporté. Merci pour votre générosité débordante, les moments de partages et votre bonne humeur qui ont ensoleillé mon quotidien.

Merci à Pierre, Babacar et Ndeye pour leur accueil à Tivaouane. Particulièrement de vous être montrés si patients et compréhensifs envers moi lors de mes nombreux faux pas culturels. Merci aussi à Camille pour son accueil à Dakar. Les moments partagés avec vous ont contribué en grande partie à rendre ce voyage inoubliable. Merci de m'avoir si vite intégrée et mise à l'aise sur place.

Merci à l'accueil de chaque Sénégalais que je ne cite pas pour avoir rendu ce voyage si enrichissant. Je n'oublierai pas tout ce que m'a apporté le pays de la Téranga.

Ensuite, j'aimerais également remercier mes amis Camille, Louise, William, Aurore, Loubna, Bastien et Arno de m'avoir poussé à croire en mon travail et suivre cette furieuse envie de voyager.

Je tiens aussi à remercier ma famille. Tout particulièrement mes frères, ma marraine et ma tante pour leurs encouragements et mes parents pour m'avoir supporté à la maison durant toute la rédaction de ce mémoire.

Enfin, merci à Margot pour son aide et sa bienveillance dans les moments de doutes et à Laetitia d'avoir été mon binôme et ma confidente tout au long de cette aventure.

Le voyage réalisé dans le cadre de ce travail a été rendu possible grâce au soutien financier de l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique (ARES : www.ares-ac.be).

RÉSUMÉ

Trois essais ont été réalisés avec la variété « Apollo » (Mediplant) sur le domaine horticole de l'organisation « Le Relais - Sénégal » à Yendane-Terokh durant la saison sèche 2016-2017 afin d'optimiser la production de feuilles et de tiges d'armoise annuelle (*Artemisia annua* L.).

Tous les essais ont été réalisés sous irrigation par aspersion ; ce qui a permis un gain de 50 % des récoltes par rapport aux rendements obtenus lors de la campagne 2015-2016 sous irrigation goutte à goutte.

Le premier essai visait à déterminer la densité de plantation la mieux adaptée en pratiquant deux coupes, rythme identifié comme le plus performant en 2016. La pratique d'une coupe intermédiaire supplémentaire a permis d'augmenter de 25 % la production par rapport à celle obtenue avec une seule coupe tout en conservant une proportion de feuilles et de tiges intéressante. La densité de 20 000 plantes/ha s'est démarquée des autres par sa bonne production à l'hectare et son prix de revient le plus bas. De plus, l'application de cette densité, selon un dispositif spatial de 1 m x 0,5 m, s'est traduite par une réduction des attaques du champignon pathogène du genre *Rhizoctonia* apparus lors des essais.

Le deuxième essai visait à déterminer la formule et la dose de fertilisation minérale la mieux adaptée aux conditions du milieu en testant l'effet d'une soustraction des apports d'azote, de potasse et de phosphore par rapport à une fumure complète. Les résultats obtenus laissent supposer l'existence d'une carence en potassium dans les sols de l'exploitation et l'absence d'effet synergique lié à la présence de soufre chez certaines fumures appliquées. L'azote reste l'élément déterminant pour favoriser la croissance et le rendement des plantes à l'hectare. Son apport à une dose supérieure à 29 kg N/ha permet un gain de rendement qui explique l'intérêt du traitement minéral optimum actuel, constitué de 47,3 kg N/ha, 4,2 kg P₂O₅/ha et 8,3 kg K₂O/ha. Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les traitements organiques et cette fertilisation minérale de référence.

Le troisième essai visait à déterminer la fertilisation organique la mieux adaptée en tenant compte de son coût et de sa disponibilité dans la zone. Aucune différence significative n'a été mise en évidence en termes de rendement entre les 6 modalités de fertilisation organique à base de fientes de volaille compostées ou de déjections d'âne-cheval compostées comparées. La fumure la plus rentable consistait à apporter 3 poignées de compost de déjections d'âne-cheval 30, 60 et 90 jours après la transplantation.

Du point de vue pratique, l'application d'une densité de 20 000 plantes/ha, sous irrigation par aspersion, avec réalisation d'une coupe intermédiaire environ 3 mois après la transplantation et l'apport de 47,3 kg N/ha, 4,2 kg P₂O₅/ha et 8,3 kg K₂O/ha constitue l'itinéraire technique le plus performant identifié jusqu'à présent dans les conditions du site étudié pour une culture d'armoise annuelle en saison sèche (transplantation en décembre - récolte finale fin mai). Cet itinéraire permet d'atteindre un rendement en matière première utile pour la production d'infusions et de gélules d'environ 8 tonnes/ha, et un prix de revient d'environ 0,70 EUR (460 FCFA) par kg de mélange de 50 % de feuilles et de 50 % de tiges séchées.

ABSTRACT

Three tests were conducted with the « Apollo » variety of Mediplant company during the dry season of 2016-2017 in the horticultural domain of « Le Relais - Sénégal » in Yendane-Terokh in order to optimize leaf and stem production of sweet wormwood (*Artemisia annua* L.).

All tests were conducted under sprinkle irrigation; allowing a 50 % gain of yield harvest in comparison with the 2016 yield under drip irrigation.

The first test aimed to determine the most suitable plant density with two cuts (most efficient cutting frequency identified in 2016). An additional intermediary cut increased production by 25 % regarding the single cut production, while remaining at an interesting proportion of leaves and stems. The 20 000 plants/ha density distinguished itself from the others by a better production per hectare and by the lowest cost price. Moreover, this density with the spatial system of 1 m x 0,5 m, induced a decrease of *Rhizoctonia* genus pathogenic fungus which appeared during the trial.

The second test aimed to determine the best mineral fertilisation formula and dose adapted to local conditions by testing the effect nitrogen, potassium and phosphorus subtraction from the complete fertilizer. Results put in evidence a potassium deficiency in the farm soil and a lack of synergic effect linked to the presence of sulphur in some fertilizer applied. Nitrogen remains the decisive element for plant growth and yield per hectare. An input greater than 29 kg N/ha improved yield and explains the interest for the actual optimal mineral treatment consisting in 47,3 kg N/ha, 4,2 kg P₂O₅/ha et 8,3 kg K₂O/ha. No significant differences were observed between organic treatments and the mineral control fertilizer.

The third test aimed to determine the most adapted organic fertilization taking into account its cost and availability in the area. No significant differences were observed in terms of yield between the 6 modalities of poultry or cow-horse manure based organic fertilizer. The cost-effective solution was to input 3 handfuls of cow-horse compost 30, 60 and 90 days after transplantation.

From a practical point of view, the 20 000 plant/ha density option, under sprinkler irrigation, with the additional intermediary cut approximately 3 months after transplantation and the input of 47,3 kg N/ha, 4,2 kg P₂O₅/ha et 8,3 kg K₂O/ha was identified as the best crop management technique for the moment being for sweet wormwood production in dry season (transplantation in December – final harvest in the end of May). This technological itinerary enabled a raw material yield for infusion and capsule production of about 8 tons/ha, and a cost price around 0,70 EUR (460 FCFA) per kg with a 50%-50% mix ratio of dried leaves and stems.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	1
2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	3
2.1. Sénégal.....	3
2.2. <i>Artemisia annua</i> L.	5
2.2.1. Taxonomie	5
2.2.2. Répartition géographique.....	5
2.2.3. Description botanique	5
2.2.4. Exigences écologiques	6
2.2.5. Utilisations	6
2.3. Le Relais - Sénégal	8
2.4. État des connaissances concernant la culture d' <i>Artemisia annua</i> L. au Sénégal.....	10
2.4.1. Variété.....	10
2.4.2. Période culturale.....	11
2.4.3. Semis	11
2.4.4. Irrigation.....	11
2.4.5. Désherbage.....	12
2.4.6. Densité.....	12
2.4.7. Fertilisation	13
2.4.8. Bioagresseurs	16
2.4.9. Récolte	16
3. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	18
3.1. Introduction.....	18
3.2. Localisation des parcelles expérimentales	20
3.3. Conditions météorologiques.....	21
3.4. Analyse pédologique.....	22
3.5. Étude de l'effet de la densité de plantation	23
3.5.1. Objectif.....	23
3.5.2. Matériel végétal	23
3.5.3. Dispositif expérimental	23
3.5.4. Itinéraire technique de la culture	25
3.5.5. Opérations post-récolte	27
3.5.6. Observations	27
3.6. Étude de l'effet de la fertilisation minérale	29
3.6.1. Objectif.....	29

3.6.2.	Matériel végétal	29
3.6.3.	Dispositif expérimental	29
3.6.4.	Itinéraire technique de la culture	31
3.6.5.	Opérations post-récolte	32
3.6.6.	Observations	32
3.7.	Étude de l'effet de la fertilisation organique	33
3.7.1.	Objectif.....	33
3.7.2.	Matériel végétal	33
3.7.3.	Dispositif expérimental	33
3.7.4.	Itinéraire technique de la culture	35
3.7.6.	Observations	36
3.8.	Analyse économique de la culture d'<i>Artemisia annua</i> L. sur un ha	36
3.9.	Suivi des bioagresseurs	36
3.9.1.	Introduction	36
3.9.2.	Observations	36
4.	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	37
4.1.	Étude de l'effet de la densité	37
4.1.1.	Évolution des dimensions des plantes	37
4.1.2.	Production de biomasse	39
4.1.3.	Discussion	40
4.2.	Étude de l'effet de la fertilisation minérale.....	42
4.2.1.	Évolution des dimensions des plantes	42
4.2.2.	Production de biomasse	44
4.2.3.	Discussion	45
4.3.	Étude de l'effet de la fertilisation organique	48
4.3.1.	Évolution des dimensions des plantes	48
4.3.2.	Production de biomasse	50
4.3.3.	Discussion	52
4.4.	Détermination du prix de revient de la matière première permettant de produire un kg de tisane d'<i>Artemisia annua</i> L.	53
4.4.1.	Étude de l'effet de la densité	53
4.4.2.	Étude de l'effet de la fertilisation minérale	54
4.4.3.	Étude de l'effet de la fertilisation organique	55
4.5.	Suivi des bioagresseurs	57
4.5.1.	Lapins	57
4.5.2.	Chèvres	58
4.5.3.	Champignon pathogène	58
4.5.4.	Termites.....	60
4.5.5.	Cochenilles	60
4.5.6.	Montée en fleurs	61
4.5.7.	Plantes atteintes de malformation	61
4.5.8.	Incidence des problèmes constatés et mesures de correction	62

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	64
6. BIBLIOGRAPHIE	67
7. ANNEXES	72
7.1. Tableaux des moyennes et des analyses statistiques.....	72
7.2. Analyse des composts.....	85
7.3. Calcul du prix de revient	Erreur ! Signet non défini.87

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Carte du Sénégal (FAO-AQUASTAT, 2005)	3
Figure 2 : <i>Artemisia annua</i> L. sur les parcelles expérimentales de Yendane (Sougné A., 2017)	5
Figure 3 : Vue satellitaire des sites de « Le Relais - Sénégal » (Source : Google Earth)	8
Figure 4 : Logo de la marque « Lion vert » (source : https://www.facebook.com/LeLionVertSenegal/)	9
Figure 5: Vue satellitaire du site de Yendane (Source : Google Earth)	20
Figure 6 : Diagramme ombrothermique moyen du département de Tivaouane (climat-data.org)	21
Figure 7 : Dispositif spatial initial en carré latin transformé en blocs aléatoires complets de l'étude de l'effet de la densité de plantation	24
Figure 8 : Levée des plantes dans la serre (Van Damme P., 2017).....	25
Figure 9: Semis des plantes d' <i>Artemisia annua</i> L. (Sougné A., 2017)	25
Figure 10 : Réalisation de la première coupe d' <i>Artemisia annua</i> L. (Sougné A., 2017).....	26
Figure 11 : Systèmes de séchage des feuilles et des tiges, sur bâche noire et table de séchage (Sougné A., 2017).....	27
Figure 12 : Dispositif spatial en blocs aléatoires complets de l'étude de l'effet de la fertilisation minérale.....	29
Figure 13 : Disposition des plantes des essais de fertilisation (Sougné A., 08/03/17)	31
Figure 14 : Désherbage des plantes d' <i>Artemisia annua</i> L. (Van Damme P., 2017)	32
Figure 15 : Parcelle de compostage du site de Yendane (Sougné A., 2017).....	33
Figure 16 : Dispositif spatial en blocs aléatoires complets de l'étude de l'effet de la fertilisation organique.....	34
Figure 17 : Parcelle de l'essai de fertilisation organique après la deuxième application de compost et avant la coupe (Sougné A., 2017)	35
Figure 18 : Coupe à la machette de la récolte d' <i>Artemisia annua</i> L. (Sougné A., 2017).....	35
Figure 19 : Influence de la densité de plantation sur l'évolution de la hauteur moyenne en fonction du temps	37
Figure 20 : Influence de la densité de plantation sur l'évolution du diamètre projeté au sol moyen en fonction du temps	38
Figure 21 : Influence de la fertilisation sur l'évolution de la hauteur moyenne en fonction du temps.....	42
Figure 22 : Influence de la fertilisation sur l'évolution du diamètre projeté au sol moyen en fonction du temps	43
Figure 23 : Influence de la fertilisation sur l'évolution de la hauteur moyenne en fonction du temps.....	48
Figure 24 : Influence de la fertilisation sur l'évolution du diamètre projeté au sol moyen en fonction du temps.	49
Figure 25 : Dégâts de lapins sur <i>Artemisia annua</i> L. (Sougné A., 2017)	57
Figure 26 : Transplant et plante d' <i>Artemisia annua</i> L. atteints par le champignon pathogène (Sougné A., mars 2017).....	58
Figure 27 : Plantes d' <i>Artemisia annua</i> L. atteintes par le champignon pathogène (Sougné A., mai 2017).....	59
Figure 28 : Plante d' <i>Artemisia annua</i> L. à la tige attaquée par les termites (Sougné A., 2017)	60
Figure 29 : Cochenille farineuse sur <i>Artemisia annua</i> L. (Sougné A., 2017)	60
Figure 30 : <i>Dysmicoccus brevipes</i> C. (Buss L., nd., source : http://entomology.ifas.ufl.edu/frank/bromeliadbiota/scalehodes.htm)	60
Figure 31 : <i>Artemisia annua</i> L. en boutons floraux (en haut et à gauche) et en fleurs (en bas et à droite) (Sougné A., mai 2017).....	61
Figure 32 : <i>Artemisia annua</i> L. présentant des malformations (Sougné A., mai 2017)	61

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Texture du sol.....	22
Tableau 2 : Analyse du sol.....	22
Tableau 3 : Distance entre les plantes dans la ligne et entre les lignes des parcelles et nombre de plantes par parcelle élémentaire pour chaque modalité	25
Tableau 4 : Détails d'application d'engrais minéral des différentes modalités	30
Tableau 5 : Nombre de poignées et dose totale de compost appliqués dans les différentes modalités	34
Tableau 6 : Hauteurs moyennes et diamètres projetés au sol moyens mesurés le 24/05/17.....	39
Tableau 7 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la densité de plantation.....	39
Tableau 8 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la densité de plantation.....	39
Tableau 9: Hauteurs moyennes et diamètres projetés au sol moyens mesurés le 11/05/17	44
Tableau 10 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.....	44
Tableau 11 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.	45
Tableau 12 : Hauteurs moyennes et diamètres projetés au sol moyens mesurés le 11/05/17	50
Tableau 13 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.....	50
Tableau 14 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.	51
Tableau 15 : Coûts de production et prix de revient des modalités testées dans l'étude de la densité	53
Tableau 16 : Coûts de production et prix de revient des modalités testées dans l'étude de la fertilisation minérale	54
Tableau 17 : Coûts de production et prix de revient des modalités testées dans l'étude de la fertilisation organique	55
Tableau 18 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la densité de plantation.....	71
Tableau 19 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la densité de plantation.....	71
Tableau 20 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction du type de fertilisation	76
Tableau 21 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction du type de fertilisation	77
Tableau 22 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction du type de fertilisation	81
Tableau 23 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction du type de fertilisation bloc	82

LISTE DES ABREVIATIONS

- AV2 : Analyse de la variance à deux critères de classification
- BAC : Blocs Aléatoires Complets
- C : Traitement « Contrôle » (sans fertilisant)
- ENSA : École Nationale Supérieure d'Agriculture de l'Université de Thiès
- F : Fertilisation
- g : gramme
- ha : hectare
- kg : kilogramme
- m² : mètre carré
- ml : millilitre
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé
- TM : Traitement « Témoin Minéral »
- TO : Traitement « Témoin Organique »

1. INTRODUCTION

Selon les estimations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), le paludisme a tué près de 429 000 personnes dans le monde en 2015. Cette maladie touche principalement les pays d'Afrique (90 % des cas d'infection sur les 212 millions estimés dans le monde en 2015) et engendre de réels impacts sur leur développement social et économique. De plus, beaucoup de populations de *Plasmodium falciparum*, causant 99% des décès, sont devenues résistantes aux médicaments standards à base de quinine, chloroquine, méfloquine ou sulfadoxine-pyriméthamine en Asie et en Afrique (Kumar *et al.*, 2004 ; Brisibe *et al.*, 2012 ; World Health Organization, 2006 ; World Health Organization, 2016).

Depuis 2001, le traitement le plus efficace recommandé par l'OMS est une polythérapie à base d'artémisinine. Cette molécule présentant une très faible toxicité a montré son efficacité mais sa synthèse chimique n'était alors pas viable économiquement. Elle est donc extraite d'*Artemisia annua* L., une plante herbacée annuelle d'origine chinoise (Aftab *et al.*, 2014).

La production d'artémisinine n'étant pas suffisante pour répondre à la demande mondiale qui ne cessait d'augmenter et sa commercialisation à un prix élevé par la Chine ne permettant pas de rendre son traitement accessible aux populations défavorisées, des filières de production se sont mises en place au début des années 2000, d'abord au Vietnam, puis en Afrique de l'Est (Blanc *et al.*, 2008).

Des études tendent à prouver que la consommation de la plante entière, sous forme de tisanes ou de gélules notamment, serait tout aussi efficace contre le paludisme que les médicaments contenant de l'artémisinine (Willcox *et al.*, 2004 ; Zime-Diawara *et al.*, 2015 ; Elfawal *et al.*, 2015 ; Daddy *et al.*, 2017). Cette consommation traditionnelle constitue un grand espoir pour permettre aux populations les plus défavorisées d'accéder à un traitement curatif antipaludique à la fois efficace et bon marché.

Artemisia annua L. pousse facilement en climat tempéré et à haute altitude sous les tropiques (Brisibe *et al.*, 2012). Elle est par contre difficile à produire en conditions tropicales de basse altitude.

Dans le but de sélectionner une variété performante et de mettre au point un itinéraire technique adaptés aux conditions de l'ouest du Sénégal, des essais sont réalisés depuis 2012 dans la région de Thiès par l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Thiès en collaboration avec le laboratoire d'Agroécologie tropicale et horticulture de Gembloux Agro-Bio Tech (Liège-Université) (Dewandeleer 2012, Goethals 2013, Martinez 2015). Depuis la campagne 2014-2015, ces travaux impliquent également l'organisation à finalité sociale « Le Relais - Sénégal » (Van Damme 2016) qui souhaite promouvoir l'utilisation traditionnelle de l'armoise annuelle pour lutter contre le paludisme et diversifier les productions réalisées au niveau de son domaine horticole de Yendane-Terokh.

Le présent travail constitue la poursuite des essais réalisés par Van Damme en 2015-2016. Ses contributions à la mise au point de l'itinéraire technique le mieux adapté aux conditions locales concernent principalement : (i) la détermination de la densité de plantation la plus adéquate en pratiquant le rythme de coupe le plus performant identifié jusqu'à présent, (ii) la détermination de la formule et de la dose de fertilisation minérale les mieux adaptées aux conditions du milieu et (iii) la détermination de la fertilisation organique la mieux adaptée en tenant compte de son coût et de sa disponibilité dans la zone. Ceci dans le but d'évaluer les conséquences au niveau de la rentabilité de la culture du passage d'une fertilisation minérale à une fertilisation totalement organique dans la perspective d'une certification biologique de la production de l'armoise annuelle

2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Sénégal

Le Sénégal est un pays d'Afrique de l'Ouest situé en bordure de l'Océan Atlantique. Il est entouré par la Mauritanie au nord, le Mali à l'est, la Guinée au sud-est et la Guinée-Bissau au sud-ouest. Il enclave également la Gambie, comme représenté à la figure 1.



Figure 1 : Carte du Sénégal (FAO-AQUASTAT, 2005)

Sa superficie est de 196 720 km². Elle compte 19 % de terres cultivables, soit 3,8 millions d'hectares et 13 % de terres cultivées, soit 2,5 millions d'hectares. Le pays compte également une superficie d'environ 6,2 millions d'hectares de forêts classées. Trois fleuves traversent le Sénégal : le Sénégal (1700 km), la Gambie (750 km) et la Casamance (300 km). Le pays comptait 1 200 km² de terres irriguées en 2012. (FAO, nd. ; FAO - AQUASTAT, 2005).

Le climat du Sénégal est de type tropical : chaud et sec dans la moitié nord du pays où s'étend le Sahel et plus humide au sud selon la classification de Köppen. La pluviométrie moyenne du territoire est de 687 mm/an. Elle varie cependant fortement d'une année à l'autre. Elle est bien plus importante au sud (1 500 mm/an) qu'au nord du pays (200 mm/an). La saison des pluies s'étend de juin à octobre au sud et de juillet à septembre au nord. Lors de la saison sèche, le pays est sujet à des alizés continentaux tel que l'harmattan. L'évapotranspiration est très élevée. La température est souvent supérieure à 40 °C en été mais descend légèrement en dessous des 16 °C lors de l'hivernage. La végétation est caractérisée par des forêts au sud, des savanes au centre et des steppes au nord (FAO, nd. ; FAO - AQUASTAT, 2005).

La population comptait 15,4 millions d'habitants en 2016, avec un taux de croissance annuel de 2,9 %. Elle est localisée en grande majorité à moins de 200 km de la côte. Dakar, la capitale du Sénégal, regroupe à elle seule un quart des sénégalais. La moitié habite dans le bassin arachidier (FAO - AQUASTAT, 2005 ; World Development Indicators database, 2017).

On retrouve au Sénégal des systèmes pastoraux et des systèmes de polyculture en zone pluviale ou irriguée. Plus de 3 sénégalais sur 5 étaient dépendants du secteur agricole en 2011. L'agriculture est dominée par de petites exploitations traditionnelles. Elle est sujette à de fortes variations lorsqu'elle est pluviale et saisonnière. Les cultures de rentes sont majoritairement l'arachide et le coton tandis que le mil, le sorgho et le maïs constituent les principales cultures vivrières. De plus grande exploitations commerciales à la recherche de profit sont présentes à la périphérie de Dakar et dans la zone des Nayas. Celles-ci pratiquent l'horticulture et l'élevage intensif. (FAO, nd. ; FAO - AQUASTAT, 2005 ; Central Intelligence Agency, 2017).

La pêche reste toutefois le principal secteur de l'économie nationale. À 80 % de type artisanale, elle constitue à elle seule 30 % des recettes totales d'exportation et 15 % de l'emploi. Elle est suivie de l'extraction de phosphate et du minerai de fer (FAO, nd. ; Central Intelligence Agency, 2017).

2.2. *Artemisia annua* L.

2.2.1. Taxonomie

Artemisia annua L. est une espèce de la famille des Asteraceae. Elle possède de nombreux noms vernaculaires, dont « sweet wormwood » en anglais et « armoise annuelle » en français (World Health Organization, 2006).

2.2.2. Répartition géographique

Cette plante originaire de Chine est aujourd'hui largement répandue dans le monde en zones tempérées (Europe, Amérique du Nord et Afrique du Nord) et subtropicales (principalement en Asie) (World Health Organization, 2006).

2.2.3. Description botanique

L'armoise annuelle est une plante herbacée annuelle de 30 cm à 1 m de hauteur (figure 2) pouvant atteindre 2 m de haut en bonnes conditions de culture (World Health Organization, 2006). On observe une grande diversité morphologique de cette plante, le genre *Artemisia* étant reconnu pour être largement affecté par les conditions écologiques (Aftab *et al.*, 2014).



Figure 2 : *Artemisia annua* L. sur les parcelles expérimentales de Yendane (Sougnez A., 2017)

Ses branches sont alternes et portent des feuilles pétiolées de 1,5 à 6,5 cm de long. Celles-ci sont segmentées et dentées. Elles dégagent une forte odeur aromatique due à la présence de trichomes glandulaires qui sécrètent une huile volatile (Aftab *et al.*, 2014; Blanc *et al.*, 2008).

