



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la vie
Département des Sciences Agronomiques

MÉMOIRE DE MASTER

Science de la Nature et de la Vie
Sciences Agronomiques
Spécialité : Protection des végétaux

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
BENMERIEM Mohammed Elkhames

Le : 10 juin 2024

Contribution à la recherche d'une méthode d'identification des nématodes

Jury :

Mme. SAIGHI SAIDA	MAA	Université Mohamed Khider Biskra	Président
Mme. SAADI INES	MCA	Université Mohamed Khider Biskra	Rapporteur
Mme. ALLOUI RAFIKA	MAB	Université Mohamed Khider Biskra	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

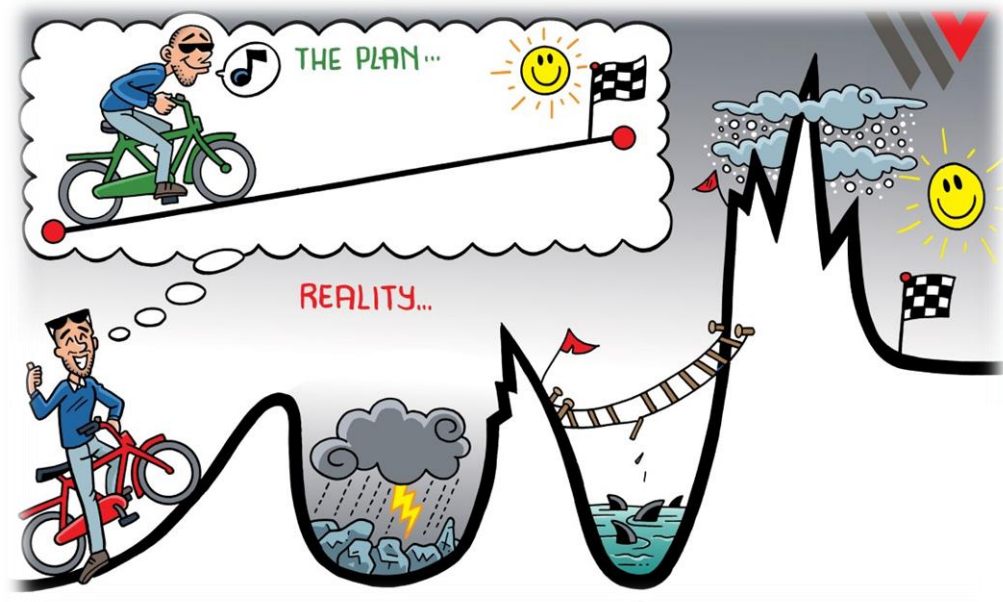
Dédicace

Oui, la différence entre ce que j'imaginai et la réalité était grande...

Oui, ça a été difficile...

Mais oui... c'est terminé... C'est vraiment la fin du voyage...

Du fond du cœur, MERCI... à tous ceux qui m'ont tenu la main et m'ont accompagnée jusqu'à la fin...



A ma mère (HIDANI, Dj), à mon père (BENMERIEM, R)...

A mes chères sœurs : Chahinaz, Nour Elhouda.

A mes frères : Mohammed Alamin, Nasre Eddin, Ishak.

Med Elkhames

Remerciements

Mes remerciements les plus profonds et inexprimables s'adressent avant tout à ALLAH le tout puissant, de nous avoir accordé la force, la santé et le courage afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

Ma très profonde reconnaissance et nos sentiments les plus sincères vont à notre Encadreur, **M^{me} SAADI Ines**, maître de conférences A au Département des Sciences Agronomiques de la Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Mohamed Kheider-Biskra, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant d'encadrer ce travail, de le diriger avec tant de compétence et de gentillesse. Pour ses conseils et ses orientations éclairées.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à **M^{me} MABREK Naima**, cheffe du département d'agronomie à l'Université de Biskra, pour le soutien considérable qu'elle m'a apporté à tous les niveaux.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur **GUIMEUR Kamel** professeur à l'université de Biskra et responsable du laboratoire **Diversité des Ecosystèmes et Dynamiques des Systèmes de Production Agricoles en Zones Arides « DEDSPAZA »**, pour m'avoir accordé l'opportunité de travailler au sein de son laboratoire et pour son soutien inestimable dans toutes les situations.

J'exprimons aussi mes remerciements aux membres de jury **M^{me} SAIGHI Saida** et **M^{me} ALLOUI Rafika**, au Département des Sciences Agronomiques de la Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Mohamed Kheider-Biskra, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en jugeant notre travail.

Je tiens à remercier également toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

ملخص

تعد المحاصيل الزراعية من بين أهم المحاصيل على المستوى العالمي، حيث تحتل المرتبة الثانية من حيث الإنتاج الزراعي في الجزائر، مما يمنحها أهمية اقتصادية كبيرة. ومع ذلك، فإن هذه المحاصيل الزراعية، مثل غيرها من المحاصيل، تتعرض للعديد من الأمراض والآفات التي تسبب خسائر كبيرة. وتعتبر نيماتودا تعقد الجذور من جنس *Meloidogyne* واحدة من أخطر الآفات، حيث تضم أكثر من 96 نوعًا. وعلى الرغم من التحديات العديدة التي تواجه تحديد هذه الأنواع، فإن دراستنا تهدف إلى إيجاد حل مبتكر، وهو تطبيق يعتمد على مهارات الذكاء الاصطناعي " الشبكة العصبية الالتفافية (CNN) " لتصنيف أو تحديد أنواع جنس *Meloidogyne* وقد أظهر هذا التطبيق نتائج مقبولة حتى الآن، بناءً على البيانات المحلية ويمكن تحسينه مع مرور الوقت.

الكلمات المفتاحية: المحاصيل الزراعية، النيماتودا المتطفلة على النباتات جنس *Meloidogyne* Spp. ، الذكاء الاصطناعي، الشبكة العصبية الالتفافية، التعرف المورفولوجي.

Résumé

Les cultures maraichères sont parmi les cultures les plus importants à l'échelle mondiale, occupant la deuxième place en termes de production agricole en Algérie, ce qui leur confère une place économique significative. Cependant, ces cultures maraichères, comme d'autres cultures, sont exposées à de nombreuses maladies et ravageurs qui causent des pertes importantes. Les nématodes à galle du genre *Meloidogyne*. Est considéré comme l'un des ravageurs les plus dangereux, comprenant plus de 96 espèces. Malgré les nombreux défis rencontrés dans l'identification de ces espèces, notre étude vise à trouver une solution innovante, à savoir une application basée sur les compétences en intelligence artificielle " Le réseau de neurones convolutif CNN" pour classer ou identifié les espèces du genre *Meloidogyne*. Cette application a montré des résultats acceptables jusqu'à présent, sur la base des données locales et peut être améliorée avec le temps.

Mots clés : Culture Maraichère, Nématodes phytoparasites (genre *Meloidogyne* Spp.), L'intelligence artificielle, Le réseau de neurones convolutif, Identification morphologique.

Abstract

The vegetable crops are among the most important crops worldwide, ranking second in terms of agricultural production in Algeria, giving them significant economic importance. However, these vegetable crops, like other crops, are exposed to numerous diseases and pests that cause substantial losses. Root-knot nematodes of the genus *Meloidogyne* are considered one of the most dangerous pests, comprising more than 96 species. Despite the many challenges encountered in identifying these species, our study aims to find an innovative solution, namely an application based on artificial intelligence skills, "the Convolutional Neural Network (CNN)," to classify or identify species of the genus *Meloidogyne*. This application has shown acceptable results so far, based on local data, and can be improved over time.

Keywords : Vegetable crops, Phytoparasitic Nematodes (genus *Meloidogyne* Spp.), Artificial Intelligence, Convolutional Neural Network, Morphological Identification.

Table des abréviations

Spp.	Les espèces
Sp.	Espèce
RKN	Root-Knot Nematodes
MEB	Microscope Electronique à Balayage
PCR	Réaction en Chaîne par Polymérase
qx	Quintaux
OEPP	Organisation Européenne de Protection des Plantes
IA	Intelligence Artificielle
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
CNNs	Réseaux de Neurones Convolutionnels
R-CNN	Réseaux de Neuronaux Convolutionnels Récurrents
DSA	Direction des Services Agricoles
INPV	Institut National de la Protection des Végétaux
µm	Micromètre

Table des figures

Chapitres	Figures	Titres	Pages
Plantes-hôtes et Symptômes causées par le genre <i>Meloidogyne</i> Spp.	Figure 01	Galles dues à <i>M. javanica</i> sur racine de melon (Siddiqi, 2000).	17
Généralité sur les nématodes à galle du genre <i>Meloidogyne</i> Spp.	Figure 02	Caractéristiques morphologiques d'un nématode phytoparasites.	21
	Figure 03	Phylum de Nematoda (d'après Blaxter et al., 1998), (Les clades dans lesquels les nématodes phytoparasites se trouvent sont entourés).	22
	Figure 04	Galles dues à <i>Meloidogyne</i> Sp. sur racine de sur la tomate. Source: University of Minnesota extension	23
	Figure 05	Morphologie et anatomie générales d'un nématode femelles adultes du genre, <i>Meloidogyne</i> Spp. (After Eisenback, 1985.)	24
	Figure 06	Morphologie et anatomie générales d'un nématode mâle adultes du genre, <i>Meloidogyne</i> Spp. (After Eisenback, 1985.)	25
	Figure 07	Morphologie et anatomie générales d'un nématode L2 adultes du genre, <i>Meloidogyne</i> Spp. (After Eisenback, 1985.)	26
	Figure 08	Cycle de vie de <i>Meloidogyne</i> Spp. (Castagnone-Sereno et al, 2013)	27
La classification des images par l'apprentissage profonde (deep learning)	Figure 09	Les relations entre l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond	30
	Figure 10	Structure du réseau neuronal à convolution (Srivastava, 2013).	34
	Figure 11	L'architecture générale d'un réseau de neurones convolutif.	36
	Figure 12	Une opération de convolution.	36
		Les différentes étapes d'extraction des nématodes (Originale. Benmeriem, 2024)	42

Partie expérimentale		Différentes étapes pour montage des femelles de genre <i>Meloidogyne</i> Spp. (Originale. Benmeriem, 2024)	43
	Figure 13	Observation microscopique de la région périnéale de femelle A : Grossissement 40 et B : Grossissement 100	44
	Figure 14	Les Images collectées pour le modèle	44
	Figure 15	Les symptômes sur la partie aériennes du melon (<i>Cucumis melo</i> L.).	47
	Figure 16	Les symptômes sur la partie racinaire du melon (<i>Cucumis melo</i> L.).	47
	Figure 17	Les symptômes sur la partie racinaire du poivron (<i>Capsicum annum</i> L.).	48
	Figure 18	L'interface de site créée	50

Table des tableaux

Chapitres	Tableaux	Titres	Pages
Plantes-hôtes et Symptômes causées par le genre <i>Meloidogyne</i> Spp.	Tableau 01	Principaux maladies qui attaquer la culture de tomate (Andrés et al., 2007).	7
	Tableau 02	Nématodes et principaux ravageurs attaquant les cultures de tomate (Naika et al., 2005 ; Castagnone Sereno et Djian-Caporalino, 2011 ; Ruocco et al., 2011 ; Trottin- Caudal et al., 2011 ; Desneux, 2010).	8
	Tableau 03	Principaux maladies et ravageurs provoquée le fruit du poivron (Messiaen et al., 1991).	9
	Tableau 04	Production de melon en Algérie (Chikhaoui, 2018).	11
	Tableau 05	Principaux ravageurs et maladies du melon (Abdelouhab, 2016).	11
	Tableau 06	Plantes hôtes des <i>Meloidogyne</i> Spp. Dans les sud et les littorales du Algérie (Sellami et al, 1999).	14
Partie expérimentale	Tableau 07	Récapitulatif des enquêtes effectuées sur terrain	48
	Tableau 08	Observation microscopique du la région périnéale de femelle pour les deux espèces	49
	Tableau 09	Performance du modèle de classification	49

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
ملخص.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Table des abréviations.....	VI
Table des figures.....	VII
Table des tableaux.....	IX
Table des matières.....	X
Introduction générale.....	2

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 01 : Plantes-hotes et symptomes causees par le genre

<i>Meloidogyne spp</i>	4
1. Définition de la notion de culture maraîchère	6
2. Les principaux produits des cultures maraîchères	6
2.1. La Tomate	6
2.2. Le Poivron	8
2.3. La Melon	10
3. Les principaux ennemis des cultures maraîchères	12
3.1. Les ravageurs	12
3.2. Les maladies	12
3.3. Les nématodes	13
4. Importance agro-économique	13
5. Plantes-hôtes	14
6. Symptômes	17
6.1. Au niveau des racines	17
6.2. Aux parties aériennes	18

Chapitre 02 : Generalite sur les nematodes a galle du genre	
<i>Meloidogyne spp</i>.....	19
1. Généralités	20
2. Les nématodes phytoparasites	20
3. Diversité interspécifique : le cas des nématodes à galles du genre	
<i>Meloidogyne</i> Goeldi, 1892	23
3.1. Position systématique.....	23
3.2. Morphologie générale.....	24
3.3. Cycle biologique des nématodes du genre <i>Meloidogyne Spp.</i>	27
3.4. Identification	28

Chapitre 03 : La classification des images par l'apprentissage profonde (deep learning).....29

1. Introduction	30
2. Classification des images	31
2.1. Définition de la classification.....	31
2.2. L'objectif de la classification.....	31
2.3. Classification d'images via le l'apprentissage profondeur.....	31
3. Apprentissage profond (Deep learning)	31
3.1. Définition.....	31
3.2. Domaines d'application de l'apprentissage profond	32
3.3. Pourquoi le l'apprentissage profond ?.....	32
4. Les réseaux de neurones convolutifs et leurs fonctions.....	33
4.1. Définition.....	33
4.2. Leurs fonctions.....	34
4.3. L'architecture générale d'un réseau de neurones convolutif...	36
4.4. Les avantages de CNN.....	37
4.5. Les inconvénients de CNN.....	37

PARTIE EXPÉRIMENTALE

1. Objectif.....	40
2. Matériel.....	40
3. Méthode.....	40
3.1. L'enquête.....	40
3.2. Les échantillons collectés.....	41
3.3. Traitements des échantillons.....	41
3.4. Entraînement le modèle sur la classification.....	44

4. Résultats et discussion.....	46
4.1. Résultats.....	47
4.2. Discussion.....	50
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques.....	55
Références électroniques.....	60
Annexe.....	62

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

En Algérie, la culture maraîchère est la 2^{ème} culture après les céréales. Elle occupe une superficie de plus de 330.000 ha avec une production estimée à 8,5 millions de tonnes en 2015 (F.A.O, 2015). Au niveau de la wilaya de Biskra, le maraichage couvre environ 45000 ha dont 5000 ha pratiqués en sous abris. Ainsi, près de 1550 ha sont réservés à la culture de poivron (DSA, 2015).

Comme pour la plupart des plantes cultivées, les cultures maraîchères se trouvent confronter aux différents problèmes d'ordre phytosanitaire entraînant des pertes économiques pouvant aller jusqu'à 100% (Bouhroua, 1991). Tout comme les maladies fongiques telles que le mildiou, l'oïdium et le botrytis, les maladies bactériennes et virales et les animaux constituent aussi un groupe de ravageurs redoutables. Nous notons parmi ces derniers, **les nématodes**, les insectes et les acariens (Bouhroua, 1991).

Les nématodes, en particulier les nématodes à galles du genre *Meloidogyne* Spp., sont parmi les principaux agents pathogènes qui affectent les cultures de légumes en Algérie. Ces parasites provoquent des dégâts considérables en endommageant les systèmes racinaires des plantes, ce qui entraîne une diminution de la croissance et la productivité des cultures. En conséquence, ils représentent une menace majeure pour la sécurité alimentaire et la durabilité de l'agriculture dans le pays.

L'agriculture a fortement évolué et s'est peu à peu digitalisée pour faire face à la demande mondiale. À travers la mécanique et la numérisation, la technologie a progressivement permis d'optimiser le travail des agriculteurs. En effet, à l'instar de l'industrie et des services, le secteur agricole est en pleine révolution digitale. Selon Research et Markets, le marché de l'utilisation de l'IA dans l'agriculture était évalué à 518,7 millions en 2017. D'après les estimations, il pourrait atteindre les 2,6 milliards d'ici l'horizon 2025.

