

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences Agrovétérinaires et biologiques

Département des sciences Agronomiques

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention
Du diplôme de Master Académique en sciences de la nature et de la vie
Option : Phytopharmacie appliquée**

**ETUDE COMPAREE DE L'EFFET DE DIFFERENTS STIMULATEURS
DES DEFENSES NATURELLES (SDN) SUR LA SANTE VEGETALE
CAS DE LA TOMATE (MARMANDE)**

Soutenue et présentée en juin 2013

Par

KEZZIM-YAAKOUB

Devant le jury composé de :

Mr. AROUN	M.A.A U. S.D.B.	Président
Mr. DJAZOULI Z.E.	MCA. U. S.D.B.	Promoteur
Mme. YAHIA N.	MCA. U.S.D.B.	Examinatrice
Mme. BRAHIMI	Doctorant. U. S.D.B.	Examinatrice

ANNEE UNIVERSITAIRE 2012/2013

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour bien mener ce travail.

Ensuite, je tiens à remercier les membres du jury de thèse d'avoir accepté d'honorer et d'enrichir mon travail. Pour cela, je leur exprime ma gratitude et mon profond respect.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur Docteur DJAZOULI Z., et le prie d'accepter le témoignage de ma sincère reconnaissance.

Mes vifs remerciements et mes respects vont à MONSIEUR AROUN qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie très sincèrement MADAME YAHIA. N et MADAME BRAHIMI d'avoir bien voulu accepter d'être membres du jury et d'examiner ce travail.

A tous mes enseignants et mes professeurs qui ont assuré ma formation sans oublier les personnels du département d'agronomie de Blida.

Au personnel de la bibliothèque et du laboratoire de zoologie pour leur disponibilité et leur compréhension, en particulier madame AMINA.

Je remercie également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail à ma très chère famille, pour laquelle je prie dieu de les garder pour moi. Elle, qui m'a éclairé le chemin de la vie par son grand soutien et ses encouragements, par ses énormes sacrifices consentis durant mes études et qui a toujours souhaité me voir réussir. Je lui exprime à mon tour, toute ma gratitude et mes sentiments les plus dévoués.

*A mes chers oncles, B. HASSENE et B. BOURENANE
que je remercie pour leur soutien moral.*

A ma sœur K. Amina que j'aime tant.

A mon promoteur Djazouli Z.E.

A tous mes ami(e)s, en particulier :

B. Islam et B. Chiheb.

Kezzim Yaakoub

ETUDE COMPAREE DE L'EFFET DE DIFFERENTS STIMULATEURS DES DEFENSES NATURELLES (SDN) SUR LA SANTE VEGETALE CAS DE LA TOMATE (MARMANDE)

Résumé

Les conséquences d'une agriculture dite intensive, rend surtout nécessaire la mise au point de solutions alternatives s'appuyant sur le rôle des Biofertilisants comme éliciteurs naturels dans la stimulation des défenses naturelles des plantes. Avec l'introduction de nouvelles formulations pour faire face aux bioagresseurs.

L'étude a porté sur l'effet comparé de deux fertilisants formulés (jus de lombricompost et un correcteur de carence à base d'oligo-éléments), avec deux fertilisants homologués, un extraits d'algues marines (Algasmar) et un fertilisants minérale(Fertiactyl) sur la physiologie et sur l'état phytosanitaire des plantes de la tomate *Solanum lycopersicum*.L (variété Marmande).

Les résultats de cette étude ont montré que tous les fertilisants expérimentés ont eu un effet contrasté sur l'expansion des surfaces foliaires, la production florale et sur le rendement d'un côté et sur la densité de différentes formes biologiques des larves du *Tuta absoluta*, le nombre de folioles infestées par les larves du *Tuta absoluta*, l'incidence d'*Autographa gamma* sur la surface foliaire et le nombre de feuilles ayant une carence en Fer. Une meilleure efficacité sur les densités des populations des larves du *Tuta absoluta* est signalée pour le jus de lombricompost et le Fertiactyl suivi de l'Algasmar. Les résultats laissent apparaitre que l'efficacité des traitements sur l'expansion foliaire est certaine avec un meilleur effet pour le Biofertilisant et Fertiactyl par rapport aux algues marines. Sur le plan effet jumelé, le jus de lombricompost formulé affiche un meilleur effet en développant un effet SDN, augmentant la surface foliaire et le rendement.

Mots Clés :

Solanum lycopersicum.L, *Tuta absoluta*, formes biologiques, *Autographa gamma*
Densité, molécules biochimiques.

COMPARATIVE STUDY OF THE EFFECT OF DIFFERENT STIMULATORS OF NATURAL DEFENSES (SDN) ON HEALTH VEGETABLE CASE OF TOMATO (MARMALADE)

Abstract

The consequences of a so-called intensive agriculture, especially makes necessary the development of alternatives based on the role of Biofertilizers as natural elicitors in stimulating the natural defenses of plants. With the introduction of new formulations to deal with pests.

The study compared the effect of two formulated fertilizers (vermicompost juice and a correction of deficiency based on trace elements), with two approved fertilizers, seaweed extracts (Algasmar) and mineral fertilizers (Fertiactyl) on physiology and plant health of tomato plants *Solanum lycopersicum*.L (variety Marmande).

The results of this study showed that all experienced fertilizers had a mixed effect on the expansion of leaf area, flower production and performance on one side and on the density of different biological forms of larvae of *Tuta absoluta* the number of leaflets infested with larvae of *Tuta absoluta*, the *Autographa gamma* impact on the leaf surface and the number of sheets with Iron deficiency. Greater efficiency on population densities of larvae *Tuta absoluta* is reported for juice and vermicompost Fertiactyl monitoring Algasmar. The results suggest that appear effective treatment of leaf expansion is certain with better effect for biofertilizer and Fertiactyl from seaweed. Effect on the combined plan juice made vermicompost shows better effect in developing SDN effect and increasing leaf area and yield.

Keywords: *Solanum lycopersicum*.L, *Tuta absoluta*, biological forms, biochemical molecules, *Autographa gamma*, density.

دراسة مقارنة لتأثير مختلف منبهات الدفاعات الطبيعية (SDN) على صحة النباتات حالة الطماطم (مارموند)

ملخص

النتائج المترتبة على ما يسمى الزراعة المكثفة، جعلت من الضروري تطوير بدائل تستند إلى دور الأسمدة الحيوية كما مثل المحفزات الطبيعية في تنشيط الدفاعات الطبيعية للنباتات. مع إدخال صيغ جديدة للتعامل مع الآفات.

الدراسة التي امامنا اعتمدت على مقارنة لتأثير اثنين من الأسمدة وضعت (عصير vermicompost وتصحيح العجز بناء على العناصر النزرية)، مع اثنين من الأسمدة المعتمدة، عصائر الأعشاب البحرية (Algasmар) والأسمدة المعدنية (Fertiactyl) في علم وظائف الأعضاء والصحة النباتية لنباتات الطماطم (نوع مازماند).

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن جميع الأسمدة التي اختبرت كان لها تأثير مختلط على التوسع في مساحة الورقة، إنتاج الزهور وكمية الإنتاج من جهة وعلى كثافة الأشكال البيولوجية المختلفة من يرقات توتا أبلستا عدد الاوراق التي تنتشر فيها يرقات توتا أبلستا ، وأثر اوتوغرافا غاما على سطح الورقة وعدد الأوراق التي تظهر نقص الحديد. وأفيد قدر أكبر من الكفاءة في الكثافة السكانية من اليرقات توتا absoluta للعصائر و vermicompost Fertiactyl Algasmар الرصد. وتشير النتائج التي تظهر علاج فعال من التوسع ورقة من المؤكد مع أفضل تأثير التسميد الحيوي لـ Fertiactyl من الأعشاب البحرية. تأثير على جنبا إلى جنب خطة عصير مصنوع vermicompost يظهر أفضل تأثير في تطوير تأثير SDN وزيادة مساحة الورقة والعائد.

كلمات البحث

الأسمدة الحيوية, محفزات طبيعية, يرقات الحفارة, الفراشة الليلية, الأسمدة الكيماوية

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Synthèse bibliographique	3
1. nutrition minérale des plantes.....	3
1.1. Généralité sur les éléments essentiels à la vie de la plante.....	3
1.2. Eléments minéraux et exigences des plantes.....	3
1.3. Notions de fertilisation	6
1.4. Effet de la nutrition de la plante sur la santé végétale	8
2. Stimulation des défenses naturelles des plantes(SDN).....	9
2.1. De la reconnaissance à la défense, les différentes étapes	9
2.1.1. Les signaux de reconnaissance.....	9
2.1.2. La signalisation conduisant à la défense.....	10
2.1.3. Les réponses de défense	14
3. La conduite de la fertilisation, facteur de la santé des plantes.....	17
3.1. Comment la fertilisation agit-elle sur la santé des plantes ?.....	17
3.2. Effet de quelques Biofertilisants sur la santé végétale.....	17
3.3. Intérêt des SDN en protection des plantes.....	20
CHAPITRE II : Matériel et méthodes	21
1. Présentation de la région d'étude.....	21
1.1. Situation géographique.....	21
1.2. Climat de la région d'étude.....	21
2. Présentation du site d'étude et conditions expérimentales.....	22
3. Matériel biologique.....	22
3.1. Obtention des plantules de tomate.....	22
3.2. Infestant de la tomate par Tuta absoluta et par Autographa gamma....	23
3.3. Obtention des produits de traitement.....	24
4. Méthodes d'études.....	24
4.1. Estimation des paramètres morphologiques des plants de la tomate..	27
4.2. Estimation de l'état phytosanitaire des plants de la tomate.....	27
5. Analyses statistiques.....	30
5.1. Analyses de variance (SYSTAT vers. 12, SPSS 2012).....	30
5.2. Analyse multivariée (PAST vers. 1.37).....	30
CHAPITRE III: Résultats	31
1. Effet temporelle des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate.....	31
1.1. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 1 ^{er} apport.....	31
1.2. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 2 ^{ème} apport.....	31
1.3. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 3 ^{ème} apport.....	31
1.4. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 4 ^{ème}	31

apport.....	32
1.5. Evolution temporelle de la production florale de la tomate après le 1 ^{er} apport.....	32
1.6. Evolution temporelle de la production florale de la tomate après le 2 ^{ème} apport.....	32
1.7. Evolution temporelle de la production florale de la tomate après le 3 ^{ème} apport.....	32
1.8. Evolution temporelle de la production globale des fleurs de la tomate	32
2. Evaluation de l'effet des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate.....	35
2.1. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le premier apport.....	35
2.2. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le deuxième apport	35
2.3. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le troisième apport.....	35
2.4. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le quatrième apport.....	35
2.5. Evaluation de l'effet des traitements sur la production florale de la tomate après le premier apport.....	36
2.6. Evaluation de l'effet des traitements sur la production florale de la tomate après le deuxième apport.....	36
2.7. Evaluation de l'effet des traitements sur la production florale de la tomate après le troisième apport.....	36
2.8. Evaluation de l'effet des traitements sur la production globale des fleurs de la tomate.....	36
3. Etude comparée des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate.....	41
3.1. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au premier apport.....	41
3.2. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au deuxième apport.....	41
3.3. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au troisième apport.....	41
3.4. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au quatrième apport.....	42
3.5. Etude comparée des traitements sur la production florale de la tomate suite au premier apport.....	42
3.6. Etude comparée des traitements sur la production florale de la tomate suite au deuxième apport.....	42
3.7. Etude comparée des traitements sur production florale de la tomate suite au troisième apport.....	42
3.8. Etude comparée des traitements sur production globale des fleurs de la tomate.....	42
4. Estimation de rendement des plantes de la tomate sous l'effet des traitements	46
5. Evaluation des traitements sur l'état phytosanitaire de la tomate.....	47

5.1. Evaluation des traitements sur l'incidence de <i>Tuta absoluta</i>	47
5.2. Evaluation des traitements sur l'incidence d' <i>Autographa gamma</i> sur la surface foliaire de la tomate.....	55
5.3. Evaluation des traitements sur le nombre de feuilles ayant une carence en Fer.....	56
CHAPITRE IV : Discussion	59
1. Effet de Biofertilisant, de la formulation minérales et des fertilisants homologués sur les paramètres morphologiques des plantes de la tomate.....	59
2. Effet de Biofertilisant, des fertilisants homologués et de la formulation minérale sur l'état phytosanitaire des plantes de tomate	63
CONCLUSION	67
Références et bibliographie	69

Liste des abréviations

ACIK1	Avr9/Cf-9 Induced Kinase 1
AOC	Allène Oxyde Cyclase
AOS	Allène Oxyde Synthase
ATP	Adénosine Triphosphate
Avr	Gène d'Avirulence
B	Bore
C	Carbone
Ca	Calcium
CDPK	Calcium-Dependent Protein Kinases
DAR	Délai Avant Récolte
EDS1	Enhanced Disease Susceptibility 1
ET	Ethylène
Fe	Le fer
FT	Facteurs de Transcription
H	Hydrogène
HR	Hypersensibilité
IPM	Integrated Pest Management
JA	Jasmonique Acide
K	Potassium
LAR	Résistance Locale Acquise
LMR	Limite Maximale de Résidus
LOX	Lipoxygénase
Mg	Magnésium
MeJA	Méthyljasmonate
MAPKs	Mitogen-Activated Protein Kinase
N	Azote
NDR	Non race specific Disease Resistance
O	Oxygène
P	Phosphore
PAD4	Phytoalexin-Deficient 4
PAMP	Pathogen Associated Molecular Pattern
PAL	Phénylalanine Ammonialyase
PGPR	Growth Promoting Rhizobacteria
PR	Pathogenesis Related
R	gène de R ésistance
RAR1	Required for Mla-dependent Resistance 1
ROS	Reactive Oxygen Species
S	le soufre
SA	Salicylique Acide
SOD	Superoxide Dismutase
SAR	résistance systémique acquise
SDN	Stimulation des défenses naturelle des plantes
SGT1	Suppressor of G2 allele of SKP1

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Eléments essentiels à la vie végétale (Blancarde, 2013).....	4
Figure 2	Une fertilisation équilibrée entre les besoins des cultures et les apports en fertilisant (Schwartz et al, 2005).....	6
Figure 3	Illustration schématique des réactions de défense induites lors d'interactions plante/agent pathogène ou éliciteur/plante (Desender et al., 2007).....	10
Figure 4	effet de la fertilisation sur la santé des plantes (Philippe, 2013).....	17
Figure 5	Figure 5 : Impact de la Minéralisation des turricules des vers de terre sur les microorganismes du sol et la croissance des plantes (Ping et Boland, 2004).....	19
.Figure 6	Localisation géographique de la plaine de la Mitidja. Echelle: 1/500 000.....	21
Figure 7	Implantation de la serre tunnel expérimentale (Originale 2012).	22
Figure 8	schéma explicatif de la distribution aléatoire des micros parcelles traitées.....	23
Figure 9	Semis et obtention des plantules de tomate (Originale, 2013)..	23
Figure10	Infestation naturelle de <i>Tuta absoluta</i> et de la noctuelle <i>Autographa gamma</i> (Originale, 2013).....	24
Figure11	Schéma directeur de l'effet comparé des traitements fertilisants sur les paramètres morphologiques et l'état phytosanitaire de la tomate.....	26
Figure12	Estimation des paramètres morphologiques et de l'état phytosanitaire des plants de la tomate (Originale, 2013).....	29
Figure13	Evolution temporelle des paramètres morphologiques de la tomate sous l'effet des traitements.....	34
Figure14	Evaluation de l'effet des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate.....	40
Figure15	Etude comparée des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate.....	45
Figure16	Estimation de rendement de la première récolte des plantes de la tomate sous l'effet des traitements.....	46
Figure17	Evolution temporelle De l'état phytosanitaire de la tomate sous l'effet des traitements.....	49
Figure18	Evaluation de l'effet des traitements sur l'état phytosanitaire de la tomate.....	51
Figure19	Etude comparée des traitements sur l'état phytosanitaire de la tomate.....	54
Figure20	Evolution temporelle de l'incidence d' <i>Autographa gamma</i> sur les feuilles de la tomate sous l'effet des traitements	55
Figure21	Evaluation de l'effet des traitements sur L'incidence d' <i>Autographa gamma</i> sur les feuilles de la tomate cryptogamiques sous l'effet des traitements.....	55
Figure22	Etude comparée des traitements sur L'incidence d' <i>Autographa</i>	56

	gamma sur les feuilles de la tomate.....	
Figure23	Evolution temporelle sur le nombre de feuilles de la tomate en carence en Fer sous l'effet des traitements.....	57
Figure24	Evaluation de l'effet des traitements sur le nombre de feuilles de la tomate en carence en Fer.....	57
Figure25	Etude comparée des traitements sur le nombre de feuilles de la tomate en carence en Fer.....	58
Figure 26	Schéma expliquant le model hypothétique de la stimulation des paramètres morphologiques et sur l'état phytosanitaire de la plante par l'application d'un Biofertilisant, des fertilisants homologués et d'une solution formulés.....	66

Introduction générale master II

Le défi des prochaines décennies allant jusqu'à 2050, porte sur le souci de nourrir une population mondiale estimée à 9.2 milliards d'individus. Ce défi va nécessiter de doubler la production de nourriture dans les pays en voie de développement et de l'augmenter de 70% à l'échelle mondiale (Barbara, 2012).

Pour atteindre cet objectif il n'y a pas d'autre solution que celle d'une intensification de l'agriculture (Perkins, 1997). Cette intensification repose sur une forte utilisation d'intrants (pesticides et fertilisants minéraux), le développement de l'irrigation ainsi que sur le développement de variétés des plantes à hauts rendements.

La révolution verte a ainsi permis de nourrir une population mondiale ayant doublé au cours des 40 dernières années. L'augmentation de la production agricole ayant accompagné la croissance de la population a évité de ce fait une catastrophe malthusienne dans de nombreux pays en voie de développement. La production mondiale de céréales est ainsi passée de 876 millions de tonnes à 2.45 milliards de tonnes au cours des 40 dernières années (Barbara, 2012). On estime que la révolution verte a ainsi sauvé un milliard de personnes de la famine.

Cependant, il est désormais admis que cette révolution verte s'est accompagné de nombreux effets négatifs pouvant compromettre la pérennité du système de production agricole actuel. Ces effets négatifs de l'intensification incluent la contamination des nappes phréatiques, les rejets de gaz à effet de serre, l'eutrophisation de nombreux écosystèmes aquatiques, la déforestation, la dégradation du sol, la salinisation des zones irriguées, l'induction et le développement de résistance chez les organismes phytopathogène. De plus, il est apparu que le système de production actuel présente déjà des limites, compte tenu d'une population sous-alimentée estimée à 13% de la population mondiale, soit près de 910 millions de personnes.

C'est dans cette optique que la FAO a lancé une initiative mondiale « Produire plus avec moins » rapportée sous la forme d'un ouvrage visant à proposer un nouveau modèle d'agriculture. Les recommandations proposées reposent sur une intensification de l'agriculture certes, mais d'une manière raisonnée et durable. (Ruben, 2012).

Ce modèle est défini comme : « une agriculture productive qui permet de conserver et d'améliorer les ressources naturelles. Elle utilise une approche écosystémique qui met à profit la contribution de la nature à la croissance des plantes – matières organiques du sol, régulation des débits d'eau, pollinisation et prédation naturelle des ravageurs – et applique des intrants externes appropriés au bon moment et en quantité voulue ». Un des principes-clé pour atteindre cet objectif est le maintien de la qualité et la santé des sols ainsi que celle des plantes cultivées (Gobat et al., 2010).

Le modèle de production agricole recommandé par la FAO inclut les mécanismes de lutte biologique faisant intervenir, entre autres, les molécules bioactives (Biopesticides et Biofertilisant). Celles-ci sont généralement compatibles avec les méthodes de lutte biologiques classiques (ex. lâchers de prédateurs ou de parasites) (Fravel *et al.*, 1999 ; Bonnemain, Chollet, 2003).

C'est ce type de mécanisme de lutte faisant appel aux biostimulants qui va ouvrir la voie sur la révision totale des paradigmes régissant la lutte contre les ennemis des cultures. Cette approche, consiste à donner aux plantes les moyens de se défendre elles-mêmes, ou renforcer leurs propres moyens de défense, plutôt que de combattre directement l'agresseur. Les biostimulants constituent donc une palette de technologies prometteuses, qui génèrent un intérêt croissant de part leurs capacités à améliorer à la fois la qualité et le rendement des récoltes, tout en réduisant certains impacts indésirables sur l'environnement. (Barbara verplancken, 2012).

Dans le cadre de la recherche sur de nouveaux procédés en phyto-protection et de la lutte biologique, une autre approche faisant appel à l'utilisation de molécules naturelles appelées Biofertilisant est envisageable. La biofertilisation foliaire offre une certaine éventualité de bio-protection par l'utilisation de nouvelles formulations des stimulateurs de défenses naturelles.

L'objectif de notre recherche est d'évaluer l'effet des Biofertilisants et des formulations minérales en comparaison avec des fertilisants homologués sur La biomasse et l'état phytosanitaire de la tomate cultivée sous serre. Et pour cela, nous avons essayé de répondre à la problématique suivante :

1. Quel serait l'intérêt de la formulation des produits biologiques ?
2. Quel serait l'effet des apports foliaires des fertilisants sur :
 - L'évolution des paramètres morphologiques de la tomate ?
 - L'abondance et la densité des larves de *Tuta absoluta* ?
 - La présence et l'agressivité de la noctuelle *Autographa gamma* ?
3. Existe-t-il un lien entre les apports des Biofertilisants et la stimulation des défenses naturelles des plantes ?
4. Comprendre le rôle de la nutrition dans la santé des plantes.

CHAPITRE I: Synthèse bibliographique

1. Nutrition minérale des plantes.

Introduction :

L'agriculture durable s'appuie sur les fondements du développement durable. Cela signifie qu'elle doit répondre aux besoins des générations présentes sans compromettre le développement des générations futures, en leur garantissant les mêmes chances de progrès.

L'agriculture durable est un moyen de réflexion sur le devenir des exploitations agricoles et plus largement sur la vie des campagnes de demain. Les agriculteurs du réseau ont développé des savoir-faire, souvent simples et empreints de bon sens, qui tendent vers une agriculture à taille humaine, liée au sol, économe en intrants comme en moyens de production (Zahm, 2011).

Alors que les principes de l'agriculture biologique concernent l'agriculture au sens large, comprenant la façon dont les hommes entretiennent le sol, l'eau, les plantes et les animaux afin de produire, de préparer et de distribuer la nourriture et les autres biens nécessaires à la survie de l'homme (Jeandet *et al.*, 1996).

Les plantes cultivées en serre tirent la plus grande partie de leur alimentation du sol. La fertilité du sol se divise en plusieurs compartiments qui diffèrent tant par la quantité d'éléments qui s'y retrouvent, par la forme sous laquelle ils s'y retrouvent et par la vitesse avec laquelle ces éléments sont fournis à la plante (Marschner, 1996).

1.1. Généralité sur les éléments essentiels à la vie des plantes

À l'instar des autres êtres vivants, les plantes se nourrissent à la fois pour se procurer de l'énergie et pour se procurer les matériaux nécessaires à sa construction.