Les fleurs sont bisexuées, très petites (2 à 3 mm de diamètre) et jaunes. Elles sont agencées en capitules réunis dans une longue inflorescence en panicule vert-jaune. Chaque ovaire donnera un akène (1 mm de diamètre) ne comportant pas de pappus. La pollinisation se fait à la fois par le vent et par les insectes (Aftab *et al.*, 2014; Blanc *et al.*, 2008).

2.2.4. Exigences écologiques

L'armoise annuelle s'adapte très bien aux conditions ensoleillées. Les graines germent à partir de 7 °C et sa température optimale de croissance déterminée sur bases d'expériences dans différents pays est de 20 à 25 °C. L'accumulation de degrés/jours au-dessus du seuil de 10 °C doit être entre 3 500 et 5 000 °C afin d'assurer une bonne croissance de la plante. On la retrouve souvent sur flanc de coteaux, en lisière forestière ou en friches. Elle pousse à diverses altitudes dans le monde et sur la majorité des types de sol dont le pH est situé entre 4,5 et 8,5. Elle requiert toutefois un sol avec un bon drainage car elle n'apprécie pas l'engorgement (World Health Organization, 2006).

2.2.5. Utilisations

Artemisia annua L. est utilisée depuis plus de 2 000 ans dans la médecine chinoise traditionnelle afin de traiter de nombreux maux dont le paludisme. C'est en 1972 que l'artémisinine a été isolée et caractérisée comme le principe actif à effet antipaludique de la plante. Cette molécule a montré son efficacité et ne présente que peu ou pas d'effets secondaires (Aftab *et al.*, 2014).

Il s'agit d'une lactone sesquiterpénique comptant un pont endopéroxyde et sept centres asymétriques. L'artémisinine a démontré son efficacité pour tuer rapidement les stades asexués du parasite *Plasmodium falciparum* dans le sang. Son action s'expliquerait par l'ouverture de son pont endopéroxyde et la formation de radicaux libres en présence de fer ferreux. Elle permettrait l'inhibition irréversible de l'ATPase (PFATP6) au niveau du réticulum endoplasmique de la cellule sanguine, perturbant ainsi l'homéostasie du calcium (Blanc *et al.*, 2008).

Les études ont permis de mettre en évidence l'accumulation d'artémisinine principalement dans les feuilles et l'inflorescence d'*Artemisia annua* L.. Elle se trouve aussi de manière moins importante dans les tiges et sous forme de traces dans les graines. Elle n'est pas présente dans les racines ni le pollen. Elle est donc extraite des feuilles de l'armoise annuelle, et plus particulièrement de son huile provenant des trichomes glandulaires de la plante (Blanc *et al.*, 2008).

L'artémisinine, ainsi que ces dérivés semi-synthétiques offrant une meilleure biodisponibilité de la molécule, sont aujourd'hui utilisés en combinaison avec d'autres molécules antipaludiques dans les ACTs (Artemisinin-based combination therapies), traitements recommandés par l'Organisation Mondiale de la santé (Blanc *et al.*, 2008).

L'armoise annuelle, utilisée également contre la fièvre dans la médecine chinoise traditionnelle, présente bien d'autres vertus médicinales. De récents articles soulignent l'activité antimicrobienne de son huile contre un grand nombre de champignons et bactéries gram-négatives et gram-positives. Ses feuilles auraient également des propriétés antivirales, anti-inflammatoires, antioxydants, immunosuppressives et seraient bénéfiques contre l'hypertension. Enfin, l'artémisinine montre un réel potentiel dans la lutte contre le cancer. Outre ses effets intéressants dans l'efficacité des traitements contre le cancer, les recherches montrent une toxicité de cette molécule ciblée uniquement sur les cellules cancéreuses et mettent en avant ses divers modes d'action la prémunissant contre l'apparition d'une éventuelle résistance. Les études sont encore controversées sur son effet potentiel dans la lutte contre le VIH/sida (Aftab *et al.*, 2014).

Lors de la consommation traditionnelle de la plante sous forme de tisane. Il semblerait que 93 % de l'artémisinine soit effectivement extraite des feuilles séchées en conditions optimales (9g/L infusé 5min à 100°C) et que cette teneur (d'environ 1,6 % dans la feuille sèche) ne diminuerait pas lors du stockage à température ambiante (Willcox *et al.*, 2004).

Ces découvertes mettent en avant une réelle possibilité de médication accessible aux personnes défavorisées mais qui n'est toutefois pas recommandée par l'OMS. Celle-ci estime que le taux d'artémisinine est trop influençable par la variété, les pratiques et l'environnement de sa culture ainsi que les conditions de récoltes et de stockage de la plante. Enfin, elle craint la possibilité d'émergence d'une résistance à l'artémisinine qui pourrait être induite par sa consommation à la dose sous-optimale (World Health Organization, 2012).

Cependant, un essai clinique portant sur une culture d'armoise annuelle au Bénin et ayant un taux en artémisinine de 0,30 % a prouvé que sa consommation traditionnelle sous forme de tisane (12 g/litre infusé 15 min pendant 7 jours) présente une baisse significative de la parasitémie (98 %) par *Plasmodium falciparum*. Ce taux d'efficacité est supérieur à 95 %, taux retenu par l'OMS pour valider un traitement, et ce malgré le taux d'artémisinine bien inférieur aux recommandations (Zime-Diawara *et al.*, 2015).

L'armoise annuelle est une plante riche en huiles essentielles, polysaccharides, saponines, coumarines, acides, minéraux, flavonoïdes et polyphénols. Outre leurs effets thérapeutiques, ces molécules expliqueraient le gain d'efficacité antipaludique observé lors de la consommation de la plante entière plutôt que l'artémisinine pure par un effet de synergie (Aftab *et al.*, 2014).

Alors que l'artémisinine n'a été trouvée que dans deux autres espèces du genre *Artemisia* (*Artemisia apiacea* H. et *Artemisia lancea* V.), certaines espèces montrent des propriétés antipaludiques qui s'expliqueraient uniquement par la combinaison complexe de ses constituants. À titre d'exemple, des extraits d'armoise africaine (*Artemisia afra* Jacq. ex Willd.) ont montré leur efficacité *in vitro* sur *Plasmodium falciparum* (Willcox *et al.*, 2004).

De plus, l'apparition d'une résistance de *Plasmodium falciparum* face aux ACTs est déjà survenue depuis 2005 au sud-est de l'Asie. Après avoir observé une meilleure efficacité des feuilles de la plante entière (consommées par ingestion orale et non via infusion) par rapport à la dose équivalente en artémisinine pure en 2012 dans un modèle de paludisme sur rat ; l'étude de Elfawal *et al.* (2015) démontre la capacité de ce traitement à surpasser la résistance de *Plasmodium yoelii* sur l'artémisinine pure. Il semble qu'une résistance à la plante entière est obtenue trois fois moins rapidement qu'avec la molécule pure utilisée dans la médication actuelle. Ces résultats s'expliqueraient par la multitude de composés secondaires du système de défense de la plante qui augmenteraient sa biodisponibilité et offriraient un effet de synergie. Ils tentent donc au contraire à favoriser la forme non pharmaceutique de l'armoise annuelle dans le traitement du paludisme pour son efficacité prouvée et contre l'apparition de résistance. Récemment, un essai clinique mené au Kivu (Daddy *et al.*, 2017) a montré qu'il était possible de guérir des patients infectés par des souches de *Plasmodium falciparum* résistantes aux ACT avec des tablettes constituées de feuilles séchées d'*Artemisia annua* L..

2.3. Le Relais - Sénégal

Les entreprises faisant partie du réseau français « Le Relais » œuvrent dans le développement d'activités économiques dans un but d'insertion des personnes en situation d'exclusion. Elles ont créé plus de 2 200 emplois durables en 30 ans. Ce réseau assure 55 % de la collecte et de 90 % de la valorisation des textiles collectés en France.

« Le Relais - Sénégal » est un centre de tri de vêtements de seconde main créé en 2006 à Diamniadio, au Sénégal. Cette entreprise a une finalité sociale. C'est pourquoi elle offre des conditions de travail exemplaires à ses employés (CDI, accès à un crédit à taux zéro et à une mutuelle de santé). De plus, l'argent dégagé de la revente des vêtements a été réinvesti en 2011 dans la création d'un projet maraîcher et fruitier permettant d'offrir un grand nombre d'emplois locaux et une autonomie alimentaire aux sénégalais. Cette succursale a d'abord pris place sur un terrain de 6 ha du village de Terokh puis a inclus 4 ha de parcelles au niveau du village de Yendane huit mois plus tard. Ces deux villages voisins sont situés dans le département de Tivaouane, dans la région de Thiès (figure 3).

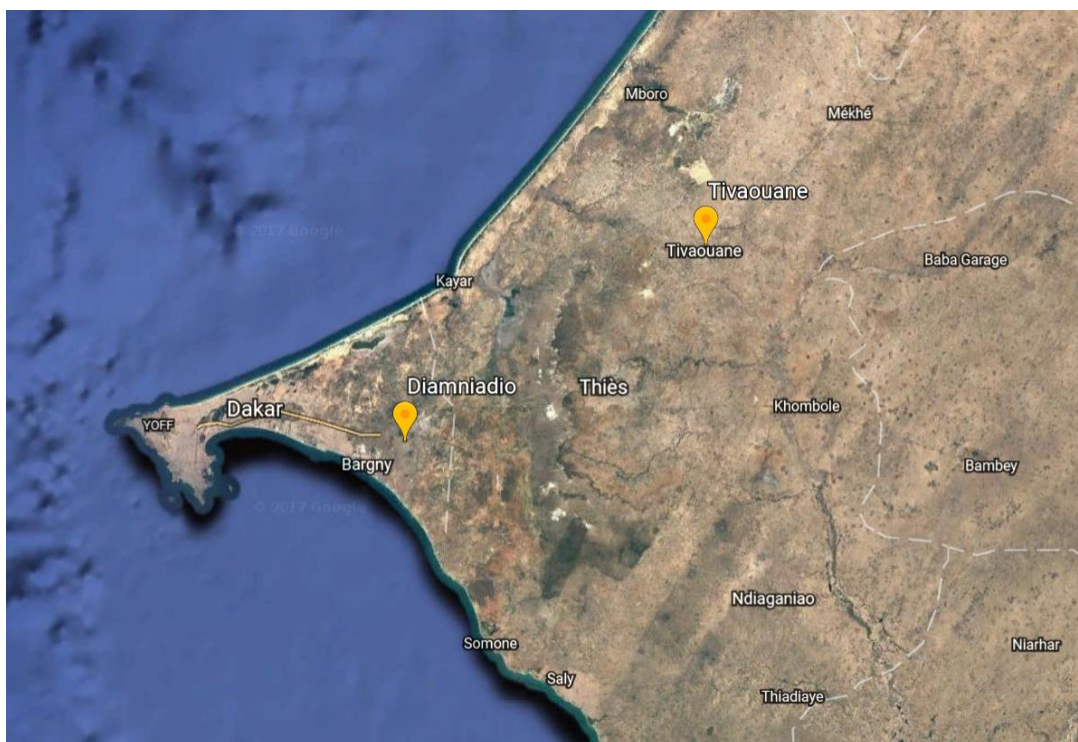


Figure 3 : Vue satellitaire des sites de « Le Relais - Sénégal » (Source : Google Earth)

En 2014, « Le Relais - Sénégal » a accepté que leur domaine soit le lieu d'essais pour la production d'armoise annuelle. Ceux-ci ont été réalisés durant la saison sèche par l'ENSA (École Nationale Supérieure d'Agriculture, de l'Université de Thiès) en collaboration avec le laboratoire d'Agroécologie tropicale et d'Horticulture de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège). Les résultats ont permis de sélectionner une variété adaptée aux conditions locales pour la culture sous irrigation pendant la saison sèche (Martinez, 2015).

Suite à la nécessité de sécher et de stocker les plantes produites lors des différents essais, les responsables du domaine horticole de « Le Relais - Sénégal » ont pris en charge la transformation sous forme de tisanes de la matière première à Diamniadio afin de les revendre à un prix abordable pour la population locale. Cela a conduit à la constitution d'une filière intégrée et complète, allant de la production jusqu'à la commercialisation de l'armoise annuelle.

Lors de la saison sèche 2015-2016, des essais complémentaires ont été réalisés sur le domaine en collaboration avec l'Université de Liège afin de parfaire l'itinéraire technique de la culture. L'objectif était alors d'y optimiser la production de feuilles et de tiges d'armoise annuelle en étudiant les effets de la densité de plantation, de la pratique de coupes et de la fertilisation (Van Damme, 2016).

Aujourd'hui, un bâtiment entièrement consacré au stockage et à la transformation en tisanes et en gélules a été mis en place. Ceci fait de « Le Relais – Sénégal » un précurseur et un acteur incontournable de la diffusion de l'armoise annuelle au Sénégal. L'entreprise compte se diversifier dans la production de savons à base d'armoise et l'utilisation de l'armoise africaine notamment. Elle garde son objectif de fournir cette médication au prix le plus bas possible. Tous ces produits sont vendus sous la marque déposée « Lion vert » (figure 4).



Figure 4 : Logo de la marque « Lion vert » (source : <https://www.facebook.com/LeLionVertSenegal/>)

2.4. État des connaissances concernant la culture d'*Artemisia annua* L. au Sénégal

De nombreux facteurs semblent déterminants dans la production de l'armoise annuelle. Ceux-ci doivent être affinés pour chaque zone géographique (Ferreira *et al.*, 2015). C'est pourquoi nous présentons ici une brève synthèse des connaissances concernant chacun d'entre eux.

2.4.1. Variété

Artemisia annua L. est une plante de jour court dont l'exposition à une photopériode de moins de 13 h et 31 min suffirait à induire la floraison dans les deux semaines, mettant alors fin à la phase végétative. Cette caractéristique va à l'encontre de la production de biomasse au Sénégal, où les jours sont courts. Cependant, les conditions locales défavorables à la culture peuvent être contournées par la sélection de variétés adaptées (Ferreira *et al.*, 2005).

Au Nigeria, une étude réalisée sur six années (2005-2008) a mis en évidence la possibilité de cultiver des souches d'armoise annuelle productives en climat tropical. Elle a cependant aussi souligné que le taux d'artémisinine varie significativement avec les semences choisies, la saison culturale, l'apport en eau et les pratiques culturales (Brisibe *et al.*, 2012).

Depuis 2013, l'ENSA a entrepris la sélection d'une variété d'armoise annuelle à partir d'un écotype du Kenya. Le but était de sélectionner des plantes au meilleur développement végétatif et au stade de floraison retardé afin de produire le plus de biomasse. Cependant, les plants de la variété « Apollon » de chez Mediplant se sont montrés bien plus productifs lors des tests effectués en champs par Martinez (2015).

Les variétés sélectionnées par la société suisse Mediplant sont des hybrides aux performances bien supérieures à la plante sauvage. De plus, elles assurent un taux de 1,6 % en artémisinine dans les feuilles sèches (Martinez, 2015). Ce taux élevé permet d'obtenir un bon traitement contre le paludisme et permet de contrebalancer la production de biomasse moins importante par plante en milieu tropical par rapport aux souches de milieu tempéré (Ferreira *et al.*, 2005). Les semences de chez Mediplant ont déjà fait leurs preuves en Afrique de l'Est où elles sont utilisées pour la production d'artémisinine par plus de 5 000 producteurs au Kenya, en Tanzanie, en Uganda et à Madagascar (Ellman, 2010).

La variété « Apollon » a produit pratiquement le double en poids humide par plante que les lignées « 10\14 » et « 9\4 » sélectionnées par l'ENSA lors d'essais réalisés en 2014-2015 sur les sites de l'ENSA, de « Le Relais - Sénégal » et du village de Beer (Martinez, 2015).

Un essai réalisé à Thiès en 2016 a permis de montrer que la descendance obtenue à partir des semences récupérées de la variété « Apollon » présentait des caractéristiques comparables par rapport à leurs parents au niveau du développement des plantes. Il est donc économiquement intéressant de récupérer les semences de plantes élites de la 1^{ère} génération de la variété « Apollon » cultivées en champs (Van Damme, chef du projet maraîcher de « Le Relais – Sénégal », communication personnelle).

2.4.2. Période culturale

Selon l'étude de Brisibe *et al.* (2012), il serait préférable de cultiver l'armoise annuelle durant la saison des pluies en milieux tropical. Cependant, celui-ci base son conseil sur le fait que la jeune plante a besoin d'eau pour grandir rapidement afin d'obtenir une production importante de biomasse fraîche.

À Thiès, le système d'irrigation de l'exploitation de « Le Relais – Sénégal » a permis d'obtenir de très bons rendements durant la saison sèche lors des essais des campagnes 2014-2015 et 2015-2016 (Martinez, 2015 ; Van Damme 2016). Toutefois, la meilleure tolérance au stress et à la photopériode observée chez la variété Mediplant laisse à supposer qu'elle produirait également une biomasse importante en saison des pluies (Martinez, 2015). Il y aurait alors la possibilité d'effectuer deux saisons culturales, comme suggéré par Ferreira *et al.* (2005) dans le cas d'une croissance rapide.

2.4.3. Semis

Le semis direct est possible mais engendre de grandes pertes. C'est pourquoi le semis en pépinière est privilégié pour les semences hybrides dont le coût est élevé (Ellman, 2010). Brisibe *et al.* (2012) ont toutefois obtenu de bons rendements par les techniques de semis direct à la volée ou en ligne car ils ont l'avantage d'être peu coûteux en main d'œuvre.

Le succès de la technique de semis dépend des caractéristiques physiques du sol et de la température. La viabilité des semences est aussi un facteur à ne pas négliger. Celle-ci diminue assez rapidement si les graines ne sont pas stockées dans un endroit frais et sec (Ferreira *et al.*, 2005).

Lors des essais réalisés sur le site de Yendane, du sable a été utilisé pour répartir les semences de petite taille (10 000 à 14 000 graines/gramme) sur des plateaux alvéolés contenant du terreau de maraîcher. Ils ont ensuite été protégés de l'ensoleillement direct et arrosés par capillarité (Martinez, 2015). L'armoise annuelle est très vite affectée par la sécheresse ou par l'engorgement avant la formation de ses nombreuses racines latérales (World Health Organization, 2006). La surface doit donc rester humide jusqu'à la germination et la formation des racines (Ferreira *et al.*, 2005). L'utilisation à cette fin d'un brumisateur peut s'avérer utile.

Après sept semaines environ, les plantes d'environ 10 à 12 cm de haut peuvent être transplantées. Cette étape est très délicate car il suffit que la racine pivotante de la plante soit pliée ou qu'elle soit stressée par un manque d'eau pour induire sa floraison. Le bouturage permettrait d'obtenir des plants plus robustes mais engendre un travail bien plus conséquent (Ellman, 2010).

2.4.4. Irrigation

Selon Ferreira *et al.* (2005), le sol doit rester humide jusqu'au début de la croissance active des jeunes plants. Ces auteurs recommandent d'apporter environ 800 ml d'eau par plante à raison de trois fois par semaine pour assurer leur établissement en champs.

Un surplus en eau peut induire le lessivage des éléments nutritifs ou une réduction de la profondeur racinaire (Ellman, 2010). De plus, l'armoise annuelle est sensible à l'engorgement. C'est pourquoi des canaux de drainage doivent être mis en place lors de sa culture en saison des pluies (World Health Organization, 2006).

Il est aussi important de minimiser l'impact de l'eau sur les transplants afin de ne pas entraîner une forte mortalité de ceux-ci (Ferreira *et al.*, 2005). Pour contrer ce phénomène, le système de micro-aspersion avait été testé lors des essais réalisés sur le site de Beer lors de la campagne 2014-2015. Cependant, la distribution de l'eau est entravée avec ce système dès que les plantes atteignent 1,2 m de haut (Martinez, 2015).

Le choix du système d'irrigation doit être réfléchi en fonction des caractéristiques du sol, de la topographie, de la qualité et du prix de l'eau ainsi que des matériaux disponibles pour réduire les coûts (Martinez, 2015).

2.4.5. Désherbage

Il est important de planter l'armoïse annuelle dans un champ exempt d'adventices car elle supporte mal la compétition (Ellman, 2010).

À Thiès, le désherbage a dû être effectué trois fois sur chaque site d'expérimentation lors de la saison culturale 2015-2016. C'est le souchet rond (*Cyperus rotundus* L.) qui a été le plus difficile à contrôler sur les sites de « Le Relais – Sénégal » et de l'ENSA (Martinez, 2015). Durant la saison culturale suivante, un désherbage a été effectué manuellement 3 semaines après transplantation sur le site de « Le Relais – Sénégal ». Il a ensuite été répété jusqu'au recouvrement du couvert à raison de une fois par mois (Van Damme, 2016).

La pratique du paillage a été expérimentée sur les champs lors de la saison 2015-2016. Elle a permis de limiter le désherbage et de réduire de moitié l'apport en eau. Cependant, le prix de la main d'œuvre supplémentaire requise par cette pratique a dépassé celui de ses avantages (Van Damme, chef du projet maraîcher de « Le Relais – Sénégal », communication personnelle).

2.4.6. Densité

La densité et la disposition spatiale des plantes influencent différentes composantes du rendement en jouant sur le niveau de concurrence entre les plantes pour les ressources disponibles et sur le contrôle des adventices.

Selon Scarcella *et al.* (2011), ce facteur est plus déterminant que la quantité d'azote apportée. Un trop grand espace entre les plantes les pousse à grandir en largeur et à produire plus de branches latérales tandis que le manque de lumière augmente leur taille mais réduit leur nombre de branches latérales à forte densité.

Selon Pop *et al.* (2017), sur base des résultats obtenus avec une variété hybride allemande et une variété roumaine en Transylvanie dans un essai irrigué 5 fois comparant l'effet de trois densités (15 000, 24 000 et 47 000 plantes/ha), la production par unité de surface a grandi proportionnellement à la densité. Les densités de 1,5 plantes/m² (0,9 m x 0,7 m) et de 4,7 plantes/m² (0,3 m x 0,7 m) étaient respectivement plus et moins intéressantes que la densité intermédiaire.

Les semences hybrides sont normalement espacées de 1 m x 1 m, ce qui revient à une densité standard de plantation de 1 plante/m² (Ellman, 2010; Martinez, 2015). Du fait de leur croissance moins vigoureuse, les autres semences sont plantées à plus haute densité (Ellman, 2010).

Lors des essais réalisés sur le site de « Le Relais - Sénégal » à Yendane lors de la saison culturale 2015-2016, quatre densités de plantation ont été testées en irrigation par aspersion. Celles-ci étaient de 0,66, 1, 2 et 4 plantes/m² avec respectivement les espacements de 1 m x 1,5 m, 1 m x 1 m, 1 m x 0,5 m et 0,5 m x 0,5 m. La production a significativement diminué par plante mais augmenté à l'échelle de l'ensemble de la parcelle avec l'augmentation de la densité. Le meilleur rendement total de feuilles et de tiges séchées (8,25 tonnes/ha) et le prix de revient le plus bas ont été obtenus avec la plus haute densité de plantation (Van Damme, 2016).

Dans un essai réalisé à Chongqing, Yang (2009) a constaté que l'augmentation de la densité avait pour effet de diminuer le rendement par plante mais de l'augmenter par parcelle. Il met également en garde contre la chute significative du contenu en artémisinine par parcelle pour les plus fortes densités. C'est la densité de 2,5 plante/m² qui s'est montrée la plus favorable dans cette expérience.

Dans une étude réalisée en Tasmanie, une souche yougoslave a été plantée aux densités de 1, 5, 10, 15 et 20 plantes/m². Les résultats obtenus ont montré la même tendance que pour les essais mentionnés ci-dessus, avec une production de biomasse sèche de feuilles de 6,8 tonnes/ha pour la densité de 20 plantes/m². Cependant, 90 % de ce rendement était déjà atteint avec la densité de 10 plantes/m² (Laughlin, 1993). C'est pourquoi Ferreira *et al.* (2005) recommande de ne pas dépasser les 10 à 12 plantes/m² en considérant le coût de production des plants de variétés hybrides à haut taux en artémisinine.

Dans un essai réalisé au Vietnam, une souche vietnamienne plantée à une densité de 25 plantes/m² (20 cm x 20 cm) a permis d'obtenir les rendements maximum en biomasse sèche de feuilles (5,3 tonnes/ha) et en artémisinine (Ferreira *et al.*, 2005). Cette expérience semble montrer que la densité n'impacte pas négativement la concentration en artémisinine puisqu'elle y était également maximale (0,86 %) à cette densité.