L'introduction des technologies modernes dans le domaine de la biotechnologie et de l'agriculture intelligent ou smart farming représente un défi majeur pour comprendre et lutter contre les maladies affectant les plantes, notamment celles causées par les nématodes. La préservation des cultures agricoles et l'amélioration de leur productivité nécessitent une connaissance précise de la distribution, les genres, espèces, de ces nématodes et de leur impact sur les plantes.

Dans ce contexte, la recherche et le développement de nouvelles technologies, telles que des applications basées sur l'intelligence artificielle avec l'avènement des machines autonomes, drones, capteurs et outils basés sur l'intelligence artificielle permet donc une évolution drastique du secteur, et nous allons plus loin et plus précis 'identification et la classification des nématodes qui offrent des perspectives prometteuses pour améliorer la gestion des maladies et soutenir la durabilité de l'agriculture des légumes en Algérie. En combinant des approches novatrices avec des pratiques agricoles durables, il est possible de réduire les pertes de récoltes causées par les nématodes tout en préservant les ressources naturelles et en garantissant la sécurité alimentaire pour les générations futures.

Notre étude vise à explorer les moyens de développer une application pour identifier et classer les nématodes, en mettant l'accent sur le genre *Meloidogyne* dans les cultures du maraicher en Algérie. En comprenant mieux la distribution et les caractéristiques de ces parasites, il sera possible de développer des stratégies de lutte plus efficaces et moins coûteuses, contribuant ainsi à renforcer la résilience de l'agriculture des maraiches dans notre pays.

Ce manuscrit est présenté en deux parties :

1) Première partie: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Le chapitre 01** : Généralité sur les nématodes phytoparasites et les nématodes à galle du genre *Meloidogyne*.
- **Le chapitre 02** : Les différents principaux cultures maraichères et principaux ravageurs et maladies attaquant les cultures maraiches principalement les nématodes à galle du genre *Meloidogyne*.
- **Le chapitre 03** : L'intelligence artificielle et la classification d'images via le l'apprentissage profondeur avec l'outil de Le réseau de neurones convolutif CNN.

2) Deuxième partie: EXPÉRIMENTALE



**SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE**

CHAPITRE

01

PLANTES-HOTES ET
SYMPTOMES CAUSEES
PAR LE GENRE
MELOIDOGYNE SPP.

1. Définition de la notion de culture maraîchère

Les cultures maraîchères sont des plantes annuelles ou pérennes, arbustives ou herbacées entretenues dans un espace agricole délimité généralement exploité de manière intensive et dont la récolte est vendue en plus ou moins grande quantité et fournit des ingrédients qui participent à la composition des sauces ou des salades (Austier, 1994).

L'agriculture maraîchère est, en général, une culture de contre-saison qui exploite les nappes d'eau souterraines pendant la saison sèche. Elle est limitée dans l'espace et nécessite une technicité élaborée pour assurer le drainage et la maîtrise de l'irrigation (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

2. Les principaux produits des cultures maraîchères

2.1. La Tomate

2.1.1 Généralité

La tomate est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille Solanaceae et est originaire de l'Amérique du sud (Nyabyenda, 2007). Elle est cultivée sous toutes les latitudes dans des conditions très variées de climat ou de mode de production. La consommation par individu, que ce soit en tomates fraîches ou transformées, ne cesse d'augmenter à l'échelle mondiale (Blancard, 2009).

2.1.2. Position systématique de la Tomate

Bien que les taxonomistes aient récemment réintroduit son nom original, *Solanum lycopersicon* Mill, le nom communément accepté et toujours valide est *Lycopersicon esculentum* Mill. (Heuvelink, 2005).

Règne : Plantae

Sous règne : Trachenobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous classe : Asteridae

Ordre : Solanales

Famille : Solanaceae

Genre : *Solanum* ou *Lycopersicon*

Espèce : *Lycopersicon esculentum* Mill (Cronquist, 1981)

2.1.3. Evolution de la production

La production nationale de la tomate fraîche s'est établie à 13,72 millions de quintaux (qx) durant la campagne 2017-2018 (Messiaen et Lafon, 2018). Le rendement a été de 428 quintaux/ha pour la tomate plein champ et 1 225 quintaux/ha pour la tomate sous serre, a précisé la même source. Les plus grandes wilayas productrices de la tomate fraîche sont Biskra avec une production de 2,3 millions de quintaux, Mostaganem avec une production de 1,3 million de quintaux, Tipaza avec 1,0 million de quintaux et Ain Defla avec 728 250 quintaux. Outre la tomate fraîche, la production de la tomate industrielle (destinée à la transformation), elle a été de 15,4 millions de quintaux durant la campagne 2017-2018, avec un rendement de 651 quintaux/ha. Les plus grandes wilayas productrices de la tomate industrielle sont Skikda avec une production de 4,7 millions de quintaux, Tarf avec 3,5 millions de quintaux, Guelma avec 2,1 millions de quintaux et Ain Defla avec 1,7 million de quintaux (Messiaen et Lafon, 1991).

2.1.4. Maladies et ravageurs de la Tomate

La tomate est sujette à diverses attaques de ravageurs (acariens, insectes et nématodes) et de maladies cryptogamiques, bactériennes et virales. Elle peut être également concurrencée par des mauvaises herbes et agressée par des facteurs abiotiques dont l'importance varie selon plusieurs facteurs, comme le mode d'installation en plein champ ou sous abris Chibane (1999).

Tableau 1 : Principaux maladies qui attaquer la culture de tomate (Andrés et al., 2007).

La culture	Maladies cryptogamiques	Maladies bactériennes	Maladies virales
La tomate	<ul style="list-style-type: none"> • Pourriture grise • Mal blanc • Mildiou • Alternariose 	<ul style="list-style-type: none"> • Chancre bactérien • Moucheture bactérienne 	<ul style="list-style-type: none"> • CMV (Cucumber Mosaic Virus) • TSWV (Tomato Spotted Wilt Virus) • TYLCV (Tomato Yellow Leaf Curl Virus)

Tableau 2 : Nématodes et principaux ravageurs attaquant les cultures de tomate (Naika et al., 2005 ; Castagnone-Sereno et Djian-Caporalino, 2011 ; Ruocco et al., 2011 ; Trottin- Caudal et al., 2011 ; Desneux, 2010).

Ravageurs	Agent causal	Symptômes
Nématodes	<i>Meloïdogyne icognita</i> <i>Meloïdogyne arenaria</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Nodosités (gales ou kystes) sur les racines. • Réduction de la croissance de la plante. • Flétrissement de la plante.
Acariens	<i>Tetranychus urticae</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Coloration bronzée ou brun roux. • Dessèchement et meurt des plantes les plus atteintes
Aleurodes	<i>Bemisia tabaci et</i> <i>Trialeurodes</i> <i>vaporariorum</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de la fumagine. • Coloration irrégulière des fruits.
Pucerons	<i>Macrosiphum</i> <i>euphorbiae,</i> <i>Myzus persicae,</i> <i>Aulacorthum solani et</i> <i>Aphis gossypii</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de la fumagine sur les feuilles et les fruits. • Croissance limitée et déformation des feuilles et des fruits
Thrips	<i>Frankliniella</i> <i>occidentalis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Les nymphes se nourrissent du pollen des fleurs et des jeunes fruits. • Lésions sur le limbe qui se nécrose pour prendre une teinte beigeâtre.
Mineuse de la tomate	<i>Tuta absoluta</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mines remplies d'excréments dans les feuilles, les bourgeons et les fruits. • Les semis endommagés peuvent cesser de pousser et mourir.

2.2. Le Poivron

2.2.1 Généralité

Le poivron (*Capsicum annum* L.) est originaire d'Amérique centrale et d'Amérique du sud, elle a un peu plus d'un siècle abordé et conquis tous les continents dans leurs parties tropical sous tempérées chaudes (Pochard et al., 1992).

Il est cultivé dans toutes les régions tropicales du monde, ainsi que dans les régions tempérées chaudes (Polese et Devaux, 2007).

2.2.2. Position systématique de la Poivron

Règne : Plantae

Division : Agnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Solanales

Famille : Solanaceae

Genre : *Capsicum*

Espèce : *Capsicum annuum* L.(1753)

2.2.3. Evolution de la production

Le poivron reste l'une des spéculations les plus cultivées à travers les différents continents. Nous constatons de ce fait, à travers le tableau 01, une évolution progressive dans le temps de la superficie mondiale réservée aux cultures du poivron plein champ et sous serre. Cette évolution a été plus particulièrement marquée durant la dernière décennie (Anon, 2006).

De plus, la production mondiale du poivron a connu une évolution progressive au cours du temps en enregistrant une quantité de l'ordre de 20 millions de tonnes en 2000 pour atteindre une valeur de 22 millions de tonnes en 2013, ce qui représente une augmentation annuelle d'environ 4%. Cette nette progression est en rapport direct avec l'élévation des superficies cultivées (Anon, 2006).

2.2.4. Maladies et ravageurs de la Poivron

Le poivron est cultivé dans de nombreux pays du monde et sous divers climats, il subit des attaques d'un grand nombre de ravageurs et de maladies, ainsi que la concurrence des mauvaises herbes, ce qui engendre des pertes considérables de rendement (Abbou, 2012).

Tableau 3 : Principaux maladies et ravageurs provoquée le fruit du poivron (Messiaen et al., 1991).

Les maladies et ravageurs	Agent causal	
Maladies	Les maladies fongiques	Le mildiou L'oïdium La fusariose
	Les maladies bactériennes	Le flétrissement bactérien La moucheture bactérienne La galle bactérienne
	Les maladies virales	La mosaïque de pomme de terre (PVY) La mosaïque du concombre (CMV)

Nématodes		<i>Meloidogyne icognita</i> <i>Meloidogyne javanica</i>
Acariens		<i>Tetranychus urticae</i> <i>Tetranychus cinnabarinus</i>
Insectes	Aleurodes	<i>Bemisia tabaci</i> <i>Trialeurodes vaporariorum</i>
	Pucerons	<i>Myzus persicae</i> , <i>Aphis gossypii</i>
	Thrips	<i>Frankliniella occidentalis</i>

2.3. La Melon

2.3.1 Généralité

Les cucurbitacées sont constituées de 90 genres et 750 espèces. Le genre *Cucumis* contient près de 40 espèces parmi eux trois sont plus cultivées *C. anguria* L. (cornichon antillaise), *C. sativus* (concombre) et *C. melo* L. (cantaloup) (Mudassar Iqbal et al, 2015).

Le Melon (*Cucumis_melo* L.) est une plante herbacée annuelle originaire de l'Inde ou Moyen-Orient, appartenant à la famille des Cucurbitacées et largement cultivée comme plante potagère pour son faux-fruit comestible. Le terme désigne aussi le fruit climactérique lui-même très savoureux, sucré et parfumé (Idris, 2019).

2.3.2. Position systématique de la melon (Idris, 2019).

Règne : Plantae

Sous-règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous-classe : Dilleniidae

Ordre : Violales

Famille : Cucurbitaceae

Genre : *Cucumis*

Espèce : *Cucumis melo* L.1753

2.3.3. Classification variétale (Chikhaoui, 2018)

Tous les melons appartiennent à la même espèce *Cucumis melo*.L. Il existe plusieurs variétés qui se distinguent entre elles par un certain nombre de caractères, suffisamment régulier et stable :

- ✚ Le nom du fruit ;
- ✚ La forme de fruit (ronde, allongée et sphérique) ;
- ✚ La grosseur du fruit ;
- ✚ La couleur de l'écorce (jaune, verte et jaune orangée) ;
- ✚ La couleur de la chair.

2.3.4. Evolution de la production

On produit près de 900 kilos de melons chaque seconde dans le monde (compteur), ce qui correspond à une production mondiale de 28,3 millions de tonnes de melons par an, dont près de la moitié en Chine. (Jones, 2001). En Algérie La production nationale du melon est faible contrairement à celle de la pastèque, pour, cela elle est comptabilisée avec celle « des autres légumes » dans les statistiques officielles du ministère de l'agriculture, dont la variété « jaune canari » la plus cultivée. (Chikhaoui, 2018).

Tableau 4 : Production de melon en Algérie (Chikhaoui, 2018).

Régions	Biskra	Borj Menaïel	Annaba	Tébessa	Sidi Bel Abbes	Skikda
Quantités (QX)	210 000	158 000	109 000	66 000	65 000	58 000

2.3.5. Principaux ravageurs et maladies du melon

Le melon est souvent attaqué par des parasites et des maladies qui peuvent compromettre gravement la récolte. Par exemple : l'oïdium qui attaque les feuilles et les Fusariums qui attaquent les racines et les tiges. (Abdelouhab, 2016).

Tableau 5 : Principaux ravageurs et maladies du melon (Abdelouhab, 2016).

La culture	Ravageurs	Champignons	Virus	Bactéries
Melon	Pyrale du maïs Nématodes Vers gris	Mildiou Oïdium Fusariose Verticilliose	Mosaïque du concombre Mosaïque de la pastèque	Bactériose du melon Flétrissement bactérien

3. Les principaux ennemis des cultures maraîchères

3.1. Les ravageurs

3.1.1. Les insectes

Tous les insectes qui piquent et qui sucent, tels que les mouches blanches, les thrips et les pucerons, ne provoquent des dommages mécaniques que lorsqu'ils surviennent en grands nombres, mais les virus qu'ils peuvent transmettre provoquent des dommages bien plus importants (Naika et al., 2005). Ces insectes peuvent survenir de l'extérieur du champ cultivé, et l'un d'entre eux pourra causer la contamination de la totalité des cultures. Par ailleurs, les feuilles qui ont été blessées par des insectes deviennent plus sensibles aux infections par des maladies fongiques et bactériennes. Lorsque les cultures sont sous abri : du verre clos, des films plastiques, des filets anti-moustiques ou encore une combinaison de ces matériaux, elles seront protégées contre les attaques d'insectes et les infestations de virus (Naika et al., 2005).

3.1.2. Les acariens

Les acariens du genre *Tetranychus* sont des arthropodes qui ressemblent aux araignées. Ils mesurent moins d'1 mm, leur couleur est souvent jaune, rouge ou orange. Ils pondent leurs œufs sur le côté inférieur des feuilles. Les larves et les insectes adultes sucent la sève des plantes. Les feuilles et les tiges jaunissent et se dessèchent. Les acariens peuvent fabriquer des toiles en fils légers qui ressemblent aux toiles d'araignée. Les dommages qu'ils provoquent sont les plus importants pendant la saison sèche (Seck, 2005).

3.2. Les maladies

3.2.1 Les champignons

Parmi les principales infections fongiques des cultures maraîchères on note ce qui suit :

L'anthracnose (*Colletotrichum coccodes*), le mal blanc ou oïdium (*Leveillula taurica*), la verticilliose (*Verticillium albo-atrum*, *Verticillium dahliae*), la fusariose (*Fusarium oxysporum*), le mildiou (*Phytophthora infestans*), l'alternariose (*Alternaria solani*), la pourriture du collet (*Phytophthora capsici*) et la pourriture grise (*Botrytis cinerea*) Les symptômes les plus évidents des maladies fongiques sont sous forme de taches rondes ou ovales sur les feuilles, mais elles peuvent également avoir une forme polygonale ou en fuseau (Naika et al., 2005).

3.2.2. Les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires minuscules. Contrairement aux moisissures, dont les spores germent puis sont capables de pénétrer la peau intacte d'une plante (Naika et al., 2005). La plupart des maladies bactériennes sont transmises dans des conditions d'humidité et de température élevées. Une fois qu'elle a pénétré la plante, une bactérie aboutit généralement dans le système vasculaire des tiges, racines et feuilles, provoquant souvent le flétrissement de ces dernières (Naika et al., 2005). Parmi les maladies bactériennes qui causent des dégâts au niveau des cultures

maraiçhères on trouve le flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*), le feu bactérien (*Xanthomonas axonopodis* p.v. *vesicatoria*) et le chancre bactérien (*Clavibacter michiganense*) (Naika et al., 2005).

3.3.3. Les virus

Les cultures maraiçhères en générale sont très sensibles aux maladies virales. Un virus est un pathogène microscopique ayant une structure de protéines que l'on ne peut pas discerner à l'œil nu. Il est souvent propagé dans la culture par des insectes vecteurs comme les mouches blanches, les thrips et les pucerons. Les dommages provoqués sont généralement bien plus importants que les blessures physiques causées par l'insecte vecteur (Naika et al., 2005).