Il n'y a pas d'alternative : toutes les plantes ont besoin de nutriments pour se développer. Or les sols sont incapables de fournir sans apport complémentaire les ingrédients nécessaires à la production actuelle de biens alimentaires. Il est donc indispensable d'apporter aux sols cultivés des matières fertilisantes. Les sols pourront ainsi durablement nourrir les plantes qui seront-elles-mêmes consommées par les animaux ou les hommes (Coïc, et Tendille, 1972).

1.2. Eléments minéraux et exigences des plantes

Comme les animaux, les plantes ont besoin de deux types d'éléments nutritionnels : les macroéléments et les oligoéléments (figure 1).

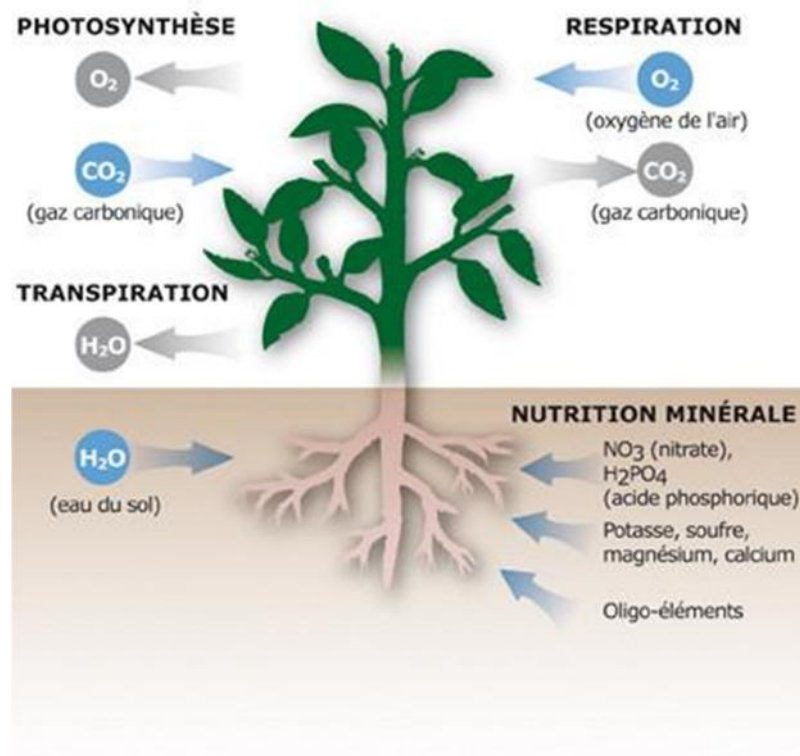


Figure 1: Eléments essentiels à la vie végétale (Blancarde, 2013)

Les principaux macroéléments sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore, le potassium, le soufre, le calcium et le magnésium. Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont fournis par l'atmosphère. Il est bien rare que l'homme ait l'occasion d'agir sur ces ressources (cultures sous serres, recherche scientifique).

Les principaux oligoéléments sont le fer, le manganèse, le zinc, le bore, le cuivre, le molybdène, le cobalt, le sodium et le chlore.

- L'azote.

L'azote est le constituant principal des protéines (chaînes d'acides aminés). Il favorise la croissance des plantes, la multiplication des chloroplastes (une plante carencée pâlit ou jaunit), la synthèse des sucres et des réserves azotées dans les fruits et les graines. L'excès d'azote allonge la période végétative des plantes. Il est donc un facteur retardant la maturité. En outre, il a été montré que les excès d'azote sensibilisaient les plantes aux maladies cryptogamiques et aux attaques des parasites. (Marschner, 1996)..

- Le phosphore.

Le phosphore est un constituant important des protéines phosphorées (nucléoprotéines, phosphoprotéines, lécithines, etc.). Les ions phosphoriques sont des éléments très importants dans les processus de stockage et de transport de l'énergie dans les cellules (ATP). Enfin, un grand nombre de réactions métaboliques

exigent des phosphorylations préalables pour se dérouler. Le phosphore, comme l'azote, est un élément indispensable à la croissance de la plante, peut-être davantage pour les organes jeunes chez lesquels on constate que le phosphore est plus abondant que dans les organes plus âgés. Le phosphore est fondamental pour les processus de floraison, la mise en graine ou en fruit des plantes (Osman, Milthorpe, 1971).

- Le soufre.

Le soufre est le constituant essentiel des acides aminés soufrés (méthionine et cystine) que la plupart des animaux ne savent pas synthétiser et qu'ils trouveront dans les plantes qu'ils consommeront. Certaines plantes comme les liliacées, les légumineuses ou les crucifères sont riches en ces acides aminés soufrés, et plus généralement en produits soufrés (Kaufmann et *al.*, 2001).

.

- Le potassium.

Le potassium est l'ion principal des solutions cytoplasmiques. Le potassium joue un rôle fondamental dans les processus d'échanges transmembranaires passifs et actifs dans les cellules.

On ne sait pas bien précisément comment le potassium favorise la photosynthèse, ni comment cet élément améliore la synthèse des protéines. On ne sait pas bien non plus pourquoi les carences comme les excès de potassium augmentent la sensibilité des plantes aux parasites (Kaufmann et *al.*, 2001).

- Le magnésium.

Le magnésium est un constituant de la chlorophylle. Il en favorise la synthèse ainsi que celle de la xanthophylle et celle du carotène. Le magnésium favorise l'absorption du phosphore et son transport dans les graines où il favorise la synthèse de la phytine et celles des lipides. Le magnésium évite l'absorption excessive de potassium par les plantes (Plaxton, 1996).

- Le calcium.

Le calcium est un élément fondamental des parois cellulaires des plantes. C'est lui qui donne leur résistance tissulaire aux membranes pectiques. Le calcium favorise aussi la formation et la maturation des fruits et des graines. Enfin, ce sel possède un rôle important dans les échanges transmembranaires (Soltner; 2001).

- Les oligoéléments.

- a) Le fer, bien qu'il ne soit pas un constituant de la chlorophylle, est indispensable à sa formation. Sa carence provoque la chlorose. Le fer participe à la constitution de nombreuses enzymes d'oxydation.

- b) Le cuivre, comme le fer, entre dans la composition de nombreuses enzymes d'oxydation.
- c) Le zinc, outre son rôle dans de nombreuses enzymes d'oxydation, participe à la fabrication des auxines de croissance.
- d) Le molybdène est nécessaire au métabolisme de l'azote. Il est le constituant d'une enzyme réduisant les nitrates en amines.
- e) Le bore et le manganèse entrent dans la composition d'enzymes. Leurs rôles sont encore mal connus.
- f) f) Le chlore est surtout connu pour les effets négatifs qu'il induit quand il est en excès.
- g) g) Le cobalt n'est peut-être pas indispensable aux végétaux, mais cet élément se révèle indispensable aux bactéries et aux champignons de la rhizosphère et plus encore aux bactéries fixatrices d'azote atmosphérique, symbiotes des légumineuses (*Rhizobium*) (Coppin, 2002).

1.3. Notions de fertilisation :

Pour assurer la rentabilité des champs, il faut obtenir non seulement de bons rendements des cultures ensemencées, mais surtout des résultats financiers positifs. L'atteinte de cet objectif passe par la recherche d'un équilibre entre les besoins en éléments nutritifs des cultures et les apports en fertilisants de toute provenance, en tenant compte du niveau de richesse du sol, de la rotation des cultures, des pratiques culturales, de la protection des cultures et de la zone climatique. Cette brochure propose un tour d'horizon des principaux facteurs à considérer dans la fertilisation des cultures (Figure 2) (Beauregard, 2003).

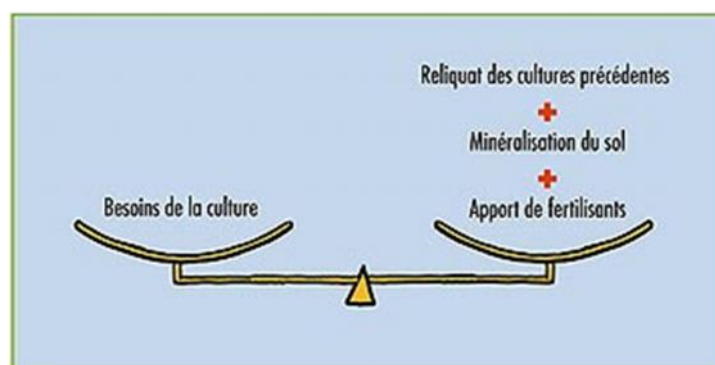


Figure 2 : Une fertilisation équilibrée entre les besoins des cultures et les apports en fertilisant (Schwartz et al, 2005)

1.3.1. Les fertilisants organiques

Les matières fertilisantes sont des produits destinés à assurer la nutrition des végétaux ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent les fertilisants minéraux ou organiques (engrais) et les

amendements. Pour clarifier le vocabulaire utilisé par la suite, il est nécessaire de préciser leur signification.

1.3.2. Les engrais minéraux

Les fertilisants minéraux sont des substances solides, fluides ou gazeuses contenant un (engrais simple) ou plusieurs (engrais composés) éléments nutritifs majeurs (N.P.K.) sous une forme inorganique. Les engrais azotés sont obtenus par la synthèse de l'azote de l'air et l'utilisation de gaz naturels. Les engrais phosphatés ou potassiques sont réalisés par extraction de minerais, sous forme de roches salines ou sédimentaires transformées. Bien que leur source soit fondée sur des éléments naturels, le recours à des techniques d'élaboration lourdes souvent liées à la chimie leur a valu souvent la connotation d'engrais chimique (Coppin, 2002).

1.3.3. Les engrais organo-minéraux

Les fertilisants organo-minéraux contiennent à la fois des matières organiques d'origine végétale et/ou animale et des matières fertilisantes minérales. Ils doivent contenir au minimum 1 % d'azote d'origine organique. On distingue les engrais organo-minéraux azotés et les engrais organo-minéraux composés (N.P.K., N.P., N.K.). Les engrais organo-minéraux N.P.K., N.P. et N.K. doivent posséder une teneur minimale en $N + P_2O_5 + K_2O$ supérieure ou égale à 7 %. La teneur en azote est supérieure ou égale à 3 % pour les engrais organo-minéraux azotés et à 2 % pour les engrais organo-minéraux composés (Roussel et al., 2001).

1.3.4. Les engrais organiques

Les engrais organiques ont un rôle nutritif, mais apportent également de la matière organique s'ils sont constitués de matière végétale. On distingue les engrais organiques azotés tels que le sang desséché, la corne broyée, les déchets de cuir, la farine de plume, le tourteau végétal et les engrais organiques composés (N.P.K., N.P., N.K.) tels que le guano de poissons, la vinasse de mélasse (Coppin, 2002).

1.3.5. Les amendements organiques

Il s'agit de matière fertilisante composée principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale fermentées ou fermentescibles destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de la matière organique du sol. Les amendements améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Les amendements calciques ou magnésiens ont pour rôle principal de maintenir ou d'élever le pH du sol. Les amendements organiques, d'origine végétale, entretiennent ou reconstituent l'humus, donc le stock de matière organique du sol (Roussel et al., 2001).

1.3.6. Les supports de culture

Ce sont des produits organiques contenant des matières fermentées essentiellement végétale ou susceptible de fermenter, mais qui se différencient des amendements organiques par une teneur plus élevée en matières inertes ; matériau permettant

l'ancrage du système racinaire de la plante, la circulation de substances nutritives exogènes, et jouant ainsi le rôle de support (Laumonier, 1978).

1.3.7. L'utilisation du fumier de vers :

Il se compose d'agrégats grumeleux stables et d'éléments importants du complexe argilo humiques. La stabilité de ces agrégats garantit une meilleure aération et un meilleur drainage du sol. Il présente constamment une action neutre et améliore ainsi la capacité du sol à réagir aux pluies acides (Bely, 2006).

Il contient des particules de silice disponibles pour les plantes, avec lesquelles elles renforcent leur épiderme et repoussent ainsi les insectes nuisibles. Il contient des mucosités antibactériennes qui peuvent guérir les plantes malades. Il stimule la croissance des racines et permet des rendements plus élevés et de meilleure qualité (Sloane, 2003).

L'utilisation à différentes doses de Biofertilisant, entre autre le lombricompost, nous permettra de mieux comprendre le rôle de cette substance naturelle sur la performance de la production de la phytomasse et dans l'induction de la résistance contre les ennemis naturels (Pajot, 2010).

Des études antérieures ont également montré que le traitement foliaire des plantes avec du lombricompost était associé au développement de certaines réponses défensives dans les tissus des plantes hôtes (Pajot, 2010).

1.4. Effet de la nutrition de la plante sur la santé végétale :

L'on sait depuis longtemps que les plantes fertilisées avec des matières organiques présentent peu de problèmes liés aux ravageurs et aux maladies. Il est également de notoriété publique que grâce à la modernisation de l'agriculture, le nombre d'espèces actuellement considérées comme des ravageurs et des maladies a augmenté. Les études de Chaboussou (1980) constituent un point de départ pour la théorie de la **throphobiose**, permettant ainsi d'établir un lien important entre ces deux faits observables et vérifiés dans la pratique par les agriculteurs.

Selon cette théorie, la sensibilité d'une plante cultivée par rapport aux ravageurs et aux maladies dépend de son état nutritionnel. Les ravageurs et les maladies n'attaqueront pas une plante saine. La santé d'une plante est directement liée à son équilibre interne qui est en perpétuelle mutation. Selon le même auteur, les ravageurs et les maladies n'attaquent pas toutes les plantes, mais uniquement celle qui pourraient servir d'aliment à l'insecte ou au pathogène. Si une plante dispose d'une quantité de substance suffisante pour alimenter les ravageurs et les maladies, c'est par ce qu'elle n'a pas été traité selon les méthodes optimales de culture. Aussi, pour qu'une plante soit résistante, est-il important de gérer correctement sa croissance.

Tous les facteurs qui affectent l'équilibre interne et le fonctionnement d'une plante peuvent diminuer ou accroître sa sensibilité aux attaques des ravageurs et des maladies. Ceci pourrait être des facteurs liés à la plante (adaptation au climat local,

âge de la plante, greffage) ou à l'environnement (climat, lumière, température, humidité, vent) ou aux pratiques de gestion (fertilité de sol, moment de la plantation, espacement, labourage, type d'engrais utilisé) (Chaboussou, 1975).

2. Stimulation des défenses naturelles des plantes (SDN) :

Pour se défendre contre les agressions, les plantes disposent de tout un arsenal de mécanismes complexes. Depuis de nombreuses années, les chercheurs tentent de percer cette complexité afin de pouvoir stimuler à la demande les défenses naturelles des plantes, ceci dans l'optique d'obtenir une alternative efficace et plus respectueuse de l'environnement aux produits phytosanitaires. Force est de constater que les produits issus de cette approche ne sont pas encore à la hauteur et donc actuellement peu utilisés en agriculture surtout en grandes cultures et en culture maraîchère (Verplancken, 2012).

2.1 De la reconnaissance à la défense, les différentes étapes

2.1.1 Les signaux de reconnaissance

- La reconnaissance générale non-spécifique de l'hôte

La résistance non-spécifique d'hôte est basée sur la reconnaissance d'éliciteurs généraux communs à de nombreux agents pathogènes. Initialement, le terme éliciteur a été utilisé pour décrire les molécules capables d'induire la production des phytoalexines (Keen, 1975), puis il a été étendu à l'ensemble des molécules qui induisent les réactions de défense chez les plantes (Montesano et al., 2003). Ainsi, d'après cette définition, les éliciteurs peuvent avoir une origine microbienne (éliciteurs exogènes : constituant des surfaces, ou molécules sécrétées), ou bien provenir de la dégradation de la paroi cellulaire végétale sous l'action des enzymes hydrolytiques du parasite (éliciteurs endogènes) (Montesano et al., 2003; Garcia-Brugger et al., 2006). Ces éliciteurs appartiennent à plusieurs familles chimiques : protéines, glycoprotéines, glycanes, lipides.

La notion d'éliciteur a ensuite évolué vers celle de PAMP (Pathogen Associated Molecular Pattern) en raison notamment de convergences de résultats entre les travaux réalisés sur l'immunité innée des mammifères et des plantes (Medzhitov and Janeway, 1997; Nürnberger and Brunner, 2002).

Le terme PAMP a été introduit pour décrire des motifs présents dans des molécules d'origine microbienne, capables de déclencher les réactions de défense. De telles molécules sont souvent indispensables à la pathogénicité et à la survie de l'agent pathogène (Guinness et al., 2003).

Les PAMP actuellement connus sont retrouvés dans des molécules polysaccharidiques ou protéiques. Les PAMPs de nature polysaccharidique sont représentés respectivement par les oligomères de β -glucanes communs aux parois végétales et fongiques, les oligomères de chitine ou de chitosan présents dans les parois des champignons et des insectes, et enfin, les oligogalacturonates des parois végétales (Shibuya and Minami, 2001).

- La reconnaissance spécifique

Il s'agit du deuxième niveau de reconnaissance des plantes ; c'est à dire lorsque les parasites sont capables de franchir la barrière de la reconnaissance non-spécifique. Cette reconnaissance est liée à la détection spécifique de certaines races appartenant à une espèce de microorganisme pathogène, par certaines variétés, appartenant à une espèce de plante hôte. On doit à Flor la démonstration que la résistance spécifique de race et de cultivar ne dépend en général que d'un seul gène dans chaque partenaire (Flor, 1955). D'où le concept gène-pour-gène selon lequel la présence simultanée et spécifique du produit d'un gène de résistance (R) dans le génome d'une plante et du produit d'un gène d'avirulence (Avr) correspondant dans celui d'un parasite conduit à une résistance spécifique souvent caractérisée par la mort cellulaire programmée des cellules attaquées, aussi appelé réaction hypersensible (HR). L'interaction est alors considérée comme incompatible.

2.1.2 La signalisation conduisant à la défense

La reconnaissance entre la plante et un microorganisme collaborée par les gènes de résistance et par la perception des PAMP conduit à l'activation d'une cascade de signaux aboutissant à la mise en place d'un réseau complexe de mécanismes de défense et, dans le cas d'interactions spécifiques, au déclenchement de la réaction HR. La découverte de nouveaux gènes et l'analyse d'une batterie de mutants ont permis de déchiffrer en partie la transduction des signaux de reconnaissance impliquant des flux ioniques, des espèces activées de l'oxygène, des protéines, et des signaux hormonaux (**Figure 3**).

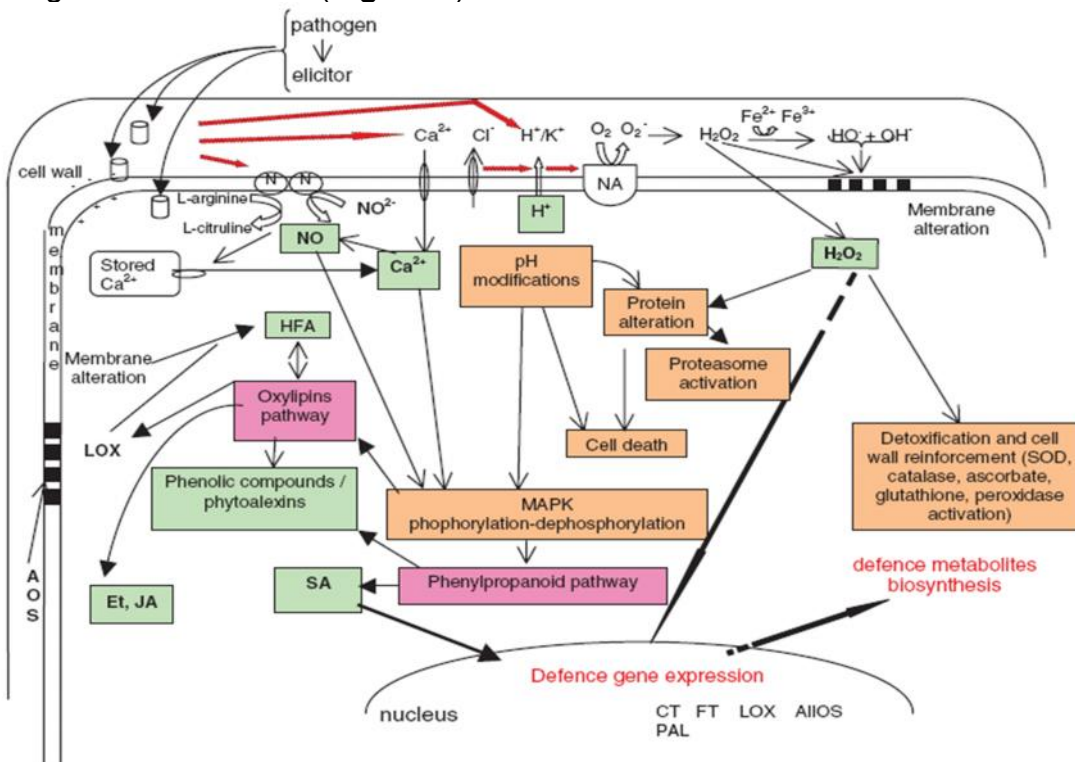


Figure 3 : Illustration schématique des réactions de défense induites lors d'interactions plante/agent pathogène ou éliciteur/plante (Desender et al., 2007).

• Les flux ioniques et la dépolarisation membranaire

Les flux d'ions à travers la membrane plasmique (influx de Ca^{2+} et H^+ et Cl^- Introduction Générale et efflux de K^+) et la dépolarisation membranaire qui en découle ont lieu dès les premières minutes de l'interaction. C'est la réponse la plus précoce à la reconnaissance spécifique d'un agent pathogène. Parmi les différents ions cités, le calcium est particulièrement important pour le bon fonctionnement des protéines kinases qui interviennent dans la phosphorylation/ déphosphorylation de diverses protéines afin de les réguler (Lecourieux et al., 2006). L'entrée de Ca^{2+} dans le cytosol est nécessaire pour l'activation du stress oxydant et de la mort cellulaire chez *A. thaliana* en réponse à *P. syringae* (Grant et al., 2000; Bent, 2001; Lecourieux et al., 2006). De même, l'implication des canaux potassiques dans l'efflux de l'ion K^+ a été démontrée dans les cellules de tabac dans l'interaction Cf-9/Avr9 (Blatt et al., 1999).

- Les espèces activées de l'oxygène (ROS)

Au cours de leur processus de développement normal, les plantes génèrent constamment des espèces réactives de l'oxygène (ROS, Reactive Oxygen Species). Les formes les plus représentées sont le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), issu de son précurseur l'anion superoxyde ($\text{O}_2^{\bullet-}$), et le radical hydroxyle (HO^\bullet). L' $\text{O}_2^{\bullet-}$ est relativement instable et peut être dismuté en H_2O_2 spontanément à pH acide ou enzymatiquement par l'intermédiaire de la superoxyde dismutase (SOD) (Fridovich, 1986). En présence de fer, $\text{O}_2^{\bullet-}$ et H_2O_2 peuvent donner naissance au très réactif HO^\bullet (Apel and Hirt, 2004; Mori and Schroeder, 2004).

Ces molécules proviennent des éléments cellulaires les plus en contact avec l'oxygène comme la chaîne de transport des électrons dans les mitochondries et les chloroplastes, et les oxydases membranaires. Suite à l'attaque d'agents pathogènes, la quantité de ROS augmente de manière rapide et localisée au niveau du site d'infection, phénomène communément appelé «stress oxydant» (Stulemeijer and Joosten, 2008).