Dans un essai réalisé dans la région semi-aride de Gujarat, aucune différence significative n'a été reportée dans les paramètres de croissance (hauteur de plante et nombre de branches) entre les espacements de 30 cm x 45 cm (7 plantes/m²), 30 cm x 60 cm (6 plantes/m²), 45 cm x 45 cm (5 plantes/m²), 45 cm x 60 cm (4 plantes/m²) et 60 cm x 60 cm (3 plantes/m²). Cependant, l'espacement de 45 cm x 45 cm (5 plantes/m²) a permis d'obtenir le plus haut rapport système racinaire/pousse feuillée et rendement en feuilles sèches. L'analyse de leur teneur en artémisinine a également été la plus importante à cet espacement (Abimari, 2014).

Il ressort des essais menés jusqu'à présent dans différentes parties du monde que la densité de plantation optimale varie en fonction des conditions de production : environnement, variété utilisée, itinéraire technique. Elle doit donc être déterminée au cas par cas.

2.4.7. Fertilisation

Sur le site de « Le Relais - Sénégal » à Yendane, lors de la saison culturale 2015-2016, 9 traitements de fertilisation minérale ont été testés à une densité de 10 420 plantes/ha en irrigation goutte à goutte. Il s'agissait de la combinaison de trois doses d'engrais N-P-K 10-10-20 (de 0, 42 ou 84 kg/ha) avec l'application de trois doses d'urée à 46 % d'azote (0, 62,5 et 94 kg/ha). À ceux-ci s'ajoutait un témoin local à base de fientes de volaille compostées et fractionné à raison de 1, 2 et 3

poignées respectivement 30, 60 et 90 jours après transplantation, soit 1 kg de compost par plante environ. Le traitement de 42 kg de N-P-K 10-10-20 combiné à 94 kg d'urée (46 % N) par hectare a montré le meilleur rendement de récolte totale sèche (tiges + feuilles) et le prix de revient le plus bas. L'engrais N-P-K a été appliqué à raison de 4 g/plante 15 jours après la transplantation tandis que l'urée a été apportée en deux fractions. Un apport de 3g/plante a été réalisé 45 jours après transplantation et un autre de 6g/plante 75 jours après transplantation. Cet apport de 47 kg N/ha, 4 kg P₂O₅/ha et 8 kg K₂O/ha a permis d'obtenir une production totale de 2,46 tonnes/ha, soit plus du double que le témoin non fertilisé et 1,3 fois plus que le témoin fertilisé avec du compost de fientes de volaille (10 kg N/ha, 19 kg P₂O₅ et 8 kg K₂O). Aucun rendement significativement supérieur n'a été obtenu avec l'application de 49 kg N/ha et se sont les objets contenant un apport à la fois en N-P-K qui ont montré le meilleur rendement (Van Damme, 2016).

Magalhaes *et al.* (1996) avaient démontré dans un essai comparant 4 modalités de fertilisation azotée (0, 32, 64 et 97 kg N/ha) que l'apport d'azote sous forme d'urée était optimal à la dose de 64 kg N/ha. Elle permettait d'obtenir la production de biomasse et d'artémisinine la plus élevée et la plus rentable. Ces résultats ont également été obtenus avec du sulfate d'ammonium et du nitrate d'ammonium.

Dans un test faisant également varier l'apport d'azote de 40, 80 et 120 kg N/ha, où les plantes ont été irriguées à quatre reprises du fait des conditions climatiques dans la province d'Adana en Turquie, Özgüven *et al.* (2008) ont démontré que le passage de 80 à 120 kg N/ha n'engendre aucune différence significative sur le rendement, la taille des plantes et le nombre de branches mais influence positivement la concentration en artémisinine.

En Inde, dans un essai réalisé à Bangalore (Karnataka), des apports de 50 et 100 kg N/ha sur sol sablo-limoneux ont montré une augmentation de rendement en biomasse de 26,2 et 40,1 % par rapport au contrôle tandis que l'apport seul de 50 kg/ha d'un engrais phosphorique ou potassique n'a montré aucun effet.

Contrairement à l'azote, il semblerait que le potassium soit moins important pour la production de feuilles d'armoise annuelle. Un test soustractif mené en serres recommande d'ailleurs son omission après avoir montré que la formule en N et P seuls entraîne une augmentation de 75 % de la teneur en artémisinine par rapport à la fumure complète en NPK testée (Ferreira, 2007).

Dans un essai réalisé en agriculture pluviale à Delhi en Inde, Kapoor *et al.* (2007) ont testé deux souches mycorhiziennes combinées ou non à un engrais phosphaté, à un traitement contrôle sans engrais et non inoculé et à un apport de phosphore sans inoculation. Il a été montré qu'un apport de phosphore minéral augmente significativement le taux d'artémisinine à lui seul, bien que l'effet soit moindre qu'avec une inoculation mycorhizienne seule ou accompagnée de l'engrais.

Une étude réalisée par Yang (2013) sur les périodes et la distribution dans la plante des éléments N, P, K, Ca et Mg a permis de définir la meilleure période d'application pour chacun d'entre eux. Il semblerait que les nutriments ne soient pas bien assimilés par l'armoise annuelle lors des 40 premiers jours après transplantation. Selon l'auteur, il serait plus judicieux d'effectuer un apport de N et de K sous forme minérale lors de la phase de croissance, du 40^e au 140^e jour après la transplantation. Les nutriments semblent ensuite passer des feuilles et des branches aux boutons floraux, en absorbant alors du P, Ca et Mg du 100^e au 120^e jour après transplantation.

En Inde, une étude menée à New Delhi en champs sous irrigation a comparé l'apport de compost (à raison de 15 tonnes/ha) à celui de N-P-K (80 kg N/ha, 40 kg P₂O₅/ha et 40 kg K₂O/ha) et de la même formule avec du soufre (80 kg N/ha, 40 kg P₂O₅/ha, 40 kg K₂O/ha et 30 kg S/ha). Les apports d'urée et de gypse ont été fractionnés en deux fois. Ces traitements ont respectivement permis d'augmenter de 5,16 %, 13 % et 21 % la biomasse des feuilles par rapport au traitement non fertilisé. L'augmentation de 9 % de masse foliaire par l'ajout de gypse dans la fertilisation minérale s'expliquerait par une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote en présence de soufre (Jha *et al.*, 2011).

Cette étude met en évidence le fait que l'ajout de matière organique apporte également des bénéfices autres que purement nutritifs au sol. Il a notamment un impact positif sur la conservation de la structure du sol, sa rétention en eau et contre l'érosion (Jha *et al.*, 2011). De plus, il a été démontré au Sénégal que l'apport régulier de fumier composté et incorporé au sol réduit les risques liés à la sécheresse même dans les zones à pluviométrie comprise entre 200 et 300 mm de précipitations par an (Ganry, Oliver, 2005).

Au Ghana, une expérience réalisée lors de la saison des pluies a testé l'application de différentes doses de compost de volaille (2, 4 et 6 tonnes/ha). Elle a obtenu la meilleure production de biomasse foliaire et le plus haut taux d'artémisinine avec l'application de 4 tonnes/ha de compost de volailles sous la forme d'amendement 14 jours après la transplantation. Ceci s'expliquerait par la particularité du compost de volaille à augmenter la disponibilité de l'azote. Ces résultats ont été aussi concluants que l'utilisation d'engrais minéral N-P-K 15-15-15 à raison de 45 kg N/ha. Ces deux modalités ont été significativement plus productives que l'absence de fertilisation et les doses de 90 kg N/ha et 6 tonnes de compost/ha (Yeboah, 2012).

Au Bénin, dans la commune d'Abomey-Calavi du département de l'Atlantique, une étude a démontré que la culture pluviale d'*Artemisia annua* L. dans un sol ferrallitique enrichi de fumures organiques (sous la forme de bouse de vache ou de lisier de porc) apporte une meilleure croissance et production de biomasse foliaire que l'addition d'une fumure minérale constituée d'urée. Bien que ces résultats démontrent le bénéfice offert par la fumure organique, la même étude a révélé que c'est l'urée qui induit le plus haut taux d'artémisinine de toutes les modalités testées (Djogo *et al.*, 2015). Il semblerait donc que la fumure optimale résulte donc d'une fumure organique additionnée d'urée.

Ceci va dans le sens de Pieri (1992) qui affirme que dans les sols de savane, il est nécessaire d'appliquer une fumure organique combinée à une fertilisation minérale afin d'accroître et de stabiliser les rendements.

Ganry, F., & Oliver, R. (2005) mettent en évidence un effet de synergie entre la fumure organique et minérale permettant de réduire l'apport d'engrais et non de le substituer dans la majorité des cas.

Selon Blanchard (2014), il existe une grande diversité de fumures organiques paysannes produites en Afrique de l'Ouest. Dans son analyse, tout compost comportant 32 % de déjection animale est considéré comme à forte valeur d'amendement. L'étude préconise l'application de 4,1 à 5,4 tonnes/ha et 3,5 à 4,6 tonnes/ha afin de compenser la minéralisation annuelle du carbone des

sols sableux et argileux respectivement. Elle souligne toutefois l'importance de l'humidification et de l'aération en plus de la composition du compost.

Il ressort de cette révision de la bibliographie que, comme dans le cas de la densité, il est indispensable d'adapter la fumure appliquée en tenant compte des conditions de culture spécifiques de chaque région : type de sol, climat, irrigation éventuelle ; l'azote semblant être l'élément nutritif le plus important pour une bonne croissance de la plante.

2.4.8. Bioagresseurs

L'armoïse annuelle semble avoir très peu d'ennemis naturels. Au Nigéria, seules des attaques mineures de tétranyques (*Tetranychus urticae* K.) ont été observées pendant la saison sèche sur les 6 années d'expérimentation (Brisibe *et al.*, 2012). Cela pourrait toutefois s'expliquer par son introduction récente dans la région. En Afrique de l'Est, des vers-gris et des dégâts bactériens sur les tiges ont toutefois été observés (Ellman, 2010).

En Afrique, il est conseillé d'utiliser une solution à 1 % d'huile ou d'extrait de neem afin de protéger les jeunes plantes des chenilles. Elle peut être pulvérisée ou bien enfuie dans le sol lors du semis (Martinez, 2015).

En Australie, la seule maladie observée sur moins d'1 % des plantes d'une grande expérience est une pourriture blanche (infection de *Sclerotinia sclerotiorum* Lib.) sur le tiers inférieur de la hauteur. En Arabie Saoudite, l'Orobanche penchée (*Orobanche cernua* Loefl.) a été identifiée comme parasite des racines d'*Artemisia annua* L. pouvant causer une perte de rendement (Ferreira *et al.*, 2005).

À Thiès, seules des attaques de cochenilles de papayer (*Paracoccus marginatus* W. et G.) ont déjà été signalées sur la culture d'armoïse annuelle du site de l'ENSA. La coupe des branches infectées a permis de contrôler le ravageur mais a engendré une perte de 30 % sur la récolte (Martinez, 2015).

2.4.9. Récolte

La date de récolte de l'armoïse annuelle doit être réfléchi en fonction des conditions climatiques, des ressources disponibles et de l'expérience locale (Martinez, 2015).

L'étude de Jha *et al.* (2011) réalisée en Inde, a montré que le rendement en biomasse sèche des feuilles et en artémisinine contenue dans les feuilles et les tiges augmente progressivement lors de la saison culturale pour atteindre leur maximum juste avant le stade de floraison. Il s'agirait donc de la période de coupe optimale. Ce résultat a été vérifié malgré les variations de la teneur en artémisinine en fonction de la fumure appliquée.

Bien qu'on ne sache pas encore en expliquer le mécanisme, il semblerait que l'arrêt de l'irrigation 2 semaines avant la récolte augmenterait de 20 à 30 % le taux en artémisinine présent dans les feuilles (Simonnet *et al.*, 2016).

De plus, l'étude de Kumar *et al.* (2004) menée en climat subtropical sur sol sablo-limoneux illustre bien l'intérêt de transplanter les plants tôt dans la saison afin de pratiquer plus qu'une simple récolte finale. Ses résultats montrent que la production de biomasse d'*Artemisia annua* L. augmente

avec le nombre de coupes pratiquées (1, 2, 3 ou 4) à une densité de 70 000 plantes/ha. De plus, cette pratique n'impacte pas l'efficacité du traitement puisque le rendement en artémisinine y est corrélé positivement à la production de feuilles et donc au nombre de coupes.

Sur le domaine de « Le Relais - Sénégal », la pratique de plus d'une coupe a permis d'obtenir un gain de 50 % sur la récolte totale sèche (feuilles et tiges séchées) sous irrigation par aspersion. Elle a également permis de faire passer de 40 à 50 % le taux de battage (proportion de feuilles séchées dans la récolte totale sèche). Ce taux est très intéressant car les tisanes produites se composent d'une quantité équivalente de feuilles et de tiges sèches. Sur les trois modalités testées (1, 2 ou 3 coupes successives), c'est la pratique de deux coupes qui a permis d'obtenir le prix de revient le plus bas à une densité de 8 000 plantes/ha environ. La première coupe a été effectuée à 30 cm du sol quatre mois après la transplantation et la récolte finale six mois et demi après la transplantation (Van Damme, 2016).

Lors de la récolte finale, les plantes sont coupées à la base et séchées à l'air sec sur une bâche. Elles sont ensuite tamisées et stockées (Ellman, 2010).

Le séchage au soleil sur le site d'exploitation a l'avantage d'être simple et permettrait d'augmenter le rendement en artémisinine (Poulson et al., 2015). Il est également recommandé par l'OMS de sécher les plantes au soleil plutôt qu'à l'ombre ou qu'à 60 °C (World Health Organisation, 2006).

De plus, le retournement journalier de la récolte empêche l'apparition de maladies fongiques lors de son séchage (Martinez, 2015).

Les feuilles séchées peuvent être stockées pendant plusieurs mois à une température de moins de 40 °C si leur taux d'humidité est inférieur à 12 % (Ellman, 2010). Ces mesures doivent absolument être respectées afin de maintenir la molécule d'artémisinine stable en conditions chaudes et humides (World Health Organization, 2006).

3. MATERIEL ET MÉTHODE

3.1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans la continuité de trois expériences réalisées par Van Damme (2016) lors de la campagne 2015-2016 au niveau du domaine horticole de l'organisation « Le Relais - Sénégal » dans le but d'y optimiser la production de feuilles et de tiges de l'armoise annuelle (*Artemisia annua* L.).

Le premier essai visait à évaluer la réponse de plantes d'armoise annuelle cultivées à une densité de 10 420 plantes/ha sous irrigation goutte à goutte à dix modalités de fertilisation. Les traitements se composaient de l'application à deux doses de 10-10-20 combinée ou non à de l'urée ou d'urée seule. Une seule récolte a été réalisée quatre mois après la transplantation. Dans ces conditions, la dose de 42 kg/ha d'engrais 10-10-20 combinée à l'apport fractionné de 94 kg/ha d'urée a donné les meilleurs résultats (2 459 kg/ha). Elle a permis de plus que doubler le rendement total par hectare de tiges et de feuilles séchées par rapport au témoin non fertilisé (1 149 Kg/ha). Dans cet essai, l'apport d'une dose d'azote supérieure à 29 kg/ha n'a pas induit de gain de rendement supplémentaire et les meilleurs rendements ont systématiquement été obtenus pour les objets qui contenaient à la fois de l'azote, du phosphore et du potassium. Ce qui laisse supposer qu'il existe probablement une carence en potassium et/ou en phosphore dans le sol. De plus, il ressort de la révision bibliographique de ce travail qu'il pourrait être intéressant de tester l'apport d'engrais contenant du soufre.

Le deuxième essai visait à identifier la meilleure modalité de récolte des feuilles et des tiges en comparant trois rythmes de coupes (1, 2 ou 3 coupes) sur une population de plantes installées en plein champ début novembre 2015 à une densité réelle de 8000 plantes/ha, cultivées sous irrigation par aspersion et recevant un peu plus de 1 kg de compost de volaille par plante. Cet essai a mis en évidence l'intérêt d'une récolte en deux coupes réalisées respectivement 4 mois et 6 mois et demi après la transplantation (5 044 kg/ha).

Le troisième essai visait à déterminer la meilleure densité de plantation en irrigation par aspersion. Il comparait 4 densités de plantation : 6 666, 10 000, 20 000 et 40 000 plantes/ha. Toutes les plantes ont reçu un peu plus de 1 kg de compost de volaille et une seule récolte a été effectuée un peu plus de trois mois après la transplantation. Dans ces conditions, la plus haute des quatre densités de plantation comparées a donné le meilleur rendement en tiges et feuilles séchées (8 250 kg/ha) et était la plus rentable.

Ces résultats montrent que les rendements et la rentabilité de la culture de l'armoise annuelle à Yendane peuvent être sensiblement améliorés en faisant varier la densité de plantation, le rythme de coupe et la fumure appliquée. Sur base de ce constat, il semble intéressant de mener des investigations complémentaires pour optimiser ces trois composantes de l'itinéraire technique en réalisant des essais qui viseraient à :

- déterminer la densité de plantation la mieux adaptée en pratiquant le rythme de coupe le plus performant identifié en 2016 (2 coupes).

- déterminer la formule et la dose de fertilisation minérale la mieux adaptée aux conditions du milieu en testant l'effet d'une soustraction des apports de potasse et de phosphore par rapport à une fumure complète.
- déterminer la fertilisation organique la mieux adaptée en tenant compte de son coût et de sa disponibilité dans la zone. Ceci dans le but d'évaluer les conséquences au niveau de la rentabilité de la culture du passage d'une fertilisation minérale à une fertilisation totalement organique dans la perspective d'une certification biologique de la production de l'armoise annuelle.

3.2. Localisation des parcelles expérimentales

Les trois essais ont été réalisés dans la partie irriguée par aspersion du site d'exploitation de Yendane de l'organisation « Le Relais - Sénégal » situé dans le département de Tivaouane, dans la région de Thiès.

Le domaine maraîcher de Yendane, dont les coordonnées géographiques sont 14°94'41.93" N et 16°85'09.14"W, fait partie du village du même nom (figure 5).



Figure 5: Vue satellitaire du site de Yendane (Source : Google Earth)

Les parcelles des essais de fertilisation organique et minérale ont été installées à la suite l'une de l'autre. Elles sont suivies de celles de l'essai de densité de plantation, comme repris par les chiffres 1, 2 et 3 sur le plan. Il est important de signaler qu'un fort vent dominant balayait cette zone selon la direction nord-ouest - sud-est.

3.3. Conditions météorologiques

D'après les données du site climat-data.org, la température et la pluviométrie moyennes seraient de 25,6 °C et de 443 mm/an à Tivaouane. Le climat chaud et sec de Tivaouane, classé BSh selon la classification de Köppen, est de type steppique. Il présente une sécheresse de 9 mois se produisant d'octobre à juin. Le mois de janvier est habituellement le plus froid de l'année (23 °C en moyenne) et celui de juin le plus chaud (27,4 °C en moyenne). La saison des pluies a lieu de juin à novembre, comme montré sur le diagramme ombrothermique de Tivaouane présenté à la figure 6.

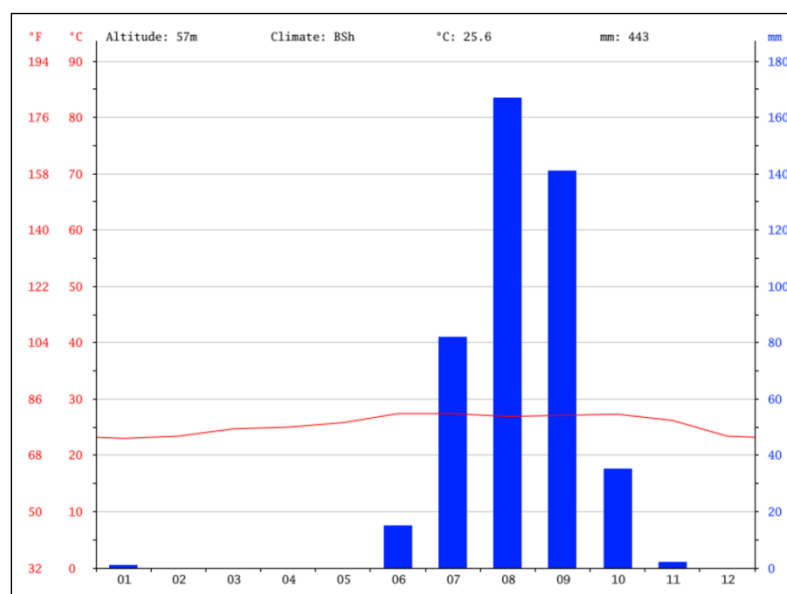


Figure 6 : Diagramme ombrothermique moyen du département de Tivaouane (climat-data.org)

Les données météorologiques de cette année ne sont pas accessibles sous cette forme. Les températures enregistrées en février et en mars de l'année 2017 ont été plus fraîches qu'à l'habitude. À partir des données du site de sn.freemeteo.com, on peut calculer une température moyenne de seulement 20 °C en février et 22 °C en mars pour la région de Thiès. Cela représente une chute de 3 °C par rapport aux températures habituelles reprises dans le diagramme. Celle-ci a lieu après le mois de janvier qui enregistre bien les 23 °C mensuels moyens en 2017. Ce froid inhabituel explique l'observation d'une plus faible croissance de l'armoise annuelle au début de la saison culturale 2016-2017. Au final, les plantes transplantées fin décembre avaient la même hauteur que celles transplantées début février à fumure égale lors de la saison 2015-2016.

De plus, les premières pluies ont été annoncées plus précoces cette année. Les récoltes ont donc été toutes finalisées avant le mois de juin. Une pluie a été observée dans la soirée du 24 mai 2017 alors qu'aucune précipitation n'a généralement lieu en mai. Elle n'a toutefois pas impacté le séchage des plantes.

3.4. Analyse pédologique

Les tableaux 1 et 2 reprennent les résultats des analyses réalisées au laboratoire provincial de La Hulpe en 2016 sur des échantillons de sol prélevés dans les parcelles (Van Damme, 2016).

Tableau 1 : Texture du sol

Texture	Sablo-limoneux
Argile % < 0,002 mm	8,7
Limon fin % 0,002 - 0,02 mm	2,5
Limon grossier % 0,02 - 0,05 mm	7,3
Sable fin % 0,05 - 0,2 mm	38,4
Sable grossier % 0,2 - 2 mm	43,1
Indice de battance	0,6

Tableau 2 : Analyse du sol

Phosphore (P)	7,7 mg/100g
Potassium (K)	12 mg/100g
Magnésium (Mg)	12 mg/100g
Calcium (Ca)	39 mg/100g
Fer (Fe)	45 mg/kg
Manganèse (Mn)	10 mg/kg
Sodium (Na)	4 mg/100g
Total Azote (N)	0,047%
C/N	11
NaCl	10,1 mg/100g
Conductivité	99 µs/cm
pH eau	6,5
pH KCl	5,7
Carbone organique	< 5,3 g/kg
Humus	< 1,1 %

Il ressort de ces analyses que le sol, de texture sableuse, est à tendance très « séchard » et possède une bonne stabilité structurale, comme suggérée par le faible indice de battance.

La zone dans laquelle ont été installés nos essais était la plus riche en éléments nutritifs et en limons grossiers. L'apport de fumure lors des essais réalisés en 2016 peut avoir permis d'enrichir légèrement le sol. Environ 1kg de fientes de volaille compostées avait alors été appliqué par plante. Aucune autre fumure n'a été appliquée sur cette zone avant les études actuelles.

3.5. Étude de l'effet de la densité de plantation

3.5.1. Objectif

Le but de l'essai est d'identifier la densité de plantation qui donnerait les meilleurs résultats avec l'application du rythme de coupe identifié comme étant le plus rentable lors de la campagne d'essais 2015-2016 (2 coupes).

3.5.2. Matériel végétal

La variété « Apollon » de la société Mediplant a été utilisée pour la transplantation initiale. Les remplacements des plants morts ont été effectués avec des plants de la variété « Yen pesokh ». Il s'agit des semences récupérées sur la 1^{ère} génération de la variété « Apollon » cultivées lors des essais réalisés l'année précédente à Yendane.

3.5.3. Dispositif expérimental

Cet essai a été installé sous la forme d'un carré latin avec la densité pour seul facteur à étudier. Il était constitué de 16 unités expérimentales (4 modalités et 4 répétitions) de 40 m² (4 m x 10 m). Les parcelles étaient séparées entre elles par des bordures de 2 m dans le sens de la longueur et de 1 m dans le sens de la largeur, comme illustré à la figure 7. De plus, un espace de bordure extérieure de minimum 2 m a été respecté entre les différents essais.