3.3. Les nématodes

Les cultures maraiçhères sont attaquées par un grand nombre de nématodes : *Criconemoides*, *Helicotylenchus*, *Longidorus*, *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Rotylenchulus*, *Rotylenchus*, *Tylenchorhynchus*, *Tylenchulus*, *Tylenchus*, et *Xiphinema*. (Seinhorst, 1962). Mais les nématodes à galles du genre *Meloidogyne* sont probablement les ennemis les plus redoutables des maraiçhers sous toutes les latitudes (Blancard, 1988 ; Ghelamallah, 2009). Ces nématodes ont une large gamme d'hôtes parmi lesquels nous citons les plantes cultivées. Ils sont souvent transmis par les transplants, le matériel agricole, les animaux, le fumier et les eaux de ruissellement (Ghelamallah, 2009).

Plus de 90 espèces ont été décrites (Jones et al., 2013), dont 23 en Europe (Wesemael et al., 2011), mais seulement quatre d'entre elles sont considérées comme particulièrement nuisibles : *M. incognita*, *M. arenaria*, *M. javanica* et *M. hapla*, (Wesemael et al., 2011).

4. Importance agro-économique

L'attention particulière portée aux *Meloidogyne* comme modèle biologique pour de nombreuses études est due à leur impact agro-économique majeur et à leur répartition géographique mondiale sur une large gamme d'hôtes. On les rencontre dans toute la zone intertropicale et dans les régions tempérées chaudes (e.g. le bassin méditerranéen) comme par exemple *M. incognita*, *M. javanica*, *M. arenaria*. Certaines espèces (e.g. *M. hapla*, *M. chitwoodi* et *M. fallax*) remontent même dans des latitudes Nord faibles et on les trouve fréquemment dans les serres des pays tempérés froids (De Guiran & Netscher, 1970). Ces nématodes sont de redoutables bio-agresseurs parasitant plus de 5500 espèces de plantes (Blok et al., 2008). Ils s'attaquent aussi bien aux grandes cultures (céréales, pommes de terre, betterave, etc.), qu'aux cultures maraiçhères, florales et fruitières (Djian-Caporalino et al., 2009). Les galles qu'ils provoquent sur les racines peuvent envahir tout le système racinaire, induisant un flétrissement et un retard de la croissance. En cas d'attaque prononcée, ces dégâts peuvent conduire à la mort de la plante. Au niveau mondial, on estime les pertes dues à *Meloidogyne* à environ 100 milliards de dollars par an (Bird & Kaloshian, 2003). En Europe, ils sont responsables de 10% de la réduction de la production céréalière et de 20 à 30% de diminutions de récoltes dans les vergers d'agrumes méditerranéens (Feldmesser, 1971). En outre, par les lésions qu'ils provoquent, ces nématodes entraînent des infestations

secondaires d'autres pathogènes fongiques ou bactériens (*Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Fusarium*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*). Les problèmes phytoparasites causés par les *Meloidogyne* se révèlent de plus en plus préoccupants et peuvent devenir dramatiques dans les années à venir (Djian-Caporalino et al., 2009). En plus, des espèces de *Meloidogyne* telles que *M. chitwoodi* et *M. fallax* sont déclarées espèces de quarantaine en Europe par l'Organisation Européenne de Protection des Plantes (OEPP) (liste A2). Une attention particulière est portée à quatre espèces principales : *M. arenaria*, *M. incognita*, *M. javanica* et *M. hapla* qui sont les plus dispersées au niveau mondial et qui ont la plus large gamme d'hôtes.

5. Plantes-hôtes

L'étude menée par Sellami et al, 1999 à travers les principales zones pratiquant les cultures sous abri plastique (superficie de 20 ha, les cultures maraichères) durant la période 1990-1995 a permis de déterminer la distribution des espèces de *Meloidogyne* dans huit wilayates (trois sont situées au Sud du pays (Adrar, Biskra, Ouargla) et cinq dans les zones littorales (Alger, Boumerdes, Tipaza, Bejaia et Jijel). Les quatre principales espèces sont présentes avec une dominance de *M. javanica* dans les zones sahariennes et *M. incognita* dans les zones littorales, *M. arenaria* et *M. hapla* sont faiblement représentées. Au total 54 plantes appartenant à 21 familles botaniques différentes sont infestées par ces nématodes, parmi lesquelles 30 sont des plantes spontanées (Sellami et al, 1999).

Tableau 6 : Plantes hôtes des *Meloidogyne* Spp. Dans les sud et les littorales du Algérie (Sellami et al, 1999).

Plantes hôtes		Espèces de <i>Meloidogyne</i>	Indice de galle	Lieux
AMARANTHACEES	<i>Amarantbus retroflexus</i> L.	<i>Mi</i>	2	Littoral algérois
	<i>A. hybridus</i> L.	<i>Mj</i>	2	Bejaia, Jijel
	<i>A. angustifolius</i> Lamk			Ouargla, Biskra
CHENOPODIACEES	<i>Cbenopodium murale</i> L.	<i>Mi</i>	2	Ouargla, Adrar, Biskra
	<i>C. album</i> L.	<i>Mi</i>	2	Littoral algérois
	<i>C. hybridum</i> L.	<i>Mi</i>	1	
	<i>Beta vulgaris</i> L.	<i>M. sp</i>	1	
	<i>Sueda fruticosa</i> L.	<i>M. sp</i>	1	Adrar, Biskra
	<i>Salicornia fruticosa</i> L.			Biskra
COMPOSEES	<i>Lactuca sativa</i> L.	<i>Mi Mj</i>	3	Littoral algérois
	<i>Soncbus oleraceus</i> L.	<i>Mi Mj</i>	1	Adrar, Biskra
	<i>S. maritimus</i> L.	<i>Mi Mj</i>	1	Adrar, Ouargla

CONVOLVULACEES	<i>Convolvulus arvensis</i> L. <i>C. supinus</i> Coss et Kral.	<i>Mi Mj</i> <i>Mj</i>	1 1	Littoral algérois, Ouargla Biskra, Adrar, Ouargla
CRUCIFERES	<i>Brassica napus</i> L.	<i>Mj</i>	2	Ouargla, Adrar
CUCURBITACEES	<i>Cucumis sativus</i> L. <i>C. pepo</i> L. <i>C. melo</i> L. <i>C. melo (catalupensis)</i> L. <i>Citrullus vulgaris</i> L. <i>Cucurbita maxima</i> L.	<i>Mi Mj</i> <i>Mi</i> <i>Mi Mj</i> <i>Mi Mj</i> <i>Mi</i> <i>Mj</i>	4-5 3 3-4 3 3 3	Littoral algérois, Jijel Adrar, Ouargla Biskra Biskra, Adrar Ouargla, Adrar Ouargla, Adrar
CYPERACEES	<i>Cyperus rotundus</i> L.	<i>Mi</i>	1	Littoral algérois, Ouargla
EUPHORBIACEES	<i>Euphorbia granulata</i> Forsk.	<i>M. sp</i>	1	Adrar
FRANKENIACEES	<i>Frankinia pulverulenta</i> L.	<i>M. sp</i>	1	Adrar, Ouargla, Ghardaia
FUMARIACEES	<i>Fumaria capreolata</i> L.	<i>Mi</i>	1	Littoral algérois
GRAMINEES	<i>Setaria viridis</i> L. <i>S. verticillata</i> L. <i>Cynodon dactylon</i> L. <i>Panicum milliaceum</i> L. <i>Cbloris gayana</i> Kunth.	<i>Mi</i> <i>Mi</i> <i>Mi</i> <i>Mi</i> <i>M. sp</i>	1 1 1-2 1 1	Littoral algérois Littoral algérois, Biskra Ouargla, Adrar, Biskra Littoral algérois Adrar
MALVACEES	<i>Malva sylvestris</i> L. <i>M. parviflora</i> L.	<i>Mi</i> <i>Mj</i>	1 1	Littoral algérois Ouargla, Biskra
MUSACEES	<i>Musa Sapiantium</i> Kuntze	<i>Mi Mj</i>	3	Littoral algérois, Jijel, Bejaia
OMBELIFERES	<i>Daucus carota</i> L. <i>Coriandrum sativum</i> L. <i>Foeniculum officinalis</i> Miller	<i>Mi</i> <i>Mj</i> <i>Mi M. sp</i>	2-3 2 3	Adrar, Ouargla, Littoral algérois

PALMACEES	<i>Pboenix dactylifera</i> L.	<i>Mi Mj</i>	2-3	Ouargla, Biskra
PAPILIONACEES	<i>Pbaseolus vulgaris</i> L. <i>Vicia faba</i> L. <i>Pisum sativum</i> L. <i>Medicago sativa</i> L. <i>Melilotus indica</i> L. <i>M. saleirolii</i> Dudy <i>Aracbis bypogea</i> L.	<i>Mi Mj</i> <i>Ma Mj</i> <i>M. sp</i> <i>M. sp</i> <i>M. sp</i> <i>Mj</i> <i>M. sp</i>	3 3-4 2 2 1 1 2	Littoral algérois, Jijel, Bejaia Biskra, Adrar Biskra, Adrar Biskra, Adrar Jijel, Bejaia Adrar, Ouargla Biskra, Ouargla
PRIMULACEES	<i>Anagalis arvensis</i> L.	<i>Mi Mj</i>	1	Littoral algérois
PORTULACACEES	<i>Portulaca oleracea</i> L.	<i>Mi Mj</i>	2	Littoral algérois, Ouargla, Biskra
SOLANACEES	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. <i>Capsicum annuum</i> L. <i>Solanum melongena</i> L. <i>S. tuberosum</i> L. <i>S. Nigrum</i> L. <i>Nicotiana tabacum</i> L. <i>Salpicroa organifolia</i> Lamk.	<i>Mi Mj Ma Mh</i> <i>Mi Mj Ma</i> <i>Mi Mj</i> <i>Ma Mi</i> <i>Mi Mj</i> <i>M. sp</i> <i>Mj</i>	4-5 2 3-4 3 1 3 1	Littoral algérois, Jijel, Bejaia Adrar, Biskra, Ouargla Biskra, Adrar, Ouargla Biskra Littoral algérois, Adrar, Biskra
TAMARICACEES	<i>Tamarix gallica</i> L.	<i>Mj</i>	1	Adrar, Ouargla
VERBENACEES	<i>Vervena officinalis</i> L.	<i>Mi</i>	1	Littoral algérois

Mi = *Meloidogyne incognita*; *Mj* = *Meloidogyne javanica*; *Ma* = *Meloidogyne arenaria*; *Mh* = *Meloidogyne hapla*.

6. Symptômes

6.1. Au niveau des racines

Le symptôme primaire, typique d'une infection par *Meloidogyne*, est la présence de galles sur les racines. Ces galles, malgré des différences de taille et de forme, ont toujours le même mode de formation et la même structure de base. Dès son entrée dans la racine, la larve de deuxième stade provoque, par les sécrétions qu'elle expulse à travers son stylet, l'hypertrophie des cellules corticales. Elle migre ensuite vers la future zone vasculaire le long de laquelle elle vient s'immobiliser, la tête logée dans la partie externe de cette zone (Bird, 1962). Les quelques cellules entourant la tête de la larve, aux dépens desquelles elle se nourrit, subissent alors une série de modifications qui ont été décrites très en détail par (Christie, 1936).

Dans une galle formée sur une jeune racine par une seule larve femelle de *Meloidogyne* (fig.8) on trouve donc, au centre un renflement du cylindre central où les éléments vasculaires sont fortement déformés et qui contient de quatre à six cellules géantes entourant la tête de l'animal. La partie globuleuse du corps de la femelle est entourée par le parenchyme cortical qui a subi à la fois une hyperplasie et une hypertrophie cellulaires. L'extrémité postérieure de la femelle, où s'ouvre la vulve, affleure à la surface de la galle, et la masse gélatineuse englobant les œufs fait saillie à l'extérieur des tissus de l'hôte (fig.8).



Figure 1 : Galles dues à *M. javanica* sur racine de melon (Siddiqi, 2000).

6.2. Aux parties aériennes

Il n'y pas, de symptômes spécifiques sur les parties aériennes, , traduisant sans doute possible le parasitisme de *Meloidogyne*. Il s'agit plutôt d'une déficience générale, consécutive d'une part à l'action du parasite qui modifie le métabolisme de la plante et en détourne une partie à son profit, mais surtout à la réduction du système racinaire qu'entraîne sa présence (Daulton, 1961).

Cette réduction a pour première conséquence une diminution de l'alimentation minérale de la plante. La partie aérienne présente alors un aspect chétif : la croissance est retardée, les feuilles sont réduites et peuvent accuser des symptômes de déficience minérale (chlorose, décoloration, etc.). La floraison et, partant, la fructification, peuvent être fortement diminuées (Daulton, 1961).

L'absence de chevelu racinaire entraîne en outre une perturbation dans l'alimentation en eau : la plante attaquée souffrira plus vite de la sécheresse en montrant des symptômes de flétrissement qui apparaissent sur l'ensemble du feuillage aux heures chaudes de la journée et disparaissent le soir. Si la sécheresse se prolonge, on peut assister à un dessèchement marginal des feuilles et à leur chute prématurée (Bird, 1962).

Tout ceci amène inmanquablement une diminution de rendement, quelle que soit la partie de la plante qui doit être récoltée. Cette diminution est fonction de la population qui vit aux dépens de la plante et qui tend évidemment à croître lorsqu'on cultive pendant plusieurs années une plante sensible sur un terrain infesté (Daulton, 1961 ; Bird, 1962).

Outre sa diminution en quantité que nous venons d'évoquer, la récolte peut également subir une dépréciation du fait des *Meloidogyne*. Cette dépréciation est surtout sensible lorsque la récolte porte sur la partie souterraine de la plante (Daulton, 1961).

CHAPITRE

02

GENERALITE SUR LES
NEMATODES A GALLE
DU GENRE
MELOIDOGYNE SPP.

1. Généralités

Les nématodes (Némathelminthes) ou "vers ronds", forment un groupe zoologique d'organismes vermiformes. Ils sont dépourvus de membres et de squelette et ont la forme d'un fuseau. Ils présentent une symétrie bilatérale. Le corps est non segmenté et recouvert d'une épaisse cuticule. La majorité des nématodes telluriques mesurent entre 0,6 et 0,8 mm de long et entre 0,025 à 0,50 mm de large (Sumenkova, 1988), certains comme les Longidoridae atteignant 4 mm. Ils sont ubiquistes (toutes latitudes et tous climats) en ayant colonisé tous les types de milieux : les eaux continentales et océaniques (salées et douces) et les sols. Certains d'entre eux se sont adaptés à la vie parasitaire chez l'homme, les animaux et les végétaux (Coyne et al., 2010).

Organismes aquatiques aérobies, ils se déplacent dans le sol dans l'eau porale en ondulant grâce à leurs muscles longitudinaux. Les nématodes ont une capacité de colonisation très élevée, et peuvent être échantillonnés à toutes les saisons. En outre, certaines espèces de nématodes peuvent résister à des conditions extrêmes puisqu'il est possible de les congeler ou de les déshydrater à des fins expérimentales (Bongers, 1990). Les nématodes telluriques sont microscopiques, donc difficiles voire impossibles à observer à l'œil nu. Ils sont majoritairement présents dans les couches superficielles du sol (horizon A), mais peuvent également se trouver dans les zones de prospection racinaire profonde (cas des espèces ligneuses) (Lee, 2002). Ils constituent l'un des groupes d'animaux les plus nombreux et les plus répandus dans le sol, et les mieux caractérisés d'un point de vue taxonomique (Lee, 2002). C'est le plus grand phylum animal, avec environ 27 000 espèces décrites à ce jour. Cependant, une grande portion (300 000 à 500 000 espèces) reste encore à décrire (Hugot et al., 2001). Dans le sol, les nématodes sont les animaux les plus abondants après les protozoaires. Ils comptent de 100 à 1000 individus/g de terre, soit de 1 à 30 millions /m² (biomasse = 1 à 30 g/m²) (Floyd et al. 2002). On peut compter plus de 100 000 individus appartenant à une centaine d'espèces dans un cm³ de sol (Gobat et al., 2003). On les différencie en fonction de leur mode trophique : ils peuvent être bactériophages, mycophages, saprophages, prédateurs d'autres organismes du sol, zooparasites et phytoparasites (Yeates et al., 1993). D'un point de vue écologique, les nématodes du sol, et en particulier les omnivores et les bactérivores, sont impliqués dans différentes fonctions du sol telles que le cycle du carbone et de l'azote, le cycle des éléments minéraux et la décomposition de la matière organique (Ingham et al., 1985).