Gènes de résistance et réseaux de signalisation

Compte tenu de l'existence de deux types de gènes NBS-LRR, l'hypothèse d'une intervention de deux voies de signalisation distinctes, l'une liée au domaine TIR, l'autre au domaine CC, a été émise (Hipskind and Paiva, 2000; Young, 2000). L'analyse du rôle de deux protéines EDS1 (Enhanced Disease Susceptibility 1) et de son partenaire PAD4 (Phytoalexin-Deficient 4) a permis de mettre en évidence leur implication dans la voie de signalisation induite par les TNLs (Feys et al., 2001; Wiermer et al., 2005), tandis que les CNLs activent plutôt la voie NDR1 (Non race specific Disease Resistance) (Century et al., 1995). Ces deux voies peuvent ensuite être régulées par un même mécanisme mettant en jeu les protéines RAR1 (Required for Mla-dependent Resistance 1), petite protéine qui contient des domaines d'accrochage au zinc et qui interagit avec la protéine SGT1 (Suppressor of G2 allele of SKP1) (Azevedo et al., 2002). Cette dernière intervient dans un complexe qui permet l'ubiquitination des protéines afin qu'elles soient alors repérées et dégradées par le protéasome 26S (Deshaies, 1999).

- **La phosphorylation ou voie des MAP kinases**

La cascade des MAPKs (Mitogen-Activated Protein Kinase) constitue un système de transmission des signaux particulièrement conservé chez les eucaryotes en réponse à différents stress environnementaux (Asai et al., 2002). Chez les végétaux, les MAPKs sont capables de moduler l'expression des gènes conduisant à la défense (Nakagami et al., 2005).

Chez le tabac, elles activent l'expression de la phénylalanine ammonialyase (PAL) en réponse à un traitement par des éliciteurs *via* la phosphorylation de facteurs de transcription (Zhang et al., 1998). Chez *Arabidopsis*, la MAP-kinase 4 inhibe PAD4 et EDS1, ce qui bloque la voie de l'acide salicylique et libère celle de l'acide jasmonique et de l'éthylène (Peter Brodersen, 2006).

Les CDPK (Calcium-Dependent Protein Kinases), un autre type de protéines kinases, sont spécifiques des plantes et des protozoaires et sont directement associées à la transduction des signaux médiés par les gènes R, ainsi que cela a été démontré chez la tomate et les cellules de tabacs exprimant le gène Cf9 (Romeis, 2001). La perte de fonction d'ACIK1 (Avr9/Cf-9 Induced Kinase 1) abolit complètement la HR suggérant le rôle important de cette protéine dans la mise en place de cette réaction (Rowland et al., 2005).

Des travaux révèlent également que les MAPKs régulent l'immunité innée chez les plantes. Une cascade MAP-Kinase complète a été activée dans les cellules d'*A. thaliana* suite à la reconnaissance de la flagelline par le récepteur FLS2, elle confère à la plante la résistance vis-à-vis des bactéries et champignons pathogènes (Asai et al., 2002).

- **Les hormones et autres molécules signaux de la défense**

- **A Les hormones**

La plupart des hormones connues sont des molécules signaux intervenant dans les interactions plantes-agents pathogènes (Spoel and Dong, 2008; Bari and Jones, 2009).

Néanmoins, trois d'entre elles, l'acide salicylique, l'acide jasmonique et l'éthylène, ont un rôle prépondérant dans l'induction des réponses de défense.

L'acide salicylique (SA) est un composé dérivé d'acide phénolique qui s'accumule non seulement dans les feuilles infectées par un agent pathogène mais aussi dans les tissus adjacents. Il induit l'expression de gènes de défense associés à la LAR (Local Acquired Resistance) et à la SAR (Systemic Acquired Resistance). Le SA induit l'expression des gènes *PR* codant notamment des glucanases, chitinases et peroxydases (Ryals et al., 1996), y compris dans les parties des plantes éloignées du site d'infection, rendant celles-ci plus résistantes vis-à-vis d'un large spectre d'agents pathogènes (Loake and Grant, 2007).

L'acide jasmonique (JA) est un dérivé de l'acide linoléique. Le JA est important dans les étapes de développement ainsi que dans la mise en place de réponses de

défense. Sa synthèse requiert l'action de plusieurs enzymes : phospholipase, lipoxygénase (LOX), allène oxyde synthase (AOS) et allène oxyde cyclase (AOC). Elles sont rapidement induites en réponse aux éliciteurs (Rickauer et al., 1997) et jouent un rôle clé dans l'expression des gènes de défense, entraînant notamment la production de phytoalexines (Kauss et al., 1992; Rancé et al., 1998) et des inhibiteurs de protéases (Farmer and Ryan, 1990). Le JA peut aussi être métabolisé en un composé volatile, le méthyljasmonate (MeJA), molécule diffusible importante dans les communications intra- et inter-plantes.

L'éthylène (ET) est une hormone végétale volatile, dérivée de la méthionine, impliquée dans divers processus physiologiques, comme la germination ou la maturation des fruits, mais aussi dans les interactions plantes-microorganismes. Son action principale est d'induire la production de phytoalexines et la synthèse de certaines PR protéines (Eyal et al., 1992; Nakazato et al., 2000).

B Les interconnexions entre les différentes voies

Les réponses de défense sont modulées par des interconnexions complexes entre les différentes voies de signalisation. Elles impliquent essentiellement le SA, le JA et l'ET (Kunkel and Brooks, 2002; Gazzarrini and McCourt, 2003; Bari and Jones, 2009). Ces trois molécules signal interviennent dans deux voies majeures qui ne fonctionnent pas indépendamment mais s'influencent l'une l'autre : la voie dépendante de SA et la voie indépendante de SA qui implique le JA et l'ET. En effet, ces trois signaux peuvent interagir de façon synergique (Rojo et al., 2003) ou antagoniste (Kunkel and Brooks, 2002). Ainsi, le JA et l'ET activent les mêmes gènes de défense *PR3*, *PR4* et *PDF1.2* (Xu et al., 1994); (Penninckx et al., 1998) et sont impliquées dans la résistance contre les mêmes agents pathogènes nécrotrophes. L'antagonisme entre SA et JA-ET implique plutôt la résistance aux agents pathogènes biotrophes (Rojo et al., 2003; Glazebrook, 2005; Bari and Jones, 2009).

C L'oxyde nitrique (NO)

Le NO stimule l'activation des gènes de défense tels que la PAL, les protéines PRs et plusieurs protéines intervenant dans le métabolisme secondaire (Klessig et al., 2000; Poverari et al., 2003; Parani et al., 2004). Les études faites sur l'implication du NO dans la HR chez *A. thaliana* et *Avena sativa* suggèrent qu'il ne constitue pas un médiateur essentiel dans cette réaction de défense (Zhang and Klessig, 1998; Tada et al., 2004) même s'il est désormais évident que le NO joue un rôle de signal intracellulaire chez les plantes en réponse aux agents pathogènes et aux éliciteurs (Hong et al., 2008).

Les facteurs de transcription

L'ensemble des cascades de signalisation conduit à l'induction de facteurs de transcription qui eux-mêmes vont induire les gènes de défense. La plupart des classes de facteurs de transcription (FT) sont impliqués dans la défense, telles les classes AP2/ERF, MYBs, les FT avec des domaines doigts de zing, ou encore les WRKY (Liu et al., 2004)

La régulation des facteurs de transcription est extrêmement complexe du fait de leur nombre et de leurs rôles pléiotropiques (AbuQamar et al., 2006). Les plus étudiés sont ceux de la superfamille des WRKY qui sont au nombre de 73 chez *Arabidopsis* (Eulgem and Somssich, 2007). WRKY3 et WRKY4 ont un rôle positif dans la résistance aux agents pathogènes nécrotrophes et WRKY4 à un rôle négatif sur la résistance aux biotrophes (Lai et al., 2008), WRKY25 fonctionne comme un régulateur négatif de la défense médiée par l'acide salicylique en réponse à *Pseudomonas syringae* (Zheng et al., 2007). Le gène RRS-1 représente un cas particulier chez *Arabidopsis* puisqu'il porte à son extrémité C-terminale un domaine WRKY associé à une séquence de localisation nucléaire, permettant probablement à cette protéine de jouer le double rôle de protéine de résistance et de facteur de transcription (Lahaye, 2002; Deslandes et al., 2003).

2.1.3 Les réponses de défense

La constitution des barrières physiques

Le renforcement des parois des cellules végétales constitue une barrière efficace pour lutter contre l'envahissement d'un agent pathogène. Il peut résulter de la création de nouvelles matrices pariétales telles que la formation de papilles, ou de l'accumulation et le renforcement des polymères déjà existants dans la paroi que sont les glycoprotéines riches en hydroxyproline (HRGP), et la lignine (Esquerré-Tugayé et al., 1979; Boudart et al., 1995).

A Les dépôts de callose

La paroi des cellules végétales constitue une barrière physique à la pénétration des agresseurs. Cependant, de nombreux champignons pathogènes développent une structure leur permettant d'adhérer aux surfaces cellulaires de l'hôte, l'appressorium, puis de les traverser par pression mécanique ou hydrolyse enzymatique. La détection précoce de l'agent pathogène, à la surface de la cellule végétale par des mécanismes à la fois chimiques et physiques, active des callose synthèses enchâssées dans la membrane plasmique et induit une réorganisation de l'ensemble du cytosquelette. Les organites impliqués dans la production, la maturation et le transport des effecteurs de la défense (Reticulum Endoplasmique, Golgi, peroxysomes) se concentrent au voisinage du point de pénétration de l'agent pathogène.

Ainsi, la proximité entre les organites et le point d'infection, associée à la forte densité du réseau de filaments d'actine dans cette zone, permet un trafic vésiculaire intense et ordonné par des syntaxines de type t-SNARE. Ce trafic aboutit à la libération d'une grande variété de composés antimicrobiens hors du plasmalemmes, lesquels sont séquestrés dans le dépôt de callose jouant un rôle de matrice (Hardham et al., 2007). L'accumulation de ces molécules sous le point de pénétration du parasite conduit à la formation d'une papille dans des invaginations du plasmalemmes, bloquant ainsi sa progression. Les papilles sont souvent associées à la résistance à des champignons phytopathogènes comme cela a été montré notamment chez le haricot vis-à-vis de *Colletotrichum lindemuthianum* (O'Connell et al., 1990) ou chez *Arabidopsis thaliana* vis-à-vis de *Colletotrichum higginsianum* (O'Connell et al., 2004).

B Accumulation d'HRGP et de polymères pariétaux

L'accumulation de glycoprotéines riches en hydroxyproline (HRGP), d'abord décrite chez le melon en réponse à l'inoculation par *Colletotrichum lagenarium* (Esquerré-Tugayé, 1973), est une réaction de défense rencontrée dans de nombreux pathosystèmes (Esquerré-Tugayé et al., 1979; Mazau and Esquerré-Tugayé, 1986; Esquerré-Tugayé, 2006).

L'induction simultanée de peroxydases pariétales permettrait de ponter les HRGPs entre elles et/ou à d'autres constituants, renforçant ainsi le réseau pariétal. Dans ce cadre, les ROS jouent un rôle, car le peroxyde d'hydrogène H₂O₂ est le co-substrat des peroxydases. La voie de synthèse des phénylpropanoïdes est également induite et génère différents 2 composés dont la lignine et des acides phénoliques tels que les acides hydroxybenzoïques et hydroxycinnaminiques (Mellersh et al., 2002). Ainsi, le renforcement des parois par l'accumulation d'HRGPs et de composés phénoliques conduit à une meilleure résistance à la pression mécanique et à la dégradation enzymatique par les parasites (Bradley et al., 1992; De Gara et al., 2003; Torres et al., 2006).

- La synthèse de composés antimicrobiens

A Les dépôts de callose

Le dépôt de callose est tout autant une barrière mécanique à la pénétration qu'une matrice chargée d'accumuler des effecteurs antimicrobiens à proximité du point d'attaque du champignon. C'est la composition en molécules antimicrobiennes du complexe callose composés antimicrobiens qui peut déjouer les systèmes d'attaque du champignon et bloquer les systèmes d'inhibition de la défense de la plante, assurant du même coup la résistance (Hardham et al., 2007).

B Les ROS

Outre leurs implications dans les mécanismes de transduction des signaux (Stulemeijer and Joosten, 2008), les ROS peuvent agir directement en tant que composés toxiques sur l'agent pathogène (Peng and Kuc, 1992).

La présence simultanée de O₂⁻ et H, ainsi que la réaction de H₂O avec des métaux de transition donne naissance au radical le plus toxique HO₂ dont l'effet est très néfaste sur les biomolécules ainsi que sur les agents pathogènes (Mayer et al., 2001).

C Les protéines PR

L'accumulation des protéines PR en réponse à différents stress biotiques ou abiotiques, est décrite chez de nombreuses plantes. Lors d'une interaction incompatible, elles sont induites très rapidement et à un niveau plus élevé que dans une interaction compatible. Ce sont des protéines intra- ou extracellulaires, réparties en 17 classes selon leur séquence en acides aminés ou leur activité biologique (Van

Loon, 1999; Sels et al., 2008). La classe des PR-1 est clairement associée à la défense, comme le montre l'augmentation de la tolérance face aux oomycètes chez le tabac surexprimant PR1 (Alexander et al., 1993). Certaines protéines PR sont des hydrolases, telles que les chitinases PR-3, PR-4, PR-8 et PR-11 (Legrand et al., 1987; Ponstein et al., 1994; Brunner et al., 1998) et les glucanases PR-2 (Kauffmann et al., 1987), capables de dégrader directement les parois des champignons et des bactéries. Les PR-5 sont des protéines de petit poids moléculaire, induites par divers agents pathogènes, et présentant des propriétés antifongiques (Vigers et al., 1991).

Les plantes luttent contre les protéases et les polygalacturonases secrétées par les agents pathogènes en synthétisant des inhibiteurs de protéases (PR-6) (Ryan, 1990) et de polygaracturonase (Cervone et al., 1989). La classe des PR-7 représente des protéases dont le rôle effectif dans la défense n'a pas été caractérisé contrairement aux PR-10 structurellement proches des ribonucléases (Kombrink and Somssich, 1995). Les gènes codant les PR-10 sont fortement induits chez les Légumineuses en réponse à *C. trifolii* ou *E. Pisi* (Torregrosa et al., 2004; Foster-Hartnett et al., 2005; Foster Hartnett et al., 2007; Samac et al., 2007). Les PR-9 sont des peroxydases H dont le rôle est de renforcer la paroi végétale (Fritig et al., 1998). La classe des PR-12, appelées également défensines, inhibe la croissance fongique en perméabilisant la membrane des champignons (Thevissen et al., 1999). Un rôle identique a été attribué aux PR-13, appelées thionines. La famille des PR-14 comporte des protéines non spécifiques transportant les lipides ou LTP (Yeats and Rose, 2008). Récemment deux autres classes ont été ajoutées PR15 et PR16 qui comportent des protéines germines et germines-like (Edreva, 2005). La PR16 a été isolée à partir du piment en situation de résistance à des infections bactériennes et virales (Park et al., 2004). Identifié sur des cellules de tomate, PR-17 est de fonction inconnue (Okushima et al., 2000).

D Les phytoalexines

Les phytoalexines sont des métabolites secondaires, de faible poids moléculaire, à activité antimicrobienne (Goy et al., 1993; Ferrer et al., 2008). Elles se déposent rapidement autour du site d'infection, ainsi qu'en réponse à des éliciteurs (Dixon et al., 2002). Leur production entraîne une réduction du développement de l'agent pathogène et de la sévérité des symptômes (Hammerschmidt, 1999). Chez *A. thaliana*, le mutant *pad3* (Phytoalexine Deficient) incapable de synthétiser la phytoalexine camalexine, montre une sensibilité à *Altenaria brassicicola* (Thomma et al., 1999). L'expression constitutive d'un gène codant la synthèse de la phytoalexine resvératrol chez le tabac et la luzerne pérenne (*M. sativa*) a conduit à une réduction importante des symptômes d'attaque de *Botrytis cinerea* sur le tabac (Hain et al., 1993) et de *Phoma medicaginis* sur la luzerne (Hipskind and Paiva, 2000). Chez les Légumineuses, et notamment *M. truncatula*, elles sont issues de la voie des isoflavonoïdes et des phénylpropanoïdes (Dixon et al., 2002) et sont produites en réponse à l'attaque d'agents pathogènes (Torregrosa et al., 2004; Foster-Hartnett et al., 2007; Kamphuis et al., 2008) ou lors de traitement avec des éliciteurs (Naoumkina et al., 2007; Farag et al., 2008).

3. La conduite de la fertilisation, facteur de la santé des plantes

Contrairement à l'agriculture dite «conventionnelle» qui nourrit directement la plante avec des engrais chimiques. Il existe aujourd'hui une tendance forte vers l'utilisation de nouveaux produits agricoles (produits de fertilisation ou de protection) visant un effet positive sur l'environnement et la santé humaine. De nouveaux types de produit émergent obtenus par exemple avec des extraits naturels ou utilisant des agents microbiens. Des extraits de sous-produits de la viticulture sont par exemple testés comme produit de protection contre les maladies de la vigne ou comme stimulant des défenses naturelles des plantes. Des cocktails de micro-organismes sont utilisés pour la bio-stimulation des plantes (croissance et résistances aux maladies).

Il est nécessaire aujourd'hui d'acquérir des connaissances et références techniques dans le but de proposer des stratégies de fertilisation minimisant le risque phytosanitaire au niveau des cultures (Christiane, 2013).

3.1. Comment la fertilisation agit-elle sur la santé des plantes ?

La fertilisation peut agir à trois niveaux. Tout d'abord, les minéraux absorbés par les racines vont être utilisés directement dans les cellules des tissus végétaux. Par exemple, si l'on apporte une importante dose d'azote à la plante, ses feuilles vont être aussi plus riches en azote, que ce soit sous forme minérale ou sous forme de protéines. Ce qui signifie que les champignons pathogènes et les pucerons ont potentiellement un substrat plus riche à leur disposition.

La fertilisation peut agir à un deuxième niveau qui est le système naturel de défense de la plante. En effet, la composition de la fertilisation peut influencer la présence dans la plante de certains composés toxiques pour les bioagresseurs, ainsi que le renforcement des parois cellulaires.

Enfin, la fertilisation a un effet sur l'architecture de la plante. Une forte fertilisation entraîne une croissance végétative forte, donc un climat plus humide dans la serre qui influe sur le développement des maladies (Philippe, 2013) (Figure 4).

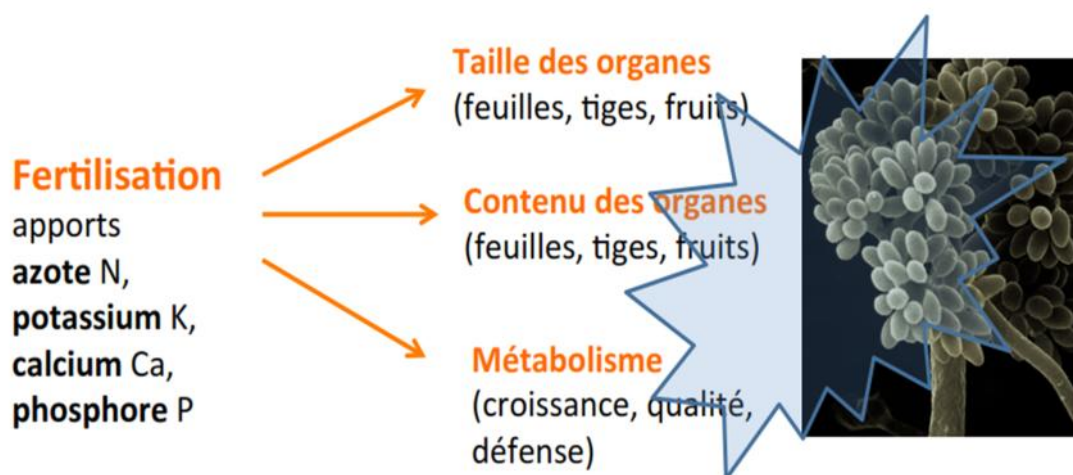


Figure 4 : effet de la fertilisation sur la santé des plantes (Philippe, 2013).

3.2. Effet de quelques Biofertilisants sur la santé végétale

- **Extrait des algues marines**

L'application d'extraits d'algues marines sur quelques plantes maraichères telque le poivron et la tomate avec une excellente efficacité à l'égard des Solanacées montrent que les résultats obtenus sur les mildious du poivron et sur quelques ravageurs de la vigne traduisent bien l'intérêt des SDN comme produits de substitution aux produits de synthèse. Ces extraits sont connus depuis longtemps et sont utilisés comme engrais pour leur richesse en minéraux et en molécules biologiques.113.

- **Effet des excréations des vers de terre sur les mécanismes de défense de la plante**

Excepté pour une étude (Elmer, 2009), l'interaction des vers de terre et leurs excréations avec ces populations de PGPR, capables de promouvoir la croissance des plantes, via la synthèse de nombreux composés proches des hormones végétales reste à démontrer. Cependant, l'effet des vers de terre, sur la réduction de la sévérité de nombreuses maladies, a été démontré à de nombreuses reprises (Stephens et al., 1993; Stephens et al., 1994; Stephens & Davoren, 1995; 1997; Clapperton et al., 2001; Wolfarth et al., 2011). Leurs effets sur la réduction de certaines maladies chez les plantes sont souvent associés à une meilleure nutrition des plantes ou encore à un effet de prédation par le vers de terre. Cependant, ces hypothèses ne suffisent pas dans certains cas à expliquer l'effet observé des turricules de ces vers de terre sur la réduction de la maladie (Blouin et al., 2005; Elmer, 2009). L'hypothèse d'une action combinée avec certains microorganismes du sol afin de produire des composés antibiotiques et/ ou d'induire des réponses systémiques de défense chez la plante est une hypothèse parcimonieuse pour expliquer l'effet des vers.

- **Minéralisation dans les turricules et le jus de lombricompost**

La digestion mutualiste initiée dans le tube digestif du vers de terre va se poursuivre à l'intérieur des turricules (jus ou compost) (Lavelle et al., 2004). Les microorganismes du sol réalisent à eux seuls près de 90% des transformations de la matière organique dans les sols (Lavelle et al., 2004). L'activité des microorganismes qui sont rejetés avec les turricules va être stimulée par l'effet d'amorçage et ces microorganismes vont poursuivre la digestion de la matière organique (Lavelle et al., 1995; Brown et al., 2000). Ainsi, les produits issus de cette digestion externe pourront être assimilés de nouveau par les vers de terre ou bien par les plantes.

En modifiant le milieu biologique, notamment l'activité des microorganismes du sol, les vers de terre avec leurs turricules vont fortement modifier les processus biochimiques qui leurs sont associés. L'implication d'une modification de l'environnement biochimique par les vers de terre est un facteur déterminant dans la compréhension de situations où des changements dans la structure du sol ou dans la disponibilité en nutriments ne permettent pas à eux seuls d'expliquer l'effet des excréments des vers de terre sur la physiologie et la croissance des plantes (Tomati et al., 1988; Blouin et al., 2005; Blouin et al., 2006; Laossi et al., 2010) (Figure 5).