Cependant, il a été décidé de ne plus prendre la première ligne de parcelles en considération suite au traitement des résultats. Celle-ci était biaisée par les effets du vent. De plus, la reprise des transplants tout particulièrement difficile dans cette zone n'a pas permis d'y atteindre la densité souhaitée. Le nouveau dispositif est donc formé de 12 parcelles agencées en trois blocs aléatoires complets, comme corrigé sur la figure 7.

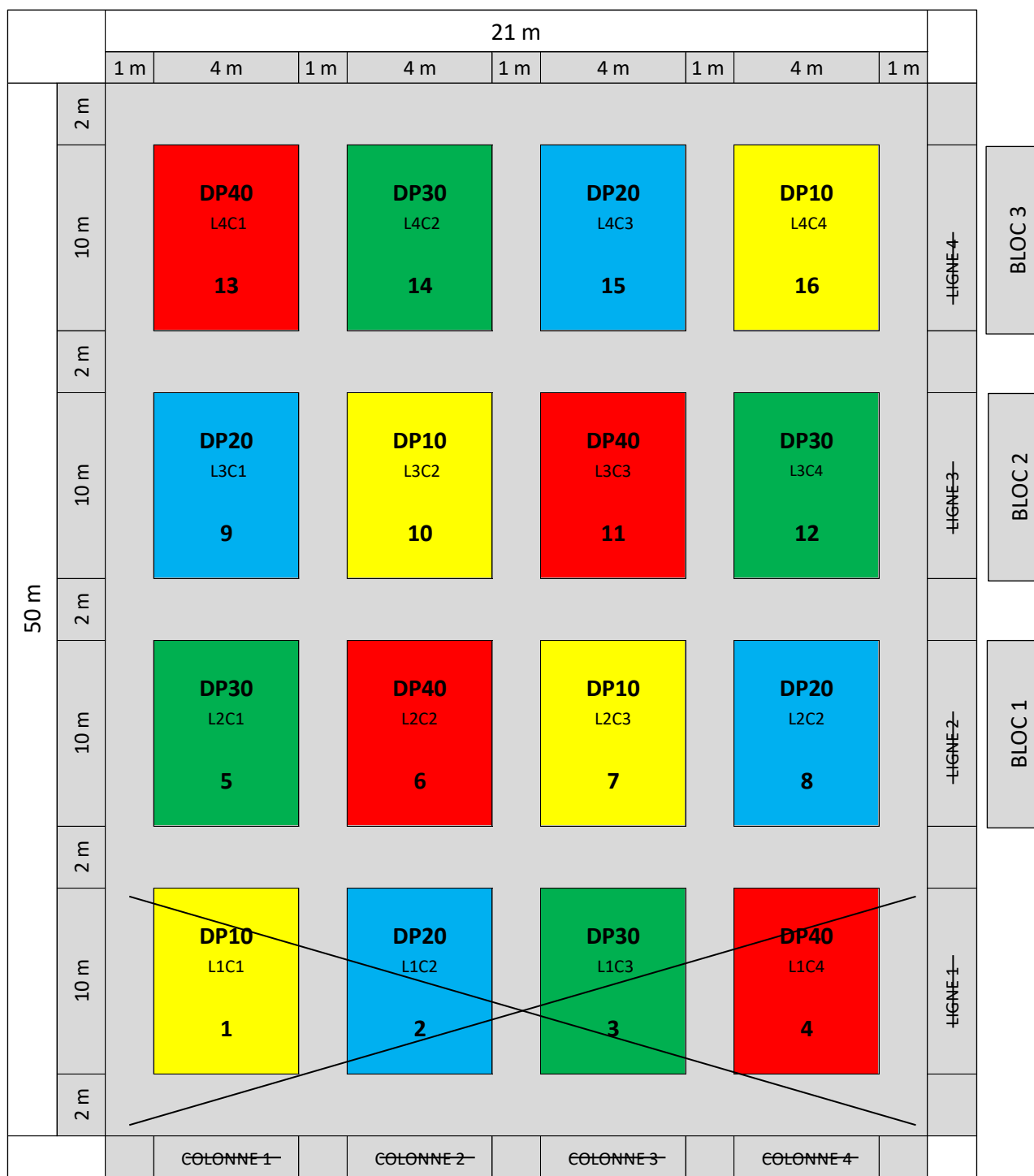


Figure 7 : Dispositif spatial initial en carré latin transformé en blocs aléatoires complets de l'étude de l'effet de la densité de plantation

Différentes densités de plantation (DP) ont été récoltées à deux reprises à des dates identiques. Les 4 modalités étaient :

- **Modalité 1, DP 10** : 10 000 plantes/ha, soit 1 plante/m² (1m x 1m)
- **Modalité 2, DP 20** : 20 000 plantes/ha, soit 2 plantes/m² (1m x 0,5m)
- **Modalité 3, DP 30** : 30 000 plantes/ha, soit 3 plantes/m² (0,5m x 0,66m)
- **Modalité 4, DP 40** : 40 000 plantes/ha, soit 4 plantes/m² (0,5m x 0,5m)

Les plantes étaient disposées comme expliqué dans le tableau 3.

Tableau 3 : Distance entre les plantes dans la ligne et entre les lignes des parcelles et nombre de plantes par parcelle élémentaire pour chaque modalité

Modalités	Distance entre les lignes d'une parcelle élémentaire	Nombre de lignes par parcelle élémentaire	Distance entre les plantes d'une ligne	Nombre de plantes par ligne	Nombre de plantes par parcelle élémentaire	Nombre total de plantes
1	1	4	1	10	40	160
2	1	8	0,5	10	80	320
3	0,5	8	0,66	15	120	480
4	0,5	8	0,5	20	160	640
Total de plantes de l'essai densité :						1600

Une analyse de la variance à deux facteurs a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 17 Statistical Software. Ces facteurs sont les blocs (3, aléatoire) et la densité de plantation (4, fixe). Une comparaison des moyennes par la méthode de Fisher a également été effectuée lorsqu'il existait une différence significative entre celles-ci.

3.5.4. Itinéraire technique de la culture

Le 28 octobre 2016, les graines d'*Artemisia annua* L. ont été semées à la volée dans des plateaux alvéolés contenant du terreau. Pour se faire, elles ont été préalablement mélangées à du sable dans les proportions suivantes : 10 volume de sable pour un volume de graines. Elles ont été délicatement humidifiées à l'aide d'un brumisateur et puis arrosées par capillarité en s'assurant qu'il y ait toujours suffisamment d'eau à la base des plateaux alvéolés. La levée a eu lieu 5 jours après le semis. Les plantules n'ont pas été démariées lors de leur développement en pépinière car elles étaient fragiles et n'avaient pas un développement racinaire suffisant.

La même procédure a été appliquée pour le semis des semences de la variété « Yen pesokh », en utilisant un mélange de 40 g de graines dans 250 g de sable.



Figure 9: Semis des plantes d'*Artemisia annua* L. (Sougnez A., 2017)



Figure 8 : Levée des plantes dans la serre (Van Damme P., 2017)

Les parcelles ont été nettoyées et ratissées le 22 décembre 2016 avant d'être labourées en traction animale le 23 décembre 2016.

Les plantes ont été transplantées le 24 décembre 2016 sur la parcelle mouillée préalablement durant 4h, à raison de 15,36 mm d'eau afin d'ameublir le sol pour faciliter la transplantation ainsi que la reprise des jeunes plantules. Des remplacements ont dû être effectués jusqu'au 6 mars 2017. Cette date tardive s'explique en partie par la forte mortalité des jeunes plantules due au système d'irrigation par aspersion et du climat présentant des nuits très fraîches en dessous des 15 degrés.

Les plantes ont été arrosées chaque jour par des asperseurs pendant 25 à 30 minutes matin et soir du 24 décembre 2016 au 8 février 2017 et 15 minutes matin et soir par la suite. Cela représente respectivement 3,52 mm d'eau et 1,92 mm d'eau par jour.

Les parcelles ont ensuite été désherbées toutes les trois semaines environ.

Pour cet essai, les meilleures formule et dose d'engrais précédemment déterminées sur le site ont été appliquées. Il s'agit de 42 kg de NPK 10-10-20 et 94 kg d'urée par hectare. Elles ont été apportées en appliquant 4 g/plante d'engrais N-P-K 10-10-20 et 9 g/plante d'urée à 46% d'N. Le contenu en engrais N-P-K d'une capsule de boisson sucrée a été mis au pied de chaque plante le 28 janvier 2017 (15 jours après leur transplantation au champ) tandis que l'apport d'urée a été fractionné en deux. Une capsule de 3 g a été appliquée le 7 février 2017 (45 jours après transplantation) et deux capsules (6g) le 9 mars 2017 (75 jours après transplantation). Afin que les engrais soient bien assimilés, les granules ont été dispersés dans une rigole profonde de 1 cm entourant chacune des plantes. Cette cavité, préalablement creusée, était refermé après chaque application.

Pour la première récolte, les plantes ont été coupées à 30 cm du sol à l'aide d'un sécateur du 1^{er} au 5 avril 2017, tel qu'illustré à la figure 10.



Figure 10 : Réalisation de la première coupe d'*Artemisia annua* L. (Sougnez A., 2017)

La récolte finale a été effectuée du 24 au 27 mai 2017. Les plantes ont alors été coupées au ras du sol à l'aide d'une machette.

3.5.5. Opérations post-récolte

Après chaque récolte, les plantes ont été coupées en petits tronçons de maximum 3 cm de long à la machette. En plus de faciliter leur séchage, cette longueur permettait aux tiges de passer à la broyeuse lors de la transformation.

Les morceaux de feuilles et de tiges ainsi obtenus étaient étendus au soleil sur des tables de séchage ou au sol sur des bâches en plastique noir. Lors de cette étape, le matériel végétal était retourné chaque jour afin de sécher de manière uniforme. Il a été recouvert chaque nuit avec une toile moustiquaire protectrice disposée sur une armature métallique lorsqu'il était disposé sur une table de séchage. Ceci afin de limiter la réhumidification du produit à la tombée de la nuit et par la rosée matinale (figure 11).



Figure 11 : Systèmes de séchage des feuilles et des tiges, sur bâche noire et table de séchage (Sougné A., 2017)

Une fois les fragments de feuilles et de tiges bien secs, après 3 à 6 jours en fonction de l'ensoleillement, ils ont été battus avec un bâton puis tamisés en vue d'être séparés. Pour les plantes observées, les feuilles et les tiges étaient pesées séparément au gramme près grâce à une balance analytique avant d'être stockées séparément dans des sacs de riz récupérés. Pour le reste de la parcelle, les fragments étaient directement pesés aux cent grammes près dans ces sacs à l'aide d'une balance de 100 kg de portée.

Les sacs de stockage étaient ensuite pesés et transportés jusqu'à l'atelier de transformation, à Diamniadio, en vue d'y fabriquer les différents produits commercialisés par « Le Relais - Sénégal ».

3.5.6. Observations

Le nombre de plantes échantillonnées par parcelle élémentaire était de 10 pour les deux premières modalités et de 13 pour les 2 dernières. La même proportion d'échantillonnage a été conservée par rapport au test de densité à une seule coupe précédemment réalisé sur le site afin de garder la même représentativité des résultats et ainsi permettre leur comparaison. Les 184 plantes observées tout au long de l'expérience ont été choisies aléatoirement en dehors des plantes de bordure.

Pour chacune d'entre elle, la hauteur maximale et le diamètre maximal projeté au sol ont été mesurés avec un pentamètre ruban toutes les 2 semaines afin de suivre leur croissance.

Suite à chacune des deux récoltes, la biomasse des tiges et des feuilles séchées produites a été déterminée par parcelle élémentaire et par plante échantillonnée. De cette manière, des mesures de la biomasse du produit sec en kilogrammes par ha et en grammes par plante ont été obtenues pour chaque unité expérimentale.

3.6. Étude de l'effet de la fertilisation minérale

3.6.1. Objectif

Le but de l'essai est de confirmer l'existence d'éventuelles carences en phosphore et/ou en potassium dans le sol du site Yendane, suite aux résultats de l'essai de fertilisation minérale réalisé en 2015-2016 qui en laissaient supposer l'existence, afin d'ajuster la formule et la dose de fumure minérale.

3.6.2. Matériel végétal

La variété « Apollon » de la société Mediplant a été utilisée pour la transplantation initiale. Les remplacements des plants morts ont été effectués avec des plants de la variété « Yen pesokh ». Il s'agit des semences récupérées sur les plantes de la 1^{ère} génération de la variété « Apollon » cultivées lors des essais réalisés l'année précédente à Yendane.

3.6.3. Dispositif expérimental

Cet essai a été installé selon un dispositif en blocs aléatoires complets constitué de 30 unités expérimentales (10 modalités et 3 répétitions) de 43,2 m² (3,6 m x 12 m). Les parcelles étaient composées de 3 lignes séparées de 1,2 m, chaque ligne comportant 15 plantes disposées à 0,8 m de distance l'une de l'autre. La densité de 1,042 plantes/m² ainsi réalisée s'approche de la densité standard de 1 plante/m² appliquée dans les essais réalisés en 2013 et 2015 (Goethals 2013, Martinez 2015). La succession des lignes de plantes de chaque parcelle formait un bloc, comme représenté à la figure 12. Les trois blocs étaient séparés l'un de l'autre par un chemin de 2 m. Plusieurs lignes de plantes supplémentaires de la modalité « témoin organique » étaient présentes aux extrémités en guise de bordures extérieures. De plus, un espace de bordure extérieure de minimum 2 m a été respecté entre les différents essais.

	42 m													
	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	2,4 m		
BLOC 3		F2	F7	F6	TO	F5	F3	F1	TM	C	F4		12 m	40 m
													2 m	
BLOC 2		C	TO	TM	F7	F6	F4	F3	F5	F2	F1		12 m	
													2 m	
BLOC 1		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	TM	TO	C		12 m	

Figure 12 : Dispositif spatial en blocs aléatoires complets de l'étude de l'effet de la fertilisation minérale

Comme repris dans le tableau 4, 10 modalités de fertilisation minérale ont été testées dans ce test soustractif. Tout d'abord, la dose saturante non toxique en N-P-K pour la plante a été appliquée. Ensuite, chaque élément s'est vu tour à tour réduit de moitié puis soustrait de la formule. De cette manière, il est possible d'observer l'effet de chacun d'entre eux de manière isolée et de

déterminer lequel est le plus limitant. À ces 7 modalités s'ajoutent deux témoins croisés permettant de faire le lien entre les deux études de fertilisation de ce travail. Le « témoin minéral », noté TM sur le tableau, est la meilleure modalité de fertilisation minérale déterminée précédemment sur le site. Le « témoin organique », noté TO, constitue quant à lui la seule modalité de fertilisation organique déjà pratiquée sur le site. Enfin, un témoin « contrôle », noté C, sans aucun engrais a été mis en place.

Tableau 4 : Détails d'application d'engrais minéral des différentes modalités

Objet	N-P-K (10-10-20)		Urée (46-0-0)		Superphosphate (0-25-0)		Sulfopotasse (0-0-50)		Eléments majeurs total (g/plante)			Eléments majeurs total (kg/ha)		
	g/plante	kg/ha	g/plante	kg/ha	g/plante	kg/ha	g/plante	kg/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
F1	0	0	12	125	15	156	8	83	5,5	3,8	4	58	39	42
F2	0	0	0	0	15	156	8	83	0	3,8	4	0	39	42
F3	0	0	6	63	15	156	8	83	2,8	3,8	4	29	39	42
F4	0	0	12	125	0	0	8	83	5,5	0	4	58	0	42
F5	0	0	12	125	7,5	78	8	83	5,5	1,9	4	58	19,5	42
F6	0	0	12	125	15	156	0	0	5,5	3,8	0	58	39	0
F7	0	0	12	125	15	156	4	42	5,5	3,8	2	58	39	21
TM	4	41,7	9	94	0	0	0	0	4,5	0,4	1	47,3	4,2	8,3
TO	0	0	0	0	0	0	0	0	9,5	15,2	6	99	158	63
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L'urée, le superphosphate simple et le sulfopotasse sont les seuls engrais simples disponibles sur place. Dans un souci d'économie et de reproductibilité, ils ont été répandus plante par plante et dosés avec un nombre de dosettes prédéfini. Les années précédentes, l'urée était appliquée localement par multiple de 3 g, dose correspondant au contenu d'une capsule de boisson sucrée. De la même manière, le superphosphate simple a été appliqué à la dose de 15 g, masse contenue dans 3 capsules de boissons sucrées. Le sulfopotasse a été dosé à 8 g grâce au contenu d'un bouchon de bouteille de boisson gazeuse. Pour les modalités F5 et F7, les demi-doses ont été pesées à l'aide d'une balance analytique.

La modalité de fertilisation « témoin minéral » (TM) correspond à 42 kg/ha de NPK 10-10-20 et 94 kg/ha d'urée. Elle a été mise en place de la même manière que l'année précédente, en appliquant 4 g/plante d'engrais N-P-K 10-10-20 et 9 g/plante d'urée à 46 % N. Le contenu d'une capsule de boisson sucrée en engrais N-P-K a été mis au pied de chaque plantes 15 jours après leur transplantation au champ tandis que l'urée a été fractionnée en 2 fois. Une capsule de 3 g a été appliquée 45 jours après transplantation, suivie de deux capsules 75 jours après la date de transplantation.

La modalité de fertilisation « témoin organique » (TO) correspond à 1 kg de compost de fientes de volaille par plante, équivalent à 99 kg N/ha, 158 kg P₂O₅/ha et 63 kg K₂O. Ces données sont approximatives car l'application a été réalisée sous forme de poignées, une poignée représentant environ 175 g de compost en moyenne. Une poignée de compost a été déposée au pied de chaque plante 30 jours après leur transplantation, suivie de deux puis de trois poignées respectivement 60 et 90 jours après la date de transplantation.

Une analyse de la variance à deux facteurs a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 17 Statistical Software. Ces facteurs sont : les blocs (3, aléatoire) et la modalité de fertilisation (10, fixe). Une comparaison des moyennes par la méthode de Fisher a également été effectuée lorsqu'il existait une différence significative entre celles-ci.

3.6.4. Itinéraire technique de la culture

Les opérations de mise en place de cette étude sont identiques à celles de l'étude de l'effet de la densité de plantation.

La transplantation a eu lieu le 24 décembre 2016 également. Des remplacements ont dû être effectués jusqu'au 7 mars 2017.



Figure 13 : Disposition des plantes des essais de fertilisation (Sougnéz A., 08/03/17)

Suite à l'important taux de mortalité des jeunes plantules causé par l'aspersion, les différents fertilisants n'ont pu être appliqués que le 21 janvier 2017 selon la méthodologie décrite précédemment. La fumure azotée a été répartie en deux fractions. Seule la moitié de la dose d'urée des modalités F1, F3, F5, F6 et F7 a donc été appliquée à cette date. La seconde moitié a été appliquée le 3 avril 2017, c'est-à-dire 100 jours après la transplantation. Cette date permettait une meilleure reprise des plantes après la réalisation d'une éventuelle coupe intermédiaire.

Les plantes des différents essais ont toutes été arrosées et désherbées à la même fréquence.



Figure 14 : Désherbage des plantes d'*Artemisia annua* L. (Van Damme P., 2017)

À la récolte finale, les plantes non échantillonnées ont été coupées au ras du sol à la machette du 3 au 5 avril. Les plantes faisant l'objet d'observations régulières ont été récoltées après leur dernière mesure du 12 au 13 avril 2017.

3.6.5. Opérations post-récolte

Les opérations post-récolte de cette étude sont identiques à celles de l'étude de l'effet de la densité de plantation.

3.6.6. Observations

Le nombre de plantes échantillonnées par parcelle élémentaire était de 10. La même proportion d'échantillonnage a été conservée par rapport au test de fertilisation précédemment réalisé sur le site afin de garder la même représentativité des résultats et ainsi permettre leur comparaison. Les 300 plantes observées tout au long de l'expérience ont été choisies aléatoirement en dehors des plantes de bordure.

Pour chacune d'entre elles, la hauteur maximale et le diamètre maximal projeté au sol ont été mesurés toutes les 2 semaines afin de suivre leur croissance.

A la récolte finale, la biomasse des tiges et des feuilles séchées produites a été déterminée par parcelle élémentaire et par plante échantillonnée. De cette manière, des mesures de la biomasse du produit sec en kilogrammes par ha et en grammes par plante ont été réalisées pour chaque unité expérimentale.

3.7. Étude de l'effet de la fertilisation organique

3.7.1. Objectif

Le but de l'essai est d'identifier la modalité de fumure organique la plus performante dans les conditions de Yendane en utilisant les sources de compost effectivement disponibles localement.



Figure 15 : Parcelle de compostage du site de Yendane (Sougnez A., 2017)

3.7.2. Matériel végétal

La variété « Apollon » de la société Médiplant a été utilisée pour la transplantation initiale. Les remplacements des plants morts ont été effectués avec des plants de la variété « Yen pesokh ». Il s'agit des semences récupérées sur les plantes de la 1^{ère} génération de la variété « Apollon » cultivées lors des essais réalisés l'année précédente à Yendane.

3.7.3. Dispositif expérimental

Cet essai a été installé selon un dispositif en blocs aléatoires complets constitué de 24 unités expérimentales (8 modalités et 3 répétitions) de 43,2 m² (3,6 m x 12 m). Tout comme dans l'autre essai de fertilisation, les parcelles étaient composées de 3 lignes séparées de 1,2 m, chaque ligne comportant 15 plantes disposées à 0,8 m de distance l'une de l'autre. La densité était également de 1,042 plantes/m². La succession des lignes de plantes de chaque parcelle formait un bloc, comme représenté à la figure 16. Les trois blocs étaient séparés l'un de l'autre par un chemin de 2 m et plusieurs lignes de plantes supplémentaires de la modalité « témoin organique » étaient présentes aux extrémités en guise de bordures extérieures. De plus, un espace de bordure extérieure de minimum 2 m a été respecté entre les différents essais.

	34,8 m											
	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	3,6 m	2,4 m		
BLOC 3		MAC 333	TM	MV 333	TO MV 123	MV 111	MAC 999	C	MAC 369		12 m	40m
											2 m	
BLOC 2		C	TM	MAC 999	MV 333	MAC 369	TO MV 123	MAC 333	MV 111		12 m	
											2 m	
BLOC 1		MV 111	MAC 333	TO MV 123	MAC 369	MV 333	MAC 999	TM	C		12 m	

Figure 16 : Dispositif spatial en blocs aléatoires complets de l'étude de l'effet de la fertilisation organique

Comme mentionné plus haut, deux types de matière organique ont été testés dans cet essai. Il s'agit de la fiente de volaille et du fumier d'âne-cheval disponibles localement et compostés sur le site de l'exploitation. Le système de fractionnement par poignées et par mois après transplantation a été gardé, 1 poignée correspondant à peu près à 175 g quelle que soit la nature du compost. Suite à l'analyse des différents composts (voir annexe 7.2.), il a été décidé de tripler la dose du compost d'âne-cheval afin de prendre en compte sa teneur en azote total trois fois plus faible que celle du compost à base de fientes de volailles. En plus d'être bien plus disponible, le fumier d'âne-cheval est trois fois moins cher. Pour chaque type de compost, trois doses ont été testées, comme représenté dans le tableau 5.

Tableau 5 : Nombre de poignées et dose totale de compost appliqués dans les différentes modalités

Modalités	Nombre de poignées appliquées :				Dose totale appliquée :	
	30 jours après transplantation	60 jours après transplantation	90 jours après transplantation	Total	en g/plante	en kg/ha
MV 111	1	1	1	3	525	5 471
MV 123 (TO)	1	2	3	6	1 050	10 941
MV 333	3	3	3	9	1 575	16 412
MAC 333	3	3	3	9	1 575	16 412
MAC 369	3	6	9	18	3 150	32 823
MAC 999	9	9	9	27	4 725	49 235

A ces 6 modalités s'ajoutent les deux témoins (TO et TM) identiques à ceux de l'essai de fertilisation minérale afin de permettre de faire le lien entre les deux types de fertilisation. Cependant, la modalité MV 123 correspondant au témoin organique, celui-ci n'a pas été répété. Enfin, un témoin « contrôle » (C) sans aucun engrais a également été mis en place.

Une analyse de la variance à deux facteurs a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 17 Statistical Software. Ces facteurs sont : les blocs (3, aléatoire) et la modalité de fertilisation (8, fixe).

Une comparaison des moyennes par la méthode de Fisher a également été effectuée lorsqu'il existait une différence significative entre celles-ci.

3.7.4. Itinéraire technique de la culture

Cet essai de fertilisation organique étant lié au précédent portant sur la fertilisation minérale, les opérations y ont toutes été effectuées de la même manière et aux mêmes dates.