2. Les nématodes phytoparasites

Les nématodes phytoparasites se trouvent généralement dans le sol ou à l'intérieur des cellules végétales racinaires et parfois foliaires, des tiges ou dans les semences. Ils se distinguent des autres groupes de nématodes du sol par la présence d'une pièce buccale spécialisée : le stylet (Figure 1) qui leur sert à perforer les cellules végétales, à y injecter des enzymes lytiques et à en extraire la sève végétale, d'une manière très semblable aux aphidés (puccerons) (Coyne et al., 2010). Leurs glandes salivaires excrètent des substances qui peuvent produire des modifications dans les tissus. Ces sécrétions semblent jouer un rôle crucial dans l'infection et la formation de cellules de la plante hôte en site nourricier comme c'est le cas pour les nématodes à galles *Meloidogyne* et

les nématodes à kystes Heterodera (Hussey et al., 1994 ; Williamson & Gleason, 2003). Les NPP pondent leurs œufs dans le sol ou dans les tissus racinaires.

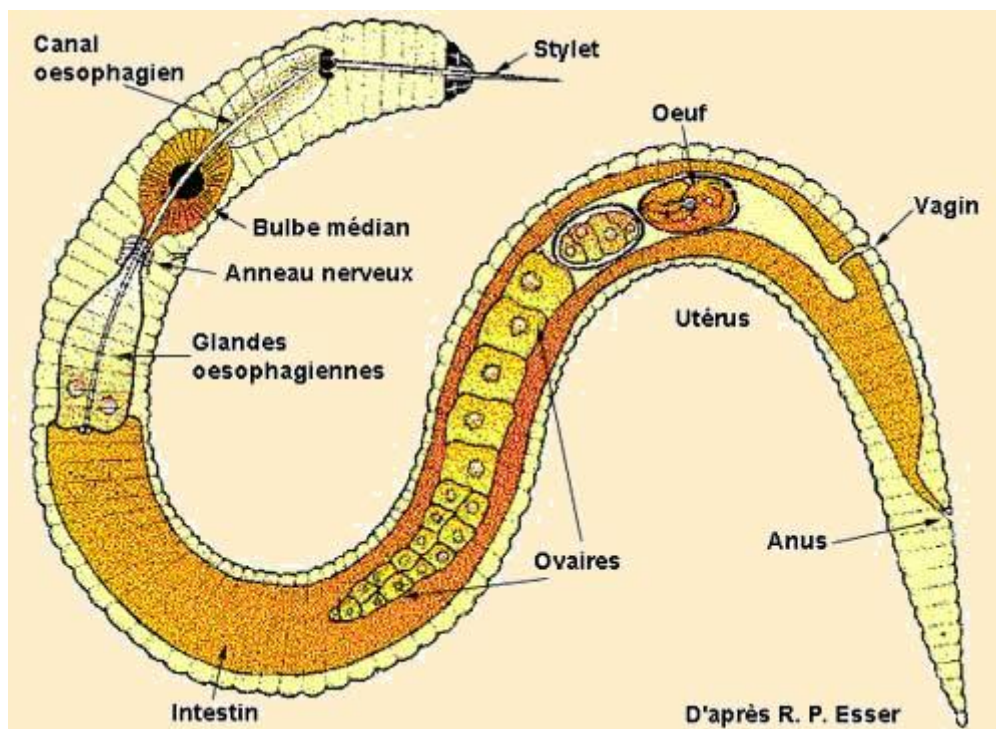


Figure 02 : Caractéristiques morphologiques d'un nématode phytoparasites. Source : R.P. Esser (<http://www.congo.ird.fr/html/nematode.htm>).

Les nématodes phytoparasites parasitent tous les types de cultures (céréalières, maraîchères, florales et fruitières, etc.) (Djian-Caporalino et al., 2009). Leurs activités parasitaires se traduisent par différents types de symptômes sur la plante tels que le flétrissement, le nanisme, le jaunissement, les carences nutritives...etc. (symptômes totalement atypiques) (Powell, 1971). Sur les racines, ils causent généralement des nécroses racinaires, et, dans certains cas spécifiques, la formation de galles sur les racines (pour le genre *Meloidogyne*) (Powell, 1971). Les blessures racinaires causées par les nématodes phytoparasites permettent également la pénétration de champignons phytopathogènes (Powell, 1971). Certains nématodes peuvent aussi transmettre des maladies virales (Taylor & Brown, 1997). Les dégâts occasionnés par ces parasites sont très importants au niveau mondial, puisqu'ils sont estimés à 20 à 30 % de la production agricole (Cayrol et al., 1994), représentant des pertes annuelles de récolte évaluées à plusieurs millions de tonnes (Agrios, 2005). Les pertes causées par les nématodes phytoparasites sont généralement plus prononcées dans les régions tropicales que les régions tempérées (Agrios, 2005). Cela tient à une diversité des pathogènes plus importante, à des conditions environnementales plus favorables à leur développement, à leur reproduction et à leur dispersion, et à une moindre utilisation de moyens efficaces pour les combattre (De Waele & Elsen, 2007).

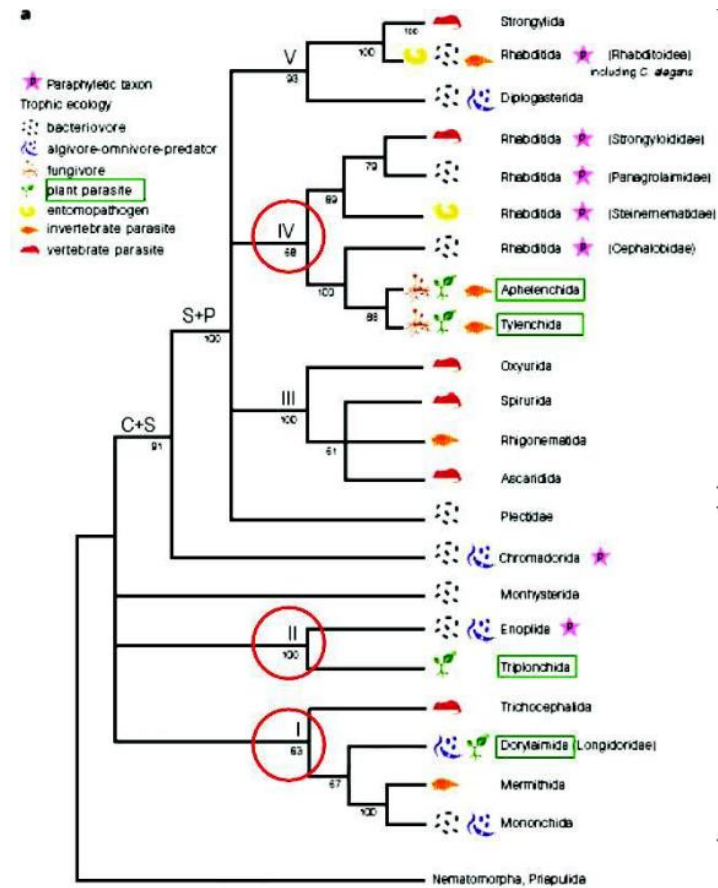


Figure 3 : Phylum de Nematoda (d'après Blaxter et al., 1998), (Les clades dans lesquels les nématodes phytoparasites se trouvent sont entourés).

3. Diversité interspécifique : le cas des nématodes à galles du genre *Meloidogyne* Goeldi, 1892

Les *Meloidogyne*, appelés communément « nématodes à galles des racines » ou « root-knot nematodes » RKN), représentent un genre de nématodes phytoparasites sédentaires obligatoires. Ces nématodes tirent leur appellation commune du fait qu'ils entraînent sur les racines des plantes parasitées la formation de renflements caractéristiques ou galles, très facilement reconnaissables (Figure 3).

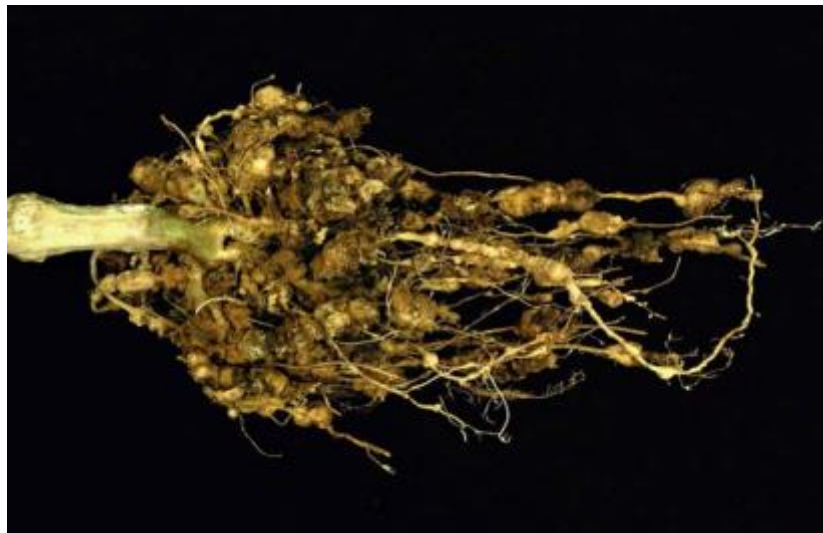


Figure 4 : Galles dues à *Meloidogyne* Sp. sur racine de sur la tomate .Source: University of Minnesota extension

3.1. Position systématique

La classification du genre *Meloidogyne* Spp. :

Phylum : Phylum Nematoda (Cobb, 1919)

Classe : Secernentea (Von Linstow, 1905)

Sous-classe : Diplogasteria (Inglis, 1983)

Ordre : Tylenchida (Thorne, 1949)

Sous-ordre: Hoplolaimina (Thorne, 1949; Chitwood, 1950)

Super-famille: Hoplolaimidae (Filipjev, 1934)

Famille: Meloidogynidae (Scarbilovich, 1959)

Sous-famille: Meloidogyninae (Siddiqi, 2000).

Genre : *Meloidogyne* (Göldi, 1892)

Espèce : *Meloidogyne* Spp. (Chitwood, 1949)

3.2. Morphologie générale

A. Femelles

Les femelles adultes du genre *Meloidogyne* ont des corps gonflés dont la longueur médiane varie d'environ 0,44 à 1,30 mm et la largeur médiane d'environ 0,325 à 0,700 mm. Le cou fait saillie vers l'avant ; la vulve et l'anus sont situés en phase terminale, au ras de la région périnéale ou ils peuvent être légèrement relevés. Chez la plupart des espèces, les femelles ont des corps symétriques et le cou et la région périnéale sont en ligne droite. Chez certaines espèces, cependant, le cou se projette de l'axe longitudinal à un angle de 15-90° sur un côté (Eisenback, 1985).

Le corps blanc nacré a une cuticule moyennement épaisse qui reste douce tout au long de la vie de la femelle. Le cadre céphalique hexa radié cuticulaire entoure la cavité stomatique, qui détient un stylet creux saillant. Le stylet délicat se compose d'un cône, d'un arbre et de boutons et mesure 10 à 24 µm de longueur parmi les espèces. La plupart des espèces ont des longueurs de stylet moyennes de 14,0 à 16,0 µm. Le stylet est déplacé par les muscles rapporteurs et fonctionne comme une aiguille hypodermique. La morphologie du stylet est un bon caractère supplémentaire pour l'identification des espèces (Eisenback, 1985).

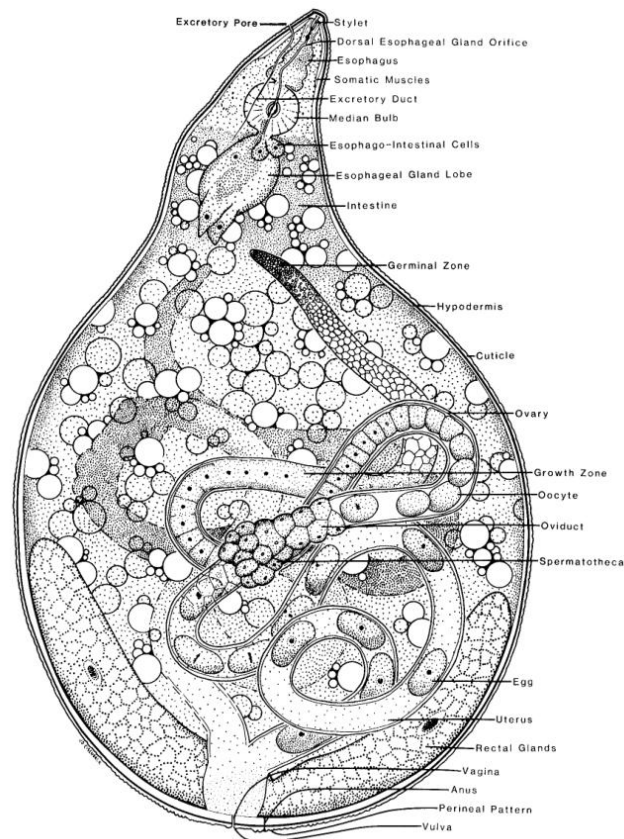


Figure 5 : Morphologie et anatomie générales d'un nématode femelles adultes du genre *Meloidogyne* Spp. (After Eisenback, 1985.)

B. Mâles

Les mâles vermiformes des espèces de nématodes à nœuds racinaires varient considérablement en taille de 700 à 2000 μm en raison des conditions environnementales variables existant au cours de leur développement. Les caractères morphométriques tels que la longueur du corps et les rapports impliquant la longueur de l'œsophage, la longueur de la queue et la largeur du corps sont presque inutiles. Le chapeau de tête comprend un disque labial entouré de lèvres latérales et médiales. Un prestome situé au centre mène à une stomie slitlike. Quatre organes sensoriels se terminent sur les lèvres médiales (sensille céphalique), et six autres entourent la zone de la stomie (sensille labiale). La taille, la hauteur, la forme et la pente de la coiffe. La longueur du stylet mâle a une large gamme au sein du genre (13-30 μm) ; bien que la plupart des espèces aient une longueur moyenne du stylet de 18-24 μm , avec un faible coefficient de variabilité (CV = 4%), ce qui en fait un bon caractère différenciateur (Eisenback, 1985).

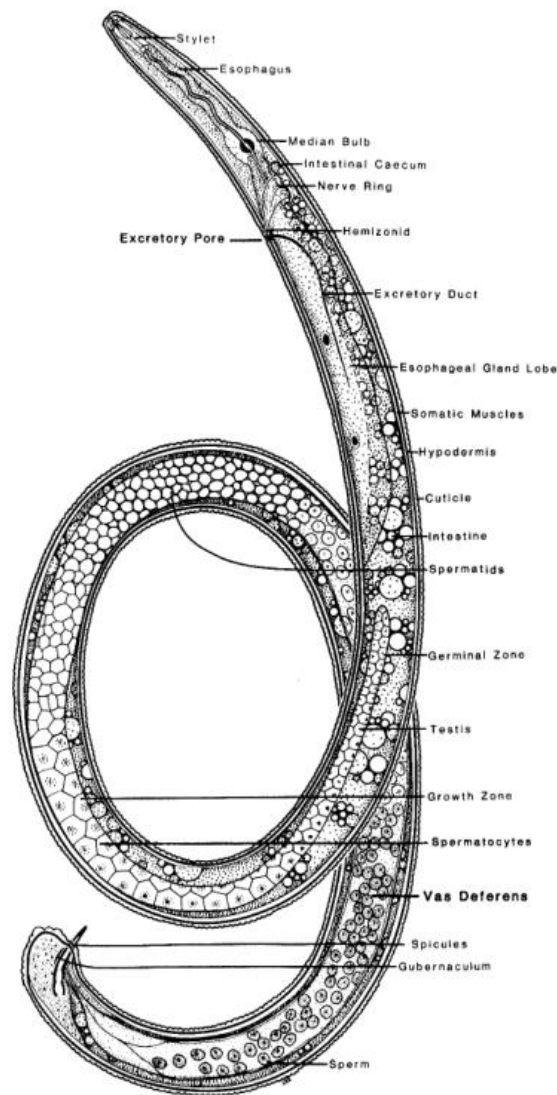


Figure 6 : Morphologie et anatomie générales d'un nématode mâle adultes du genre *Meloidogyne* Spp. (After Eisenback, 1985.)

C. Les larves du deuxième stade

La longueur corporelle des larves infectieux de deuxième stade des nématodes à nœud racinaire varie de 290 à 912 μm dans le genre. L'aire de répartition de l'espèce est d'environ 300 à 500 μm . De nombreuses espèces se chevauchent dans la longueur du corps ; par conséquent, ce caractère est inadéquat pour l'identification des espèces. En raison de la petite taille de la larve de deuxième stade, il est difficile de discerner précisément la morphologie de la tête. Les larves du deuxième stade ont les mêmes caractères de base que les mâles, mais ils ne peuvent être vus clairement qu'avec le microscope électronique à balayage (MEB) (Eisenback, 1985). En général, la morphologie de la tête est assez similaire chez les espèces. Certaines espèces, cependant, diffèrent distinctement dans la forme du disque labial, les lèvres latérales et médianes, l'expression de sensille labiale et céphalique, et l'occurrence des annulations de tête (Eisenback, 1985).