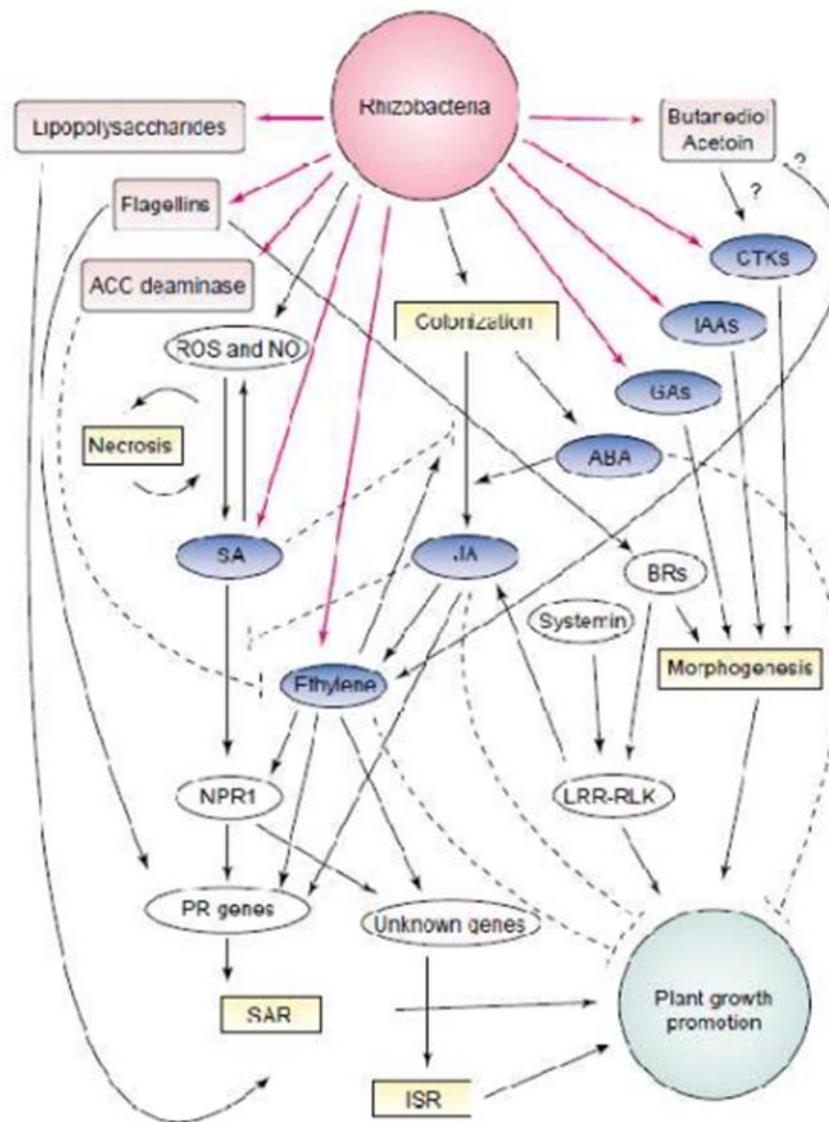


Figure 5 : Impact de la Minéralisation des turricules des verres de terre sur les microorganismes du sol et la croissance des plantes (Ping et Boland, 2004).

- Effet de lombricompost et l'extrait de lombricompost sur la santé des plantes

Clive Edwards (2004), entomologiste de l'université de l'Ohio, démontre que le lombricompost solide réduit les pullulations de nématodes parasites sur les cultures en champ; l'extrait de lombricompost présente les mêmes effets, en laboratoire ou sous serre. L'impact positif a été démontré sur des cultures infestées de façon artificielle avec le *Meloidogyne incognata*, parasite sérieux de tomates, un mois plus tard, on notait 25% de racines porteuses de galles sur les tomates témoins, 10% sur celles ayant reçu du lombricompost et 5% sur celles ayant bénéficié d'un arrosage à l'extrait de lombricompost liquide; même effets positifs vis à vis des acariens et des pucerons: le taux d'infestations par ces derniers diminuait de moitié entre des tomates témoins et d'autres ayant reçu de l'extrait de lombricompost liquide, les tomates ayant été placées sous cages en voile avec la même quantité de pucerons libères par cage, puis comptage de ces derniers au bout de 13 jours. L'action

positive sur la santé des plantes serait à relier avec la présence de nombreux micro-organismes, que le brassage d'air contribue à multiplier, en les pulvérisant à la surface des feuilles ; ils ont créés une compétition vis à vis des attaquants éventuels. Cela a pu être démontré en comparant avec l'effet de préparation stérilisée, donc contenant les mêmes molécules mais sans trace de vie. L'extrait de lombricompost liquide serait ainsi une parade efficace vis à vis du terrible *Verticillium* de la tomate qui cause un flétrissement souvent mortel sur les plants en début de production. Un effet fongicide a été remarqué sur la nourriture grise chez le fraisier et le haricot vert ; l'oïdium sur la vigne ; le mildiou sur la tomate et la pomme de terre (Allard, et Fernand, 2004).

3.3. Intérêt des SDN en protection des plantes :

Les SDN sont donc une nouvelle voie que la science a ouverte dans le domaine de la protection des plantes. Il reste cependant à bien préciser leur intérêt pour l'agriculture, aussi bien sur les plans technique qu'environnemental.

3.3.1. Intérêt technique :

Les SDN induisent les réactions de défense de la plante, qui mobilise alors ses moyens propres. Or le plus souvent il s'agit d'une résistance systémique acquise, qui est efficace contre un large spectre d'agresseurs. C'est un confort pour l'agriculteur qui réalise, en même temps, une économie du nombre de passages au champ par rapport à l'application de plusieurs autres interventions ciblées. De plus, ce large spectre de résistance permet d'envisager une lutte contre les viroses et les phytoplasmoses contre lesquelles on ne possède actuellement aucun traitement conventionnel. Les SDN sont aussi souvent efficaces sur un grand nombre de cultures, ce qui peut sauver des cultures mineures pour lesquelles le nombre de produits phytosanitaires disponibles est quasi-nul. Parce qu'ils ont un mode d'action indirect, il semble impossible que les SDN entraînent des résistances (qui seraient en fait des résistances aux propres systèmes de défense de la plante) (Gullino et al., 2000; Lyon et Newton, 1997).

L'utilisation des SDN en alternance avec des produits phytosanitaires « classiques » permettrait d'éviter ou de retarder l'apparition de résistances à ces produits et donc augmenterait leur durabilité. Or c'est là un enjeu majeur de la protection des plantes pour les années à venir. Il y aurait un effet de synergie intéressant à exploiter, permettant de réduire encore plus le nombre de traitements fongicides grâce au gain d'efficacité. (Gullino et al., 2000, Jeandet et al., 1996).

3.3.2. Intérêt environnemental :

Les SDN sont le plus souvent des analogues ou des dérivés de molécules naturelles, efficaces à très faible dose et avec un profil éco-toxicologique généralement bon (certains sont même exempts de classement toxicologique et éco-toxicologique, comme Iodus 40 R).

Ce sont donc des molécules très respectueuses de l'environnement, ce qui est crucial quand on sait qu'il s'agit d'une préoccupation majeure du public comme des pouvoirs publics et des agriculteurs.

Par conséquent, elles n'ont généralement pas de contraintes de limite maximale de résidus (LMR) et de délai avant récolte (DAR) d'où une meilleure flexibilité pour l'utilisateur.

Enfin, les SDN sont une méthode de lutte qui complète bien les autres méthodes utilisées, comme la lutte chimique mais aussi la lutte biologique (les SDN n'ont aucun effet sur les auxiliaires), la sélection variétale, les pratiques culturales. . . Elles ont donc leur place dans les programmes de gestion intégrée des ravageurs (Integrated Pest Management ou IPM) qui se développent de plus en plus notamment dans une optique de respect de l'environnement (Jeandet et *al.*, 1996).

3.3.3. Place dans l'agriculture contemporaine :

Il reste la question importante de la place que les SDN peuvent prendre dans l'agriculture contemporaine, notamment face à la lutte chimique « classique ». Nous pensons qu'il serait illusoire de vouloir remplacer l'un par l'autre, d'autant qu'une cohabitation semble bénéfique, que ce soit au sein d'un programme de lutte ou d'une formulation. Or il y a des cultures pour lesquelles le programme de lutte est très chargé (comme la vigne et ses 20 traitements fongicides par an) et où le remplacement de 2 ou 3 traitements par des SDN pourrait être envisagé (Delorme, 2005).

Ce serait déjà d'un intérêt évident pour les raisons environnementales et techniques évoquées précédemment et « éthiquement satisfaisant » (Delorme, 2005).

Autre exemple, sur des cultures à cycle court comme le chou-fleur d'automne ou le chou-fleur Romanesco, un traitement SDN conférant une protection durable (30 jours) serait suffisant pour lutter contre le mildiou et remplacerait plusieurs traitements fongicides, avec en plus un gain économique (Ziadi et *al.*, 2001).

Enfin, les SDN ont un rôle important à jouer dans les programmes de lutte intégrée, ceux-là même qui tendent à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires classiques », notamment en leur apportant une nouvelle approche, un complément d'efficacité et une plus grande flexibilité (Lyon et Newton, 1997).

L'utilisation des SDN ne peut se faire que par des agriculteurs suffisamment au point techniquement, pour les raisons suivantes :

- il faut compter un certain délai avant que la réaction de la plante soit efficace ;
- il s'agit de traitements préventifs qui doivent si nécessaire être renforcés par des traitements curatifs « classiques » ;

Cela correspond à une vision d'une agriculture technicienne, plutôt intégrée et non intensive.

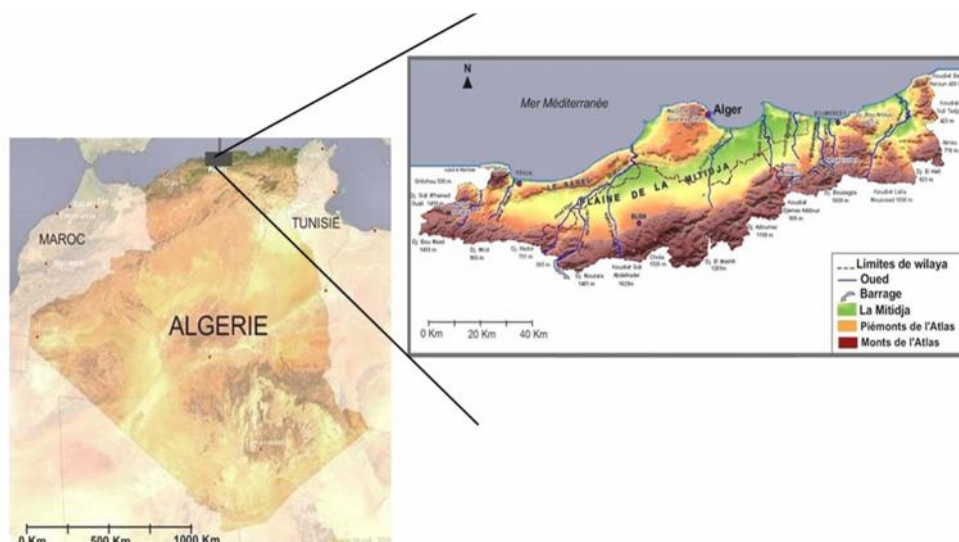
CHAPITRE III : Matériel et méthodes

Dans ce travail, notre souci porte sur la recherche d'une meilleure gestion culturale à moyen et long terme, permettant de démontrer l'effet des bio fertilisants et de formulations minérales en comparaison avec des fertilisants homologués sur les paramètres morphologiques et l'état phytosanitaire de la tomate.

1. Présentation de la région d'étude

1.1. Situation géographique

La Mitidja est une vaste plaine littorale, étroite du Nord du pays. Elle s'étend sur une longueur de 100 kilomètres et une largeur de 5 et 20 kilomètres et couvre une superficie de 150 000 ha. Elle correspond à une dépression allongée d'Ouest en Est. Elle est limitée à l'Ouest par l'Oued NADOR et à l'Est par l'Oued BOUDOUAOU et est bordée par deux zones élevées : le Sahel au Nord et l'Atlas au Sud. La Mitidja se situe à une latitude Nord moyenne de 36 à 48° et une altitude moyenne de 30 et 50 mètres. La plaine ne s'ouvre que sur quelques kilomètres sur la mer Méditerranée (Loucif et Bonafonte, 1977) (figure 6).



1.2. Climat de la région d'étude

Les précipitations annuelles en Mitidja ont un régime typiquement méditerranéen avec un maximum en hiver et un minimum en été (Stewart, 1969). Elles varient de 600 mm à 900 mm en fonction de la région considérée (localisation géographique et l'altitude) (Bagnouls et Gausson, 1953). Cette distribution inégale des précipitations au cours d'un cycle annuel et l'alternance saison humide et saison sèche, conditionnent les activités biologiques des ravageurs. Les précipitations

annuelles ont lieu principalement durant l'hiver et le printemps, c'est en été, saison sèche, que les plus faibles précipitations sont enregistrées.

Sur le plan thermique, Les mois les plus froids sont janvier et février avec des températures moyennes minimales respectives de 4,49 °C et 4,48 °C, et une température moyenne maximale de 20,31 °C et 22,56 °C, tandis que les mois les plus chauds sont juillet et août avec des températures moyennes maximales respectives de 37,2°C et 37,00°C et de 20,54°C suivie de 22,01 °C comme température moyenne minimale.

Le diagramme Ombrothermique établie pour la période (1995 à 2010) se caractérise par deux périodes fondamentales: l'une humide de sept mois s'étalant de janvier à avril puis de octobre à décembre, l'autre sèche d'un intervalle de cinq mois de mai à septembre. Alors que pendant l'année d'étude 2010, on peut constater une période de sécheresse de cinq mois entre mai et septembre et une autre saison froide et humide caractérisée par une pluviosité élevée, s'étalant d'octobre à avril (Tchaker, 2011).

2. Présentation du site d'étude et conditions expérimentales

Les essais de la présente étude ont été réalisés au niveau de la station expérimentale de la faculté des Sciences Agrovétérinaires et Biologiques de l'Université de Blida durant la période allant du 12/12/2012 au 28/03/2013. Le dispositif a été conduit sous un abri en serre (8mx50m). Durant toute la période d'expérimentation, l'enceinte expérimentale enregistre une température oscillant entre 16 et 28°C avec une humidité relative de l'aire variant entre 55 et 70% (Figure 7).



Figure 7 : Implantation de la serre tunnel expérimentale (Originale 2012)

3. Matériel biologique

3.1. Obtention des plantules de la tomate

Sous serre, les semences de tomates (variété Marmande) fournies par le laboratoire de culture maraichères du département d'agronomie de Blida ont été semées dans des alvéoles en date du 12/12/2012. Après dix-huit jours, les plantules obtenues ont été repiquées dans le sol (Figure 9). Selon les objectifs fixés, vingt (20) micro parcelles élémentaires de 2m² ont été délimitées, contenant

chacune quatre (4) plantules. On notera que la dispersion des micro-parcelles a été opérée de façon aléatoire. Le dispositif est irrigué régulièrement selon les besoins de la culture (Figure 8).

ALGUE / 4plantés	Témoin / 4plantés	BioFert / 4plantés	Fertiact yl/ 4plantés	Témoin n/ 4plantés	OLIGO / 4plantés	ALGUE / 4plantés	Fertiact yl/ 4plantés	BioFert / 4plantés	OLIGO / 4plantés
Fertiact yl/ 4plantés	OLIGO / 4plantés	ALGUE / 4plantés	Témoin / 4plantés	OLIGO / 4plantés	ALGUE / 4plantés	BioFert / 4plantés	Fertiact yl/ 4plantés	Témoin / 4plantés	BioFert / 4plantés

Figure 8: schéma explicatif de la distribution aléatoire des micros parcelles traitées



Figure 9: Semis et obtention des plantules de tomate (Originale, 2013).

3.2. Infestation de la tomate par *Tuta absoluta* et par la noctuelle *Autographa gamma*

Les plantes de la tomate ont été infestées par la mineuse (Figure 10.A) et la noctuelle (Figure 10.B) naturellement et successivement après un mois et deux mois de la date de repiquage dans la serre expérimentale. L'identification et la détermination de l'espèce de la noctuelle a été réalisée avec l'aide du professeur Allal.

3.2.1. Présentation des ravageurs

Papillons de nuit (noctuelles)

Les organes aériens de la tomate sont susceptibles d'être dévorés par le stade **chenille** de plusieurs Lépidoptères plus ou moins polyphages. Ces insectes appartiennent à diverses familles, en particulier aux **Noctuidés**. Parmi celles-ci, citons *Autographa gamma* (L.) (figure 10 B). On retrouve cet insecte et bien d'autres, dans de nombreuses zones de production du monde où elle

occasionnent des dégâts parfois considérables dans les cultures de plein champ, comme sous abri (Blancard, 2012).

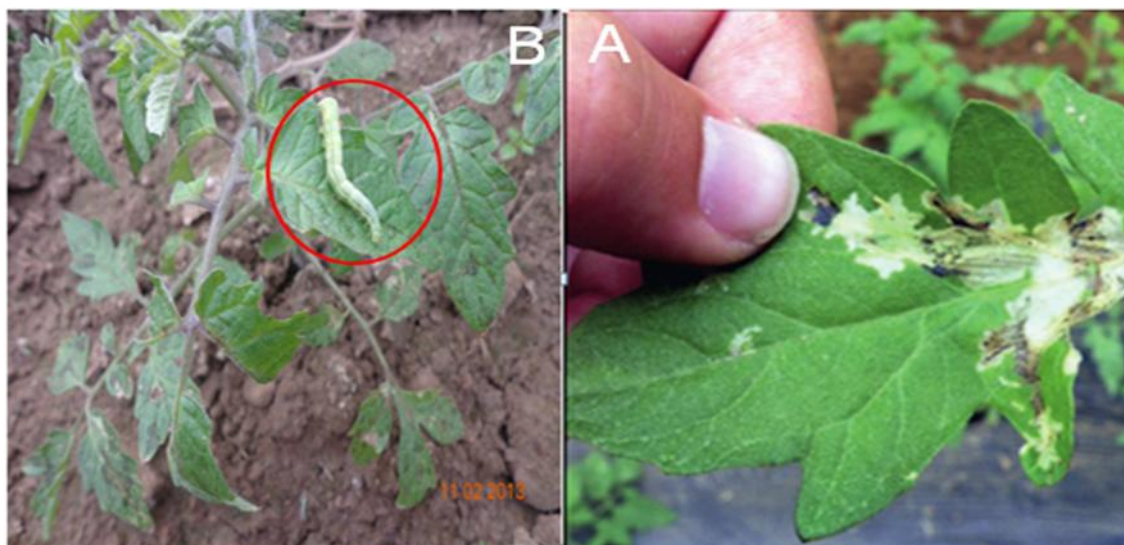


Figure 10 : Infestation naturelle de *Tuta absoluta* et de la noctuelle *Autographa gamma* (Originale, 2013)

3.3. Obtention des produits de traitement

La réalisation de l'essai a nécessité la mise en œuvre de quatre (4) produits fertilisant à savoir :

- **Le Jus formulé du lombricompost** est une solution sans odeur issue de l'égouttage du lombricompost et formulée dans le laboratoire de phytopharmacie du département d'agronomie de l'Université de Blida.

- **La Formulation minérale d'oligoéléments** est une solution à forte concentration élaborée en partenariat avec les Dr ZEBIB.B et MERAH.O de l'Université de Toulouse (France).

- **Les Produits Homologués** : Deux molécules ont été testées. Il s'agit de Fertiactyl GZB et Algamar. Le premier est un fertilisant minéral, le deuxième est un Biostimulant à base d'algues marines. Les deux produits nous ont été fournis successivement et gracieusement par les sociétés TIMAC AGRO et SAPHYTO.

4. Méthode d'étude

A partir du matériel biologique obtenu, nous avons procédé à l'étude d'effets des différentes molécules sur la production de la phytomasse et sur l'état phytosanitaire de la tomate. Chaque quatre micro parcelles élémentaires ont reçu ensemble un traitement fertilisant de quatre applications foliaires, avec un délai de quinze (15) jours entre une application et l'autre. Les quatre dernières micro parcelles élémentaires sont considérées comme témoins n'ayant reçu que de l'eau (Figure 10).

Pour le jus formulé du lombricompost, nous avons apporté une dose de 10ml/1L

Quant à la formulation d'oligo-éléments, elle a été apportée à une dose de 5ml/1L

En ce qui concerne le Bioactivateur (Fertiactyl) et le Biostimulant (Algasmar), ils ont été apportés successivement selon des doses prescrites (6ml et 3ml/1l d'eau).

L'effet comparé des différentes molécules a été évalué sur des paramètres morphologiques ainsi que sur l'état phytosanitaire de la tomate. Pour visualiser l'étendue de l'étude nous vous proposons ci-dessous le schéma directeur de l'étude (Figure 11).

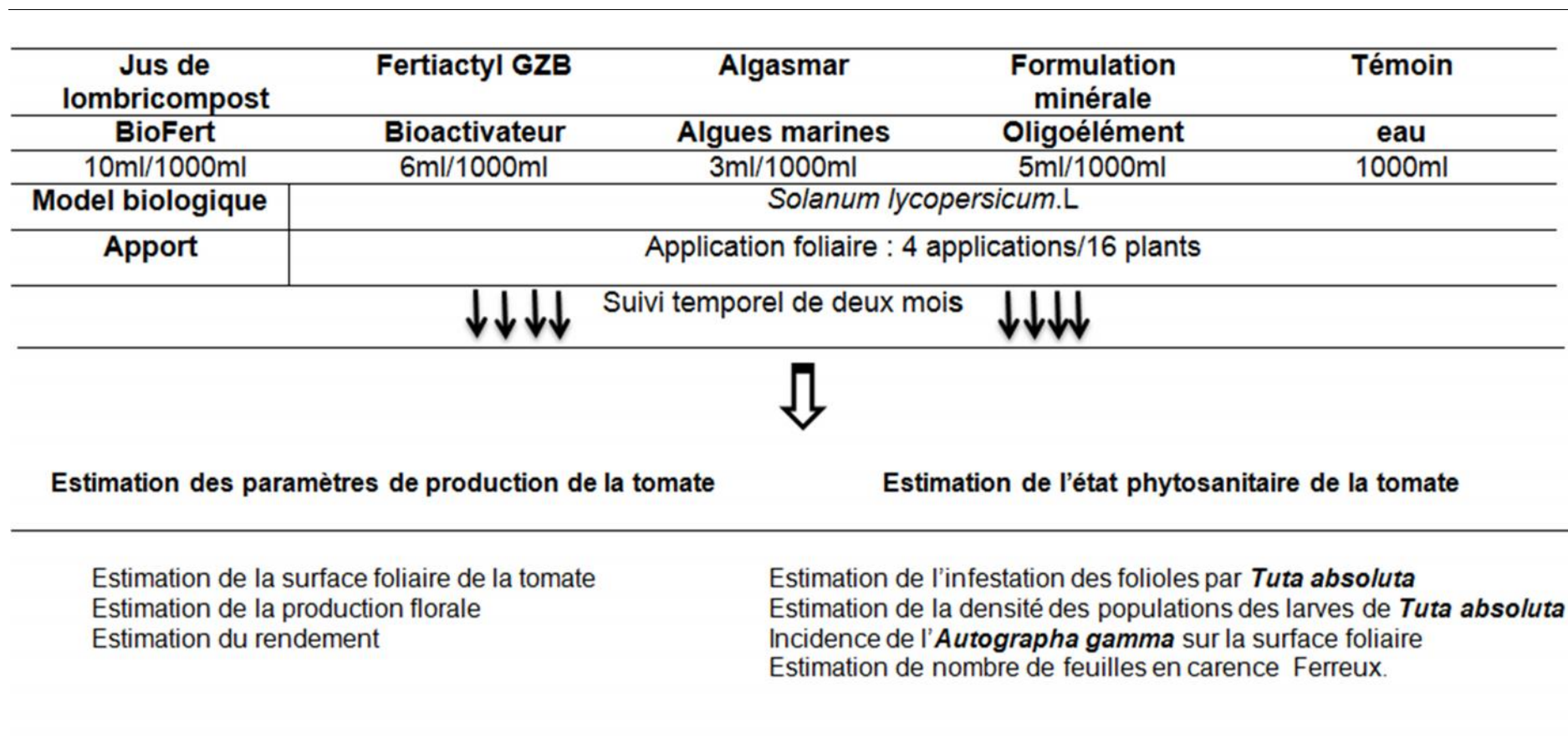


Figure 11: Schéma directeur de l'effet comparé des traitements fertilisants sur les paramètres morphologiques et l'état phytosanitaire de la tomate

4.1. Estimation des paramètres morphologiques des plants de la tomate

- **Estimation de la surface foliaire des plantes de la tomate :**

La surface foliaire de chaque plant a été mesurée tous les cinq jours durant les deux mois de l'étude au niveau des différentes micro-parcelles élémentaires (figure 12.A).