Les différents fertilisants ont été appliqués comme expliqué au point précédent.



Figure 17 : Parcelle de l'essai de fertilisation organique après la deuxième application de compost et avant la coupe (Sougnez A., 2017)

3.7.5. Opérations post-récolte

Les opérations post-récolte sont identiques à celles des autres essais.



Figure 18 : Coupe à la machette de la récolte d'*Artemisia annua* L. (Sougnez A., 2017)

3.7.6. Observations

Le nombre de plantes échantillonnées par parcelle élémentaire était de 10. La même proportion d'échantillonnage a été conservée par rapport au test de fertilisation minérale afin de permettre leur comparaison. Les 240 plantes observées tout au long de l'expérience ont été choisies aléatoirement en dehors des plantes de bordure.

Les observations de l'étude de l'effet de la fertilisation organique ont été réalisées exactement de la même manière que celles pour l'étude de l'effet de la fertilisation minérale.

Pour cet essai, il a également été vérifié que la minéralisation du compost soit optimale après application.

3.8. Analyse économique de la culture d'*Artemisia annua* L. sur un ha

Afin de comparer la rentabilité de production de l'armoise annuelle selon les différents itinéraires techniques pratiqués, le prix de revient de chaque modalité de production testée a été calculé selon la méthode reprise en annexe.

3.9. Suivi des bioagresseurs

3.9.1. Introduction

Lors de la réalisation des essais, les plantes d'*Artemisia annua* L. ont dû faire face à différentes sortes d'attaques encore inconnues ou du moins très peu répertoriées dans la littérature. Celles-ci ont fait l'objet d'un suivi régulier en cours de culture pour en déterminer les agents causaux et l'ampleur des dégâts occasionnés.

3.9.2. Observations

Le suivi a été effectué régulièrement sur l'ensemble des parcelles, y compris les parcelles 1 à 4 de l'essai de densité. Une attention toute particulière a été prêtée aux plantes faisant l'objet de mesures régulières dans les différents essais.

Toutes les deux semaines, les bioagresseurs présents sur les plantes observées ont été identifiées et photographiés lors des prises de mesures de croissance. De plus, des rondes d'observation ont été effectuées au moins une fois par semaine sur l'ensemble des parcelles afin d'évaluer le nombre de plantes touchées et l'impact des attaques. Le rythme des observations était quotidien dans les cas les plus préoccupants. Enfin, un contrôle final dénombrant les emplacements vides, plantes atteintes de malformations, en boutons floraux et en fleurs a été effectué juste avant chaque coupe afin de prendre ces éléments en considération dans l'interprétation des résultats.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les tableaux reprenant le détail des données observées et les traitements statistiques auxquels il est fait référence dans cette partie sont présentés pour chaque étude à l'annexe 7.1.

Les plantes observées ayant subi une attaque de bioagresseurs ont été retirées des données afin de ne pas biaiser les résultats. Il en va de même pour les transplants tardifs utilisés pour le remplacement des manquants car ceux-ci présentaient un retard de croissance important dû au climat frais du début de saison.

4.1. Étude de l'effet de la densité

4.1.1. Évolution des dimensions des plantes

La hauteur moyenne et le diamètre projeté au sol moyen ont été mesurés du 15 février au 24 mai 2017 afin de décrire la croissance des plantes d'*Artemisia annua* L. en fonction du temps et de leur densité de plantation (figure 19 et 20).

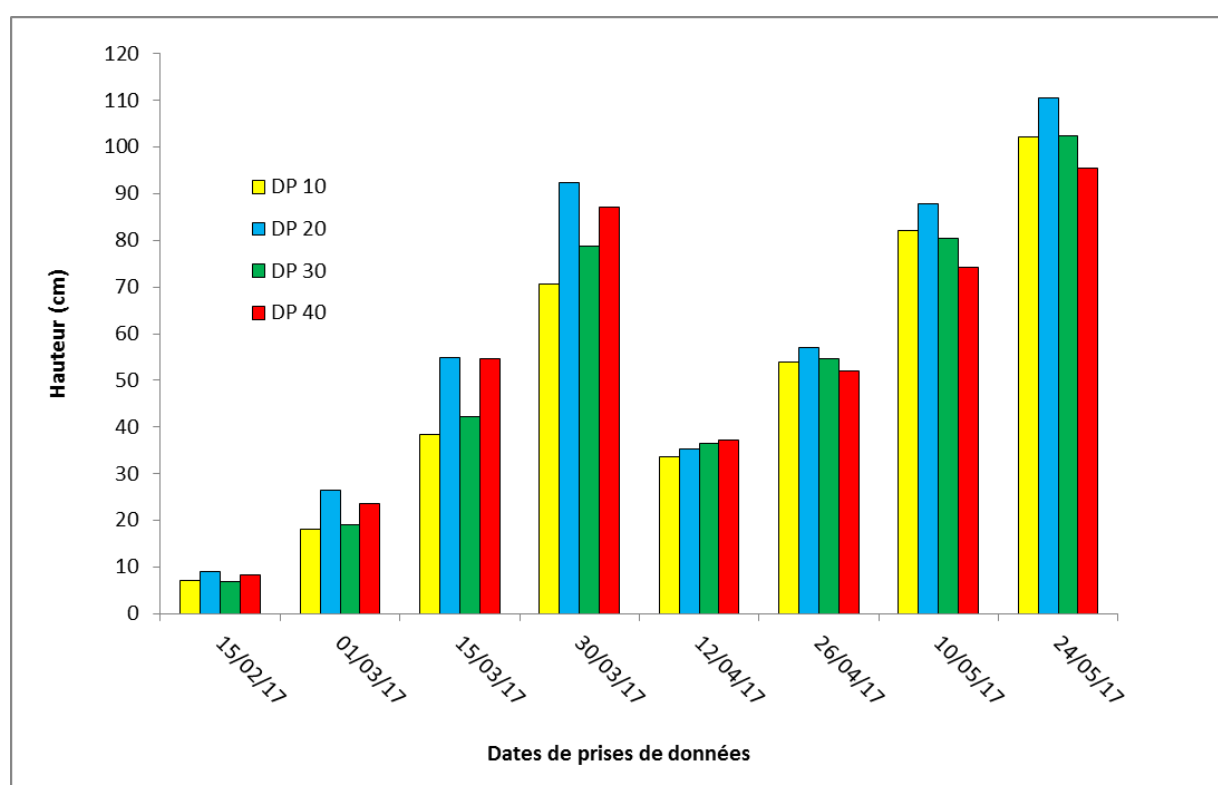


Figure 19 : Influence de la densité de plantation sur l'évolution de la hauteur moyenne en fonction du temps

Légende :

- DP 10 : 10 000 plantes/ha, soit 1 plante/m² (1m x 1m)
- DP 20 : 20 000 plantes/ha, soit 2 plantes/m² (1m x 0,5m)
- DP 30 : 30 000 plantes/ha, soit 3 plantes/m² (0,5m x 0,66m)
- DP 40 : 40 000 plantes/ha, soit 4 plantes/m² (0,5m x 0,5m)

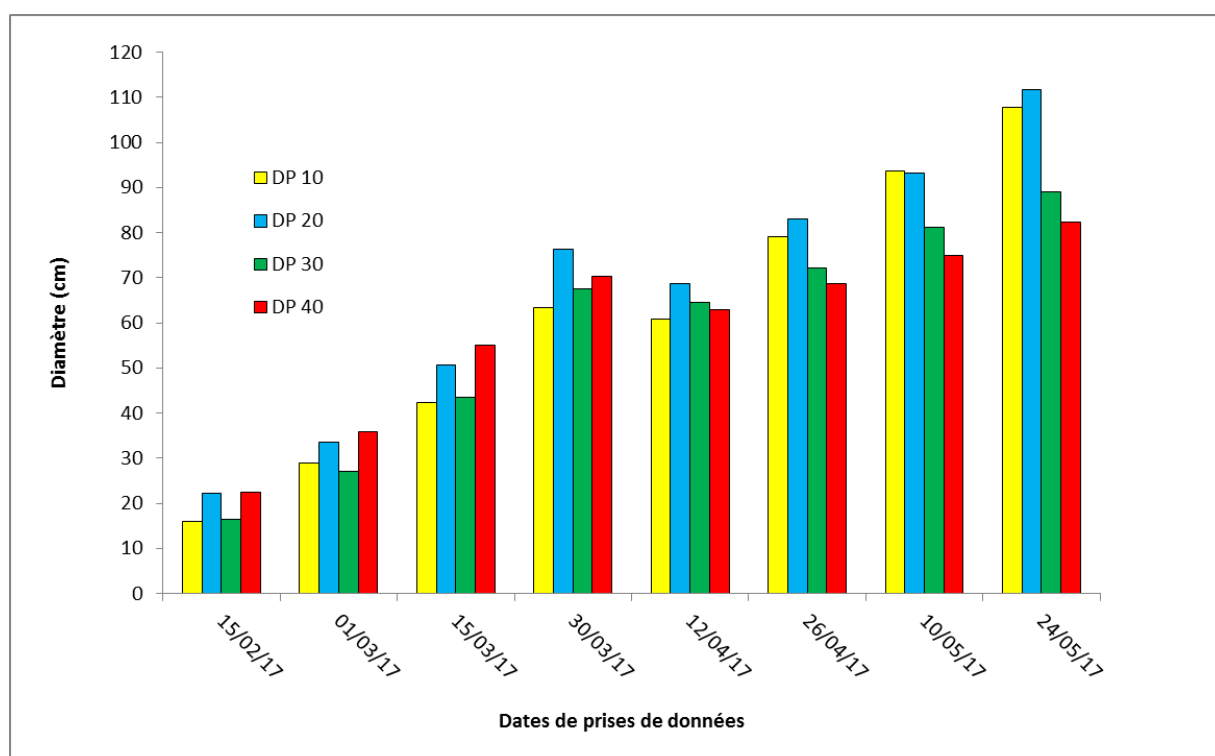


Figure 20 : Influence de la densité de plantation sur l'évolution du diamètre projeté au sol moyen en fonction du temps

Légende :

- DP 10 : 10 000 plantes/ha, soit 1 plante/m² (1m x 1m)
- DP 20 : 20 000 plantes/ha, soit 2 plantes/m² (1m x 0,5m)
- DP 30 : 30 000 plantes/ha, soit 3 plantes/m² (0,5m x 0,66m)
- DP 40 : 40 000 plantes/ha, soit 4 plantes/m² (0,5m x 0,5m)

Toutes modalités confondues, les plantes ont grandi en moyenne de 24 cm en hauteur et de 14 cm en diamètre toutes les deux semaines. Les plantes de la modalité DP 20 se démarquent des autres par leur croissance moyenne de 26 cm de hauteur par période contre 22 et 23 cm respectivement pour la modalité DP 10 et les modalités DP 30 et DP 40. Au niveau du diamètre projeté au sol, les plantes des deux plus faibles densités de plantation (DP 10 et DP 20) se démarquent des autres par une croissance moyenne de 16 cm contre 13 et 11 cm respectivement pour les modalités DP 30 et DP 40.

Que ce soit pour la hauteur ou le diamètre, les modalités DP 20 et DP 40 semblent les plus prometteuses avant la coupe. Cependant, les plantes de la modalité DP 40 ont perdu en croissance après la coupe et présentent les plus petites hauteurs et diamètres finaux.

Les moyennes des dernières prises de mesures de la hauteur et du diamètre projeté au sol sont reprises dans le tableau 6.

Tableau 6 : Hauteurs moyennes et diamètres projetés au sol moyens mesurés le 24/05/17

Objet	Effectif/ parcelle élémentaire	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)
DP 10 : 10 000 pl/ha	24	103 ± 17	108 ± 19 A
DP 20 : 20 000 pl/ha	23	110 ± 15	113 ± 16 A
DP 30 : 30 000 pl/ha	24	103 ± 23	88 ± 16 B
DP 40 : 40 000 pl/ha	23	96 ± 24	83 ± 17 B
P-value		0,074 (AH0)	0,000 (***)

Légende : moyenne ± écart-type, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes

Aucune différence significative n'a été observée entre les hauteurs finales des différentes densités de plantation testées, principalement du fait d'une très forte variabilité des résultats, due en grande partie à l'effet des vents dominants qui ont induit un effet bloc très hautement significatif. La hauteur finale des plantes est d'autant plus petite que le bloc est situé côté vent.

Les diamètres finaux présentent une différence très hautement significative entre les deux plus fortes et les deux plus faibles densités malgré l'hétérogénéité du terrain.

4.1.2. Production de biomasse

Les tableaux 7 et 8 présentent les poids moyens de feuilles et de tiges séchées exprimés par plante et par ha pour les traitements comparés dans l'essai de densité de plantation.

Tableau 7 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la densité de plantation

Objet	Effectif/ parcelle élémentaire	Feuilles séchées (gramme/plante)	Tiges séchées (gramme/plante)	Récolte totale (gramme/plante)	Taux de battage (%)
DP 10 : 10 000 pl/ha	24	228 ± 131 A	269 ± 152 A	497 ± 279 A	46
DP 20 : 20 000 pl/ha	23	211 ± 73 AB	296 ± 115 A	507 ± 182 A	42
DP 30 : 30 000 pl/ha	24	162 ± 83 BC	192 ± 115 B	354 ± 189 B	46
DP 40 : 40 000 pl/ha	23	138 ± 62 C	185 ± 98 B	323 ± 156 B	43
P-value		0.004 (**)	0.003 (**)	0.003 (**)	

Légende : moyenne ± écart-type, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes

Tableau 8 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la densité de plantation

Objet	Densité réelle (pl/ha)	Feuilles séchées (kg/ha)	Tiges séchées (kg/ha)	Récolte totale (kg/ha)	Taux de battage (%)	Récolte utile = 2 x poids feuilles (kg/ha)
DP 10 : 10 000 pl/ha	8929	2340 ± 690 B	3309 ± 1797 B	5649 ± 2484 B	41	4680
DP 20 : 20 000 pl/ha	19231	4033 ± 1296 A	5674 ± 1498 A	9707 ± 2774 A	42	8066
DP 30 : 30 000 pl/ha	27027	3591 ± 475 A	5901 ± 944 A	9492 ± 1305 A	38	7182
DP 40 : 40 000 pl/ha	35714	3812 ± 471 A	6426 ± 816 A	10238 ± 1287 A	37	7624
P-value		0.021 (*)	0.010 (*)	0.008 (**)		

Légende : moyenne ± écart-type, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes

- voir résultats du test de Fisher en annexe

On peut distinguer la production par plante des modalités DP 10 et DP 20 de celle des modalités DP 30 et DP40. Les tisanes et les gélules produites par le « Relais - Sénégal » étant constituée pour moitié de feuilles et pour moitié de tiges, il est intéressant d'avoir un taux de battage (proportion de feuilles séchées dans la récolte totale sèche) le plus élevé possible.

Tout comme il avait déjà été observé précédemment sur le site, l'augmentation de la densité entraîne une diminution significative du poids des feuilles et des tiges séchées produites par plante (Yang, 2009 ; Van Damme, 2016). La tendance inverse à l'hectare avancée par Yang (2009) et Pop *et al.* (2017) n'est cependant plus totalement vérifiée cette année car la modalité DP 20 se démarque par sa plus grande production de feuilles ; ce qui se traduit par une récolte utile (poids des feuilles + poids équivalent de tiges) maximale pour cette modalité. On peut cependant noter que celle-ci présente une variabilité bien plus importante que les autres.

La modalité DP 20 se démarque également des autres par sa densité réelle plus proche de la théorique, avec 96 % contre 89 à 90 % des plantes réellement présentes dans les parcelles pour les autres modalités (voir « Densité réelle (pl/ha) » sur le tableau 8). Cela indique que les parcelles à 20 000 plantes/ha présentaient un taux de mortalité de 4 % contre 10 % pour les autres densités de plantation.

La densité de plantation de 40 000 plantes/ha permet d'obtenir une production de 10 tonnes à l'hectare, soit presque le double qu'avec le standard actuel de 10 000 plantes/ha. Un tel gain de production lors du test de ces deux modalités avait déjà été observé en 2016. La pratique de deux coupes a permis d'obtenir des rendements de feuilles et de tiges de 5 à 10 T/ha au lieu de 4 à 8 T/ha pour les mêmes densités de plantation récoltées avec une seule coupe finale en 2016. On peut noter un gain d'environ 30 %, 70 % et 25 % de la récolte totale cette année par rapport à 2016 respectivement pour les modalités DP 10, DP 20 et DP 40. De plus, le taux de battage ne s'en est pas vu fort diminué, puisqu'il était alors proche des 40 % en moyenne pour cet essai densité à une seule coupe (Van Damme, 2016).

4.1.3. Discussion

Le test de différentes densités de plantation avec la pratique d'une seule coupe en 2016 avait permis d'émettre l'hypothèse qu'une augmentation de la densité de plantes à l'hectare se traduisait par une augmentation de la hauteur et une diminution du diamètre projeté au sol (Van Damme, 2016). Cette hypothèse était corroborée par les résultats obtenus par Yang (2009). Cependant, les plantes de la modalité DP 20 de cette saison culturale semblent échapper à cette règle en présentant à la fois une hauteur et un diamètre plus élevés avant la première coupe.

On peut remarquer que le diamètre projeté au sol final des plantes est significativement plus grand lorsque l'espace entre les lignes est de 1 m plutôt que 0,5 m. Ceci tend à confirmer l'observation de Scarcella *et al.* (2011) selon laquelle l'armoise annuelle se ramifie plus en largeur et grandit moins en hauteur lorsqu'elle a plus d'espace et de lumière à faible densité.

La densité de plantation de 20 000 plantes/ha a permis d'obtenir une récolte totale de 9,7 tonne/ha. Dans les conditions de cet essai, la disposition spatiale des armoises annuelles a certainement dû jouer un rôle dans la réussite de cette modalité. En effet, celle-ci cumule deux bénéfices : celui d'une forte densité sur les lignes, poussant les plantes à croître rapidement en

hauteur ; et celui d'un espace plus important entre les lignes, permettant ainsi une meilleure aération et un plus grand développement en largeur. Limiter le confinement des plantes permettrait d'éviter la propagation de maladies fongique notamment.

La baisse de croissance des plantes de la modalité DP 40 observée après la coupe pourrait s'expliquer par trois effets. Premièrement, ce phénomène avait déjà été observé pour le diamètre projeté au sol l'année passée. Indépendamment de la pratique d'une coupe, la croissance du diamètre des plantes de la même densité de plantation avait diminué à la mi-avril. Il s'expliquerait simplement par le manque de place nécessaire à une plus grande croissance en largeur des plantes à forte densité (Van Damme, 2016). Deuxièmement, la perte de croissance des plantes en hauteur pourrait s'expliquer par la pression des ravageurs qui semble plus importante à forte densité. Troisièmement, les plantes de la modalité DP 40 ont montré une moins bonne reprise après la coupe car leur centre était défeuillé dû au manque de lumière. Ces sources de stress expliqueraient également pourquoi les plantes de la modalité DP 10 montrent une meilleure croissance que les deux plus fortes densités après la coupe, ce qui va également à l'encontre de l'observation de Yang (2009).

Le vent était particulièrement fort sur les parcelles de cette étude. Il semble être le principal facteur de variabilité de la hauteur finale des plantes. L'étude de Wang *et al.* (2015) a démontré que le vent limite la conductivité hydraulique des tiges d'*Artemisia annua* L. Ce phénomène entraîne une diminution de la photosynthèse, menant à une biomasse significativement plus basse et une diminution du rapport système racinaire/pousse feuillée. Sur le terrain, il était aisément visible que les plantes situées coté vent étaient plus petites et que le taux de mortalité des transplants y était bien plus grand. De plus, les rafales de vent plus importantes empêchaient parfois à l'eau émise par aspersion d'atteindre les plantes. Enfin, il semble qu'il ait été porteur du champignon pathogène qui a attaqué les plantes cette année (voir paragraphe 4.5.3.), puisqu'elles ont d'abord été touchées de ce côté avant que la maladie ne se propage vers le sud.

La production à l'hectare des modalités DP 10, DP 30 et DP 40 doit être biaisée du fait de leur taux de mortalité deux fois plus important que celui de la DP 20. Elles présentent d'ailleurs un taux de battage plus faible à l'hectare qu'à l'échelle de la plante, certainement dû au champignon pathogène qui entraîne la nécrose des feuilles. En se référant aux données prises sur les plantes observées, on remarque que le taux de battage de la modalité DP 20 est moins intéressant que les autres. Il est toutefois plus élevé que ceux obtenu avec la pratique d'une seule coupe. C'est le prix de revient obtenu pour chaque modalité qui déterminera quelle densité de plantation est la plus rentable.

Enfin, cet essai a confirmé l'intérêt de pratiquer une coupe intermédiaire en cas de transplantation en début de grande saison sèche et de récolte finale début mai. Cette pratique a permis d'augmenter la production totale de 25 à 70 % en fonction des densités de plantation.

4.2. Étude de l'effet de la fertilisation minérale

4.2.1. Évolution des dimensions des plantes

La hauteur moyenne et le diamètre projeté au sol moyen ont été mesurés du 15 février au 24 mai 2017 afin de décrire la croissance des plantes d'*Artemisia annua* L. en fonction du temps et de leur fertilisation (figure 21 et 22).

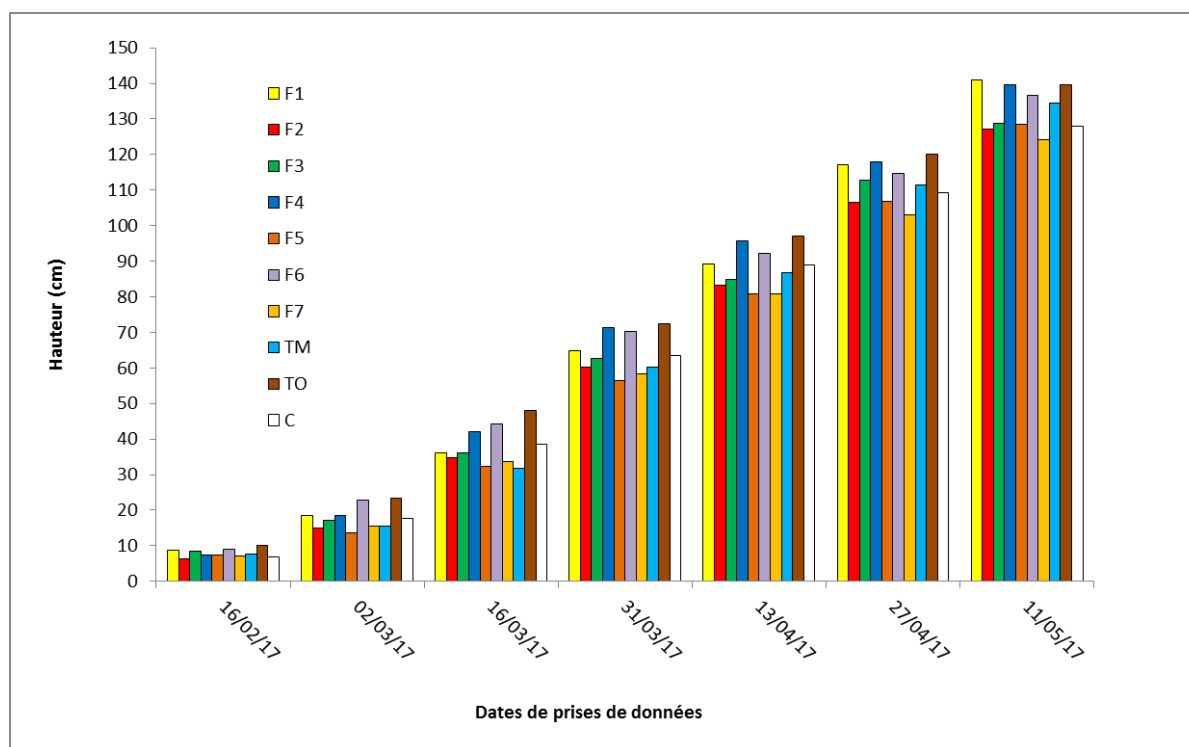


Figure 21 : Influence de la fertilisation sur l'évolution de la hauteur moyenne en fonction du temps

Traitements comparés (Fx : kg N/ha - kg P₂O₅/ha - kg K₂O/ha) :

F1 : 58-39-42 ; F2 : 0-39-42 ; F3 : 29-39-42 ; F4 : 58-0-42 ; F5 : 58-19,5-42 ; F6 : 58-39-0 ; F7 : 58-39-21 ;
 TM : 47,3-4,2-8,3 ; TO : 99-158-63 ; C : 0-0-0 .