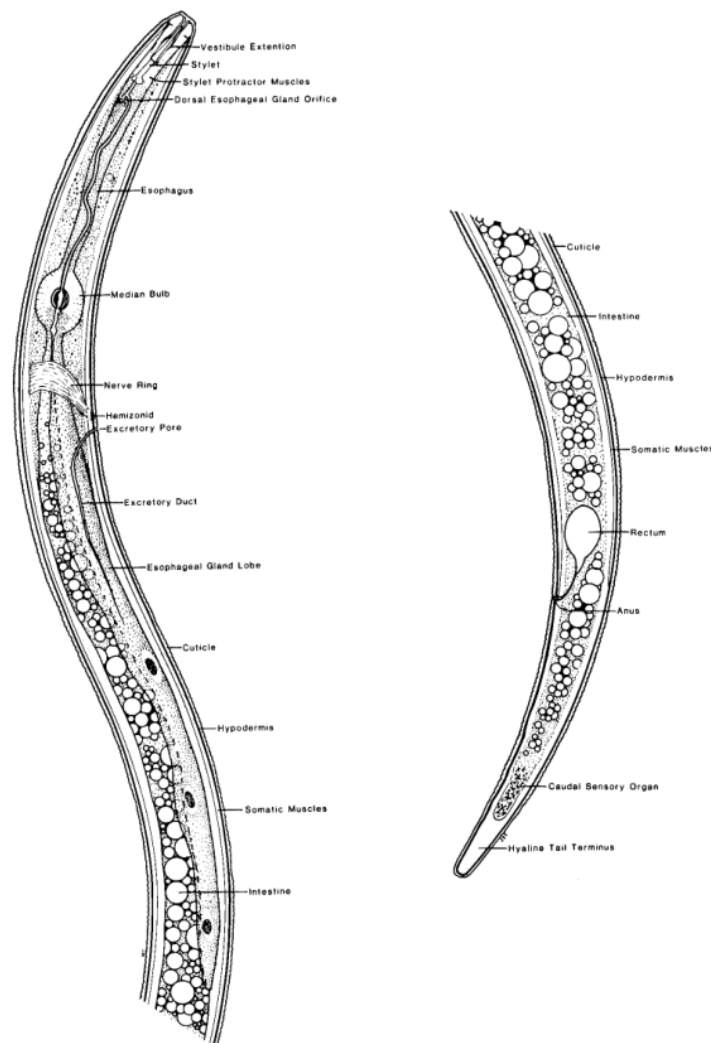


Figure 7 : Morphologie et anatomie générales d'un nématode L2 adultes du genre *Meloidogyne* Spp. (After Eisenback, 1985.)

3.3. Cycle biologique des nématodes du genre *Meloidogyne* Spp.

Le cycle de vie des nématodes à galles des racines comporte trois niveaux de développement (œuf, quatre stades juvéniles (L1, L2, L3, L4) et adulte (femelles et très rarement des mâles à cause de leur mode de reproduction parthénogénétique). Leur cycle se déroule en deux phases (exo-endo parasite) :

- ✚ Une phase libre mobile qui ne concerne que le stade juvénile L2 qui se déplace dans le sol à la recherche des racines de plante hôte.
- ✚ Une phase sédentaire de maturation des L2 en femelles qui se déroule à l'intérieur des racines après la pénétration des L2.

Le cycle commence à partir des œufs réunis en une masse dans une gangue mucilagineuse à l'intérieur de laquelle on peut trouver des œufs à différents stades de développement, du stade unicellulaire au juvénile L1 et ensuite au L2 prêt à éclore. Le développement embryonnaire dure de sept à neuf jours à 28°C au cours duquel intervient une première mue. Une fois l'œuf éclos, le L2 se déplace dans le sol à la recherche de sa plante hôte, il pique une racine et y pénètre. Il traverse l'épiderme, puis le cortex pour arriver au cylindre central où il se fixe et établit un site nourricier induit par les sécrétions salivaires du nématode (Djian-Caporalino, 2009). Ce site est constitué de 5 à 6 cellules géantes polynucléées, en 3 à 8 semaines selon la température, le L2 subit trois autres mues en L3, L4 pour atteindre ensuite le stade adulte en une femelle piriforme (ce qui conduit à la déformation des racines en galles) qui pond ses œufs (300 à 3000) dans la gangue mucilagineuse (Djian-Caporalino, 2009) ou en mâle qui reste filiforme et qui quitte les racines pour le sol (figure 7).

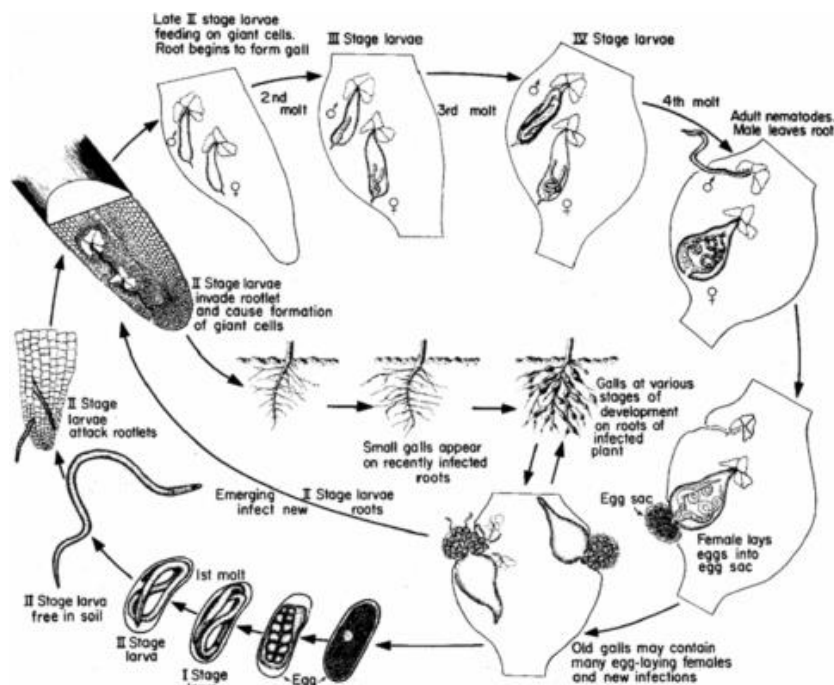


Figure 8 : Cycle de vie de *Meloidogyne* Spp. (Castagnone-Sereno et al, 2013)

3.4. Identification

Traditionnellement, les espèces de *Meloidogyne* sont décrites et identifiées en fonction de la morphologie des femelles, des mâles et de deuxième stade juvénile, ainsi que des profils périnéaux des femelles adultes (Hunt et Handoo, 2009). Cependant, pour une identification fiable, la meilleure approche consiste à intégrer les données morphologiques, isozymes et ADN, ainsi que les informations sur le mode de reproduction, le nombre de chromosomes, les plantes hôtes et la distribution (Karssen et Moens, 2006). L'identification morphologique des nématodes à nœuds racinaires est difficile et prend du temps en raison du chevauchement des caractères (Jepson, 1987 ; Karssen, 2002). Par conséquent, de nombreux groupes de recherche, ont mis au point des techniques moléculaires pour l'identification des espèces de *Meloidogyne* (Blok et Powers, 2009).

L'électrophorèse des protéines a été la première technique biochimique appliquée en nématologie (Subbotin et Moens, 2006 ; Perry et coll., 2007). Des phénotypes isozymes de femelles adultes ont été développés en France (Dalmasso & Bergé, 1978) et, depuis lors, l'estérase et la déshydrogénase de malate ont été des marqueurs particulièrement fiables pour l'identification des espèces de *Meloidogyne* (Esbenshade et Triantaphyllou, 1985, 1990 ; Venkatachari et coll., 1991 ; Karssen et coll., 1995) et sont maintenant utilisés comme norme ajoutée aux descriptions des nouveaux *Meloidogyne* Spp. L'électrophorèse en gel bidimensionnelle, qui fournit une meilleure séparation des protéines et des empreintes digitales, a été utilisée pour distinguer *M. chitwoodi*, *M. fallax* et *M. hapla* (van der Beek et al., 1997 ; Tastet et al., 1999).

Pour séparer les espèces de *Meloidogyne*, l'électrophorèse protéique nécessite des femelles adultes. Cependant, comme les profils d'ADN ne sont pas spécifiques à un stade, ils peuvent être utilisés pour identifier n'importe quel stade de développement. Cela a fait de la technique de réaction en chaîne par polymérase (PCR) la technique la plus utilisée pour étudier la diversité génétique des nématodes à nœuds racinaires et leur identification. Les méthodes de PCR multiplexes permettent la détection d'une ou plusieurs espèces dans un mélange de nématodes par un seul test PCR.

CHAPITRE

03

LA CLASSIFICATION
DES IMAGES PAR
L'APPRENTISSAGE
PROFONDE (DEEP
LEARNING)

1. Introduction

Durant la dernière décennie, l'intelligence artificielle (IA), l'apprentissage automatique (machine learning) et l'apprentissage profond (deep learning) ont fait l'objet d'un buzz médiatique intense. Ces technologies apparaissent dans d'innombrables articles et ouvrages scientifiques. A travers ces techniques plusieurs programmes sont développés pour effectuer des tâches spécifiques et qui sont utilisée pour un large éventail d'activités (Otoum, 2022). Grâce à l'apparition de ces technologies ont permet de simplifier les taches dans divers domaines y compris le contrôle des robots des voitures autonomes et d'assistants virtuels, la télédétection, le commerce électronique et le diagnostic médical... ect. Les tâches les plus laborieuses sont désormais effectuées par des programmes et des robots sophistiqués. Où les emplois humains seront rares puisque la plupart des activités économiques seront gérées par des robots ou par des agents IA (AI agents). Tous les secteurs sont alors touchés par ce changement : la finance, la santé, l'éducation, le transport ou encore la médecine (Alzubaidi, 2021).

La **Figure 9** présente clairement la relation entre l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond et les liens qui existent entre eux.

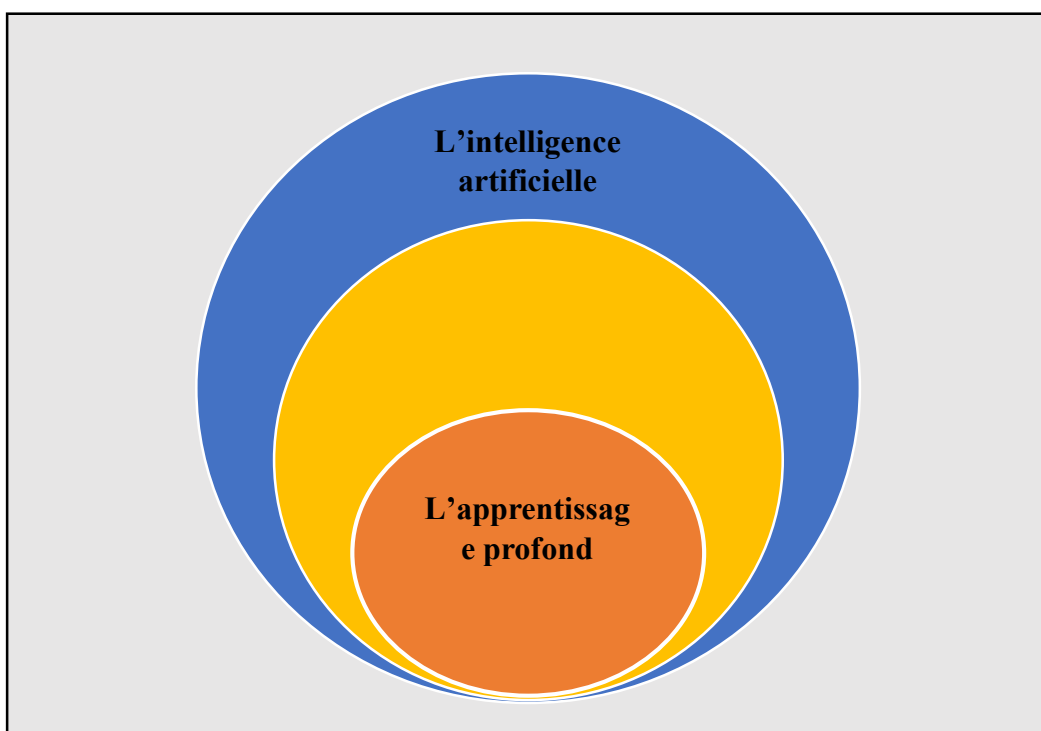


Figure 9 : Les relations entre l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond.

2. Classification des images

2.1. Définition de la classification

Classifier une image est une tâche ou une série de méthodes qu'une théorie unifiée pour pouvoir utiliser les images pour les analyses complémentaires ou pour la cartographie. Elle consiste à déterminer des procédures permettant de rassembler l'ensemble des pixels de l'image en un nombre limité de classes correspondant aux grands éléments structuraux de l'image (Parrochia, 1997).

2.2. L'objectif de la classification

L'objectif de la classification d'images est d'élaborer un système capable d'affecter une classe automatiquement à une image ainsi ce système permet d'effectuer une tâche d'expertise qui peut s'avérer coûteuse à acquérir pour un être humain en raison notamment de contraintes physiques comme la concentration, la fatigue ou le temps nécessaire à allouer pour un volume important d'images (Parrochia, 1997).

2.3. Classification d'images via le l'apprentissage profond

Dans le cas d'une classification standard, l'image d'entrée est introduite dans une série de couches de convolution, qui génère une distribution de probabilités sur toutes les classes (généralement à l'aide de la fonction softmax). Par exemple, si on essaye de classer une image comme étant un « chat », un « chien », un « cheval » ou un « éléphant », pour chaque image d'entrée appartenant à l'une de ces classes, quatre probabilités seront générées, indiquant le niveau de confiance avec lequel le réseau a étiqueté l'image (Zaccone, 2017).

3. Apprentissage profond (Deep learning)

3.1. Définition

L'apprentissage en profondeur est l'une des plus prometteuses techniques d'apprentissage qui ont été appliquées dans plusieurs domaines. Les architectures basées sur l'apprentissage profond sont caractérisées par de nombreuses couches cachées de neurones. Cependant, la principale limite de ces architectures est le long temps nécessaire à l'apprentissage. Obtenir une excellente précision et un temps d'apprentissage raisonnable est un objectif ambitieux pour la communauté de recherche l'apprentissage profond (Otoum, 2022).

3.2. Domaines d'application de l'apprentissage profond

Un model issu d'un apprentissage profond peut servir dans des situations réelles telle que :

- ✓ Reconnaissance des visages ;
- ✓ Identification selon les mouvements de la marche ;
- ✓ Lecture des chiffres et des textes manuscrits ;
- ✓ Reconnaissance et analyses des discours ;
- ✓ Traduction des langues ;
- ✓ Contrôler les voitures autonomes ;
- ✓ Les comportements des robots (position/map estimation) ;
- ✓ Bio-informatique ;
- ✓ E-commerce (détection de fraude) ;
- ✓ Médecine (diagnostic des maladies) ;
- ✓ Web (les réseaux sociaux).

3.3. Pour quoi le l'apprentissage profond ?

Les algorithmes d'apprentissage automatique décrits dans la première partie fonctionnent bien pour une grande variété de problèmes. Cependant, ils ont échoué à résoudre certains des principaux défis de l'IA, tels que la reconnaissance vocale et la reconnaissance d'objets. Le développement du deep learning a été en partie motivé par l'échec des algorithmes traditionnels dans ces tâches. Cependant, ce n'est qu'avec la disponibilité de grandes quantités de données, grâce notamment au Big Data et aux objets connectés, ainsi que la puissance accrue des machines de calcul, que le potentiel réel du deep learning a été pleinement compris (Otoum, 2022).

Une des grandes différences entre le Deep Learning et les algorithmes de ML traditionnelles c'est qu'il s'adapte bien, plus la quantité de données fournie est grande plus les performances d'un algorithme de Deep Learning sont meilleures. Contrairement à plusieurs algorithmes de ML classiques qui possèdent une borne supérieure à la quantité de données qu'ils peuvent recevoir des fois appelée "plateau de performance", les modèles de Deep Learning n'ont pas de telles limitations (théoriquement) et ils sont même allés jusqu'à dépasser la performance humaine dans des domaines comme l'image processing (LeCun et al. 1998).