La surface foliaire est estimée par la formule suivante :

$$\begin{aligned} 1\text{m}^2 \text{ de feuilles blanches A4 (Ramos)} &\longrightarrow \text{pèse } 90 \text{ g} \\ X\text{m}^2 \text{ de la feuille de la tomate} &\longrightarrow \text{pèse } Y\text{g} \end{aligned}$$

On trace le contour d'une feuille de la tomate sur une feuille blanche A4, on la découpe et on la pèse à l'aide d'une balance de précision. En utilisant la règle de trois, on obtient la surface foliaire mesurée en Cm^2

- **Estimation de la production florale par plante :** Au cours de notre expérimentation, on a estimé le nombre de fleurs pour chaque plant. La moyenne des fleurs évoluant au niveau de chaque plante est prise en considération (Figure 12.B).

- **Estimation du rendement de la première récolte des plantes de la tomate** (Figure 12.D):

Un mois après le dernier apport, nous avons procédé à l'estimation du rendement en gramme (g) de chaque 16 plantes traitées et dispersées suivant la description donnée dans la figure 10.

4.2. Estimation de l'état phytosanitaire des plants de la tomate

- **Estimation de la densité des formes biologiques des larves de *Tuta absoluta* :**

Dans chaque micro parcelle, on dénombre tous les cinq jours, sur place, les différentes formes biologiques des larves de *T.absoluta* (Figure 12.C).

- **Estimation du nombre de folioles infestées par *T.absoluta* des plantes de la tomate :**

A partir de la première semaine suivant la troisième application en fertilisants, nous avons constaté l'évolution du nombre de folioles infestées par *Tuta* et ce, durant un mois d'essai dans chaque micro parcelle. (Figure 12.E).

Estimation de la surface foliaire infestée par *Autographa gamma* des plantes de la tomate :

La surface foliaire infestée de chaque plant a été mesurée tous les cinq jours durant sa période d'infestation (quinze jours) et ce, au niveau des différentes micro parcelles élémentaires (figure 12.F). La surface foliaire infestée est calculée par la formule précédemment citée.

- **Estimation du nombre de feuilles en carence de Fer des plantes de la tomate :**

A partir de la première semaine suivant la deuxième application, nous avons constaté l'évolution du nombre de feuilles en carence en Fer durant une période de dix jours (figure 12.G). La constatation de la carence en fer a été rendue possible grâce au guide des symptômes des carences de la tomate de Blancard (2012).

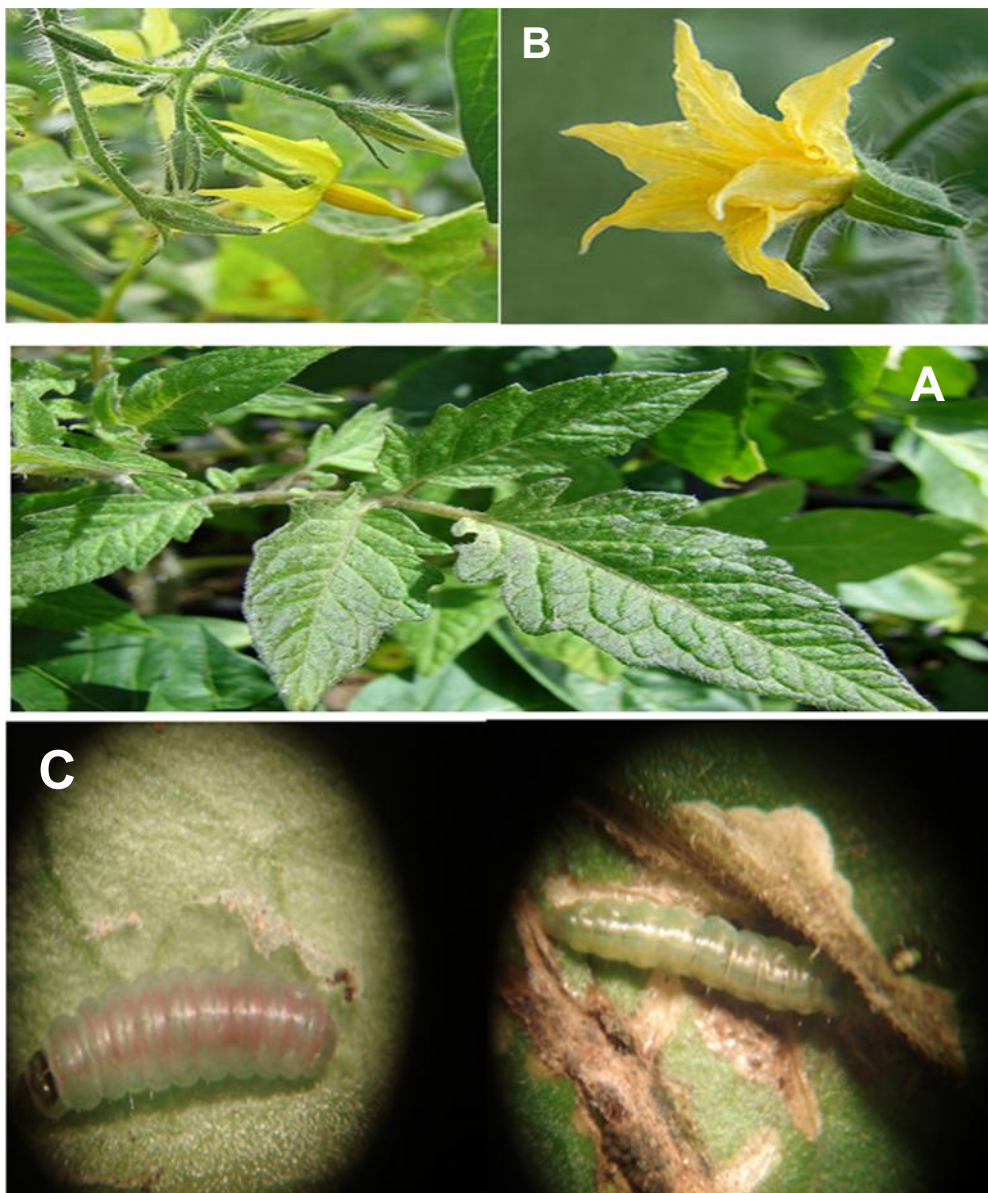




Figure 12: Estimation des paramètres morphologiques et de l'état phytosanitaire des plants de la tomate (Originale, 2013).

5. Analyses statistiques

5.1. Analyses de variance (SYSTAT vers. 12.02, SPSS 2012)

Lorsque le problème consiste à savoir si la moyenne d'une variable quantitative varie significativement selon les conditions (période, matière active, dose), nous avons eu recours à une analyse de variance (ANOVA pour *Analysis Of Variance*) qui permet de vérifier la signification de la variable d'intérêt entre toutes les combinaisons des modalités, dans les conditions paramétriques si la distribution de la variable quantitative est normale.

Dans les cas où plusieurs facteurs sont en jeu, il peut arriver que toutes les interactions entre facteurs ne soient pas pertinentes à tester. Nous avons alors utilisé le modèle linéaire global (G.L.M.). Par exemple, si on désire connaître l'effet des facteurs A, B et C et seulement l'interaction entre A et C, il suffit de sélectionner explicitement ces trois (3) catégories.

5.2. Analyse multivariée (PAST vers. 1.37)

Dans le cas de variables quantitatives, les relations multivariées sont étudiées à l'aide d'une analyse en composantes principales (A.C.P.). Ainsi, nous avons analysé globalement les variables qui sont corrélées entre elles (paramètres morphologiques et état phytosanitaire de la tomate). A partir des coordonnées des variables et facteurs dans les trois premiers axes de l'analyse en composantes principales, une classification ascendante et hiérarchique est réalisée dans le but de détecter les groupes corrélés à partir des mesures de similarité calculées à travers des distances euclidiennes entre les coordonnées des variables quantitatives étudiées.

CHAPITRE III : Résultats

Les résultats relatifs à l'effet des fertilisants homologués en comparaison avec le produit formulé à base de lombricompost, d'éléments minéraux sur l'état phytosanitaire et sur les paramètres morphologiques de la tomate *Solanum lycopersicum*.L, sont présentés dans le chapitre ci-dessous.

1. Effet temporelle des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate :

La figure 13 présente l'évolution temporelle des paramètres morphologiques des plantes de la tomate sous l'effet des fertilisants homologués Fertiactyl (Bioactivateur), Algamar (Biostimulants à base d'algues marines), les Oligo-éléments formulés (solution oligo-éléments) et le produit à base de lombricompost (Biofertilisant).

1.1. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 1^{er} apport

Le prélèvement opéré cinq jours après le premier apport révèle une surface foliaire relativement faible par rapport au témoin et ce, pour l'ensemble des molécules appliquées.

Après dix jours au premier apport, une évolution notable et progressive de la surface foliaire est remarquée sous l'effet du Biofertilisant, du Bioactivateur et des algues marines contrairement aux plantes traitées avec la solution d'oligoéléments qui, elles, présentent une évolution perturbée (Figure 13.A).

1.2. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 2^{ème} apport

L'évolution temporelle de la surface foliaire de la tomate sous l'effet des différents traitements est très contrastée par comparaison au témoin. Il est à signaler qu'à partir de la 1^{ère} semaine d'application, on note une évolution très marquée de la surface foliaire sous l'effet de Bioactivateur, de Biofertilisant et des algues marines et ce, pendant toute la période d'essai. Par ailleurs, une évolution moins rapide de la surface foliaire des plantes traitées par la solution d'oligoéléments est constatée (Figure 13.B).

1.3. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 3^{ème} apport

L'évolution temporelle de la surface foliaire des plantes révèle une augmentation très visible dès le premier prélèvement pour la plupart des traitements. Le Biofertilisant et le Bioactivateur montrent une évolution de la surface plus importante par rapport au témoin. En deuxième position, on remarque que les algues marines et la solution d'oligoéléments ont un effet de moindre importance (Figure 13.C).

1.4. Evolution temporelle de la surface foliaire de la tomate suite au 4^{ème} apport

Un important rythme d'évolution temporelle de la surface foliaire est remarqué dès le 1^{er} prélèvement sous l'effet des algues marines et du Biofertilisant. La surface foliaire est influencée secondairement par le Bioactivateur, alors que l'application de la solution d'oligoéléments n'a pas montré un effet appréciable sur la surface foliaire durant toute la période de traitement (Figure 13 D).

1.5. Evolution temporelle de la production florale de la tomate suite au 1^{er} apport

L'évolution temporelle du développement du nombre de fleurs révèle l'existence d'un rythme de production très important dès le premier prélèvement sous l'effet des algues marines et de la solution d'oligoéléments. La production des fleurs est influencée secondairement par le Bioactivateur, alors que l'application de Biofertilisant n'a pas montré un effet appréciable sur la production de fleurs pendant toute la période du 1^{er} traitement (Figure 13 E).

1.6. Evolution temporelle de la production florale de la tomate suite au 2^{ème} apport

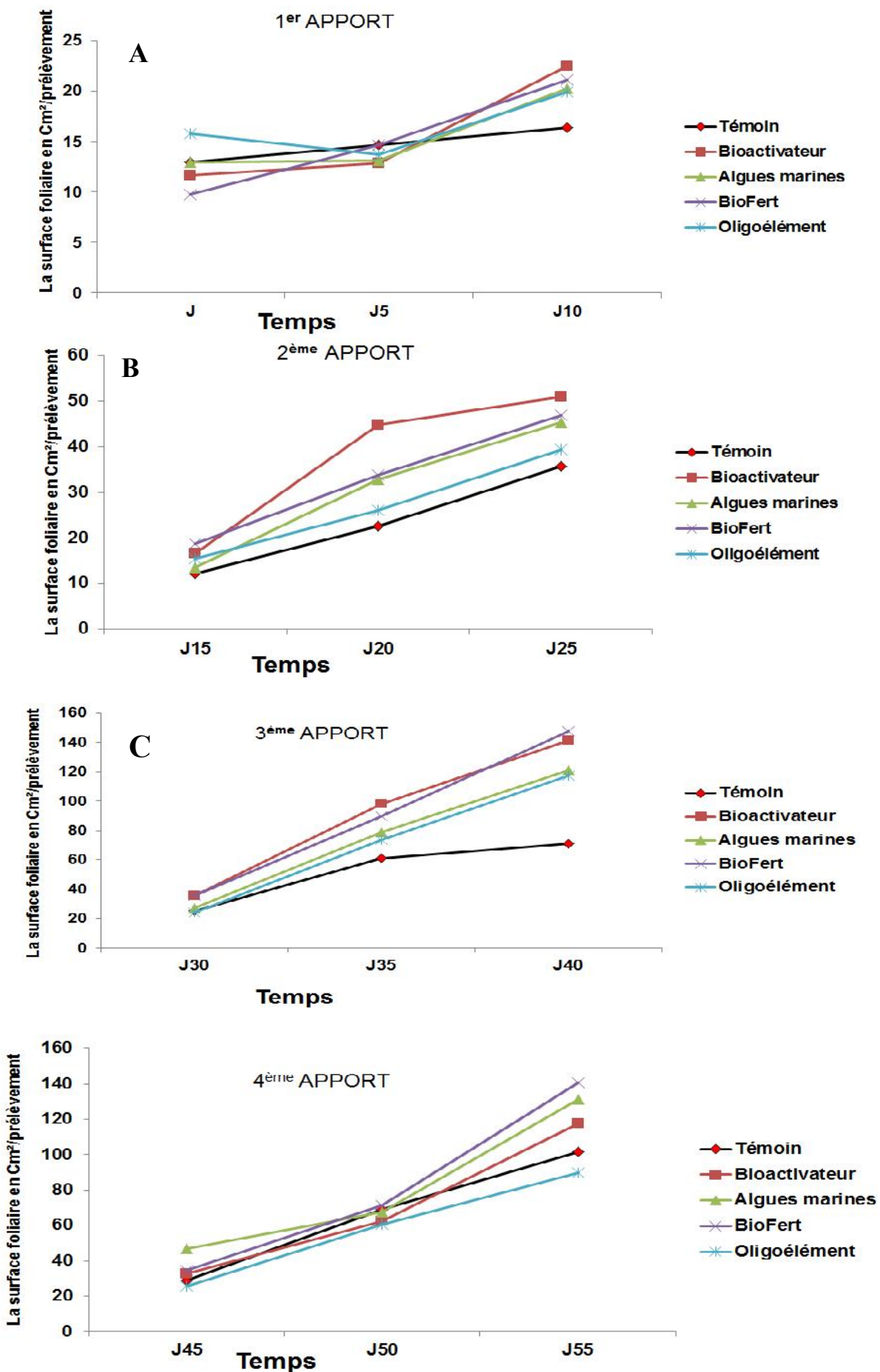
L'évolution temporelle du développement du nombre de fleurs de la tomate sous l'effet de la solution d'oligoéléments est très contrastée par comparaison au témoin. Il est à signaler que l'application de Biofertilisant, des algues marines et de Bioactivateur n'a pas montré un effet appréciable sur la production de fleurs pendant le 1^{er} et le 2^{ème} prélèvement. Au 3^{ème} prélèvement, on constate une floraison assez fournie par rapport au témoin et ce, sous l'effet de ces derniers traitements (Figure 13 F).

1.7. Evolution temporelle de la production florale de la tomate suite au 3^{ème} apport

L'évolution temporelle du nombre de fleurs de la tomate sous l'effet des différents traitements est très contrastée par rapport au témoin. Il est à signaler qu'à partir du 1^{er} prélèvement, on note une évolution très marquée du nombre de fleurs sous l'effet de Biofertilisant et de Bioactivateur suivis par les algues marines et ce, pendant toute la période de traitement. L'évolution est par contre moins rapide, du nombre de fleurs, sous l'effet de la solution d'oligoéléments (Figure 13.G).

1.8. Evolution temporelle de la production globale des fleurs de la tomate

Une lecture globale de l'évolution du nombre de fleurs nous permet de constater la présence d'une réaction différente des plantes aux différentes molécules. Ainsi, le nombre de fleurs présente une augmentation remarquable, pendant toute la période d'essai et sous l'effet de toutes les molécules utilisées. Il est à signaler qu'à partir du septième prélèvement et sous l'effet de Biofertilisant, une évolution du nombre de fleurs est très contrastée par comparaison aux autres molécules (Figure 13.H).



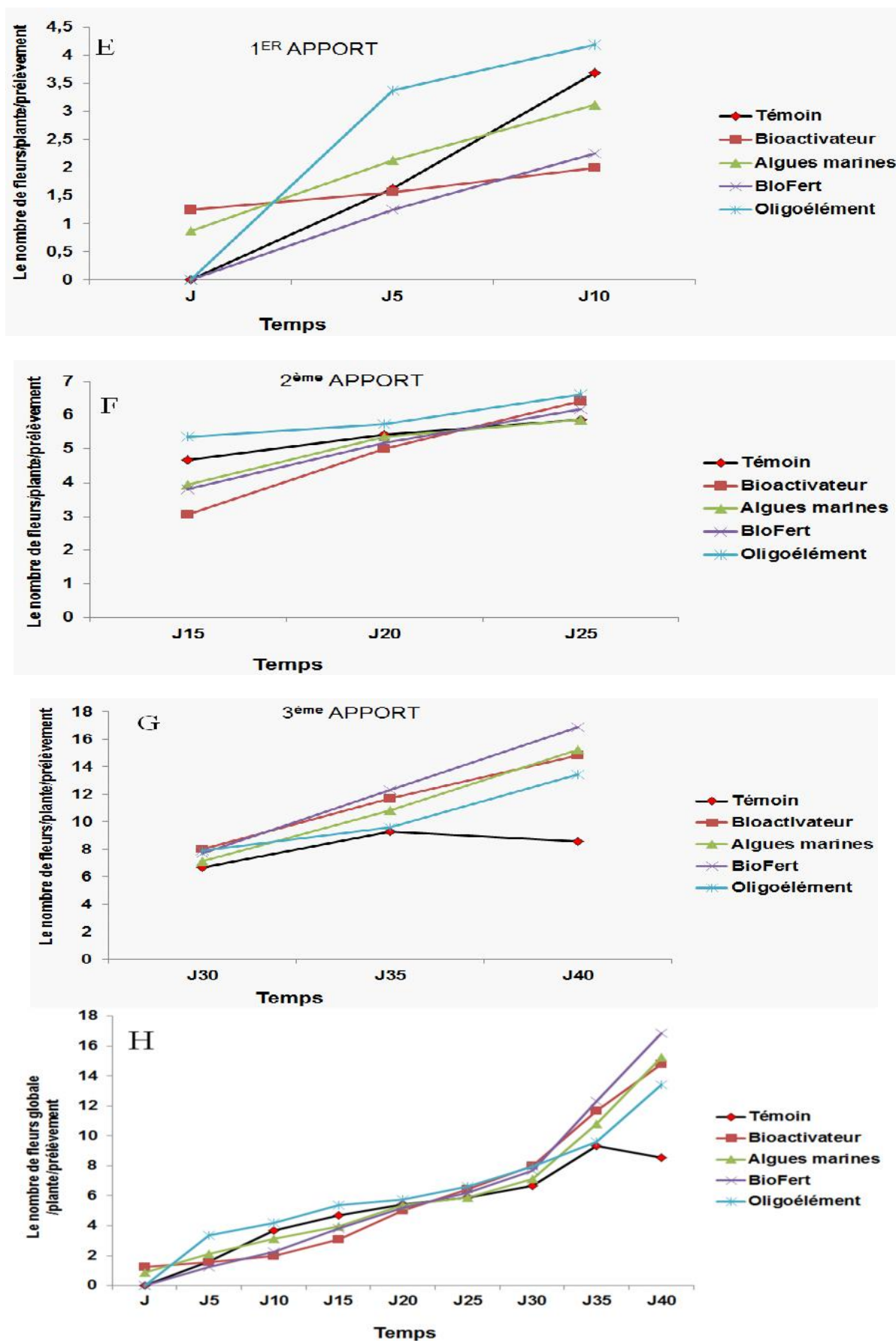


Figure 13: Evolution temporelle des paramètres morphologiques de la tomate sous l'effet des traitements

2. Evaluation de l'effet des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate

Les résultats de l'analyse en composantes principales effectuée avec le logiciel PAST, montrent un effet temporel très contrasté des différentes molécules sur les paramètres morphologiques de la tomate. L'analyse est satisfaisante pour l'ensemble des paramètres étudiés dans la mesure où plus de 80% de la variance sont exprimés sur les 2 premiers axes.

2.1. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au 1^{er} apport

La projection des vecteurs à travers le premier axe 1 (91,03%), montre que la surface foliaire est très importante sous l'effet de la plupart des traitements, exception faite pour le traitement de Biofertilisant qui manifeste une vitesse d'évolution stable. En revanche, la projection des nuages des points à travers le deuxième axe 2 (08,97%), montre que la surface foliaire est très appréciable au-delà du 2^{ème} prélèvement (Figure 14.A).

2.2. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au 2^{ème} apport

La projection via l'axe « 1 » (97,92%) montre que la surface foliaire est corrélée positivement avec les traitements de Bioactivateur, d'algues marines et de Biofertilisant, par opposition à la solution d'oligoéléments qui n'affectent pas de la même manière la surface foliaire. La projection des variables sur l'axe « 2 » (7,92%) permet de constater que les différents traitements sont corrélés positivement avec l'évolution de la surface foliaire dès le premier prélèvement (Figure 14.B).

2.3. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au 3^{ème} apport

La projection des vecteurs à travers le premier axe (98,61%), montre que l'évolution de la surface foliaire est très importante sous l'effet de la plupart des traitements, à l'exception du témoin. En revanche, la projection des nuages de points à travers le deuxième axe (1,38%) montre que la surface foliaire est très appréciable au-delà du premier prélèvement (Figure 14.C).