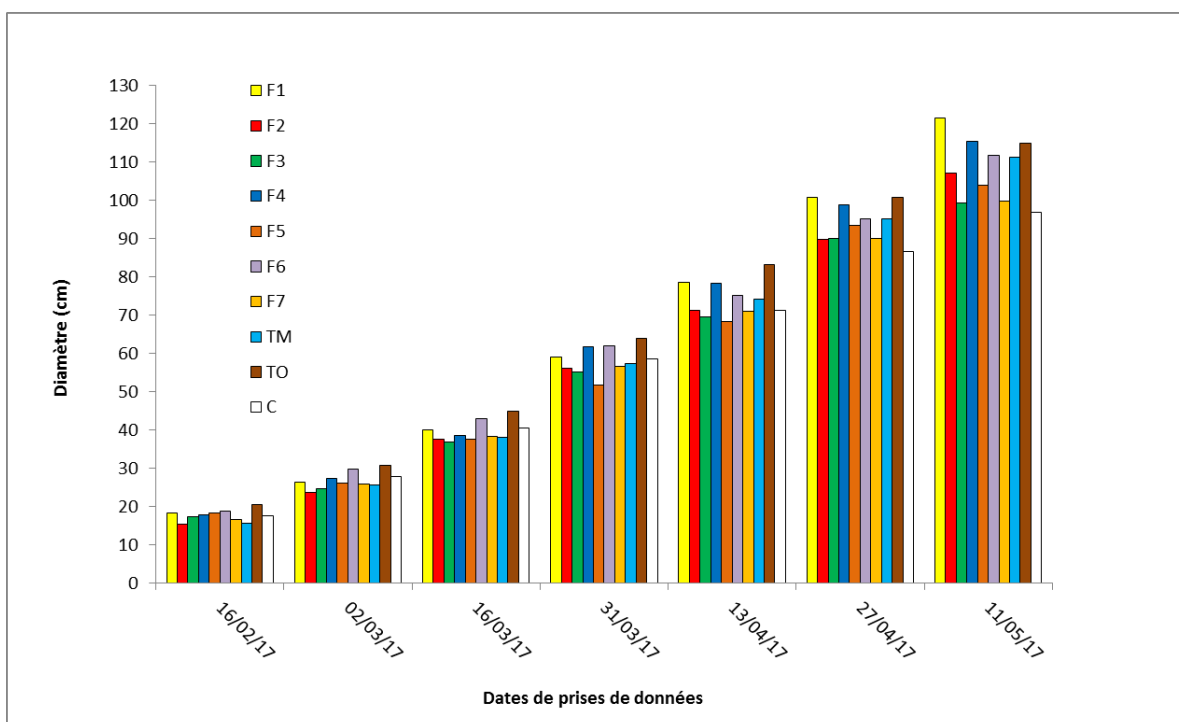


Figure 22 : Influence de la fertilisation sur l'évolution du diamètre projeté au sol moyen en fonction du temps

Traitements comparés (Fx : kg N/ha - kg P₂O₅/ha - kg K₂O/ha) :

F1 : 58-39-42 ; F2 : 0-39-42 ; F3 : 29-39-42 ; F4 : 58-0-42 ; F5 : 58-19,5-42 ; F6 : 58-39-0 ; F7 : 58-39-21 ;

TM : 47,3-4,2-8,3 ; TO : 99-158-63 ; C : 0-0-0 .

Les plantes ont crû en moyenne de 21 cm en hauteur et 15 cm en diamètre projeté au sol par période de deux semaines. Les armoises annuelles de l'essai de fertilisation cultivées à la même densité et saison en 2015-2016 avaient montré une croissance moins importante de 17 cm en hauteur et 14 cm en diamètre par période (Van Damme, 2016). Mis à part un début de croissance tardif dû au début de saison particulièrement froid, les plantes montrent une croissance linéaire au cours du temps pour tous les traitements.

Au niveau de la hauteur, les modalités TO, F4 et F6 semblent très légèrement supérieures aux autres durant toute la saison. La modalité TM semble également légèrement plus favorable lors des dernières semaines et la modalité F1 se démarque légèrement des autres lors du dernier mois. On observe à peu près les mêmes tendances au niveau du diamètre. Les seules différences sont que la modalité F4 semble se sortir du lot plus tardivement alors que la modalité F1 se démarque de manière plus précoce que les autres.

Les moyennes des dernières prises de mesures de la hauteur et du diamètre projeté au sol sont reprises dans le tableau 9.

Tableau 9: Hauteurs moyennes et diamètres projetés au sol moyens mesurés le 11/05/17

Objet Kg unités fertilisantes/ha	Effectif	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)
F1 : 58-39-42	22	141 ± 22	122 ± 24 A
F2 : 0-39-42	24	126 ± 26	107 ± 29 BC
F3 : 29-39-42	19	129 ± 33	101 ± 24 BC
F4 : 58-0-42	17	139 ± 20	115 ± 19 AB
F5: 58-19,5-42	21	129 ± 21	105 ± 23 BC
F6 : 58-39-0	23	135 ± 24	111 ± 21 ABC
F7 : 58-39-21	25	124 ± 26	100 ± 25 BC
TM : 47,3-4,2-8,3	27	135 ± 24	112 ± 29 AB
TO : 99-158-63	20	139 ± 30	111 ± 34 ABC
C : 0-0-0	23	128 ± 23	97 ± 20 C
P-value		0,254 (AH0)	0,044 (*)

Légende : moyenne ± écart-type, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes

Aucune différence significative n'a été observée entre les hauteurs finales des plantes pour les modalités de fertilisation testées. Les blocs ne présentent pas de différence significative entre eux. On peut cependant souligner l'importance de la variabilité des résultats.

Malgré cette variabilité, les diamètres finaux présentent des différences significatives pour les traitements F1, F4 et TM par rapport au témoin « contrôle » C. Comme observé sur les graphes, les plantes des modalités F1, F4, F6, TM et TO présentent des diamètres légèrement plus élevés et la modalité F1 se démarque significativement des modalités F2, F3, F5, F7 et C.

4.2.2. Production de biomasse

Les tableaux 10 et 11 présentent les poids moyens de feuilles et de tiges séchées exprimés par plante et par ha pour les traitements comparés dans l'essai de fertilisation minérale.

Tableau 10 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.

Objet (kg unités fertilisantes/ha)	Effectif/ parcelle élémentaire	Feuilles séchées (gramme/plante)	Tiges séchées (gramme/plante)	Récolte totale (gramme/plante)	Taux de battage (%)
F1 : 58-39-42	22	277 ± 131	383 ± 251 A	660 ± 376 A	42
F2 : 0-39-42	24	212 ± 132	279 ± 238 ABC	492 ± 361 BC	43
F3 : 29-39-42	19	191 ± 79	242 ± 147 BC	433 ± 220 BC	44
F4 : 58-0-42	17	210 ± 68	333 ± 129 AB	542 ± 189 ABC	39
F5: 58-19,5-42	21	205 ± 104	262 ± 119 BC	467 ± 210 BC	44
F6 : 58-39-0	23	195 ± 91	261 ± 175 BC	457 ± 261 BC	43
F7 : 58-39-21	25	180 ± 80	234 ± 143 BC	413 ± 210 BC	44
TM : 47,3-4,2-8,3	27	236 ± 124	321 ± 210 AB	557 ± 326 AB	42
TO : 99-158-63	20	223 ± 130	316 ± 190 AB	539 ± 294 ABC	41
C : 0-0-0	23	172 ± 104	203 ± 179 C	375 ± 277 C	46
P-value		0.066 (AH0)	0.043 (*)	0.040 (*)	

Légende : moyenne ± écart-type, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes

Tableau 11 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.

Objet (kg unités fertilisantes/ha)	Densité réelle (pl/ha)	Feuilles séchées (kg/ha)	Tiges séchées (kg/ha)	Récolte totale (kg/ha)	Taux de battage (%)	Récolte utile = 2 x poids feuilles (kg/ha)
F1 : 58-39-42	9346	1663 ± 305	2318 ± 614	3981 ± 919	42	3326
F2 : 0-39-42	9174	1239 ± 64	1681 ± 203	2920 ± 266	42	2478
F3 : 29-39-42	8621	1223 ± 245	1535 ± 392	2759 ± 619	44	2446
F4 : 58-0-42	9901	1535 ± 251	2174 ± 806	3710 ± 1055	41	3070
F5: 58-19,5-42	9091	1445 ± 353	1764 ± 341	3209 ± 686	45	2890
F6 : 58-39-0	9615	1399 ± 478	1673 ± 660	3072 ± 1125	46	2798
F7 : 58-39-21	9174	1209 ± 186	1525 ± 216	2734 ± 390	44	2418
TM : 47,3-4,2-8,3	9615	1530 ± 315	2124 ± 410	3655 ± 723	42	3060
TO : 99-158-63	10101	1589 ± 642	1857 ± 493	3445 ± 1124	46	3187
C : 0-0-0	9615	1150 ± 133	1589 ± 365	2739 ± 494	42	2300
P-value		0.371 (AH0)	0.181 (AH0)	0.232 (AH0)		

Légende : moyenne ± écart-type

Dans les conditions de cet essai, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes modalités pour les récoltes à l'hectare. La différence significative entre les blocs suggère une forte hétérogénéité du terrain à laquelle s'ajoute le biais lié aux bioagresseurs et à la reprise difficile des transplants. On peut toutefois observer que le traitement complet (F1) a permis d'augmenter la récolte totale de moitié par rapport au témoin « contrôle » (C) non fertilisé. De plus, les récoltes totales du témoin minéral (TM), organique (TO) et « contrôle » (C) ont augmenté de respectivement 50 %, 86 % et 138 % par rapport à l'an dernier. La récolte totale (feuilles + tiges séchées) sous irrigation par goutte à goutte y était alors de seulement 2 459 kg/ha, 1 854 kg/ha et 1 149 kg/ha pour les traitements TM, TO et C respectivement (Van Damme, 2016).

Les données par plante permettent de déceler une différence significative entre les traitements pour la récolte finale. Les modalités F1 et TM sont les seules à se démarquer significativement du témoin « contrôle » (C). On peut aussi remarquer que les récoltes des modalités TO et F4 ne sont pas significativement plus faibles que celles des modalités F1 et TM.

Hormis pour le traitement F4 où beaucoup de manquants ont été enregistrés, le taux de battage se situe au-dessus des 40 %.

4.2.3. Discussion

Comme attendu, la modalité F1 se démarque des autres puisqu'il s'agit de la dose supposée saturante non toxique en N-P-K pour *Artemisia annua* L..

Ce test confirme que la formule minérale retenue lors des essais sur le site l'année dernière (TM) est intéressante puisqu'elle est la seule à apporter une récolte de feuilles et de tiges séchées significativement plus grande que le témoin « contrôle » (C).

Bien que sa production ne se différencie pas aussi clairement du témoin « contrôle » (C), le traitement « témoin organique » (TO) semble tout aussi prometteur que le traitement minéral complet (F1) et le « témoin minéral » (TM).

L'importante augmentation de croissance et de production des plantes cette année doit certainement s'expliquer par l'utilisation d'un système d'irrigation par aspersion et non plus par goutte à goutte. Bien qu'elle augmente le taux de mortalité des transplants en tout début de culture, l'aspersion semble entraîner une meilleure croissance de l'armoise annuelle. De plus, elle permet une meilleure décomposition de la matière organique, expliquant peut-être l'augmentation de production du témoin organique (TO) de cette année.

Le traitement F4 apporte les doses estimées saturantes en azote et en potassium mais aucun apport de phosphore. Son efficacité laisse à supposer que le phosphore n'est pas limitant pour la culture d'armoise annuelle dans les conditions du site de Yendane. Il est toutefois étonnant que l'application de la moitié de la dose saturante en phosphore (F5) n'ait pas également montré un rendement significativement distinct du témoin « contrôle » (C). Ces résultats s'expliquent peut-être pas la faible mobilité de cet élément ou par une relation antagoniste encore mal connue mais ils doivent être interprétés avec prudence, d'autant plus que cette modalité présente un taux de battage anormalement bas. De plus, l'apport de phosphore est reconnu pour augmenter la teneur en artémisinine de la plante (Kapoor *et al.*, 2017).

Le fait que les traitements F6 et F7, dans lesquels l'apport en potassium est diminué ou omis, ne montrent pas une récolte significativement plus importante que le témoin « contrôle » (C) semble indiquer un intérêt de l'apport d'engrais potassique pour améliorer le rendement de la culture d'armoise annuelle sur le site de Yendane.

La distinction du traitement F6 en termes de croissance rappelle toutefois que c'est l'azote qui joue un rôle déterminant sur la croissance de l'*Artemisia annua* L.

Les traitements F2 et F3, apportant une dose saturante en phosphore et potassium mais aucun apport ou la demi-dose supposée saturante d'azote, ne montrent aucune différence de croissance et de productivité avec le témoin « contrôle » (C). Ces résultats confirment l'importance de l'apport d'azote pour assurer une meilleure croissance des plantes et donc un rendement plus important.

Cependant, le manque de productivité des parcelles de la modalité F3 va à l'encontre de l'observation effectuée en 2016 sur le même site. Il avait alors été observé qu'un apport d'azote de 29 kg/ha suffisait à avoir un rendement significativement plus grand que la formule sans fertilisant et qu'aucun gain de rendement significatif n'était obtenu par une plus grande application d'urée (Van Damme, 2016). Le plafonnement du bénéfice de l'azote sur la culture de l'armoise annuelle supposé à la dose de 29 kg N/ha l'année passée n'est peut-être pas aussi bas. Les études menées dans d'autres conditions de sol et de climat mentionnent en effet un minimum de 50 kg N/ha pour obtenir un rendement optimal (Singh, 2000 ; Kumar *et al.*, 2004 ; Özgüven *et al.*, 2008). Magalhaes *et al.* (1996) recommandent d'ailleurs un apport de plus de 32 kg N/ha pour atteindre ce plafonnement supposé à partir de 64 kg N/ha. Il se pourrait aussi que le fractionnement de l'apport ait réduit son efficacité. Cependant, la seconde fraction a été appliquée durant la phase de croissance de l'armoise annuelle, soit entre le 40^e et le 140^e jour après la transplantation comme recommandé par Yang

(2013). Une autre explication plus plausible serait que l'amélioration de la croissance et du développement des plantes induits par l'irrigation par aspersion se traduit par une augmentation des besoins en azote de la culture.

La présence de soufre dans l'engrais phosphoré et l'engrais potassique ne semble pas avoir permis une meilleure assimilation de l'azote ni induit un gain de productivité contrairement à ce qui a été démontré dans l'étude de Jha *et al.* (2011).

4.3. Étude de l'effet de la fertilisation organique

4.3.1. Évolution des dimensions des plantes

La hauteur moyenne et le diamètre projeté au sol moyen ont été mesurés du 15 février au 24 mai 2017 afin de décrire la croissance des plantes d'*Artemisia annua* L. en fonction du temps et de leur mode de fertilisation (figure 23 et 24).

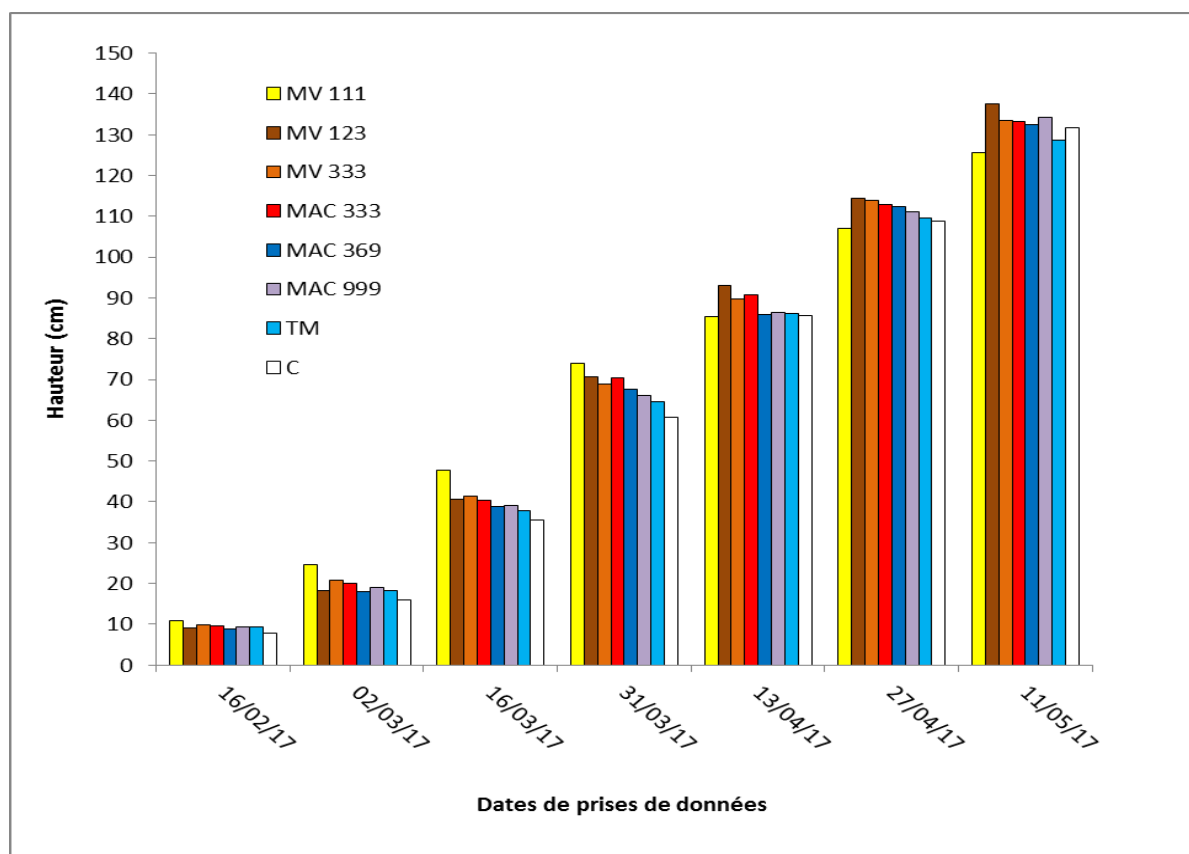


Figure 23 : Influence de la fertilisation sur l'évolution de la hauteur moyenne en fonction du temps

Légende : MV xyz = nombre de poignées de compost de fiente de volaille appliquées 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation, MAC xyz = nombre de poignées de compost de déjections âne – cheval, appliquée 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation : MV 111 ; MV 123 ; MV 333 ; MAC 333 ; MAC 369 ; MAC 999 ; TM : 47,3-4,2-8,3 ; C : 0-0-0 (témoin « contrôle »)

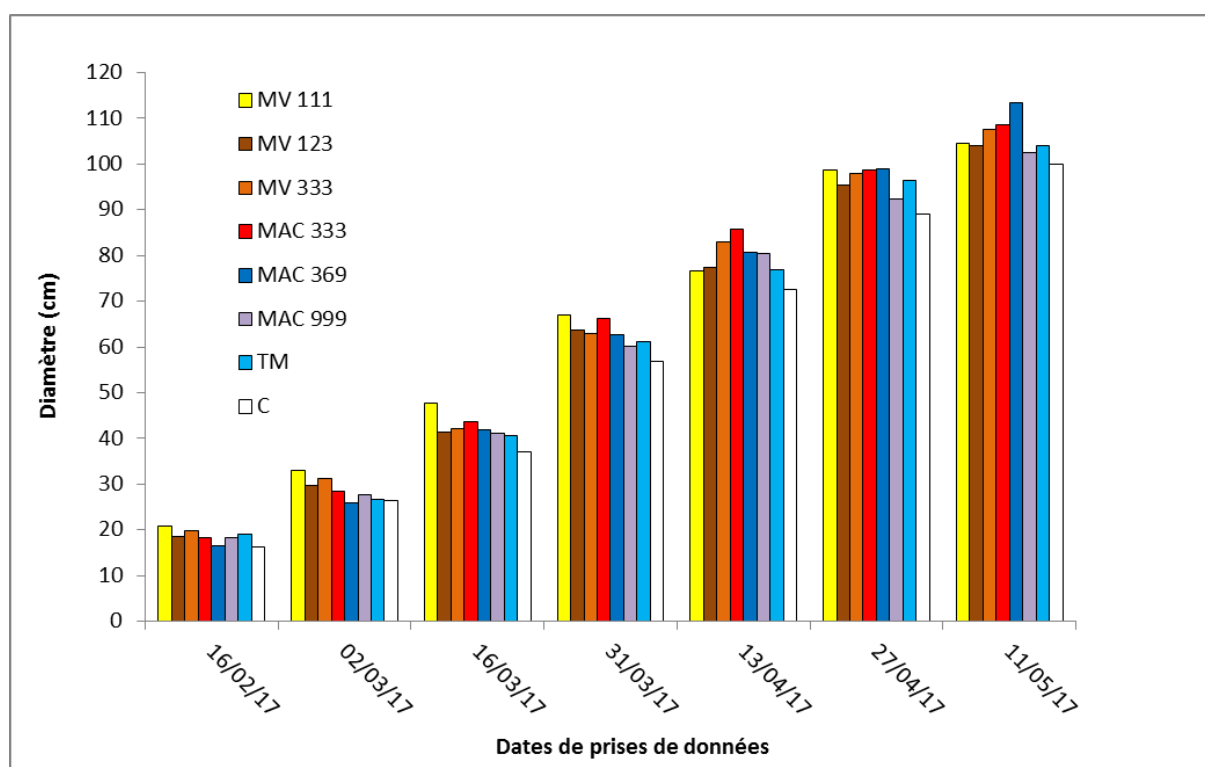


Figure 24 : Influence de la fertilisation sur l'évolution du diamètre projeté au sol moyen en fonction du temps.

Légende : MV xyz = nombre de poignées de compost de fiente de volaille appliquées 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation, MAC xyz = nombre de poignées de compost de déjections âne – cheval, appliquée 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation : MV 111 ; MV 123 ; MV 333 ; MAC 333 ; MAC 369 ; MAC 999 ; TM : 47,3-4,2-8,3 ; C : 0-0-0 (témoin « contrôle »)

Les plantes ont crû en moyenne de 20 cm en hauteur et 15 cm en diamètre projeté au sol par période de deux semaines. Elles présentent également une croissance relativement linéaire au cours du temps pour toutes les modalités à partir du mois de mars.

Au niveau de la hauteur comme du diamètre, les plantes de la modalité MV 111 semblent se démarquer des autres par leur forte croissance en début de saison. Les traitements MV 123 et MAC 369 semblent très légèrement se démarquer respectivement au niveau de la hauteur et du diamètre final. Les plantes montrent une croissance très similaire pour les différents traitements.

Les moyennes des dernières prises de mesures de la hauteur et du diamètre projeté au sol sont reprises dans le tableau 12.

Tableau 12 : Hauteurs moyennes et diamètres projetés au sol moyens mesurés le 11/05/17

Objet Kg unités fertilisantes/ha	Effectif/ parcelle élémentaire	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)
MV 111 : 50-79-32	23	130 ± 30	105 ± 36
MV 123 - TO : 99-158-63	18	136 ± 20	105 ± 22
MV 333 : 149-237-95	18	135 ± 27	109 ± 25
MAC 333 : 44-153-24	21	133 ± 18	109 ± 25
MAC 369 : 89-306-47	16	132 ± 22	114 ± 23
MAC 999 : 133-459-71	20	135 ± 26	104 ± 24
TM : 47,3-4,2-8,3	27	129 ± 25	104 ± 27
C : 0-0-0	21	131 ± 20	100 ± 21
P-value		0,962 (AH0)	0,871 (AH0)

Légende : MV xyz = nombre de poignées de compost de fiente de volaille appliquées 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation, MAC xyz = nombre de poignées de compost de déjections âne – cheval, appliquée 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation : MV 111 ; MV 123 ; MV 333 ; MAC 333 ; MAC 369 ; MAC 999 ; TM : 47,3-4,2-8,3 ; C : 0-0-0 (témoin « contrôle »),
moyenne ± écart-type

L'analyse de la variance n'a pas permis de déceler de différence significative entre les différentes hauteurs et les diamètres finaux pour les modalités de fertilisation testées. La variabilité des résultats n'est pourtant pas plus importante que pour l'étude de la fertilisation minérale. De plus, les blocs ne présentent pas de différence significative entre eux.

4.3.2. Production de biomasse

Les tableaux 13 et 14 présentent les poids moyens de feuilles et de tiges séchées exprimés par plante et par ha pour les traitements comparés dans l'essai de fertilisation organique.

Tableau 13 : Récoltes par plante de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.