Le réseau de neurones convolutif appelé aussi CNN (en anglais « Convolutional Neural Network ») est une nouvelle architecture d'apprentissage profond inventée par LeCun et al. Elle est modélisée sous formes multicouches hiérarchique. Il se compose généralement de trois types de couches : la couche d'entrée (convolution layer), couche(s) cachée(s) (hidden layer) et la couche de sortie (fully connected layer). Ces couches sont organisées selon leurs fonctionnements en deux parties distinctes : la première partie est la phase d'extraction des caractéristiques et la deuxième partie est la phase de classification qui correspond à un modèle Multi Layers Perceptron classique (LeCun et al. 1998).

4. Les réseaux de neurones convolutifs et leurs fonctions

4.1. Définition

Les CNN ont dominé les solutions aux tâches de vision par ordinateur, affichant des performances supérieures aux méthodes traditionnelles d'apprentissage automatique (Diba, 2017). Les CNN sont des architectures d'apprentissage profond avec apprentissage spontané des fonctionnalités pour le traitement d'images et la reconnaissance d'images. Après l'optimisation des paramètres de formation et d'apprentissage, le CNN effectue plusieurs couches de transformations non linéaires sur les données d'entrée, couplant en continu les caractéristiques de bas niveau, et obtient enfin une représentation sémantique de haut niveau. Par rapport à l'apprentissage automatique traditionnel, un CNN peut utiliser un modèle de réseau de neurones plus profond pour entraîner les données d'entrée afin de simplifier le processus de traitement des données (Diba, 2017).

Un CNN typique se compose d'une couche convolutive, d'une couche de mise en commun et d'une couche entièrement connectée (Alzubaidi, 2021). Les neurones de la couche convolutive sont disposés dans une matrice pour former une carte d'entités multicanaux. Un neurone dans chaque canal n'est connecté qu'à une partie de la carte d'entités avant cette couche (Liu, 2021). Les neurones situés sur la même carte de caractéristiques de canal de la même couche convolutive sont obtenus en appliquant le même noyau convolutif à la carte de caractéristiques précédente de la couche. Guidée par des caractéristiques locales dans les cartes d'entités supérieures, la couche convolutive recherche des liens entre eux, tandis que les couches de mise en commun combinent des données avec la même sémantique. Étant donné que les informations graphiques formées par les positions adjacentes peuvent être légèrement agitées, l'opération de regroupement extrait les informations principales de la carte des entités supérieure. La mise en commun maximale et la mise en commun moyenne sont des opérations courantes de mise en commun. Le modèle est capable de garder la traduction et la rotation invariante tout en préservant les caractéristiques (Alzubaidi, 2021). Après avoir alterné entre la convolution et la mise en commun, une couche entièrement connectée apparaît souvent. Chaque neurone de la couche entièrement connectée est connecté à chaque neurone de la couche supérieure. Toutes les informations sont combinées pour transformer les caractéristiques multidimensionnelles en caractéristiques unidimensionnelles, qui sont remises au régresser et classificateur final pour produire le résultat final.

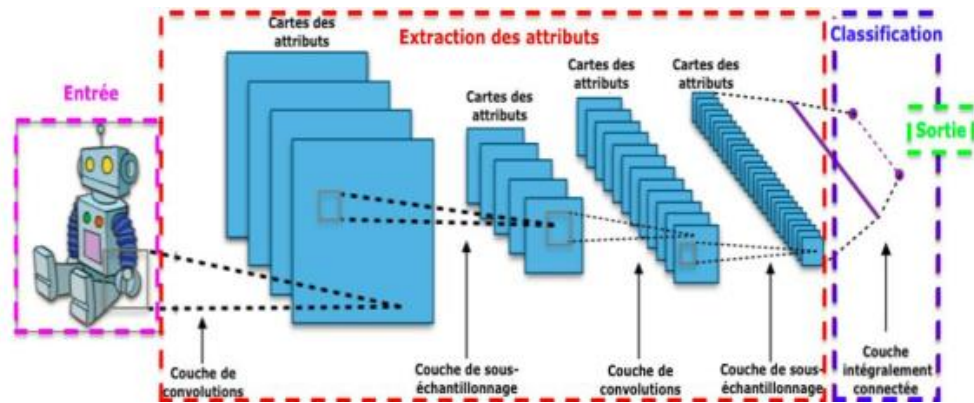


Figure 10 : Structure du réseau neuronal à convolution (Srivastava, 2013).

4.2. Leurs fonctions

A. Classification des images

La classification des images vise à attribuer des étiquettes de classe prédéfinies aux images. Le CNN est actuellement le réseau de neurones le plus populaire qui combine un ensemble d'opérations mathématiques (par exemple, la convolution, la mise en commun et l'activation), en utilisant divers schémas de connexion, tels que l'empilement simple, le démarrage et les connexions résiduelles, pour apprendre les paramètres opérationnels des images annotées afin de classer les ensembles de données d'images (Krizhevsky, 2012). Le développement actuel des CNN modernes pour la classification des images peut être divisé en trois phases :

1. L'apparition des CNN modernes (2012-2014) ;
2. Le développement et le raffinement de l'intensification de l'architecture des CNN (2014-2017) ;
3. L'introduction de l'apprentissage par renforcement et de l'intelligence artificielle pour la conception d'architecture CNN (début 2017).

En 2012, la première architecture CNN moderne nommée AlexNet a été proposée. L'algorithme a démontré une forte performance dans la classification des images dans le concours ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC 2012) cette année-là (Krizhevsky, 2012).

CNN. De 2014 à 2017, les chercheurs ont développé plusieurs CNNs représentatifs tels que le réseau neuronal résiduel (ResNet) (Szegedy, 2016), le réseau de groupe de géométrie visuelle, (Simonyan, 2014) et le réseau convolutif dense (DenseNet), (Huang, 2017) pour la classification des images. Ces CNN ont considérablement amélioré la capacité d'apprentissage et la complexité de la reconnaissance en utilisant des algorithmes informatiques efficaces et des schémas de connectivité modifiés. À partir de 2017, d'autres études se sont concentrées sur l'utilisation de l'apprentissage par renforcement pour rechercher la meilleure architecture CNN qui pourrait produire des performances plus élevées (Zoph, 2016).

Les chercheurs ont étudié les mécanismes des CNN pour la classification des images. Une étude récente a amélioré AlexNet pour créer une nouvelle variante (ZFNet) à l'aide d'un outil de visualisation. Cet outil est un cadre intégré avec les CNN qui peut mapper

l'activité neuronale à l'espace de pixel d'entrée. Ainsi, les activations au niveau des pixels peuvent être visualisées après chaque couche convolutive, ce qui est particulièrement utile pour comprendre le mécanisme CNN pour d'autres mises à niveau. Les CNN peuvent apprendre des représentations générales des images plutôt que des caractéristiques uniquement pour la classification. Par la suite, des recherches ont permis de mettre au point diverses méthodes de mesure de gradient, notamment la rétropropagation guidée, la cartographie de classe d'activation pondérée en gradient et la propagation de pertinence couche par couche (LRP). Entre-temps, certains cadres généraux peuvent également être utilisés pour afficher des régions d'images importantes pour les résultats de classification (Arrieta, 2020).

B. Détection d'objets

La détection d'objet est définie comme la détermination de l'emplacement des objets dans une image donnée et la classe à laquelle chaque objet appartient. Comme le montre la figure 2, la détection d'objets à l'aide de CNN peut être divisée en deux catégories : les architectures CNN à un niveau et à deux niveaux. Au début du développement du cadre, OverFeat est le modèle le plus représentatif et a remporté la tâche de localisation du concours ILSVRC 2013 (Girshick, 2014). Ensuite, une série de cadres de réseaux de neurones à convolution par région a été introduite, y compris l'original (Ren, 2015). Il existe trois techniques clés dans les architectures de réseau de neurones de convolution de région, y compris le réseau de proposition de région, l'opération de mise en commun de région d'intérêt, et la fonction de perte multi-tâche. La famille des réseaux de neurones à convolution de région a été largement adoptée comme détecteurs d'objets pour divers ensembles de données de domaines (Ren, 2015).

C. Segmentation sémantique et par instance

La segmentation sémantique vise à attribuer une classe à chaque pixel d'une image, mais les objets des mêmes classes ne sont pas distingués. La segmentation d'instance produit le masque et la classe de la cible. En règle générale, les architectures CNN pour les segmentations sémantiques et d'instance peuvent être divisées en deux catégories, y compris les cadres basés sur encodeur-décodeur et les cadres basés sur la détection. Le modèle basé sur un encodeur-décodeur est le réseau de segmentation d'image intelligent le plus primitif pour améliorer la précision de la segmentation. Au stade de l'encodeur, le CNN extrait les caractéristiques sémantiques des échantillons d'entrée. Dans l'étape du décodeur, la déconvolution est utilisée pour affecter les caractéristiques extraites à l'étiquette de chaque pixel. DeepLab (Chen, 2018), et U-Net (Ronneberger, 2015).

4.3 L'architecture générale d'un réseau de neurones convolutif

Un réseau de neurone convolutif est composé de trois types de couches : **couche de convolution**, **couche de pooling** et **couche entièrement connectée**. La **figure 11** illustre l'architecture d'un CNN (Alhindi et al. 2018).

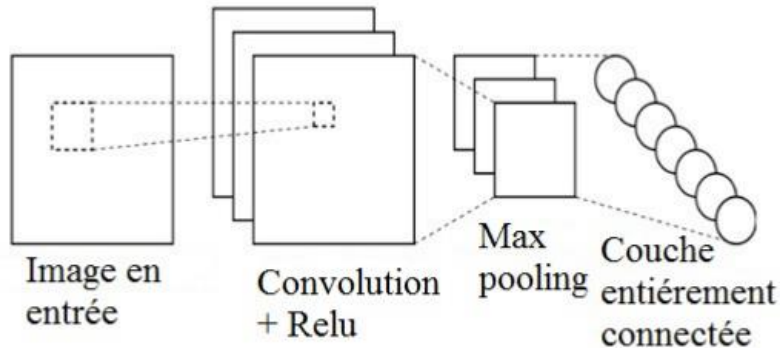


Figure 11 : l'architecture générale d'un réseau de neurones convolutif.

A. Couche de convolution

La couche de convolution est définie par le bloc de construction principal d'un CNN. Le but de cette couche est d'extraire implicitement les caractéristiques pertinentes des images en entrée durant l'apprentissage (Alhindi et al. 2018).

Cette couche effectue une opération de convolution entre deux matrices, la première représente une sous partie des données en entrée (champ réceptif) et la deuxième représente un filtre qui contient les paramètres d'apprentissage. Une opération de convolution génère une troisième matrice référencée par la carte des caractéristiques. La **figure 12** illustre une opération de convolution qui est réalisée par un produit scalaire entre le filtre et un champ réceptif. Ensuite, les résultats du produit sont additionnés pour produire un seul résultat présenté sous forme d'une case dans la carte des caractéristiques. Enfin, le filtre des poids est glissé par un pas S sur le reste des champs réceptifs de la matrice en entrée, et cette opération est répétée pour tous les autres champs (Alhindi et al. 2018).

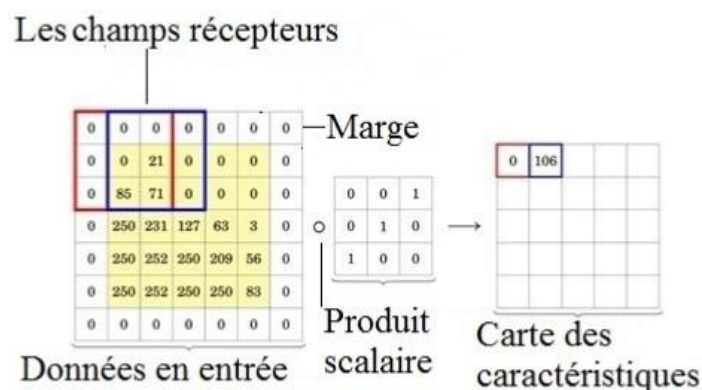


Figure 12 : Une opération de convolution.

B. Couche de pooling

Le rôle de la couche de pooling est de réduire la dimensionnalité des couches de convolution résultantes. Le but de cette réduction est d'améliorer la précision par la sélection des attributs dominants. En plus, l'optimisation du nombre des paramètres permet de réduire la taille du modèle et d'optimiser la complexité temporelle (Alhindi et al. 2018).

Il existe deux types d'opérations pooling : Max-pooling et Avg-pooling. L'opération de Max-pooling renvoie la valeur maximale du champ réceptif tandis que l'opération Avg-pooling renvoie la moyenne des valeurs. Max-pooling est la forme la plus utilisée dans la majorité des architectures de type CNN (Alhindi et al. 2018).

C. Couche entièrement connectée

Dans un CNN, les couches entièrement connectées ont la même structure qu'un MLP. Le but de ces couches est d'apprendre les combinaisons non linéaires entre les caractéristiques extraites par les couches de convolution. Le résultat de la dernière couche de convolution $[N, N, N_c]$ est aplati dans un vecteur de taille $[N \times N \times N_c]$. Ce vecteur présente la couche d'entrée à l'ensemble des couches entièrement connectées. En classification supervisée, la dernière couche est utilisée pour la prédiction en se basant sur la fonction d'activation Softmax (Alhindi et al. 2018).

4.4. Les avantages de CNN

Les avantages des réseaux à convolution par rapport aux méthodes de classifications traditionnelles peuvent être résumés comme suit :

- Représentation hiérarchique des caractéristiques, qui correspond aux représentations multi niveaux du pixel aux caractéristiques sémantiques de haut niveau apprises par une structure hiérarchique à plusieurs étapes (Jia, 2014).
- L'architecture des réseaux CNN offre la possibilité d'optimiser conjointement plusieurs tâches connexes (par exemple, Fast R-CNN combine la classification et la régression de la boîte englobant dans un mode d'apprentissage multitâches) (Jia, 2014).
- Bénéficiant de la grande capacité d'apprentissage des CNN, certains défis classiques de la vision par ordinateur peuvent être reformulé en tant que problèmes de transformation de données de grande dimension et résolu d'un point de vue différent (Jia, 2014).
- En raison de ces avantages, les réseaux à convolution ont été largement appliqués dans de nombreux domaines de recherche, tels que la super-résolution d'images, reconstruction, classification d'images, récupération d'images, reconnaissance faciale, détection et analyse vidéo (Jiang, 2018).

4.5. Les inconvénients de CNN

Malgré ses progrès par rapport aux méthodes traditionnelles et l'importance des réseaux à convolution dans la détection pratique d'objets, il y a encore quelques inconvénients :

- En raison de l'existence de couches entièrement connecté (fully connected), les réseaux de neurones à convolution nécessitent une image d'entrée de taille fixe (par exemple, 227×227), qui mène directement au recalcul du modèle pour chaque région, prenant beaucoup de temps dans la période de test (Jouni, 2018).
- L'apprentissage du R-CNN est un pipeline en plusieurs étapes. En premier, le réseau convolutif (ConvNet) sur les propositions d'objets est peaufiné. Ensuite, le classifieur softmax appris par réglage fin est remplacé par des SVM pour s'adapter aux fonctionnalités de ConvNet (Jouni, 2018).
- Enfin, les régresseurs de la boîte englobante sont entraînés. L'apprentissage est coûteux en espace et en temps. Les caractéristiques sont extraites de différentes propositions de région et stockés sur le disque. Il faudra beaucoup de temps pour traiter un problème avec une petite base de données avec les techniques des réseaux à convolution, tels que VGG16. Au en même temps, la mémoire de stockage requise par ces caractéristiques devrait également être un sujet de préoccupation (Jouni, 2018).
- Bien que la recherche sélective puisse générer des propositions de région avec des rappels relativement élevés, les propositions de régions obtenues sont toujours redondantes et cette procédure prend beaucoup de temps (Jouni, 2018).



**PARTIE
EXPÉRIMENTALE**

1. Objectif

Le but ultime de la recherche est de faire une application qui identifie l'espèce de nématode de genre *Meloidogyne* Spp. à l'aide d'un outil de l'intelligence artificielle qui forme un grand nombre d'images de la région périnéale de femelles de chaque espèce.

2. Matériel

Une prospection dans les régions potentiellement élevées de production maraichères tomate sous serre poivron et melon. Bien sûr en utilisant une fiche d'enquête.