2.4. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire de la tomate suite au 4^{ème} apport

La projection via l'axe « 1 » (98,12%) montre que la surface foliaire des plantes est corrélée positivement avec les traitements d'algues marines, de Biofertilisant et de Bioactivateur, par opposition à la solution d'oligoéléments qui montre un effet assez faible sur la surface foliaire des plantes. La projection des variables sur l'axe « 2 » (1,88%) permet de constater que les différents traitements sont corrélés positivement avec l'évolution de la surface foliaire dès le premier prélèvement à l'exception de la solution d'oligoéléments (Figure 14.D).

2.5. Evaluation de l'effet des traitements sur Le nombre de fleurs de la tomate après le 1^{er} apport

La projection des vecteurs à travers le premier axe (98,05%) montre que l'évolution du nombre de fleurs est très faible sous l'effet de la plupart des traitements à l'exception de la solution d'oligoéléments et du témoin qui enregistrent un nombre de fleurs très important. En revanche, la projection des nuages de points à travers le deuxième axe (1,94%) montre que le nombre de fleurs est très appréciable au-delà du premier prélèvement (Figure 14.E).

2.6. Evaluation de l'effet des traitements sur la production florale de la tomate après le 2^{ème} apport

La projection via l'axe « 1 » (97,34%) montre que le nombre de fleurs est corrélé positivement avec le traitement de la solution d'oligoéléments. Par opposition, les algues marines, le Biofertilisant et le Bioactivateur montrent un effet assez faible sur le nombre de fleurs. La projection des variables sur l'axe « 2 » (2,65%) permet de constater que les différents traitements sont corrélés positivement avec l'évolution du nombre de fleurs dès le deuxième prélèvement (Figure 14.F).

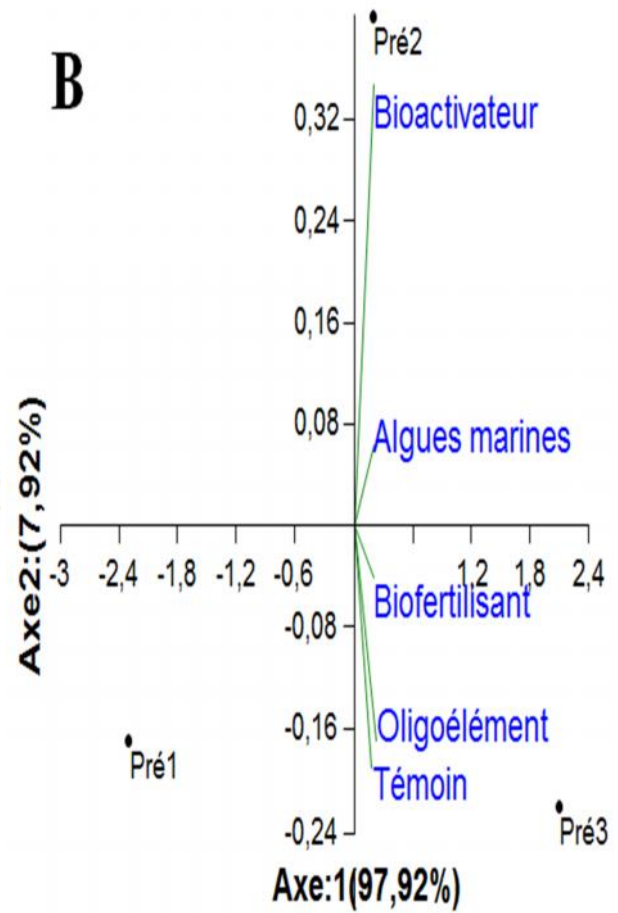
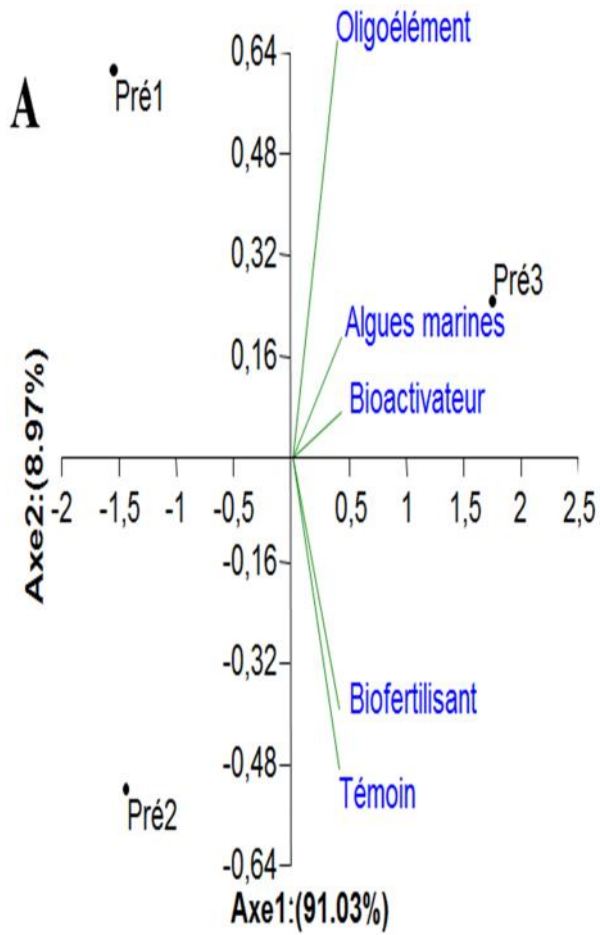
2.7. Evaluation de l'effet des traitements sur la production florale de la tomate après le 3^{ème} apport

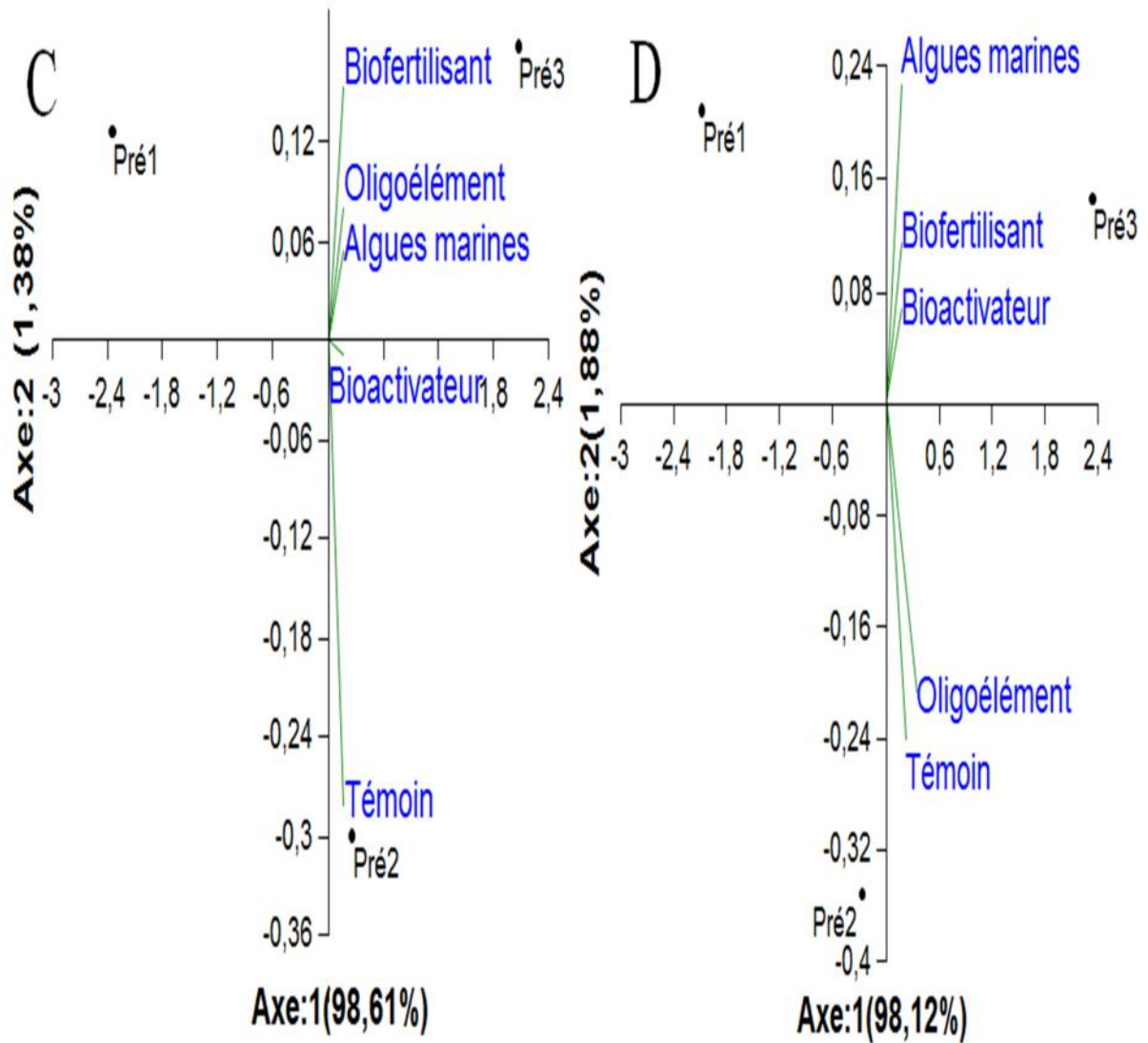
La projection des vecteurs à travers le premier axe (88,98%) montre que l'évolution du nombre de fleurs est très importante sous l'effet de la plupart des traitements à l'exception du témoin. En revanche, la projection des nuages de points à travers le deuxième axe (11,01%) montre que le nombre de fleurs est très appréciable au-delà du premier prélèvement (Figure 14.G).

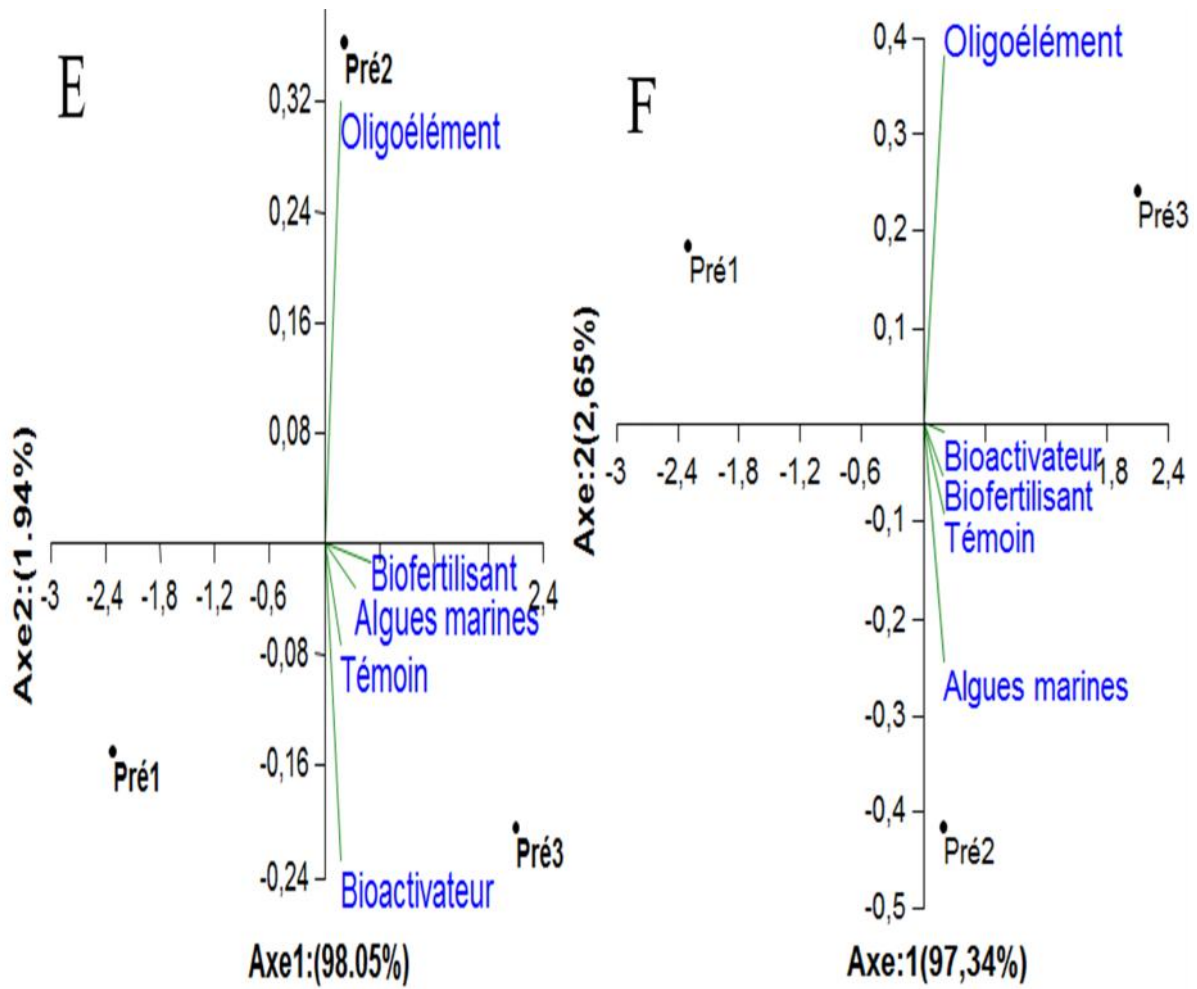
2.8. Evaluation de l'effet des traitements sur la production globale de fleurs de la tomate

L'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) appliquée à toutes les périodes de traitement sur le nombre de fleurs est satisfaisante dans la mesure où plus de 80 % de la variance est exprimé sur les deux premiers axes. D'une manière générale, la projection du nombre de fleurs sur le plan d'ordination F1/F2 montre que l'ensemble des traitements ont un effet stimulant qui s'affiche dès le troisième prélèvement.

Globalement, le nombre de fleurs semble être stimulé par le traitement de bioactivateur, de biofertilisant et des algues marines (Figure 14.H).







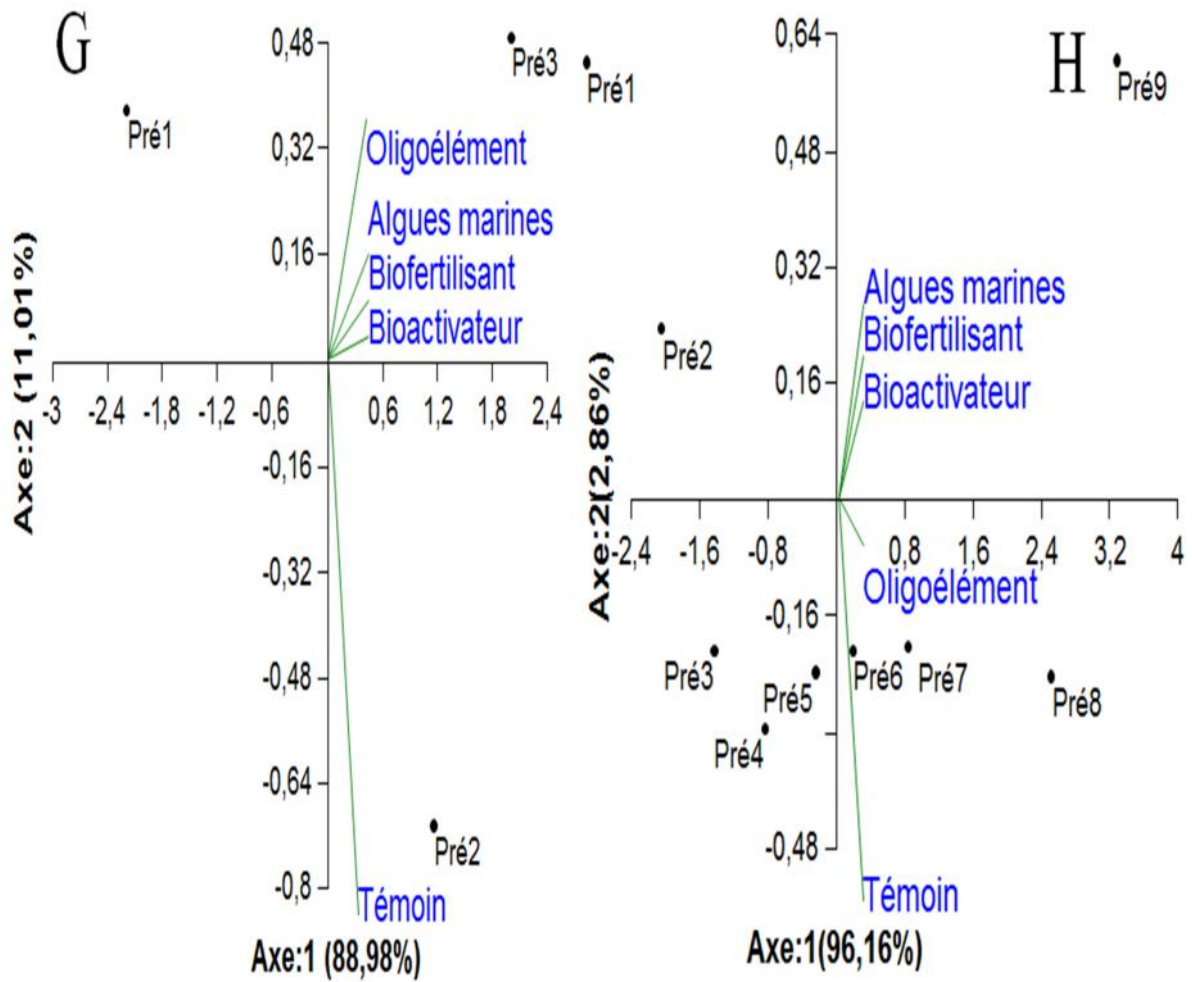


Figure 14 : Evaluation de l'effet des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate

3. Etude comparée des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate

Le modèle G.L.M. a été appliqué dans le but d'évaluer l'effet strict des différentes molécules sur les paramètres morphologiques de la tomate.

3.1. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le 1^{er} apport

La figure 15 montre que le facteur traitement agit d'une manière non significative sur la surface foliaire (F-ratio=0.152, $p=0,961$, $p>5\%$) (Figure 15.A), alors que le facteur temps présente un effet significativement apparent sur la surface foliaire (F-ratio=7.627, $p=0,001$, $p<0,01\%$) (Figure 15.B).

L'analyse de la variance confirme la présence d'un effet stimulant graduel et progressif des produits de moindre effet vers les produits les plus stimulants, à savoir successivement, le Biofertilisant, les fertilisants homologués et la solution d'oligoéléments (Figure 15A). La même analyse confirme que l'écart de la surface foliaire s'agrandit dès le deuxième prélèvement (Figure 15B).

3.2. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le 2^{ème} apport

Les résultats de l'analyse de la variance montrent que les traitements exercent un effet non significatif (F-ratio=2.237, $p=0,077$, $p>5\%$), alors que le temps a un effet hautement significatif sur l'évolution de la surface foliaire, (F-ratio=25,99, $p=0,000$, $p<0.001\%$).

Les valeurs de la surface foliaire les plus importantes sont enregistrées sous l'effet du Bioactivateur, avec un degré moindre sous l'effet du Biofertilisant et des algues marines et en dernière position la solution d'oligoéléments (Fig. 15.C). L'évolution temporelle de la surface foliaire enregistre une augmentation apparente dès le premier prélèvement (Fig. 15.D).

3.3 Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le 3^{ème} apport

Les résultats d'analyses touchant l'évolution de la surface foliaire présentent des différences hautement significatives sous l'effet des traitements et du temps avec des probabilités respectives de : (F-ratio=3.299, $p=0,017$, $P<0,02\%$), (F-ratio=42,911, $p=0,000$, $P<0,001\%$),

L'analyse de la variance confirme la présence d'un effet très stimulant au profit du Bioactivateur et du Biofertilisant. Un effet stimulateur modéré est affecté aux algues marines et à la solution d'oligo-éléments (Fig. 15.E). L'évolution de la surface foliaire se manifeste donc d'une manière très apparente à partir du premier prélèvement (Fig. 15.F).

3.4. Etude comparée des traitements sur la surface foliaire de la tomate après le 4^{ème} apport

Les résultats d'analyses touchant l'évolution de la surface foliaire affichent des différences non significatives sous l'effet des traitements (F-ratio=1,071, p=0,380, P>5%), alors que le temps a un effet hautement significatif sur l'évolution de la surface foliaire, (F-ratio=29,807, p=0,000, P<0,001%).

Les dénivellations de la surface foliaire enregistrées entre les différentes molécules sont en faveur, en premier degrés, au Biofertilisant et les algues marines, en second lieu s'affiche par ordre d'importance, le Bioactivateur et le témoin. Enfin, la solution d'oligoéléments ne présente aucun effet (Fig. 15.G). L'évolution temporelle de la surface foliaire enregistre une augmentation avérée à partir du premier prélèvement (Fig. 15 H).

3.5. Etude comparée des traitements sur le nombre de fleurs de la tomate après le 1^{er} apport

Les résultats d'analyses touchant l'évolution du nombre de fleurs présentent des différences non significatives sous l'effet des traitements (F-ratio=0,982, p=0,425, P>5%), alors que le facteur temps a un effet hautement significatif sur le nombre de fleurs (F-ratio=8.93, p=0,000, P<0,001%).

L'analyse de la variance confirme la présence d'un effet non stimulant au profit du Biofertilisant et du Bioactivateur. Un effet stimulateur modéré est affecté aux algues marines et à la solution d'oligoéléments (Fig. 15.I). L'évolution du nombre de fleurs se manifeste d'une manière très apparente à partir du deuxième prélèvement (Fig. 17.J).

3.6. Etude comparée des traitements sur le nombre de fleurs de la tomate après le 2^{ème} apport

Les résultats d'analyses touchant l'évolution du nombre de fleurs présentent des différences non significatives sous l'effet des traitements et du temps avec des probabilités respectives de : (F-ratio=0.269, p=0,896, p>5%), (F-ratio=2,673, p=0,07, p>5%).

Les dénivellations du nombre de fleurs enregistrées entre les différentes molécules sont en faveur, en premier lieu à la solution d'oligoéléments, en second lieu s'affiche par ordre d'importance le témoin et le Biofertilisant et enfin les algues marines et le Bioactivateur (Fig. 15.K). L'évolution temporelle du nombre de fleurs enregistre une augmentation progressive pendant toute la période du traitement (Fig. 15 L).