Objet (kg unités fertilisantes/ha)	Effectif/ parcelle élémentaire	Feuilles séchées (gramme/plante)	Tiges séchées (gramme/plante)	Récolte totale (gramme/plante)	Taux de battage (%)
MV 111 : 50-79-32	23	226 ± 108	307 ± 189	533 ± 284	42
MV 123 - TO : 99-158-63	18	204 ± 80	232 ± 109	436 ± 180	47
MV 333 : 149-237-95	18	248 ± 109	279 ± 118	527 ± 212	47
MAC 333 : 44-153-24	21	234 ± 120	287 ± 139	521 ± 239	45
MAC 369 : 89-306-47	16	180 ± 83	204 ± 91	384 ± 164	47
MAC 999 : 133-459-71	20	213 ± 100	203 ± 98	417 ± 190	51
TM : 47,3-4,2-8,3	27	211 ± 108	250 ± 146	461 ± 243	46
MV 111 : 50-79-32	21	173 ± 90	206 ± 129	379 ± 214	46
P-value		0,304 (AH0)	0,062 (AH0)	0,134 (AH0)	

Légende : MV xyz = nombre de poignées de compost de fiente de volaille appliquées 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation, MAC xyz = nombre de poignées de compost de déjections âne – cheval, appliquée 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation : MV 111 ; MV 123 ; MV 333 ; MAC 333 ; MAC 369 ; MAC 999 ; TM : 47,3-4,2-8,3 ; C : 0-0-0 (témoin « contrôle »),
moyenne ± écart-type

Tableau 14 : Récoltes par hectare de feuilles et de tiges séchées en fonction de la fertilisation.

Objet (kg unités fertilisantes/ha)	Densité réelle (pl/ha)	Feuilles séchées (kg/ha)	Tiges séchées (kg/ha)	Récolte totale (kg/ha)	Taux de battage (%)	Récolte Utile = 2 x Récolte feuilles Kg/ha
MV 111 : 50-79-32	10101	1486 ± 327	1790 ± 416	3275 ± 724	45	2972
MV 123 - TO : 99-158-63	10101	1516 ± 320	1735 ± 258	3251 ± 577	47	3032
MV 333 : 149-237-95	9901	1689 ± 140	1854 ± 373	3543 ± 473	48	3378
MAC 333 : 44-153-24	10101	1561 ± 168	1739 ± 420	3300 ± 586	47	3122
MAC 369 : 89-306-47	9804	1350 ± 441	1722 ± 793	3072 ± 1226	44	2700
MAC 999 : 133-459-71	10000	1395 ± 435	1364 ± 667	2759 ± 1035	51	2790
TM : 47,3-4,2-8,3	9434	1343 ± 504	1707 ± 894	3050 ± 1397	44	2686
MV 111 : 50-79-32	9709	1337 ± 222	1741 ± 160	3079 ± 335	43	2674
P-value		0,701 (AH0)	0,948 (AH0)	0,932 (AH0)		

Légende : MV xyz = nombre de poignées de compost de fiente de volaille appliquées 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation, MAC xyz = nombre de poignées de compost de déjections âne – cheval, appliquée 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation : MV 111 ; MV 123 ; MV 333 ; MAC 333 ; MAC 369 ; MAC 999 ; TM : 47,3-4,2-8,3 ; C : 0-0-0 (témoin « contrôle »),
moyenne ± écart-type

Dans les conditions de cet essai, aucune différence significative n’a été observée entre les différentes modalités de fertilisation comparées pour les récoltes par plante et à l’hectare. Les résultats des tests suggèrent que les plantes du bloc exposé au vent se différencient des autres de par leur plus faible production. La reprise difficile des transplants et l’éventuelle variabilité du terrain peuvent aussi avoir engendré un biais plus important que l’impact des différents traitements sur la récolte.

On peut toutefois remarquer que le témoin « contrôle » (C) apporte une production par plante semblable à celui de l’étude de la fertilisation minérale. Les deux autres témoins (TM et TO) par contre semblent produire un peu moins de tiges par plante. Cette variation entre les deux études pourrait expliquer pourquoi le « témoin minéral » (TM) ne se différencie plus du témoin « contrôle » (C).

La modalité MV 333 induit la récolte de feuilles séchées et totale par hectare la plus élevée dans les conditions de cet essai. Elle apporte 40 % de feuilles séchées supplémentaire par plante par rapport au témoin « contrôle » (C) qui présente la récolte la plus faible par plante.

Hormis pour la modalité MV 111, le taux de battage calculé par plante semble plus élevé que dans l’étude de la fertilisation minérale, y compris pour les témoins. On peut également observer que la modalité MAC 999 a produit particulièrement peu de tiges et est la seule à avoir jamais montré un taux de battage supérieur à 50 %. Cette observation pourrait s’expliquer par une attaque moins importante du champignon pathogène sur ces parcelles ou par un taux en azote plus important de par la quantité importante de matière organique appliquée.

4.3.3. Discussion

Il est impossible de différencier les fumures organiques testées à partir des données collectées.

La perte de croissance des plantes de la modalité MV 111 tandis que la modalité MV 123 (TO) se démarque au fil de la saison culturale tend toutefois à suggérer qu'il y a intérêt à augmenter la dose de compost de volaille au-dessus de 0,5 kg/plante.

Les prises de mesures, la récolte et les opérations post-récolte des parcelles des essais de fertilisation minérale et organique ont été effectuées ensemble et dans un ordre aléatoire. L'absence de différence significative entre les modalités TM et C pour cette étude doit donc venir du milieu. Les parcelles du premier bloc de l'essai fertilisation organique étaient le plus exposées au vent. Un biais supplémentaire pourrait avoir été engendré par la quantification très approximative des quantités de compost appliquées due au système de poignées. Enfin, les dégâts liés aux ravageurs ont dû également augmenter la variabilité des résultats.

Il a été vérifié que le compost déposé au pied des plantes se décomposait bien au bout de quelques semaines. De plus, leur rapport C/N de 11,2 et 12,8 respectivement pour le compost de volaille et le compost d'âne-cheval (voir Annexe 7.2.) semble indiquer une tendance à la libération rapide de l'azote. Cependant, il aurait peut-être été préférable d'apporter cette matière organique en une seule fraction au début de la saison culturale et non comme pratiqué localement. C'est en effet en tant qu'amendement qu'il est généralement conseillé d'appliquer le compost dans la littérature (Yeboah, 2012 ; Blanchard, 2014). Son impact aurait alors peut-être été plus visible grâce à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs. La validité de cette supposition dépend cependant de la vitesse de minéralisation du compost dans les conditions locales et mériterait à ce titre d'être testée dans le futur.

De plus, il semblerait que l'application de compost apporte de meilleurs bénéfices qu'une fertilisation minérale mais à long terme et en synergie avec l'application d'un engrais minéral tel que l'urée (Djogo *et al.*, 2015 ; Ganry, Olivier, 2005).

4.4. Détermination du prix de revient de la matière première permettant de produire un kg de tisane d'*Artemisia annua* L.

Le prix de revient de la matière première permettant de produire un kilogramme de tisane d'*Artemisia annua* L. dans les conditions du site de Yendane a été calculé pour chaque modalité de production testée. Les détails du calcul effectué selon l'itinéraire technique de la modalité ayant le prix de revient le plus faible sont repris dans l'annexe 7.3.

4.4.1. Étude de l'effet de la densité

Le tableau 15 montre les résultats obtenus pour les différentes densités de plantation avec réalisation de deux coupes.

Tableau 15 : Coûts de production et prix de revient des modalités testées dans l'étude de la densité

	Modalités			
	DP 10	DP 20	DP 30	DP 40
Densité de plantation (plante/ha)	10 000	20 000	30 000	40 000
Distance entre les lignes (m) x distance entre les plantes (m)	1 x 1	1 x 0,5	0,5 x 0,66	0,5 x 0,5
Feuilles séchées (kg/ha)	2 340	4 033	3 591	3 812
Tiges séchées (kg/ha)	3 309	5 674	5 901	6 426
Rendement (kg tisane/ha)	4 680	8 066	7 182	7 624
Coût de production (FCFA/ha)	2 537 237	3 649 517	4 759 277	5 868 097
Prix de revient (FCFA/kg)	542	452	663	770
Prix de revient (euro/kg)	0,83	0,69	1,01	1,17

Le prix de revient le plus faible a été obtenu avec la densité de 20 000 plantes/ha. Cette modalité a donné le plus haut rendement utile de tisane à l'hectare. Celui-ci est de 8 tonnes/ha, soit 4 fois plus que la production obtenue en 2016 en utilisant la même fertilisation mais en pratiquant une seule récolte et à la densité de 10 420 plantes/ha.

À plus forte densité, la main d'œuvre supplémentaire nécessaire à l'application d'engrais au pied de chaque plante et à la coupe fait monter le coût de production de manière plus importante que le gain de feuilles obtenu.

Il est à noter que ce prix de revient est moins élevé que les années précédentes. Ceci s'explique en partie par la dépense en eau qui a été fortement réduite par la mise en place d'asperseurs et la prise en compte du prix réel payé par « Le Relais - Sénégal ». De plus, la main d'œuvre nécessaire à la réalisation d'une coupe a été considérablement réduite grâce à une meilleure organisation du travail.

4.4.2. Étude de l'effet de la fertilisation minérale

Le tableau 16 montre les résultats obtenus pour les différentes modalités de fertilisation minérales avec réalisation d'une seule coupe (récolte finale).

Tableau 16 : Coûts de production et prix de revient des modalités testées dans l'étude de la fertilisation minérale

	Modalités				
	F1	F2	F3	F4	F5
Fertilisation (kg unités fertilisantes/ha)	58-39-42	0-39-42	29-39-42	58-0-42	58-19,5-42
Feuilles séchées (kg/ha)	1 663	1 239	1 223	1 535	1 445
Tiges séchées (kg/ha)	2 318	1 681	1 535	2 174	1 764
Rendement (kg tisane/ha)	3 326	2 478	2 446	3 070	2 890
Coût de production (FCFA/ha)	2 236 545	2 161 186	2 221 125	2 217 489	2 226 647
Prix de revient (FCFA/kg)	672	872	908	722	770
Prix de revient (euro/kg)	1,03	1,33	1,38	1,10	1,17

	Modalités				
	F6	F7	TM	TO	C
Fertilisation (kg unités fertilisantes/ha)	58-39-0	58-39-21	47,3-4,2-8,3	99-158-63	0-0-0
Feuilles séchées (kg/ha)	1 399	1 209	1 530	1 589	1 150
Tiges séchées (kg/ha)	1 673	1 525	2 124	1 857	1 589
Rendement (kg tisane/ha)	2 798	2 418	3 060	3 178	2 300
Coût de production (FCFA/ha)	2 162 568	2 198 786	2 224 746	2 565 537	1 983 353
Prix de revient (FCFA/kg)	773	909	727	807	862
Prix de revient (euro/kg)	1,18	1,39	1,11	1,23	1,31

C'est le traitement total en engrais saturant (F1) qui présente le prix de revient le plus bas.

Mis à part un faible surcoût pour la production du compost de la modalité TO, le choix du traitement (hors contrôle) ne semble pas impacter le coût de production. C'est avant tout le rendement qui dicte le prix de revient.

On peut également ajouter que le fractionnement de l'apport d'azote en deux fois entraîne un coût de main d'œuvre supplémentaire estimé à 3 cents par kg de tisane. Il pourrait donc être judicieux de déterminer si ce fractionnement est bien utile.

4.4.3. Étude de l'effet de la fertilisation organique

Le tableau 17 montre les résultats obtenus pour les différentes modalités de fertilisation organiques avec réalisation d'une seule coupe (récolte finale).

Tableau 17 : Coûts de production et prix de revient des modalités testées dans l'étude de la fertilisation organique

	Modalités			
	MV 111	MV 123 (TO)	MV 333	MAC 333
fertilisation (kg unités fertilisantes/ha)	50-79-32	99-158-63	149-237-95	44-153-24
Feuilles séchées (kg/ha)	1 486	1 516	1 689	1 561
Tiges séchées (kg/ha)	1 790	1 735	1 854	1 739
Rendement (kg tisane/ha)	2 972	3 032	3 378	3 122
Coût de production (FCFA/ha)	2 334 119	2 565 357	2 796 956	2 359 016
Prix de revient (FCFA/kg)	785	846	828	756
Prix de revient (euro/kg)	1,20	1,29	1,26	1,15

	Modalités			
	MAC 369	MAC 999	TM	C
fertilisation (kg unités fertilisantes/ha)	89-306-47	133-459-71	47-4-8	58-0-42
Feuilles séchées (kg/ha)	1 350	1 395	1 343	1 337
Tiges séchées (kg/ha)	1 722	1 364	1 707	1 741
Rendement (kg tisane/ha)	2 700	2 790	2 686	2 674
Coût de production (FCFA/ha)	2 614 411	2 870 406	2 224 306	1 983 793
Prix de revient (FCFA/kg)	968	1 029	828	742
Prix de revient (euro/kg)	1,48	1,57	1,26	1,13

Légende : MV xyz = nombre de poignées de compost de fiente de volaille appliquées 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation, MAC xyz = nombre de poignées de compost de déjections âne – cheval, appliquée 1mois (x), 2 mois (y) et trois mois (z) après transplantation.

On remarque par les témoins présents dans les deux essais (TM, TO et C) que le rendement présente une variabilité pouvant aller jusqu'à 374 kg de tisane produite en moins à l'hectare (pour le témoin minéral), entraînant une augmentation d'une quinzaine de cents sur le prix de revient par kg de tisane. Les prix de revient fort proches des modalités MV et TM ne permettent donc pas de tirer de réelles conclusions.

Dans les conditions de ce test, on observe que le rendement plus élevé obtenu en augmentant la quantité de compost de volaille appliquée ne permet pas de couvrir les coûts supplémentaires liés à la production de ce compost.

L'application de compost âne-cheval à raison de 3 poignées, respectivement 30, 60 et puis 90 jours après transplantation, semble plus intéressante que l'application de la même quantité de compost de volaille. Le rendement de ces deux modalités étant similaire, ceci s'explique par les coûts moins importants liés à l'utilisation de compost âne-cheval. En effet, le fumier d'âne-cheval coûte trois fois moins cher que la fiente de volaille. Cependant, il perd cet avantage dès qu'il est appliqué en plus forte quantité car il demande alors bien plus d'eau et de main d'œuvre pour sa production.

Finalement, ce sont les parcelles avec les modalités MAC 333 et « contrôle » (C) qui ont permis d'obtenir le prix de revient le plus bas de ce test.

4.5. Suivi des bioagresseurs

4.5.1. Lapins

Des attaques de rongeurs ont été identifiées sur les plants d'*Artemisia annua* L. sept semaines après leur transplantation. Il s'agit de lapins qui coupent des feuilles, parfois des tiges entières, et les laissent sur le sol. Selon les villageois, ils attendraient le soir pour les consommer lorsqu'elles sont sèches. Ils apprécient les pousses tendres, ce qui explique pourquoi les attaques ont cessé après cinq semaines.



Figure 25 : Dégâts de lapins sur *Artemisia annua* L. (Sougnez A., 2017)

Les dégâts sont préoccupants sur les jeunes plantules qui peuvent s'en trouver défeuillées. Ces agresseurs entravent la croissance de la plante, en particulier lorsque la tige centrale est coupée. Cependant, ce ravageur a eu moins d'impact que redouté sur les individus dont seules quelques feuilles ou tiges secondaires avaient été coupées. Ceci s'explique certainement par la capacité de l'armoise annuelle à croître de plus belle après une coupe.

Aucun moyen de lutte testé n'a montré d'effet concluant contre ces attaques. Contrairement aux rats, trop méfiants pour entrer dans une cage, quel que soit l'appât placé dans celle-ci. La mise en place de chiffons bleus imbibés d'essence ou de fil de cassette produisant du bruit situés côté vent n'a pas semblé les éloigner. Les 3 pièges « à crocs » soigneusement camouflés placés dans la zone d'essais n'ont permis d'attraper qu'un seul lapin sur le mois durant lesquels ils ont été mis en place. La chasse au fusil semble être la méthode de lutte la plus efficace contre ce ravageur.

4.5.2. Chèvres

Les plantes ont également subi quelques attaques de chèvres. Les dégâts causés sont bien plus préoccupants dans ce cas, car les tiges sont directement mangées avec les feuilles. Il peut s'agir de la plante toute entière si elle est encore jeune. Heureusement, l'armoise annuelle montre une très bonne résistance à la coupe et sa croissance ne s'en trouve donc pas trop impactée si la tige centrale est intacte et les attaques non répétées.

Le moyen de protection le plus efficace contre les dégâts de chèvre est de clôturer le site d'exploitation avec des barrières hautes et denses afin d'empêcher leur passage.

4.5.3. Champignon pathogène

À la mi-mars, soit onze semaines après la transplantation, des symptômes d'attaques d'un champignon pathogène ont été observés dans l'essai le plus exposé au vent (figure 26).

Selon les analyses réalisées par le laboratoire de phytopathologie du CRAW à Gembloux, il s'agit d'une espèce du genre *Rhizoctonia*, regroupant 37 ou 49 espèces selon les auteurs (González García *et al.*, 2006). Ce genre de champignon du sol, à la distribution cosmopolite, est présent sur un grand nombre d'hôtes et a déjà été identifié sur des racines d'*Artemisia capillaries* L. par Matsumoto *et al.* (2006). Il peut engendrer une fonte des semis, une pourriture des racines ou de la pseudo-tige et des chancres au niveau de la tige. Sur l'armoise, il peut causer une dégradation de la partie aérienne (Anon., nd.). Les espèces du genre *Rhizoctonia* peuvent également s'attaquer aux feuilles, en particulier lorsque les plantes sont cultivées à haute densité dans une atmosphère humide (Chase A.R., 2000).



Figure 26 : Transplant et plante d'*Artemisia annua* L. atteints par le champignon pathogène (Sougnuez A., mars 2017)

Sur le site de l'exploitation, les premiers symptômes de la maladie fongique sur *Artemisia annua* L. ont été un jaunissement et/ou brunissement des extrémités des feuilles suivi du brunissement de leurs tiges basales. Par la suite, une ligne noire semblant remonter la tige centrale a fini par atteindre toute la plante et les feuilles se sont nécrosées.

Ce type de pathogène persistant dans la partie supérieure du sol serait facilement introduit dans la culture par des pratiques culturales manuelles, des outils ou pots non stérilisés ou via les transplants dont la terre est contaminée. Son introduction serait aussi possible par des fongicoles (par exemple : *Bradysia* spp.), ou la mouche de rivage (*Scatella stagnalis* Fall.) (Anonyme, nd.).

Lorsque *Rhizoctonia* spp. est présent dans le milieu, l'apport hydrique doit être avant tout régulé car il est favorisé par la présence d'eau stagnante au niveau des racines. Un fongicide peut être utilisé si nécessaire. Le meilleur moment d'application serait directement après avoir retiré les feuilles infectées. Il existe de nombreux fongicides avec différents types d'applications et modes d'action contre ce type de pathogène. Les matières actives potentiellement efficaces sont : azoxystrobine, fludioxonil, iprodione, pencyuron, mépronil, tocolofos-méthyl et l'association de boscalid et pyraclostrobine. Un traitement avec une formulation à base du champignon antagoniste du genre *Trichoderma* est également envisageable (phytoweb, 2017 ; fiwap, 2017 ; Messiaen, 1991).

Le 17 mars 2017, soit douze semaines après transplantation, l'impact du champignon a été estimé. Seulement 8 % des plantes étaient touchées ou mortes sur les parcelles les plus attaquées. Il a donc été décidé de ne pas effectuer de traitement phytosanitaire mais de retirer les plantes et les feuilles affectées hors du champ. Cela a effectivement permis de limiter la progression de la maladie.

Elle a cependant refait son apparition sur des plantes saines début mai, toujours par le côté des essais le plus exposé au vent. Dans les parcelles du bloc situé de ce côté des essais de fertilisation, 53 % des plantes étaient atteintes par des attaques de *Rhizoctonia* spp. avant la récolte finale. Heureusement, seules les feuilles de la base présentaient les premiers symptômes pour la majorité des plantes (figure 27).



Figure 27 : Plantes d'*Artemisia annua* L. atteintes par le champignon pathogène (Sougnez A., mai 2017)

Il faut noter que des attaques similaires ont été observées cette année dans deux autres sites de culture de l'armoise annuelle dans la région : la ferme expérimentale de l'école nationale supérieure d'agriculture de Thiès et le monastère de Keur Moussa. Aucune attaque n'avait été constatée à ces endroits au cours des cinq années précédentes. Des symptômes semblables ont été observés sur les plantes d'*Artemisia afra* cultivées dans le même site. La réalisation d'une taille a permis dans leur cas une régénération du feuillage.

4.5.4. Termites

L'armoise annuelle a également été attaquée par des termites. Celles-ci rongent la base de la plante et entraînent rapidement sa mort. Moins de 0,5 % des plantes adultes en sont mortes dans les essais sur toute la saison. Le plus souvent, il s'agissait d'une seule branche basale qui était attaquée, comme illustré à la figure 28. Ce phénomène totalement aléatoire a été estimé à 1 plante par jour sur l'ensemble des essais. Ceux-ci comprenant 4 030 plantes sur 15 ares des parcelles expérimentales environ, cela représente un impact de moins de 3 % des plantes sur les 3 mois et demi d'observation.

Ne plus placer des bouts de bois pour marquer l'emplacement de chaque plante avant la transplantation devrait permettre de réduire ces attaques.



Figure 28 : Plante d'*Artemisia annua* L. à la tige attaquée par les termites (Sougnéz A., 2017)

4.5.5. Cochenilles

Deux cas d'attaques de cochenille ont été répertoriés durant toute la saison culturale sur le champ expérimental, à la onzième et dix-septième semaine après transplantation. Les plantes attaquées étaient flétries. Des cochenilles roses, une cire blanche et quelques fourmis étaient visibles au niveau des racines. Il pourrait s'agir de *Dysmicoccus brevipes* C., connu sous le nom commun de « Pineapple mealybug », formant des colonies juste en dessous du niveau du sol et dont les fourmis se nourrissent du miellat en échange de leur protection (Jahn *et al.*, 2000). Cette espèce dont la distribution est mondiale s'attaque à un grand nombre de plantes hôtes et a déjà été signalée au Sénégal (Ben-Dov, 1994).



Figure 30 : *Dysmicoccus brevipes* C. (Buss L., nd., source : <http://entomology.ifas.ufl.edu/frank/bromeliadbiota/scalehodes.htm>)



Figure 29 : Cochenille farineuse sur *Artemisia annua* L. (Sougnéz A., 2017)

Au vu du faible impact de ce bioagresseur (2 cas observés sur les 4 030 plantes des parcelles expérimentales, toutes les parcelles initiales de l'essai densité comprises), les plantes affectées ont simplement été retirées du champ. Si la pression avait été plus forte, une solution efficace aurait été de lutter contre les fourmis afin de supprimer la protection qu'elles apportent aux cochenilles vis-à-vis de leurs prédateurs et parasitoïdes naturels (Egelie A., Gillett-Kaufma J., 2015). Malgré leur présence visible, les fourmis n'ont pas engendré de dégâts importants cette année sur les plants d'armoise annuelle du domaine.

4.5.6. Montée en fleurs

Fin mars, les plantes les plus exposées au vent de l'essai densité ont commencé à monter en fleurs. L'attaque par des ravageurs semble aussi engendrer l'apparition de boutons floraux. Ce phénomène est synonyme de la fin de la phase végétative et donc de l'arrêt de la croissance de l'armoise annuelle.



Figure 31 : *Artemisia annua* L. en boutons floraux (en haut et à gauche) et en fleurs (en bas et à droite) (Sougniez A., mai 2017)

Protéger les plantes de toute source de stress permet d'éviter leur montée en fleurs précoce. De plus, la pratique d'une coupe permet de rajeunir la plante et de contrer ce phénomène, comme il a été démontré dans les études réalisées à Yendane en 2015-2016 (Van Damme, 2016).

4.5.7. Plantes atteintes de malformation

De la onzième à la quatorzième semaine après transplantation, certaines plantes d'armoise annuelle ont montré une croissance anormale. Ces plantes manifestaient un épaississement de la tige centrale accompagnée d'une torsion induisant un aspect en crosse plate à partir de laquelle aucune tige secondaire ne se forme. Elles sont bien plus petites et moins productives que la normale, comme on peut le voir sur la figure 32. Ces plantes ont été découvertes de manière aléatoire dans les parcelles. Ce phénotype résulte peut-être de la variété ou d'une réponse à un facteur externe qui n'a pas pu être déterminé.