2.1. Pour les prélèvements des échantillons

- Sécateur jardin
- Sac pour les échantillonnages
- Étiquette

2.2. Pour traitements des échantillons

Outils de laboratoire	Appareille	Produits chimiques
<ul style="list-style-type: none"> • Boite de Pétri • Batterie de tamis • Becher • Pince • Lame et lamelle • D'aiguille 	<ul style="list-style-type: none"> • Broyage • Loupe binoculaire • Microscopes optiques 	<ul style="list-style-type: none"> • L'eau distillée • Acide lactique • Glycérol

3. Méthode

3.1. L'enquête

3.1.1. Objectif de l'enquête

Le but de cette enquête est de :

- ✓ Identification des lieux infectés par des nématodes à *Meloidogyne* Spp. ;
- ✓ Identifier les diverses cultures maraichères infectées par des nématodes ;
- ✓ Prélèvement d'échantillons de différentes cultures maraichères infectées.

3.1.2. Enquête auprès d'institutions liées au domaine agricole

- **La Direction des Services Agricoles (DSA)** pour des données concernant les superficies, les productions et les rendements des cultures maraichères ;
- **L'Institut National de la Protection des Végétaux (INPV)** pour des données

3.1.3. Les personnes concernées par nos enquêtes.

- Les agriculteurs ;
- Les grainetiers de produits agricoles.

3.2. Les échantillons collectés

À travers le questionnaire de l'enquête adressé aux agriculteurs et les informations fournies par chaque agriculteur sur le type de culture et la probabilité de contracter la maladie étudiée d'une part et en essayant de diagnostiquer l'état de la culture en fonction des symptômes étudier à partir de la bibliographie d'autre part.

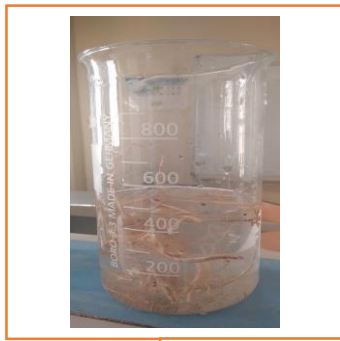
3.3. Traitements des échantillons

3.3.1. Extraction des nématodes

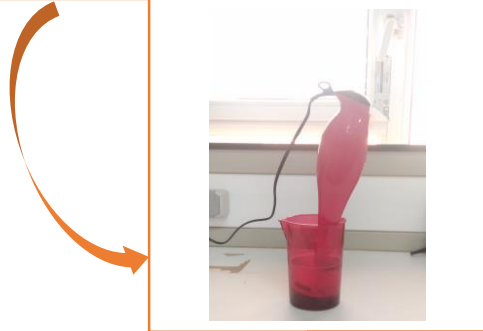
- ❖ Laver les racines avec un jet puissant d'eau pour les débarrasser de la terre ;
- ❖ Sur une planche, découper les racines en petits morceaux de 1 cm environ ;
- ❖ Mettre les morceaux de racines dans une béccher avec l'eau distillé pendant 24 h ;
- ❖ Mettre les morceaux de racines dans une broyage avec l'eau distillé ;
- ❖ Verser le broyat sur une colonne de tamis : de bas en haut 45 μm , 50 μm , 100 μm , 200 μm ;
- ❖ Tamiser pendant 2 min ;
- ❖ Récupérer le contenu du tamis 100 μm pour la femelle, 50 μm pour le mâle et 45 μm pour les larves.

3.3.2. Montage des femelles de genre *Meloidogyne* Spp. pour l'identification morphologique de l'espèce.

- ❖ Sous Loupe binoculaire on chasse la femelle à la pince ;
- ❖ Nous avons coupé la femelle en deux par d'aiguille pour vider son contenu ;
- ❖ On garde la partie avec la queue.
- ❖ Mettre les morceaux dans l'Acide lactique pendant 1 minute pour se débarrasser des impuretés
- ❖ Ensuite, nous mettons les morceaux dans une goutte de glycérol entre la lame et lamelle ;
- ❖ Sous Microscopes, nous clarifions de la région périnéale pour reconnaître l'espèce.



Les morceaux de racine



Broyage

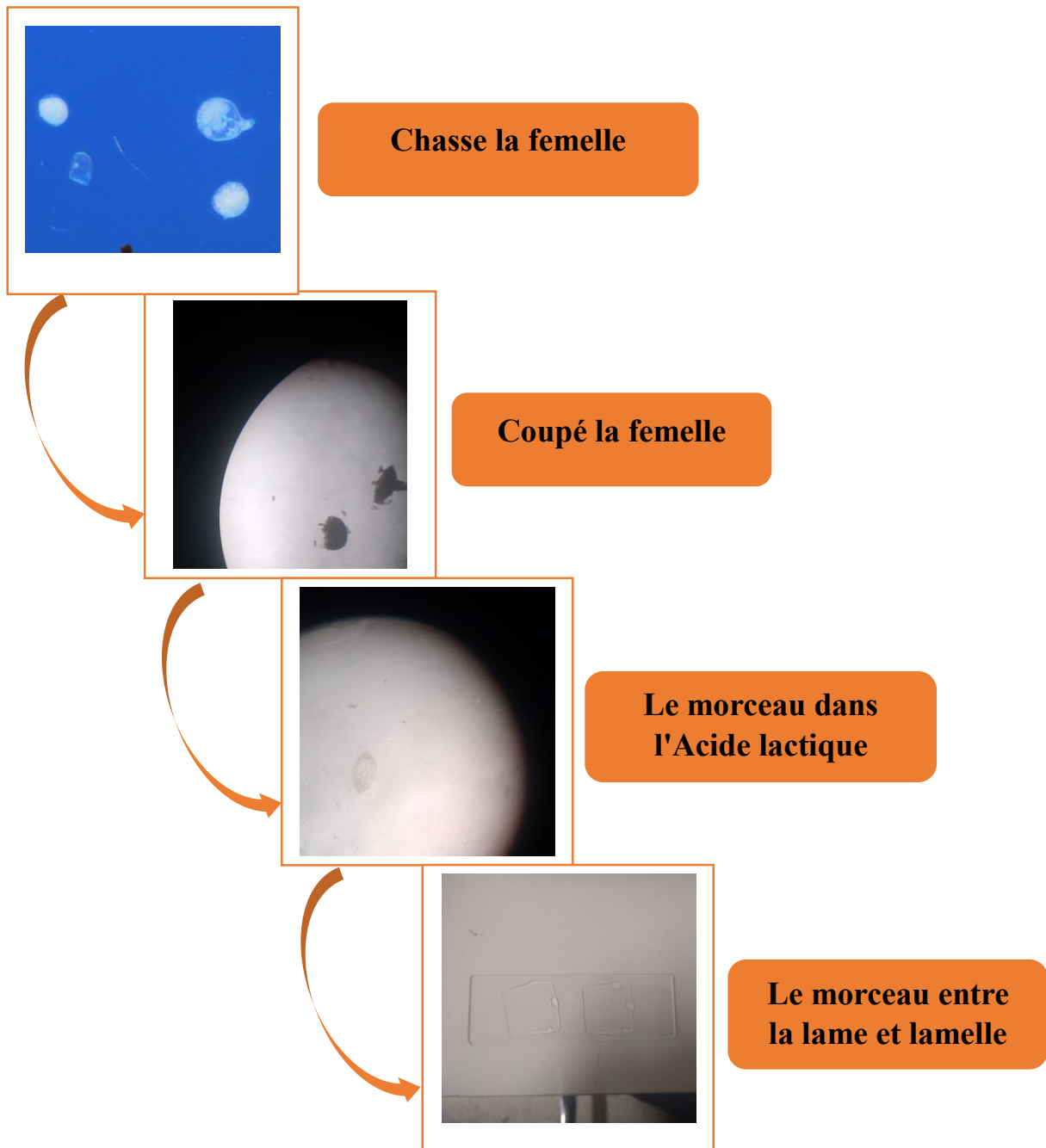


Le contenu



Colonne de tamis

**Les différentes étapes d'extraction des
nématodes (Originale. Benmeriem, 2024)**



Différentes étapes pour montage des femelles de genre *Meloidogyne* Spp. (Originale. Benmeriem, 2024)

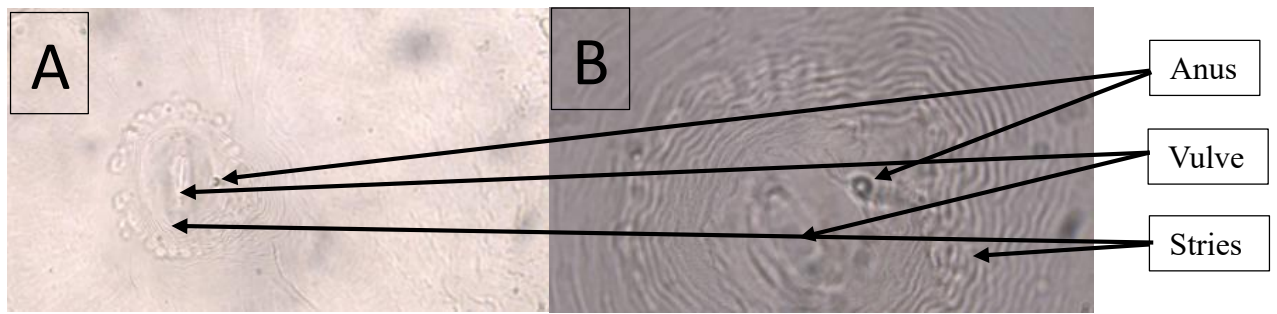


Figure 13 : Observation microscopique de la région périnéale de femelle
A : Grossissement 40 et B : Grossissement 100 (Benmeriem, 2024).

3.4. Entraînement le modèle sur la classification

3.4.1. Collection d'images (Dataset).

Les données ont été collectées par le biais d'expériences de terrain. Le jeu de données comprend des images de l'organe excréteur des femelles de deux espèces différentes de nématodes. Le jeu de données contient 200 images par espèce, soit un total de 400 images. Les images ont été capturées à l'aide d'un microscope optique moderne connecté à un écran de sortie et ont été collectées en deux qualités différentes, avec une diversité suffisante pour garantir une représentation précise des différents modèles. Les images ont été traitées pour ajuster la luminosité et le contraste avant leur utilisation dans l'entraînement. Ces données seront utilisées pour entraîner un modèle de réseau de neurones convolutifs (CNN) afin d'améliorer la précision de la reconnaissance des espèces de nématodes en se basant sur leurs caractéristiques morphologiques.

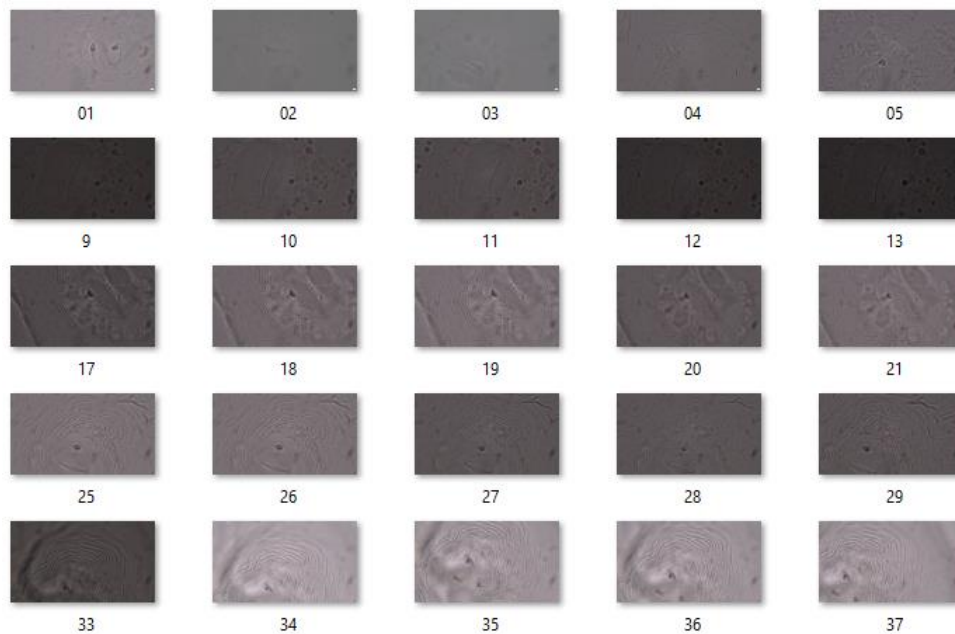


Figure 14 : Les Images collectées pour le modèle (Benmeriem, 2024).

3.4.2. Ressources matérielles et logicielles :

3.4.2.1. Ressources matérielles :

Notre système est développé dans un ordinateur dont les caractéristiques techniques, sont les suivantes :

- Processeur : Intel « I9 10 700 »
- RAM : 32 Go
- GPU : 3080

3.4.2.2. Ressources logicielles :

Système d'exploitation : Windows 10 titan 64bit

Langage de programmation : Python est un langage de programmation, un des langages de niveau supérieur, caractérisé par une écriture et une lecture simple, facile à apprendre, e programmation ouvert, et évolutif. En général, Python peut être utilisé pour programmer des programmes simples pour les débutants et pour réaliser de grands projets en même temps que tout autre langage de programmation. Il est souvent conseillé aux débutants en programmation d'apprendre cette langue car c'est l'une des langues de logiciel d'apprentissage les plus rapides.

TensorFlow : est une bibliothèque de logiciels open source pour le calcul numérique à l'aide de graphiques de flux de données. Les nœuds de graphique représentent des opérations mathématiques, tandis que les arêtes de graphique représentent les tableaux de données multidimensionnels (tenseurs) qui circulent entre eux.

ResNet : Le réseau Residual Neural Network (ResNet) a introduit une architecture innovante avec des « sauts de connexions » et une lourde normalisation par lots. Ces connexions sont également appelées unités gated ou unités récurrentes gated et ont une forte similitude avec les éléments récents réussis appliqués dans les réseaux neural network. Grâce à cette technique, ils ont pu former un neural network avec 152 couches tout en ayant une complexité inférieure à celle de VGGNet. Il atteint un taux d'erreur de 3,57% parmi les cinq premiers, ce qui est supérieur à la performance au niveau humain sur cet ensemble de données.

Anaconda : est une distribution libre et open source des langages de programmation Python et R appliqué au développement d'applications dédiées à la science des données et à l'apprentissage automatique (traitement de données à grande échelle, analyse prédictive, calcul scientifique), qui vise à simplifier la gestion des paquets et de déploiement.

3.4.3. Architecture du CNN proposé

L'architecture d'un CNN (Convolutional Neural Network) combinant **ResNet** et des couches denses est une approche courante pour bénéficier à la fois des capacités de traitement de caractéristiques spatiales de **ResNet** et des capacités de classification des **couches denses**. Voici une description générale de cette architecture :

- Input Layer: (216, 384, 3)
|
v
- ResNet Backbone: (7, 12, 2048)
|
v
- Global Average Pooling: (1, 1, 2048)
|
v
- Dropout Layer (2048)
|
v
- Dense Layer 20: (1)
|
v
- Output Layer :

ResNet-50 Backbone : La structure de ResNet comprend des blocs résiduels qui permettent un apprentissage plus profond en atténuant le problème de gradient vanishing.

Global Average Pooling Layer : Réduction de la dimensionnalité des cartes de caractéristiques sans utiliser de couches fully connected traditionnelles.

Couches DENSES pour la classification : Une couche dense avec un nombre de neurones égal au nombre de classes de sortie, utilisant une fonction d'activation softmax pour la classification multiclass.

4. Résultats et discussion

Après avoir rencontré des difficultés à identifier les espèces des nématodes à *Meloidogyne* Spp. en utilisant la clé de détermination traditionnelle, nous avons eu l'aide d'utiliser l'outil informatique de tirer profile des compétences de l'intelligence artificielle pour accomplir cette tâche facilement et pas besoin de solliciter des spécialistes dans ce domaine ou analyses moléculaires que coûte très chères à faire. En plus notre choix s'explique par la rapidité de l'intelligence artificielle à obtenir des résultats et par son absence d'erreurs comparée à l'évaluation humaine.

4.1. Résultats

4.1.1- Les résultats obtenus après la réalisation de l'enquête sont les suivants :

Dans la région de Doucen nous avons trouvé après le diagnostic des symptômes sur les plants de melon infectés par le nématode à galles.



Figure 15 : Les symptômes sur la partie aérienne du melon (*Cucumis melo* L.) (Benmeriem, 2024).



Figure 16 : Les symptômes sur la partie racinaire du melon (*Cucumis melo* L.) (Benmeriem, 2024).

Dans la région de M'ziraa nous avons trouvé après le diagnostic des symptômes sur les plants de poivron infectés par le nématode à galle.