3.7. Etude comparée des traitements sur le nombre de fleurs de la tomate après le 3^{ème} apport

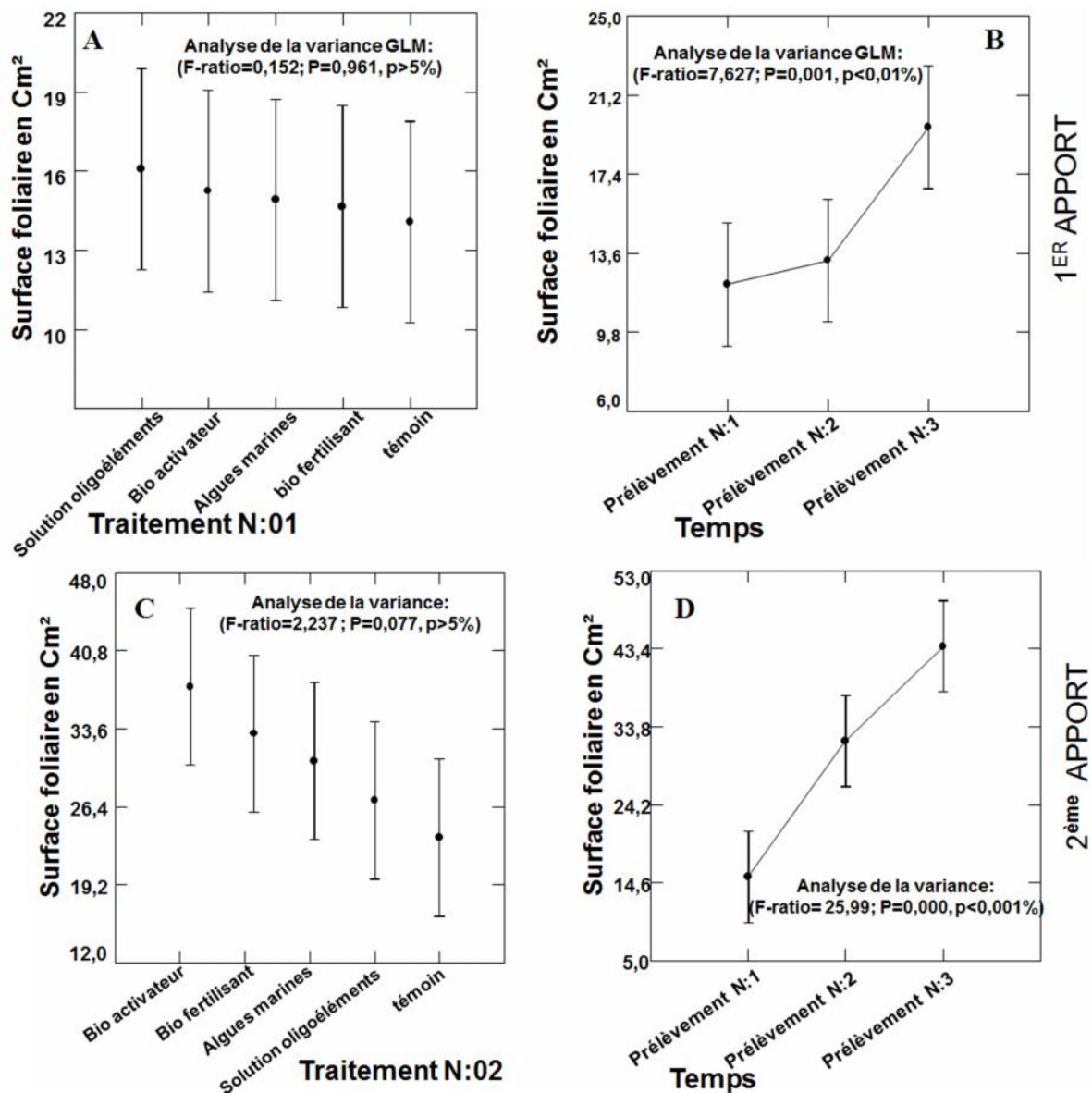
Les résultats de l'analyse de la variance montrent que les traitements exercent un effet non significatif (F-ratio=1.781, p=0,146, p>5%), alors que le temps a un effet hautement significatif sur l'évolution de le nombre de fleurs, (F-ratio=12,08, p=0,000, p<0.001%).

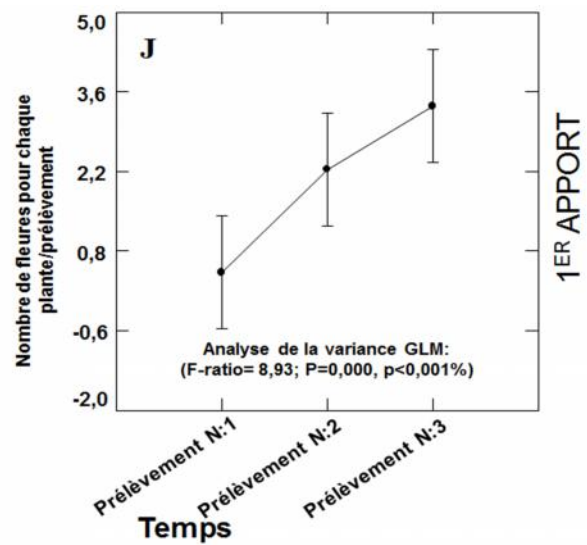
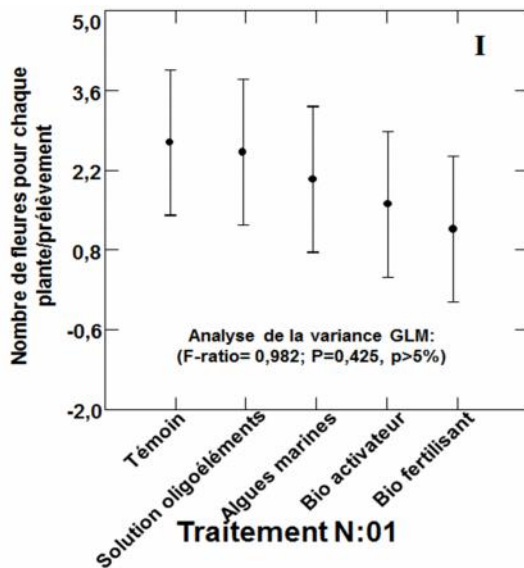
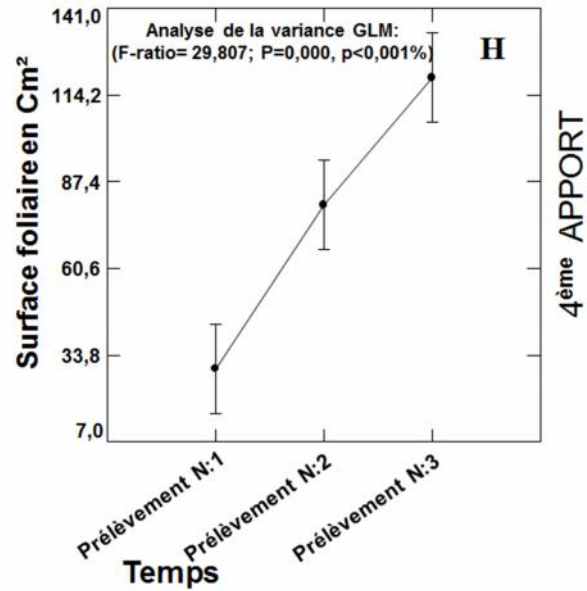
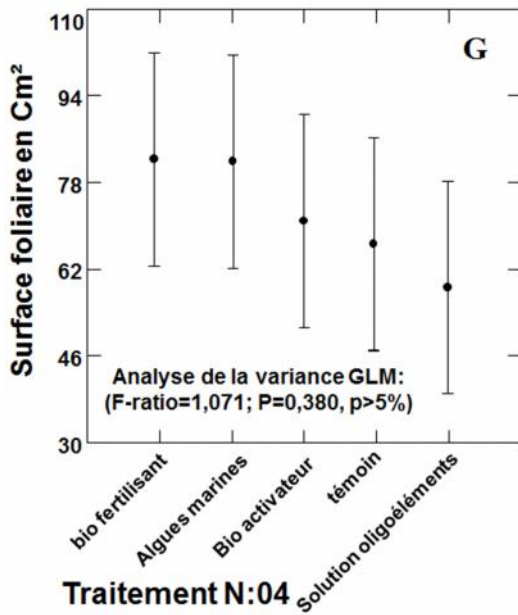
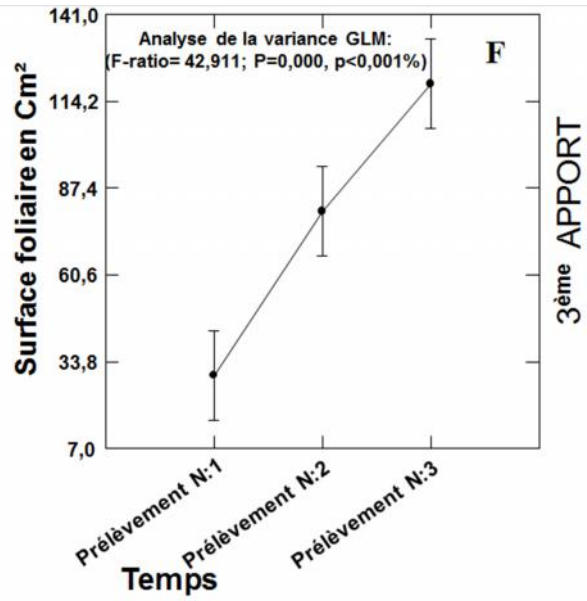
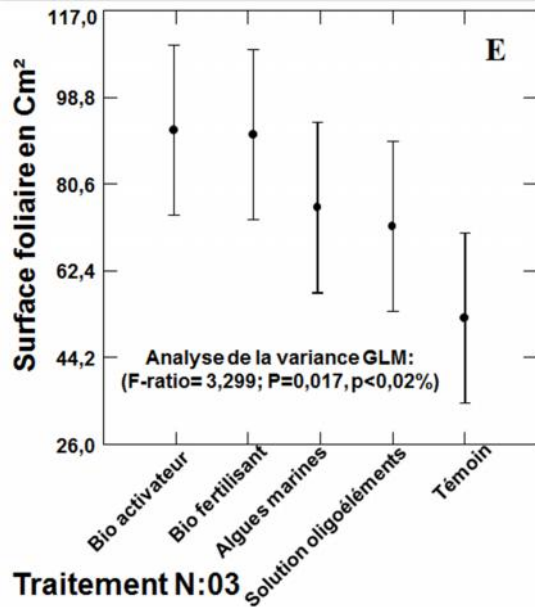
L'analyse de la variance confirme la présence d'un effet stimulant au profit du Biofertilisant et du Bioactivateur. Un effet stimulateur modéré est affecté aux algues marines et à la solution d'oligo-éléments (Fig. 15.M). L'évolution du nombre de fleurs se manifeste d'une manière très apparente à partir du premier prélèvement (Fig. 15.N).

3.8. Etude comparée des traitements sur le nombre globale de fleurs de la tomate

D'une manière générale, les traitements et le temps relatifs à l'essai agissent d'une manière non significative sur l'évolution du nombre de fleurs.

La (figure15.O) affiche un effet stimulant de la solution d'oligoéléments et de Biofertilisant, suivi d'un effet modéré exercé par le Bioactivateur et les algues marines. L'effet temporel montre une faible dénivellation pendant toute la période de traitement (Fig.15.P).





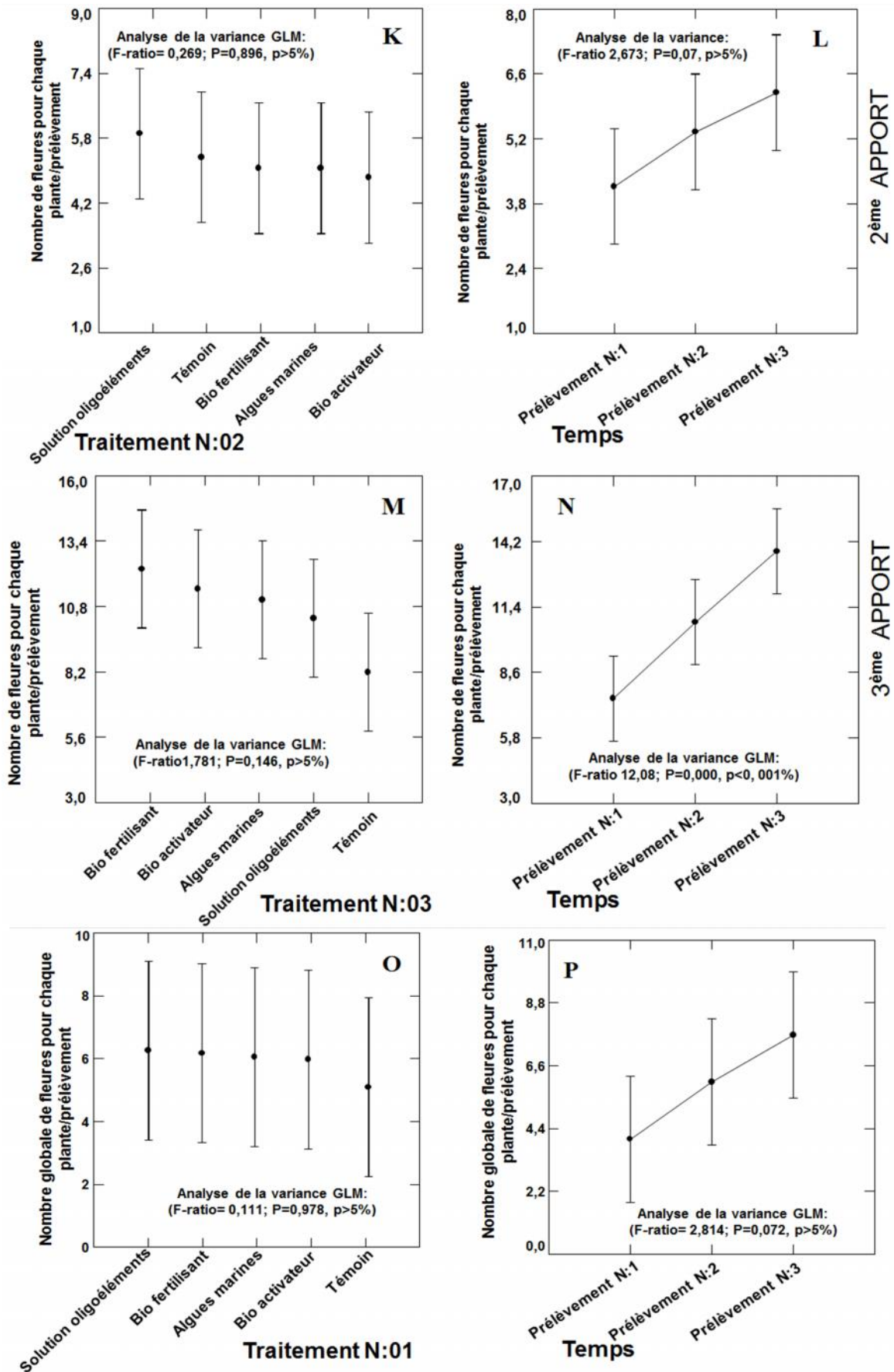


Figure 15: Etude comparée des traitements sur les paramètres morphologiques de la tomate

4. Evaluation des traitements sur l'état phytosanitaire de la tomate

4.1. Evaluation des traitements sur l'incidence d'*Autographa gamma*

4.1.1. Evolution temporelle du développement de la surface foliaire infestée par la noctuelle sous l'effet des traitements.

La figure 20 révèle que la surface foliaire infestée par la noctuelle est très importante avec un taux d'infestation optimale sous l'effet de la solution d'oligoéléments. Le Bioactivateur et les algues marines expriment quant à eux la même tendance que celle du témoin avec une surface infestée remarquable. Par ailleurs, les plantes traitées avec le Biofertilisant, elles ne présentent aucune infestation par la noctuelle pendant toute la période de l'essai.

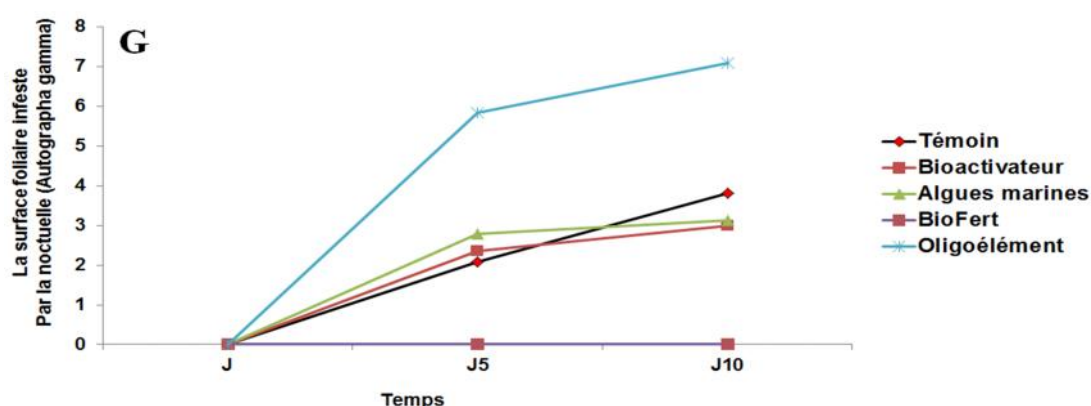


Figure 20 : Evolution temporelle de l'incidence d'*Autographa gamma* sur les feuilles de la tomate sous l'effet des traitements

4.1.2. Evaluation de l'effet des traitements sur la surface foliaire infestée par la noctuelle (*Autographa gamma*).

La projection des vecteurs à travers le premier axe (98,69%) montre que l'évolution de la surface foliaire infestée est nulle sous l'effet de Biofertilisant et du Bioactivateur, à l'exception de la solution d'oligoéléments, les algues marines et le témoin où on enregistre une surface foliaire infestée très importante. En revanche, la projection des nuages de points à travers le deuxième axe (1,30%) montre que la surface foliaire infestée est très appréciable au-delà du deuxième prélèvement (Figure 21).

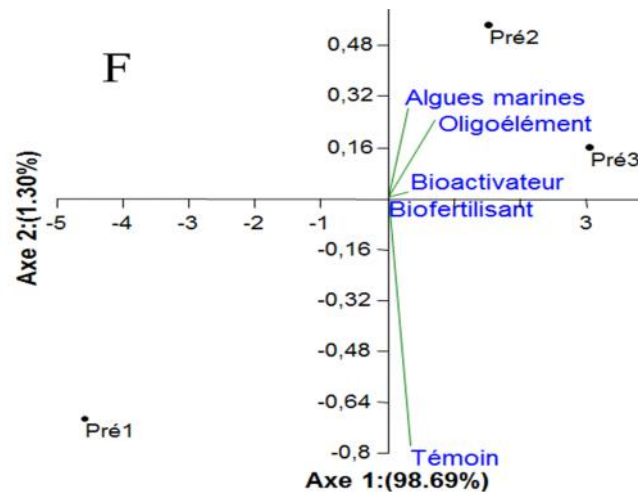


Figure 20 : Evaluation de l'effet des traitements sur l'incidence d'*Autographa gamma* sur les feuilles de la tomate

4.1.3. Evaluation de l'effet comparé des traitements sur la surface foliaire infestée par la noctuelle *Autographa gamma*

Les résultats d'analyses touchant l'évolution de la surface foliaire affichent des différences significatives sous l'effet des traitements, (F-ratio=3.057, $p=0,02$, $P<5\%$), alors que le temps a un effet très significatif sur l'évolution de la surface infestée, (F-ratio=6,897, $p=0,002$, $P<0,005$).

Les dénivellations de la surface foliaire infestée constatées entre les différentes molécules sont en faveur, en premier lieu, au Biofertilisant avec une surface infestée **moins importante**. Suivra ensuite le Bioactivateur et les algues marines et le témoin qui ont une **importante** surface foliaire infestée. En dernière position, se trouvent les plantes traitées par la solution d'oligoéléments qui présentent une surface infestée **très remarquable** (Fig. 22.O). L'évolution temporelle de la surface foliaire infestée enregistre une augmentation avérée à partir du deuxième prélèvement (Fig. 22 P).

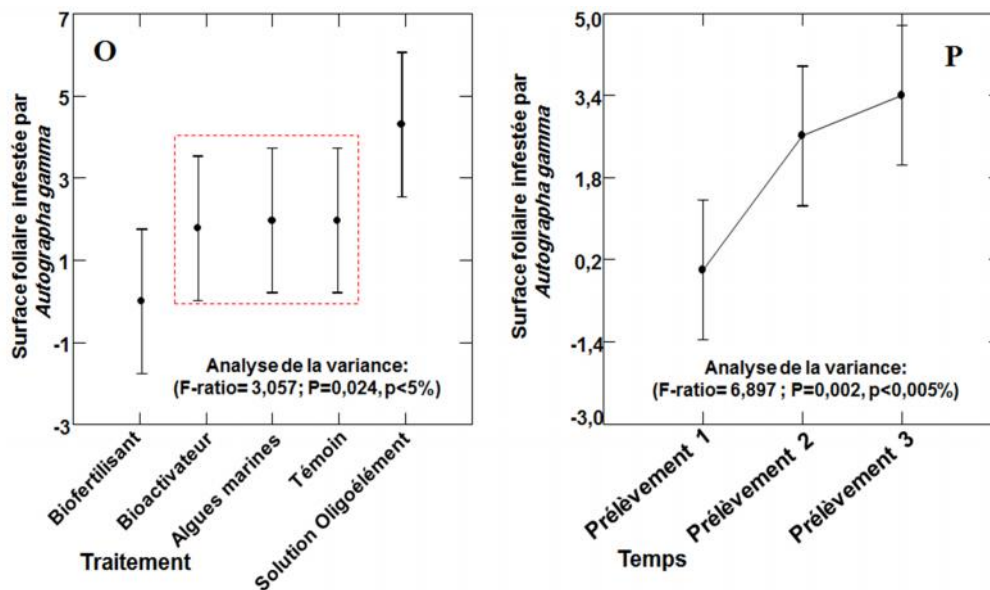


Figure 22: Etude comparée des traitements sur l'incidence d'*Autographa gamma* sur les feuilles de la tomate

4.2. Evaluation des traitements sur le nombre de feuilles ayant une carence en Fer

4.2.1. Evolution temporelle du développement du nombre de feuilles de la tomate présentant une carence en Fer sous l'effet des traitements.

La figure 23 désigne une carence accrue en Fer des feuilles de la tomate traitées par la solution d'oligoéléments dès le 1^{er} prélèvement. Il apparait clairement que les plantes traitées par le Bioactivateur présentent une augmentation progressive de la carence en fer avec celles du témoin et ce, pendant toute la période d'essai. D'un autre côté, les plantes traitées par le Biofertilisant expriment une absence totale de la carence sur les feuilles durant toute la période expérimentale.

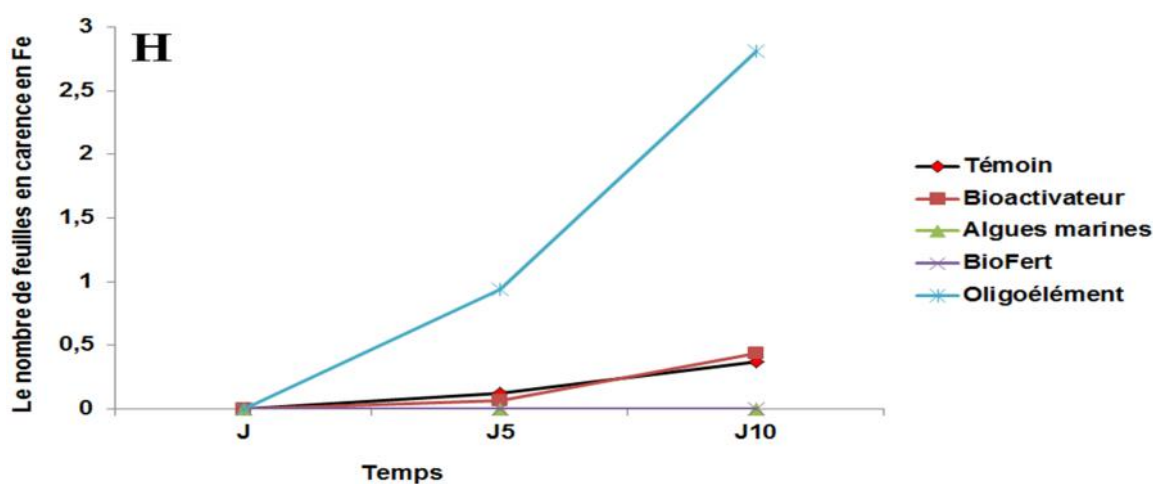


Figure 23 : Evolution temporelle sur le nombre de feuilles de la tomate ayant une carence en Fer sous l'effet des traitements

4.2.2. Evaluation de l'effet des traitements sur le nombre de feuilles ayant une carence en Fer.

L'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) appliquée sur le nombre de feuilles de la tomate présentant une carence en fer est **satisfaisante** dans la mesure où plus de 80 % de la variance est exprimée sur les deux premiers axes. La (Figure 24) montre que les plantes traitées par le Biofertilisant et des algues marines ne présentent **aucune carence** en Fer et enfin **une faible carence** est signalée sous l'effet du Bioactivateur. Par ailleurs, les plantes traitées par la solution d'oligoéléments présentent une **forte carence** en fer et ce, pendant toute la période d'essai.