Figure 32 : *Artemisia annua* L. présentant des malformations (Sougniez A., mai 2017)

4.5.8. Incidence des problèmes constatés et mesures de correction

Lorsqu'une plante retenue pour réaliser des observations montrait des signes de malformation, elle était remplacée par une autre présentant des dimensions similaires estimées pour la parcelle. Cela a permis de ne pas biaiser les données de récolte par plante. Pour ce qui est de la récolte par hectare, le relevé du nombre de plantes malformées par bloc semble montrer que l'effet est homogène, à raison de 4 à 5 % des plantes à la densité de plantation standard. L'apparition des plantes malformées tend à décroître avec l'augmentation de la densité de plantation : elles ont été observées à un taux de 2,8 %, 2,3 % et 1,9 % pour les densités de 20 000 plantes/ha, 30 000 plantes/ha et 40 000 plantes/ha respectivement.

Les plantes en boutons floraux et en fleurs représentaient respectivement 5 % et 1,6 % des plantes des parcelles expérimentales juste avant la coupe. Les 4,2 % de plantes observées présentant des boutons floraux déjà plusieurs semaines avant la coupe ont été retirées des données pour éviter qu'elles ne biaisent les mesures de croissance. Le nombre de plantes montant en fleurs est semblable dans les différentes parcelles et blocs excepté dans le premier bloc de l'essai de fertilisation organique. Son exposition au vent entraînant la montée en fleurs précoce de l'armoise annuelle pourrait expliquer pourquoi aucune différence significative n'a été trouvée entre les modalités TM et C de l'essai de fertilisation organique.

Les transplants tardifs ont également été retirés des données afin que leur plus petite taille due à la fraîcheur du climat au moment de leur transplantation ne biaise les résultats. L'essai de densité n'en comportait pas suite au retrait des 4 parcelles les plus exposées au vent du dispositif expérimental. Dans les essais de fertilisation minérale et organique, ils représentaient respectivement 2,6 et 4 % des plantes observées. Si on généralise ces données à l'échelle de la parcelle, on peut estimer que la proportion plus importante de transplants tardifs dans l'essai de fertilisation organique apporte une explication supplémentaire au manque de résultats concluants.

Les plantes observées ayant subi une attaque de bioagresseur ont également été remplacées par d'autres lorsque l'attaque était jugée importante. Celles qui ont subi de faibles attaques ont finalement été retirées des données afin d'être certain qu'elles ne faussent pas les résultats. Toutefois, les plantes de la modalité F4 ont été tout particulièrement touchées par les attaques de lapins. Leur productivité anormalement élevée, croissance se distinguant plus tardivement que la fumure complète et proportion de tiges plus importante pourrait donc n'être qu'un biais résultant de petites coupes de feuilles et de tiges par ce ravageur.

Pour ce qui est des récoltes par hectare de chaque essai, c'est le champignon pathogène qui a dû biaiser les données, les autres ravageurs ayant un impact minoritaire.

Dans l'étude de la densité de plantation, les deux plus fortes modalités (DP 30 et DP 40) ont été les plus touchées par le champignon pathogène à la mi-mars. Ces parcelles présentaient alors un taux d'infestation (plantes mortes et aux feuilles atteintes) de 11 à 12 % contre 4 % pour la modalité DP 10 et 2 % pour DP 20. Le taux de mortalité causé par le champignon restait cependant sous le seuil des 10 % pour chaque parcelle. Cela confirme bien l'hypothèse selon laquelle la pression des ravageurs est plus importante à forte densité.

Lors de la récolte finale, les parcelles de la modalité DP 20 se distinguaient par leur taux de mortalité de 4 % contre 10 à 11 % dans les autres. Ce taux permet d'évaluer l'impact du champignon pathogène puisque l'essai densité ne comportait plus aucun transplant tardif et que les attaques des autres bioagresseurs ont été très faibles. Les emplacements vides dénombrés y sont donc synonymes de plantes fortement affectées par le champignon qui en sont mortes ou qui ont dû être retirées du champ. Cette plus faible mortalité confirme donc bien l'hypothèse selon laquelle l'aération des plantes dans la modalité DP 20 leur assure une moindre propagation des maladies fongiques.

L'essai de fertilisation organique n'a pratiquement pas été touché lors de la première apparition du champignon pathogène puisque moins de 1 % des plantes étaient affectées à la mi-mars. L'essai de fertilisation minérale a lui été impacté à raison de 7 % de plantes mortes et 3 % des plantes atteintes par le pathogène. Juste avant la récolte, les parcelles de l'essai de fertilisation minérale présentaient un taux de mortalité de 10 % en moyenne, comprenant la modalité TO qui ne présentait qu'un taux de mortalité de 3 %. Le taux de mortalité moyen des parcelles de l'essai de fertilisation organique n'était que de 5 %, en comprenant la modalité TM qui se distingue par son taux de mortalité plus élevée. Ces données laissent à penser que les bioagresseurs attaquent deux fois plus les parcelles à fertilisation minérale (11 % de mortalité) que celle à fertilisation organique (4 % de mortalité) et un peu plus que le témoin « contrôle » (7 à 8 % de mortalité).

On peut aussi noter que la modalité F3 se distingue par son taux de mortalité (17 %) bien plus élevé que les autres. Les attaques plus importantes sur ces parcelles pourraient expliquer pourquoi le rendement n'a pas été aussi bon qu'espéré à la dose de 29 kg N/ha.

De plus, il semble que les plantes observées atteintes par le champignon présentent un taux de battage légèrement inférieur par rapport aux plantes saines, avec une moyenne de 43 %, 40 % et 44 % respectivement pour les essais de densité, de fertilisation minérale et de fertilisation organique.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Trois essais ont été réalisés afin d'optimiser la production de feuilles et de tiges de l'armoise annuelle (*Artemisia annua* L.) sur le domaine horticole de l'organisation « Le Relais - Sénégal » :

- Le premier essai visait à déterminer la densité de plantation la mieux adaptée en pratiquant le rythme de coupe le plus performant identifié en 2016 (2 coupes).
- Le deuxième essai visait à déterminer la formule et la dose de fertilisation minérale la mieux adaptée aux conditions du milieu en testant l'effet d'une soustraction des apports d'azote, de potasse et de phosphore par rapport à une fumure complète.
- Le troisième essai visait à déterminer la fertilisation organique la mieux adaptée en tenant compte de son coût et de sa disponibilité dans la zone. Ceci dans le but d'évaluer les conséquences au niveau de la rentabilité de la culture du passage d'une fertilisation minérale à une fertilisation totalement organique dans la perspective d'une certification biologique de la production de l'armoise annuelle.

Le prix de revient a été calculé pour chaque variante de l'itinéraire technique pratiqué lors de ces essais et un relevé des bioagresseurs a été effectué.

Une première conclusion que nous pouvons tirer de nos travaux concerne la supériorité du système d'irrigation par aspersion par rapport à l'irrigation en goutte à goutte. Le recours à l'irrigation par aspersion semble en effet expliquer à lui seul l'augmentation de 50 % des récoltes constatée par rapport à l'année précédente. Bien qu'il entraîne une plus forte mortalité des transplants, ce système permet une meilleure décomposition de la matière organique et de la croissance des plantes, quelle que soit la fumure appliquée.

Il se confirme que le système de récolte en deux coupes permet d'obtenir le prix de revient le plus bas. Outre son effet bénéfique sur la croissance des plantes, il permet de retarder leur montée en fleurs et d'augmenter la production d'au moins 25 % par rapport à la réalisation d'une seule récolte tout en conservant un taux de battage intéressant.

Divers bioagresseurs sont apparus dans la culture de *Artemisia annua* L. Parmi eux, un champignon pathogène du genre *Rhizoctonia* est préoccupant, surtout pour les plus hautes densités de plantation où la forte humidité de l'atmosphère favorise son développement. L'évacuation du champ des plantes atteintes doit absolument être pratiquée pour limiter sa propagation.

La densité de plantation de 20 000 plantes/ha avec la réalisation de deux coupes a permis d'obtenir le prix de revient le plus bas. Elle permet une production de 8 tonnes de tisane à l'hectare ; ce qui est quatre fois supérieur à celle obtenue l'année passée en apportant la même fertilisation, jugée optimale, mais à une densité de plantation de 10 420 plantes/ha et avec une seule coupe. Ces résultats démontrent tout l'intérêt de l'optimisation de ces deux paramètres dans la culture de l'armoise annuelle.

De plus, l'application de cette densité selon un dispositif spatial de 1 m x 0,5 m s'est traduite par une réduction des attaques du champignon pathogène apparu cette année. Ce dispositif spatial permettrait de bénéficier à la fois d'un effet de concurrence favorable entre les plantes dans les rangées au début de leur croissance et d'une meilleure aération entre celles-ci, décisive pour limiter la propagation de la maladie fongique.

On peut aussi noter l'apparition de plantes présentant des malformations, à raison de 5 % environ des populations cultivées. Ce taux semble toutefois diminuer avec l'augmentation de la densité.

L'étude de la fertilisation minérale semble mettre en évidence l'existence d'une carence en potassium dans les sols de Yendane. Les résultats liés au phosphore sont délicats à interpréter à cause des attaques de ravageurs. Aucun effet synergique lié à la présence de soufre chez certaines fumures appliquées n'a été mis en évidence. L'azote semble toujours être l'élément déterminant pour favoriser la croissance et le rendement des plantes à l'hectare. Cependant, contrairement à ce qui avait été supposé en 2016, on constate une réponse positive de la croissance des plantes pour des doses supérieures à 29 kg N/ha. Le remplacement de l'irrigation goutte à goutte par l'irrigation par aspersion explique sans doute cette différence car elle permet d'augmenter de manière non négligeable la production de biomasse par plante et par unité de surface, même en l'absence d'application de fumure. Ce constat sur l'azote explique probablement pourquoi le traitement « témoin minéral » (TM), constitué de 47,3 kg N/ha, 4,2 kg P₂O₅/ha et 8,3 kg K₂O/ha, retenu sur base des résultats de l'essai de fertilisation minérale réalisé en 2016, donne un rendement intéressant par rapport aux autres fumures testées cette année.

Lorsque la fumure apportée est uniquement minérale, le prix de revient dépend avant tout du rendement obtenu.

Il ressort de l'essai comparant différentes modalités de fertilisation minérale, que le témoin local (TO) à base de fiente de volaille donne un rendement équivalent à celui du traitement minéral optimum actuel (TM). Il est vrai que cette fumure organique (TO : 99 kg N/ha, 158 kg P₂O₅/ha, 63 kg K₂O) apporte pratiquement la même dose de potassium que ce dernier. La combinaison de l'apport de compost avec l'apport d'urée pourrait permettre d'augmenter significativement le rendement, comme suggéré par Djego *et al.* (2015).

Aucune différence significative n'a été mise en évidence en termes de rendement entre les 6 modalités de fertilisation organique à base de fiente de poule ou de déjections d'âne-cheval comparées. Les modalités impliquant l'apport de compost semblent aussi productives que celles basées sur l'apport d'engrais minéraux. Cependant, l'eau et la main d'œuvre supplémentaires requises pour la production du compost se traduisent par un coût de production plus élevé. Le prix de revient dépend alors du rendement obtenu mais aussi du choix de la matière première et de la quantité de compost appliquée.

De par son prix d'achat trois fois moins élevé dû à sa bonne disponibilité sur place, l'utilisation du compost âne-cheval, à raison de 3 poignées 30, 60 et 90 jours après la transplantation, s'avère économiquement plus intéressante que l'emploi de compost de fiente de volaille, quelle que soit la dose appliquée, ou l'emploi de doses supérieures de compost âne-cheval, même si elle n'induit pas de gain de rendement.

Les résultats observés mettent en évidence une meilleure rentabilité de la fertilisation minérale par rapport à l'apport de fumure organique. Cependant, compte tenu des effets négatifs sur la durabilité de la production observés dans la région en cas d'application d'engrais uniquement minéraux, il est important d'envisager la continuation de l'apport d'une fumure organique. Surtout que celle-ci semble présenter un avantage au niveau de la survie des plantes d'armoïse annuelle attaquées par la maladie fongique apparue cette année. La détermination des meilleures modalités d'apport de cette fumure organique devrait faire l'objet d'investigations complémentaires. A ce niveau, le passage à une certification biologique de la production impliquerait la prise en compte des coûts de production supplémentaires liés à l'abandon de la fertilisation minérale.

Il serait également intéressant de vérifier l'utilité du fractionnement du compost et de l'azote car tous deux engendrent un coût de production supplémentaire alors que le bénéfice exact de ces pratiques sur le rendement n'est pas connu. L'application du compost associée à un apport d'azote sous forme d'urée pourrait se traduire par un gain de rendement lié à un effet de synergie ; gain potentiellement supérieur à celui obtenu par le fractionnement de leur apport. Le fractionnement de l'azote pourrait néanmoins rester intéressant pour renforcer la vigueur des plantes après la pratique d'une coupe intermédiaire.

Etant donné l'importance des pertes de jeunes plants causées par l'irrigation par aspersion, il pourrait être intéressant d'avoir recours à la micro-irrigation telle que testée par Martinez en 2015. Celle-ci permet d'apporter l'eau nécessaire au développement des plantes sans induire de pertes importantes au moment de la transplantation. Ce type de système d'irrigation n'est toutefois possible pour les plantes dont la hauteur est inférieure à 1,2 m. L'utilisation de têtes d'asperseur interchangeables pourrait donc s'avérer utile afin de bénéficier d'une micro-aspersion en début de culture et d'une aspersion classique lorsque les plantes prennent de la vigueur.

Des recherches complémentaires concernant la biologie et le contrôle de la maladie fongique causée une espèce du genre *Rhizoctonia* apparue cette année sont indispensables.

Enfin, la mise en place d'arbres ou de tout autre dispositif de brise-vent semble essentielle sur les parcelles de l'exploitation. L'absence de protection contre le vent se traduit en effet actuellement par une forte réduction à la fois de la hauteur et du rendement de l'armoïse annuelle.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aftab, T. et al., 2014. *Artemisia annua - Pharmacology and Biotechnology*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg.
- Anonyme, nd. . Artemisia - Rhizoctonia web blight. New England Greenhouse Update. <https://negreenhouseupdate.info/photos/artemisia-rhizoctonia-web-blight>, (14/08/17).
- Ben-Dov Y, 1994. A systematic catalogue of the mealybugs of the world (Insecta: Homoptera: Coccoidea: Pseudococcidae and Putoidae) with data on geographical distribution, host plants, biology and economic importance. *Andover, UK; Intercept Limited*, pp.686.
- Blanc B., Weniger B. & Nicolas J.-P., 2008. Réflexions autour de la culture d'Artemisia annua et de la production d'artémisinine, <http://www.jardinsdumonde.org/wp-content/uploads/2016/03/R%C3%A9flexions-autour-de-la-culture-Artemisia-annua-Barbara-Blanc-Bernard-Weniger-Jean-Pierre-Nicolas.pdf>, (08/08/17).
- Blanchard, M. et al., 2014. Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest : quelles conséquences sur les recommandations de fumure ?/Diversity in the quality of organic manure produced on farms in West Africa: what impact on recommendat. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(4), pp.512–523.
- Brisibe, E.A. et al., 2012. Adaptation and agronomic performance of Artemisia annua L. under lowland humid tropical conditions. *Industrial Crops & Products*, 39, pp.190–197.
- Central Intelligence Agency, 2017. CIA World Factbook. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>, (10/08/17).
- Chase A.R., 2000. Rhizoctonia Diseases on Ornamentals. Gpn - greenhouse product news. <http://www.gpnmag.com/article/rhizoctonia-diseases-ornamentals/>, (14/08/17).
- Climat-data.org, nd. Climat: Tivaouane. <https://fr.climate-data.org/location/28912/>, (10/08/17).
- Daddy, N.B. et al., 2017. Artemisia annua dried leaf tablets treated malaria resistant to ACT and i.v. artesunate: Case reports. *Phytomedicine : international journal of phytotherapy and phytopharmacology.*, 32, pp.37–40.
- Dewandeleer, N., 2012. *Evaluation de l'effet insecticide de décoctions d'Artemisia annua L. et évaluation du comportement de trois écotypes de cette espèce dans la région de Thiès (Sénégal)*. THES. S.I.

- Djogo, J.G. et al., 2015. Influence de différents substrats (fumures organiques et minérale) sur la croissance de *Artemisia annua* L. acclimaté au Bénin et sa teneur en artémisinine quantifiée par RMN 1H. *Sciences de la vie, de la terre et agronomie*, 2(2).
- Egelie A., Gillett-Kaufma J., 2015. Featured Creatures; Common name: pineapple mealybug ; scientific name: *Dysmicoccus brevipes* (Cockerell) (Insecta: Hemiptera: Pseudococcidae), University of Florida, Entomology and Nematology Department, http://entnemdept.ufl.edu/creatures/FRUIT/MEALYBUGS/pineapple_mealybug.htm, (28/08/17).
- Elfawal, M.A. et al., 2015. Dried whole-plant *Artemisia annua* slows evolution of malaria drug resistance and overcomes resistance to artemisinin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(3), p.821.
- Ellman, A., 2010. Cultivation of *artemisia annua* in Africa and Asia. *Outlooks on Pest Management*, 21(2), pp.84–88.
- FAO - AQUASTAT, 2005. Rapport sur l'eau 29, Sénégal. L'irrigation en Afrique en chiffres – Enquête AQUASTAT 2005. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/SEN/SEN-CP_fra.pdf, (10/08/17).
- FAO, nd. Sénégal : Le pays en un coup d'œil. <http://www.fao.org/senegal/la-fao-au-senegal/le-pays-en-un-coup-doeil/fr/>, (10/08/17).
- Ferreira, J.F.S. et al., 2005. Cultivation and genetics of *Artemisia annua* L. for increased production of the antimalarial artemisinin. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*, 3(2), pp.206–229.
- Ferreira, J.F.S., 2007. Nutrient deficiency in the production of artemisinin, dihydroartemisinic acid, and artemisinic acid in *Artemisia annua* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(5), pp.1686–1694.
- Ferreira, J. et al., 2010. Flavonoids from *Artemisia annua* L. as Antioxidants and Their Potential Synergism with Artemisinin against Malaria and Cancer. *Molecules*, 15(5), pp.3135–3170.
- Fiwap, 2017. Produits phytopharmaceutiques agréés en cultures de pomme de terre pour un usage professionnel (Version 1er Juin 2017). <http://www.fiwap.be/uploads/File/Liste%20phyto/170628ListePhyto2017WEBOK.pdf>, (14/08/17).
- Ganry, F., & Oliver, R. (2005). La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne: enjeu et contrainte. https://vpn.gw.ulg.ac.be/531850/1/DanaInfo=agritrop.cirad.fr+document_531850.pdf, (05/08/17).

- Goethals, C.S., 2013. *Etude des possibilités d'optimisation de la production de biomasse d'Artemisia annua L. et de Stevia rebaudiana (Bertoni) Hemsl dans les conditions de la région de Thiès au Sénégal*. THES. S.I.
- González García, V., Portal Onco, M.A. & Rubio Susan, V., 2006. Review. Biology and systematics of the form genus Rhizoctonia. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4(1), pp.55–79.
- Jha, P. et al., 2011. Impact of organic manure and chemical fertilizers on artemisinin content and yield in *Artemisia annua* L. *Industrial Crops and Products*, 33(2), pp.296–301.
- Jahn GC, Beardsley JW, 2000. Interactions of ants (Hymenoptera: Formicidae) and mealybugs (Homoptera: Pseudococcidae) on pineapple. *Proceedings of the Hawaiian Entomological Society* 34: 161-165.
- Kapoor, R., Chaudhary, V. & Bhatnagar, A.K., 2007. Effects of arbuscular mycorrhiza and phosphorus application on artemisinin concentration in *Artemisia annua* L. *Mycorrhiza*, 17(7), pp.581–587.
- Kumar, S. et al., 2004. High yields of artemisinin by multi-harvest of *Artemisia annua* crops. *Industrial Crops & Products*, 19(1), pp.77–90.
- Laughlin JC, 1993. Effect of agronomic practices on plant yield and antimalarial constituents of *Artemisia annua* L. *Acta Horticulturae* 331: 53–61.
- Magalhaes P., Raharinaivo J. & Delabays N., 1996. Influence of the amount and type of nitrogen on the artemisinin production of *Artemisia annua* L. *Rev. suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 28, 349–353.
- Martinez Noguera, I., 2015. Study about the possibilities of the dissemination of *Artemisia annua* L. cultivation in the Thiès region of Senegal : performance analysis of three different varieties grown under irrigation. G. Mergeai, ed.
- Matsumoto, M., Hossain, D. & Ogata, K., 2006. Characterization of rhizoctonia-like endophytes from wormwood (*Artemisia capillaries*) roots using whole-cellular fatty acid analysis. *Bulletin of the Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University*, 29(1), pp.21–29.
- Messiaen CM., Blancard D., Rouxel F. & Lafon R., 1991. Les maladies des plantes maraîchères, p.110, INRA.
- Özgüven, M. et al., 2008. Effects of varying nitrogen doses on yield, yield components and artemisinin content of *Artemisia annua* L. *Industrial Crops and Products*, 27(1), pp.60–64.
- Phytoweb, 2017. Liste des autorisations de produits phytopharmaceutiques, <http://www.fytoweb.be>, (14/08/17).

- Pieri C., 1992. Fertility of Soils. A future for farming in the West African Savannah. Springer-Verlag, Berlin, Allemagne, p.348.
- Pop, I.A. et al., 2017. *Artemisia annua* L. Culture Technology in the Climatic Conditions in Transylvania. *Procedia engineering.*, 181, pp.433–438.
- Poulson, M. & Thai, T., 2015. Effect of high light intensity on photoinhibition, oxyradicals and artemisinin content in *Artemisia annua* L. *International Journal for Photosynthesis Research*, 53(3), pp.403–409.
- Scarcella, M., Grassi, F. & Mastroianni, M., 2011. *Artemisia annua* L.: agro-techniques for semi-arid environments. *Italian journal of agronomy : official journal of the Italian Society of Agronomy.*, 6(3), pp.26–170.
- Simonnet, X., Quennoz, M. & Carlen, C., 2016. Influence of postharvest treatments on the artemisinin content of leaves of *Artemisia annua*. *Acta horticulturae.*, 1125(1125), pp.395–398.
- Singh, M., 2000. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium nutrition on herb, oil and artemisinin yield of *Artemisia annua* under semi-arid tropical condition. *Journal of Medicinal and Aromatic Plant Sciences*, 22(4a), pp.368–369. sn.freemeteo.com, nd. Thiès - Historique météo mensuel. <http://sn.freemeteo.com>, (10/08/17).
- Van Damme P., 2016. Optimisation de la production de l'armoise annuelle (*Artemisia annua* L.) sur le domaine de l'organisation « Le Relais - Sénégal » à Yendane (région de Thiès, Sénégal), Mémoire de master bioingénieur en sciences agronomiques, sous la direction de Pr. Guy Mergeai, Gembloux, Gembloux Agro-Bio Tech (ULg).
- Wang, L. et al., 2015. Effects of wind on hydraulic properties and growth of *Artemisia annua* Linn. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, 35(13), pp.4454–4461.
- Willcox M., et al., 2004. *Artemisia annua* as a Traditional Herbal Antimalarial, pp.43-59.
- World Development Indicators database, 2017. Country Profile: Senegal. <http://donnees.banquemondiale.org/pays/senegal>, (10/08/17).
- World Health Organization, 2006. WHO monograph on good agricultural and collection practices (GACP) for *Artemisia annua* L. WHO Library Cataloguing and Publication Data.
- World Health Organization, 2012. WHO position statement: Effectiveness of non-pharmaceutical forms of *Artemisia annua* L. against malaria. WHO Library Cataloguing and Publication Data.
- World Health Organization, 2016. World Malaria Report 2016. WHO Library Cataloguing and Publication Data.

- Yang, M.-Q., 2013. Regularity of absorption and distribution of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium in *Artemisia annua*. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 44(19), pp.2745–2752.
- Yang, S., 2009. Effects of application of N, P and K and plant density on growth of *Artemisia annua* and yield of artemisinin. *Zhongguo Zhongyao Zazhi*, 34(18), pp.2290–2295.
- Yeboah, S., 2012. *Organic and inorganic fertilizers application on the growth and yield of Artemisia annua L. in the humid tropics of Ghana*.
- Zime-Diawara, H. et al., 2015. Etude de l'efficacité et de la tolérance d'une tisane à base de *Artemisia annua* L. (Asteraceae) cultivée au Bénin pour la prise en charge du paludisme simple. *International+Journal+of+Biological+and+Chemical+Sciences*, 9(2), pp.692–702.