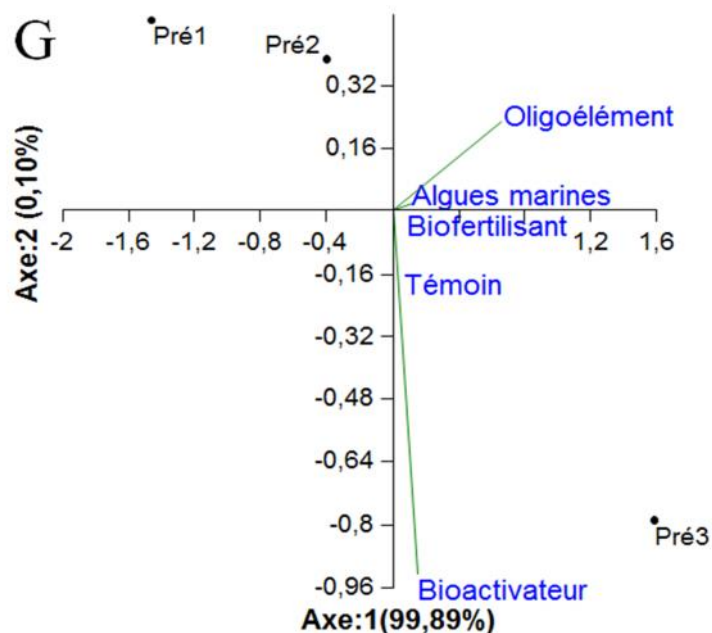


Figure 24 : Evaluation de l'effet des traitements sur le nombre de feuilles de la tomate ayant une carence en Fer

4.2.3. Evaluation de l'effet comparé des traitements sur le nombre de feuilles ayant une carence en Fer

Les résultats de l'analyse de la variance montrent que les traitements exercent un effet **très significatif**, ($F\text{-ratio}=4.458$, $p=0,004$, $p<0.01$), alors que le temps a un effet **significatif** sur l'évolution du nombre de feuilles présentant une carence, ($F\text{-ratio}=3,665$, $p=0,032$, $p<5\%$) (Figure 18.M.N).

L'analyse de la variance confirme aussi la présence d'un effet de correction de la carence au profit du Biofertilisant et des algues marines. Un effet modéré est affecté aux Bioactivateur et du témoin (Fig. 25.M). L'évolution du nombre de feuilles ayant une carence se manifeste d'une manière très apparente à partir du premier prélèvement (Fig. 25.N).

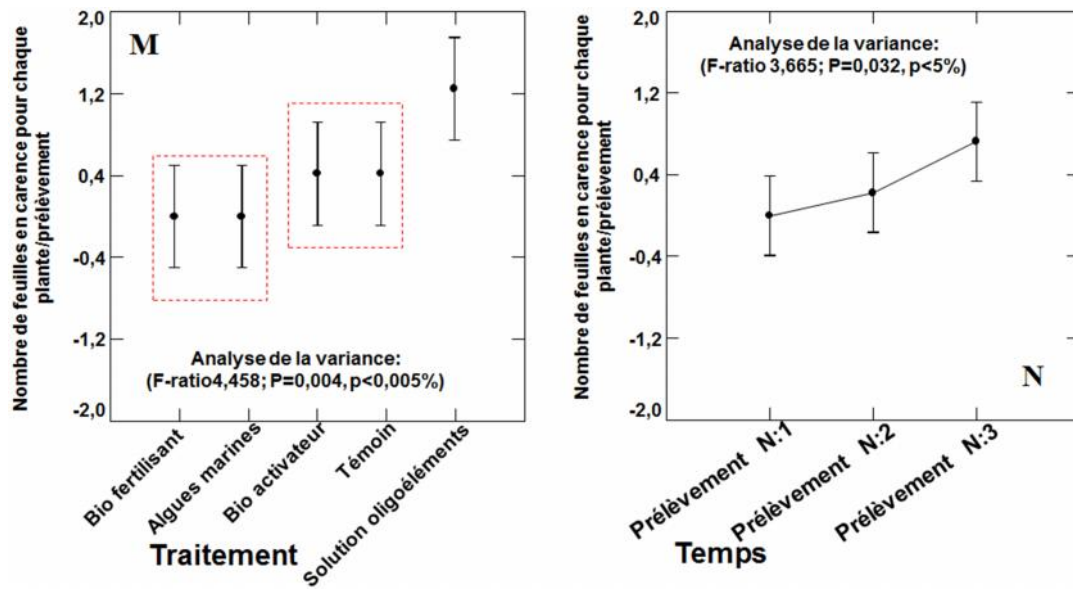


Figure 25: Etude comparée des traitements sur le nombre de feuilles de la tomate ayant une carence en Fer

CHAPITRE IV: DISCUSSION:

La serriculture permet une croissance rapide des plantes quel que soit la saison et permet de contrôler parfaitement les produits phytopharmaceutiques apportés à la plante.

Les résultats auxquels nous avons aboutis en traitant l'effet comparé de Biofertilisant, de la formulation minérales et des fertilisants homologués sur les paramètres morphologiques et l'état phytosanitaire de la tomate, nous ont permis de dégager les hypothèses suivantes :

Cette hypothèse rejoint plusieurs études qui ont touchées de plus près l'effet des fertilisants biologiques sur les paramètres physio morphologiques des plantes. (Xing et Rajashekar, 2001), avancent que l'application des algues sur des plants de tomate permet une croissance journalière assez conséquente, de même, les hormones qui assurent une croissance aussi rapide des algues, augmentent la division et l'élongation des cellules des plantes testées, alors l'application du lombricompost sous forme de fumier permettra d'obtenir des plantes deux fois plus longue que celle traité par les algues marine.

A l'heure actuelle, les mécanismes d'action des extraits d'algues ne sont pas connus de façon satisfaisante. Quels que soient leur origine, ou leur mode de préparation, ces extraits sont très complexes et renferment de nombreux éléments minéraux et constituants organiques. Aujourd'hui, on s'accorde à dire que les algues marines contiennent quatre types de composants particulièrement intéressants : (1) colloïdes, (2) acides aminés et éléments minéraux, (3) sucres et (4) phytohormones (Ruben, 2012).

Sur le même aspect plusieurs données scientifiques confirment que le lombricompost entraîne des rendements plus élevés avec un état physiologique très satisfaisant (Arora et al. 2005). Une étude qui a été réalisée par Allard et Fernand (2004) au Département de phytologie, Université Laval, Québec, où ils ont examiné les impacts du compost et du lombricompost sur des rendements du fraisier et sur la réaction au *Verticillium dahliae*. Les effets des traitements chez le fraisier ont été examinés par l'estimation de : l'indice de surface foliaire, la masse sèche, le rendement en fruits et le poids moyen des fruits. Les plants de fraisiers sous compost et lombricompost ont réagi de façon significative différente des plants témoins. Les milieux avec compost et lombricompost contenaient plus d'azote que le milieu témoin. L'azote présent dans le milieu avec le lombricompost est principalement sous forme de nitrate. Avec fertilisation minérale, les écarts entre les rendements obtenus avec les trois milieux diminuent par rapport au rendement de fertilisation. Sous fertilisation minérale, les plantes ne réagiraient plus à l'addition excessive d'éléments fertilisants (Soltner, 2000), ou encore les fertilisants minéraux stimuleraient la minéralisation de l'azote contenu dans les composts, diminuant ainsi sa disponibilité pour la plante (Jedidi et al, 1994).

Jusqu'à aujourd'hui, le nombre d'expériences visant à étudier l'effet des Lombrics et les excréments issus de lombric sur la croissance des plantes n'a eu de cesse d'augmenter et a fait à ce jour, l'objet de deux revues de synthèse référencant respectivement 67 études en milieu tempéré et 246 expériences en milieu tropical. Les questions récurrentes posées par les études référencées portent sur: (1) quantifier l'effet (négatif ou positif) des excréments des vers sur la biomasse des plantes, (2) quelles espèces de plantes sont les plus affectées et (3) comment ces excréments agirai sur la promotion de la croissance des plantes (Scheu, 2003; Brown et al., 2004). Ces études mettent en évidence un effet positif des vers de terre sur la croissance des plantes avec un effet positif sur la biomasse aérienne dans 75% des cas pour le jus des vers de terres tropicaux et 79% des cas pour le jus issu des vers de terre tempérés. Ces études ce sont intéressées tout particulièrement à l'effet des excréments issu des vers de terre sur des espèces de plantes d'intérêt agronomique.

Les auteurs de ces deux revues soulignent que les études référencées soulèvent rarement la question du mécanisme via lequel le jus des vers de terre agit sur la croissance des plantes et sur la fertilité des sols. Dès que le sol rentre en contact avec le tube digestif du vers de terre, il va subir de profonds changements physico-chimiques et biologiques qui affectent l'ensemble du profil du sol. Ces changements sont les facteurs déterminants pour expliquer l'effet des vers de terre sur les plantes et sont fortement dépendants de la classe écologique du vers de terre étudié. De l'interaction entre les vers de terre, les microorganismes du sol et la plante va résulter des bénéfiques mutualistes pour chacun des organismes. De cette relation tripartite découle de nombreux services et modifications de l'environnement pouvant influencer la croissance des plantes. Ces modifications étant tant d'ordre physique (modification de la porosité et de l'agrégation), chimique (enrichissement en minéraux et matière organique) que biochimique (via la synthèse de molécules agissant directement sur la physiologie de la plante).

La relation significative entre l'activité des vers de terre et ses sécrétions, la fertilité du sol, la structure du sol et la dynamique de la matière organique est depuis longtemps reconnue (Darwin, 1881; Edwards & Bohlen, 1995; Edwards, 2004). Lors de leurs déplacements, les vers de terre consomment du sol et des résidus organiques qui vont être mixés pendant le passage dans leur tube digestif, pour être finalement excrétés sous forme de turricules et d'un jus dit jus de lombric. Ce processus va fortement affecter la dynamique de la matière organique, la porosité ainsi que la formation et la stabilité des agrégats de sol par la formation de complexes argilo-humiques de la même manière les turricules et le jus de compost vont fortement affecter sur les déférent organismes de la plante

La disponibilité en nutriments dans l'environnement est indispensable à la croissance des plantes. Souvent, la limitation en nutriments concerne l'azote, le phosphore et le potassium. La disponibilité de ces nutriments essentiels a déjà été montrée comme étant accrue dans les structures produites par de nombreuses espèces de vers de

terre. Les turricules de ces vers de terre présentent une teneur en nutriments élevée pour NH_4^+ , NO_3^- , Mg^{2+} , K^+ et HPO_4^{2-} en comparaison avec un sol non ingéré (Syers et al., 1979; Mackay et al., 1983; Tiwari et al., 1989; James, 1991). Les vers de terre sont des acteurs majeurs au niveau de la circulation des nutriments dans le sol de par la consommation, la fragmentation et le mixage de cette matière organique avec les particules minérales de sol, afin de former des agrégats.

La digestion de la matière organique par le vers de terre est réalisée dans leur tube digestif au travers d'un ensemble d'enzymes tel que des chitinases, des protéases, des phosphatases ainsi que diverses glucosidases (Brown et al., 2000). Ces enzymes leur permettent de digérer des bactéries, protozoaires, champignons et une partie des débris végétaux. Cependant, la majorité des invertébrés ne possèdent pas les enzymes appropriés afin de digérer la cellulose, la lignine, les tanins ou encore des complexes humiques qui constituent une grande partie des ressources présentes dans le sol (Lavelle et al., 1995; Brown et al., 2000). Néanmoins, il a été observé que certains vers de terre étaient tout de même impliqués dans les processus de dégradation de ces composés (Lattaud et al., 1998a; Lattaud et al., 1998b). Le mécanisme à la base de la digestion de ces composés repose sur une association avec la microflore ingérée et certains microorganismes déjà présents dans le tube digestif, activés au travers de l'effet «belle au bois dormant » (Lavelle et al., 1995; Brown et al., 2000).

Ces bactéries, par l'ensemble des enzymes qu'elles sont capables de synthétiser et que ne possèdent pas les vers de terre, vont permettre de réaliser une digestion mutualiste de la matière organique (Lattaud et al., 1998; Lattaud et al., 1998b; Brown et al., 2000). Durant le processus de digestion par les vers de terre, le ratio carbone/azote va chuter progressivement. La majeure partie de l'azote sera convertie sous forme de nitrate ou d'ammonium. En parallèle, le potassium et le phosphore seront eux aussi convertis en une forme qui les rend disponibles pour la plante (Edwards, 2004).

La digestion mutualiste initiée dans le tube digestif du vers de terre va se poursuivre à l'intérieur des turricules (Lavelle et al., 2004). Les microorganismes du sol réalisent à eux seuls près de 90% des transformations de la matière organique dans les sols (Lavelle et al., 2004). L'activité des microorganismes qui sont rejetés avec les turricules va être stimulée par priming effect et ces microorganismes vont poursuivre la digestion de la matière organique (Lavelle et al., 1995; Brown et al., 2000). Ainsi, les produits issus de cette digestion externe pourront être assimilés de nouveau par les vers de terre ou bien par les plantes.

Au niveau de l'implication des microorganismes dans le cycle de l'azote on peut bien sûr citer les bactéries symbiotiques ou non-symbiotiques capables de fixer le diazote atmosphérique et dont les effets ont déjà été largement étudiés (Hayat et al., 2010). Cependant, aucune influence des vers de terre sur ces populations n'a été démontrée à ce jour.

Toutefois, d'autres bactéries, au travers d'activités de nitrification et de dénitrification, sont capables elles aussi, d'intervenir dans le cycle de l'azote. L'activité et l'abondance de ces populations de bactéries nitrifiantes et dénitrifiantes restent très élevées dans les turricules et le jus de lombric (Businelli et al., 1984; Parkin & Berry, 1999; Wu et al., 2012), ayant pour conséquence d'accroître les teneurs en NH_4^+ et NO_3^- . Les vers de terre vont également impacter les populations bactériennes intervenant dans la solubilisation et la minéralisation du phosphate inorganique (Rodriguez & Fraga, 1999; Wu et al., 2012) ainsi que sur la solubilisation du potassium (Wu et al., 2012).

L'action des vers de terre au niveau de la concentration des nutriments dans le sol peut être réalisée, par un effet direct via (1) les produits issus de leur propre métabolisme (déchets azotés et mucus), (2) l'ingestion et le brassage de résidus de matière organique avec la microflore dans leur tractus digestif ou (3) via un effet indirect au travers de changements dans leur environnement. Ces changements au niveau de l'environnement peuvent correspondre à une modification de la structure des communautés microbiennes du sol ou au déplacement de résidus de matière organique. Il a ainsi été estimé que les vers de terre au travers d'excrétion, de la production de mucus, ainsi que du passage du sol dans leur tractus digestif, contribuaient fortement à l'apport en nutriments dans les écosystèmes tropicaux comme tempérés, avec un apport en azote estimé de 30 à 50 kg ha⁻¹ an⁻¹ (Curry & Byrne, 1992; Edwards, 2004).

Les ancêtres des plantes terrestres, les plantes aquatiques, ont la capacité d'absorber des minéraux par leurs organes foliaires. Bien que le processus d'évolution du règne végétal terrestre a conduit à la spécialisation des feuilles dans les mécanismes de la respiration cellulaire et de la photosynthèse, les plantes terrestres ont conservé ce vestige de leurs ancêtres aquatiques (Marschner, 1995). Depuis cette découverte, de plus en plus de producteurs font appel à la fertilisation foliaire pour combler les carences minérales de leur culture. Pourtant, ces producteurs demeurent sceptiques quant aux effets bénéfiques de cette pratique. La panoplie de publications d'articles scientifiques à cet effet indique qu'ils n'ont ni tort, ni raison.

De nombreux résultats de recherche démontrent clairement les effets positifs de la fertilisation foliaire sur la croissance, le développement et parfois même sur le rendement des cultures (Hannam et al. 1984), tandis que d'autres recherches montrent l'inefficacité de cette pratique (Edmidten et al. 1994; 2002; Tojnko et al. 2002). Ces résultats divergents sont dus aux nombreux facteurs régissant l'efficacité de la fertilisation foliaire. Ces facteurs limitants sont, d'une part, reliés aux conditions climatiques, et d'autre part, à la nature même du ou des produits utilisés.

Tous ces facteurs agissent directement ou indirectement sur la pénétration stomatale et cuticulaire et la translocation des nutriments dans la plante entière. Les fertilisants foliaires utilisés sont confrontés à des barrières physiques considérables avant d'entrer dans le cytosol des cellules épidermales des feuilles. Les conditions

climatiques et la nature du ou des produits utilisés influencent significativement l'efficacité de ces barrières au passage des micros et macroéléments (Mengel, 2002).

D'autres études montrent que les microorganismes du jus issu des vers de terre après leur digestion peuvent interagir directement avec les mécanismes de défense de la plante au travers de la synthèse d'acide salicylique (S.A.) ou d'1aminocyclopropane-1-carboxylic acid (A.C.C.), induisant un mécanisme de résistance acquise (S.A.R.) ou induite (I.S.R.) respectivement.

L'étude d'Elmer (2009), concernant l'interaction des vers de terre avec ces populations de P.G.P.R., sont capables de promouvoir la croissance des plantes, via la synthèse de nombreux composés proches des hormones végétales restent à démontrer. Cependant, l'effet des vers de terre, sur la réduction de la sévérité de nombreuses maladies, a été démontré à de nombreuses reprises (Stephens et al., 1993; Stephens et al., 1994; Stephens & Davoren, 1995; 1997; Clapperton et al., 2001; Wolfarth et al., 2011). Leurs effets sur la réduction de certaines maladies chez les plantes sont souvent associés à une meilleure nutrition des plantes ou encore à un effet de prédation par le vers de terre. Cependant, ces hypothèses ne suffisent pas dans certains cas à expliquer l'effet observé des vers sur la réduction de la maladie (Blouin et al., 2005; Elmer, 2009). L'hypothèse d'une action combinée avec certains microorganismes du sol afin de produire des composés antibiotiques et/ ou d'induire des réponses systémiques de défense chez la plante est une hypothèse parcimonieuse pour expliquer l'effet des vers et leur sécrétions.

- Les résultats de notre étude affichent l'absence de carence en Fer sous l'effet de Biofertilisant et des algues marines par contre les plantes qui ont subi des molécules de Bioactivateur et de la solution d'oligoélément présentent des carences remarquables de Fer (Figure 26). Les résultats obtenus vont nous permettre d'avancer que les modifications physiologiques issues de la stimulation de la résistance inductible ne sont pas les mêmes sous les différentes molécules appliquées. On suppose que le Biofertilisant et les algues marines via leurs effets SDN ils fournissent à la plante cultivée une gamme équilibrée de nutriment couvrant les exigences dictées par chaque phase de développement phénologique.

Conclusion générale et Perspectives

Au terme de ce travail consacré essentiellement à l'étude de l'effet comparé d'un Biofertilisant, d'une formulation minérale et des fertilisants homologués sur les paramètres morphologiques et sur l'état phytosanitaire de la tomate sous abris serre, il nous a paru intéressant de dégager les principaux résultats auxquels nous avons aboutis.

Les résultats montrent que l'apport de Bioactivateur (Fertiactyl) a un effet satisfaisant sur les paramètres morphologiques de la tomate. Une intention particulière est à signaler quant à l'effet du Biofertilisant (jus formulé de lombricompost) sur tous les paramètres considérés. Les mêmes résultats expriment un effet favorisant des algues marines (Algasmar) et la solution d'oligoéléments sur les paramètres morphologiques mais avec un degré moindre par comparaison au Biofertilisant.

A partir des résultats obtenu on peut constaté que le taux d'infestation des feuilles par des larves de *T. absoluta* sont réduites sous l'effet du Biofertilisant, d'un autres coté les plantes traitées par des algues marines et de Bioactivateur représentent une densité élevée des populations des larves . En fin une forte densité des populations est à signaler sous l'effet de la solution d'oligoéléments.

La densité des différentes formes biologiques des larves montre une nette diminution des larves L1 sous l'effet du Biofertilisant, du Bioactivateur et des algues marines. De leur coté, les larves L2 expriment une stabilité très apparente sous l'effet de Biofertilisant et de Bioactivateur, par contre, les algues marines et la solution d'oligoéléments affichent un effet modéré sur la densité des larves L2. La densité des larves L3 se montre très sensible à l'effet de Biofertilisant, des algues marines et de Bioactivateur. En revanche, la densité des larves L4 semble réagir au Bioactivateur et aux algues marines sachant qu'il n'y a aucune apparition des larves L4 sur les plantes traitées par le Biofertilisant.

Les mêmes résultats montrent que les plantes traitées par le Biofertilisant ne présentent aucune infestation par la noctuelle *A. gamma* par apport aux autres plantes ayant subis les autres molécules.

Par ailleurs, les résultats de notre étude affichent l'absence de carence en Fer sous l'effet de Biofertilisant et des algues marines contrairement aux plantes qui ont subi des molécules de Bioactivateur et de la solution d'oligoéléments qui, elles présentent des carences remarquables en Fer.

L'étude de la réaction des plantes aux infestations par les bioagresseurs (*Tuta absoluta* et *Autographa gamma*) a permis de mettre en évidence l'existence

Conclusions et Perspectives

d'éliciteurs de défense naturelle des plantes dans les formulations. Ceci pourra offrir une stratégie supplémentaire dans les programmes de la production intégrée.

En perspective, il serait intéressant d'instaurer un programme d'apport de fertilisants sur la base des connaissances accumulées via cette approche. Le recours à une évaluation de certains paramètres physiologiques (ex. Osmo-régulateurs) nous permet de bien connaître le mode et les conditions d'applications des différentes molécules. Connaître l'opportunité d'apport sur différents modèles végétales (grandes cultures, arboriculture et Culture légumières).

- ✓ Mieux comprendre aussi les interactions plante- conduite culturale pour améliorer la protection des cultures.
- ✓ Favoriser par les techniques culturales les voies métaboliques qui concourent à limiter le développement des bioagresseurs (caractérisation des mécanismes de défense des plantes).
- ✓ Evaluer les effets d'autres éléments fertilisants et les combinaisons de modes d'irrigation et de fertilisation.
- ✓ Valider de nouvelles stratégies de protection biologique au champ (y compris l'utilisation de Stimulateurs des Défenses des Plantes).