Figure 18 : Les symptômes sur la partie racinaire du poivron (*Capsicum annum* L.) (Benmeriem, 2024).

Tableau 07 : Récapitulatif des enquêtes effectuées sur terrain

Agriculteur	Localisation	Culture	Nombre de serres	Serres infectées
01	Région de Doussen	Melon (<i>Cucumis melo</i> L.)	40	4
02	Région de M'ziraa	Poivron (<i>Capsicum annum</i> L.)	20	3

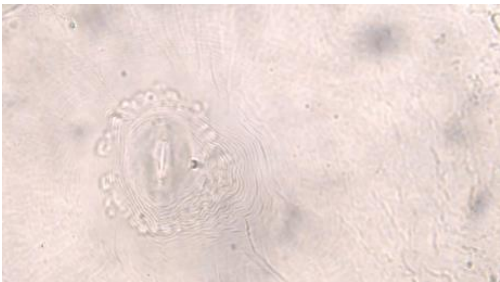
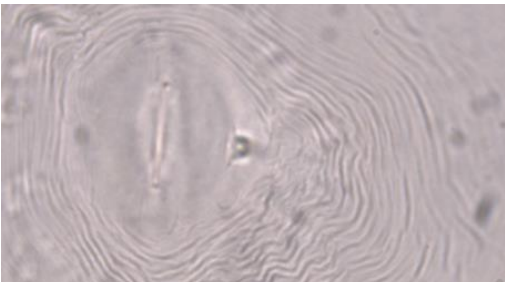
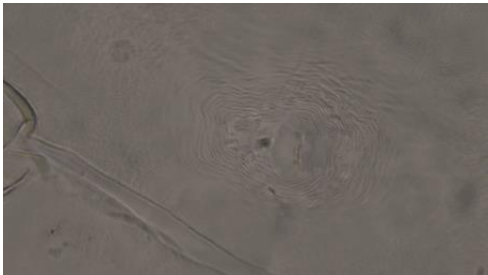
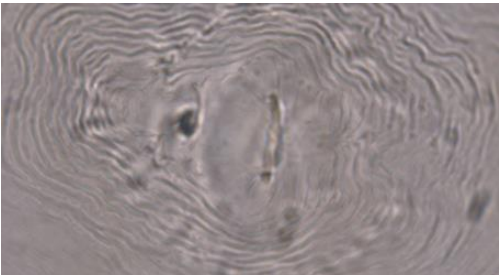
4.1.2. Après la collecte des échantillons sur le terrain et leur transfert au laboratoire pour traitement et extraction des nématodes des racines, la détermination de l'espèce a été faite en se basant sur la morphologie de l'organe excréteur chez les femelles, en utilisant une clé de détermination. Les résultats étaient les suivants :

- Le melon est infecté par l'espèce *Meloidogyne icognita*.
- Le poivron est infecté par l'espèce *Meloidogyne javanica*.

Ces résultats ont été envoyés par consultation avec l'experte en nématodes, la professeure **De Luca Francesca** de l'institut de recherche Institute for Sustainable Plant Protection (IPSP). En Italy, via l'envoi d'images.

1.3. À l'aide d'un microscope optique moderne connecté à un écran de sortie.

Tableau 08 : Observation microscopique de la région périnéale de femelle pour les deux espèces

Les espèces	Observation microscopique de la région périnéale de femelle	
	Grossissement x40	Grossissement x100
<i>M. incognita</i>		
<i>M. javanica</i>		

4.1.3. Résultats de l'étape de classification

Dans cette étape, nous avons validé le système d'aide à l'identification de l'espèce de nématode à partir des données recueillies.

Après l'étape d'augmentation de données, nous avons obtenu 200 images pour chaque modalité (espèce) de test de notre ensemble de données, où nous avons partitionné 70% des images pour la phase d'apprentissage et 15% pour le test et 15% pour validation.

Tableau 09 : Performance du modèle de classification.

	Accuracy (Précision)	Loss (La fonction de perte)
Training (apprentissage)	98.52%	3.9%
Validation	89.90%	30%
Test	63.33%	85.83%



Figure 19 : L'interface de site créée.

4.2. Discussion

D'abord, le choix de l'architecture CNN, permettant l'extraction automatique et intelligente des caractéristiques par élimination de l'étape traditionnelle dont le choix était très difficile. Deuxièmement, nous avons utilisé une base de 400 images en entrée des modèles CNNs, car l'utilisation de plus d'images assure toujours de meilleurs résultats. Troisièmement, nous avons opté pour un redimensionnement de l'image (216 x 384) pour être adapté à notre structure, car une image de petite taille peut perdre des informations significatives.

Les résultats de votre modèle de nématode CNN montrent une précision élevée lors de l'apprentissage (98.52%), ce qui indique que le modèle est capable de bien apprendre les caractéristiques des images de nématodes pendant l'entraînement. Cependant, lors de la validation et du test, on observe une baisse significative de la précision (89.90% en validation et 63.33% en test) ce qui suggère que le modèle peut avoir du mal à généraliser sur de nouvelles données.

En examinant les fonctions de perte, on constate que la perte pendant l'apprentissage (3.9%) est faible, ce qui démontre que le modèle apprend efficacement à partir des données d'entraînement. Mais la perte augmente considérablement lors de la validation (30%) et du test (85.83%), ce qui indique que le modèle a du mal à généraliser et qu'il peut être en train de surprendre les données d'entraînement.

Il se peut que le modèle soit trop complexe et qu'il souffre d'un sur ajustement aux données d'entraînement. Pour améliorer les performances du modèle, il peut être nécessaire de réduire sa complexité, d'augmenter la quantité de données d'entraînement ou d'utiliser des techniques de régularisation pour éviter le sur apprentissage. Il serait également intéressant de revoir la qualité et la diversité des données utilisées pour l'entraînement du modèle.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'intelligence artificielle dans l'agriculture devient de plus en plus cruciale pour le bien des agriculteurs grâce aux chercheurs. Avec l'appui de l'IA, l'agriculture intelligente offre de nombreux avantages au secteur notamment de meilleurs rendements, une efficacité accrue et des coûts d'exploitation plus bas.

En effet, au moyen de la machine learning et du deep learning, les activités à forte demande de main-d'œuvre sont confiées à des systèmes pilotés par l'IA. Les agriculteurs améliorent ainsi leur efficacité et leurs rendements agricoles. Cette automatisation des tâches offre également l'avantage de réduire les coûts de main-d'œuvre et d'accroître la productivité.

De plus, l'intelligence artificielle introduite même dans la protection des végétaux en particulier dans l'identification des espèces de genres de nématodes cela permet aux protectionnistes d'optimiser leurs temps et couts, et ce, en fournissant des données plus opportunes et précises.

Nous nous sommes intéressés aux différentes techniques d'exploration de données utilisées pour extraire des informations utiles à l'identification des espèces du genre *Meloidogyne* qui est un nématode très dangereux et cause des dégâts très important. Ainsi, nous avons revu cette technique pour concevoir et réaliser de la solution efficace et pratique aux problèmes d'identification de façon IA. Cette contribution a mis en évidence la particularité de la rapidité avec laquelle en peu reconnaître une espèce grâce au logiciel que nous avons mis au point.

La performance de l'approche proposée est exposée dans le dernier chapitre en termes conception et amélioration de notre logiciel car à partir de nos résultats expérimentaux nous somme arriver a identifié que deux espèces celle que nous avons trouvé durent notre prospection et il reste beaucoup de travail à faire car le genres *Meloidogyne* bibliographiquement a une vingtaine d'espèces qui attaques les cultures maraîchères et nous devons faire une moyenne de 400 photos par espèce son oublier les prospections qui nous permettre de récolté les espèces présent en Algérie.

Donc le travail est de longue haleine, un mastère ne peut pas contenir tous cela, la phase de prospection peu prendre beaucoup de temps son oublier la partie de laboratoire et la confirmation des espèces.

Ce modeste travail nous a permis d'élabore un logiciel qui permet d'identifier rapidement des espèces et nous fait gagner beaucoup de temps et financièrement et les institutions spécialiser en nématologie peuvent l'utiliser. C'est un logiciel qui de l'avenir.

Perspectives

A court terme :

Dans une recherche future, il serait intéressant d'améliorer notre approche en considérant :

- ❖ Une prospection de la wilaya de Biskra dans les régions potentielle en maraichers qui prendra en compte les spécificités de chaque culture soit en plein champs ou sous serres pour un meilleur déploiement.
- ❖ Récolte d'un nombre important d'échantillonnages faire les traitements de données au laboratoire et le paramètre le plus important c'est l'identification fiable des espèces rencontre l'approche proposée.

A Moyen terme :

- ❖ Dans une stratégie de balayage de toute notre région, pour pouvoir faire une cartographie d'infestation des attaques de *Meloidogyne*.
- ❖ Amélioration de notre logiciel pour arriver à une fiabilité de 98 % pour être plus efficace.
- ❖ Nous envisageons que le même travail doit être fait dans les régions à potentiels maraichers.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. Abbou A., 2012 :étude de complexe parasitaire de *Myzus persicae* sulzer(Homoptera : Aphididae) sur le poivron sous serre.
2. ABDELOUHAB, B. (2016). L'étude de l'effet de la taille sur le comportement du melon cantaloup F1 (*Cucumis Melo*. L) sous abri serre, en zone littorale. Mostganem.
3. Agrios, G.N., 2005. Plant diseases caused by fungi. Plant pathology, pp: 385-614.
4. Alhindi et al. 2018. Taha J Alhindi, Shivam Kalra, Ka Hin Ng, Anika Afrin et Hamid R Tizhoosh. Comparing LBP, HOG and deep features for classification of histopathology images. In 2018 international joint conference on neural networks (IJCNN), pages 1–7. IEEE, 2018
5. Alzubaidi, L.; Zhang, J.; Humaidi, A.J.; Al-Dujaili, A.; Duan, Y.; Al-Shamma, O.; Santamaria, J.; Fadhel, M.A.; Al-Amidie, M.; Farhan, L. Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. J. Big Data 2021, 8, 53.
6. Andrés G. S., Accotto G. P., Navas-Castillo J., et Moriones E. (2007). Founder effect, plant host, and recombination shape the emergent population of begomoviruses that cause the tomato yellow leaf curl disease in the Mediterranean basin. Virology, 359 : 302 - 312.
7. Anon., (2006). Consensus document on the biology of *Capsicum annum* complex (chilli peppers, hot peppers and sweet peppers). Environment.
8. Arrieta, A.B.; Diaz-Rodriguez, N.; del Ser, J.; Bennetot, A.; Tabik, S.; Barbado, A.; Garcia, S.; Gil-Lopez, S.; Molina, D.; Benjamins, R.; et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. Inf. Fusion 2020, 58, 82–115.
9. Austier V., 1994 - Jardins de villes, Jardins des champs : maraîchage en Afrique de l'Ouest du diagnostic à l'intervention, Edition GRET 295 p.
10. Austier V., 1994 - Jardins de villes, Jardins des champs : maraîchage en Afrique de l'Ouest du diagnostic à l'intervention, Edition GRET 295 p.
11. Bird (A. F.) - 1962 - The inducement of giant cells by *Meloidogyne jauanica*. Hematological 8, 1-10.
12. Bird, D.M., Kaloshian, I., 2003. Are roots special? Nematodes have their say. Physiological and Molecular Plant Pathology, 62: 115-123.
13. Blancard D., 1988. Maladies de la tomate : Observer, Identifier, Lutter. I.N.R.A Paris 1988, I.S.B.N.2738000878. 205 pages.
14. BLANCARD D., 2009 - Les maladies de la tomate. Identifier, connaitre, maitriser. Éditions Quae, Paris, France, 679p.
15. Blaxter, M.L., De Ley, P., Garey, J.R., Liu, L.X., Scheldeman, P., Vierstraete, A., et al., 1998. A molecular evolutionary framework for the phylum Nematoda. Nature, 392 : 71-75.
16. Blok, V.C., Jones J.T., Phillips M.S., Trudgill D.L., 2008. Parasitism genes and host range disparities in biotrophic nematodes: the conundrum of polyphagy

- versus specialisation. *BioEssays: news and reviews in molecular, cellular and developmental biology*, 30: 249-59.
17. Bongers, T., 1990. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 83: 14-19.
 18. Bouhroua R.T., 1991. Contribution à l'étude bio écologique des insectes et des acariens nuisibles en cultures protégées dans la région de Tlemcen et mise au point d'une stratégie de lutte. Mémoire de Magister, option : Phytotechnie. Institut National d'Agronomie El-Harrech, Algérie, 418 pages.
 19. Castagnone-Sereno P. et Djian-Caporalino C. (2011). Lutte contre les nématodes à galles en cultures maraîchères : des recherches pour promouvoir la durabilité des résistances variétales. *Innovations Agronomiques*, 15 : 55-64.
 20. Castagnone-Sereno, P., Danchin, E.G., Perfus-Barbeoch, L., Abad, P., 2013. Diversity and evolution of root-knot nematodes, genus *Meloidogyne*: New insights from the genomic era. *Annual Review of Phytopathology*, 51: 203-220.
 21. Cayrol, J.C., Djian-Caporalino C., Panchaud-Mattei E., 1994. La lutte biologique contre les nématodes phytoparasites. Dossier de la Cellule Environnement n°17. INRA, 5 : 161-174.
 22. Chen, L.C.; Papandreou, G.; Kokkinos, I.; Murphy, K.; Yuille, A.L. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2018 , 40, 834–848.
 23. CHIKHAOUI, A. (2018). Caractérisation d'une variété de melon (*Cucumis*. Tizi-Ouzou.
 24. Christie (J. R.) - 1936 - The development of root-knot nematode galls. *Phytopathology* 26, 1-22.
 25. Coyne, D.L., Nicol, J.M., Claudius-Cole, B., 2010. Les nématodes des plantes : Un guide pratique des techniques de terrain et de laboratoire.
 26. Daulton (R. A. C.), Nusbaum (C. J.) - 1961 - The effect of soil temperature on the survival of the root-knot nematodes *Meloidogyne jauanica* and *M. hapla*. *Nematologica* 6, 280-294.
 27. De Guiran, G., Netscher, C., 1970. Les nématodes du genre *Meloidogyne* parasites de cultures maraîchères au Sénégal. Cahier ORSTOM, Serie Biologie, 11: 151-158.
 28. De Waele, D., Elsen, A., 2007. Challenges in tropical plant nematology. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 45: 457-485.
 29. Diba, A.; Sharma, V.; Pazandeh, A.; Pirsiavash, H.; van Gool, L. Weakly supervised cascaded convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2017*, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017; pp. 914–922.
 30. Djian-Caporalino, C., Védie, H., Arrufat, A., 2009. Gestion des nématodes à galles : lutte conventionnelle et luttés alternatives. *L'atout des plantes pièges*. *Phytoma*, 624 : 21-25.

31. Djian-Caporalino, C., Védie, H., Arrufat, A., 2009. Gestion des nématodes à galles : lutte conventionnelle et luttés alternatives. L'atout des plantes pièges. *Phytoma*, 624 : 21-25.
32. Eisenback, J. D. 1985. Detailed morphology and anatomy of second-stage juveniles, males, and females of the genus *Meloidogyne* (root-knot nematodes). In *An advanced treatise on Meloidogyne*, Vol. I, Biology and control, J. N. Sasser and C. C. Carter, eds., North Carolina State Univ. Graphics, Raleigh.
33. FAO., 2015. Données de la base statistique de l'organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture sur le site : <http://apps.fao.org>
34. Feldmesser, J., 1971. Estimated crop losses from plant-parasitic nematodes in the United States. *Soc.Nematol. (USA) Special Publication*, No. 1.
35. Floyd, R., Abebe, E., Papert, A., Blaxter, M., 2002. Molecular barcodes for soil nematode identification. *Molecular Ecology*, 11: 839-850.
36. Ghelamallah A., 2009. Contribution à l'étude bioécologique de la mineuse de la tomate *Tuta absoluta* Meyrick (1917) (Lépidoptera : Géléchiidae) dans la région de Mostaganem. Mémoire de Magister en Sciences agronomiques. Université de Mostaganem, 56 pages.
37. Girshick, R.; Donahue, J.; Darrell, T.; Malik, J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2014*, Columbus, OH, USA, 23–28 June 2014; pp. 580–587.
38. Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W., 2003. *Le sol vivant*, 2e édition revue et complétée. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 568 pp.
39. Huang, G.; Liu, Z.; van der Maaten, L.; Weinberger, K.Q. Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2017*, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017; pp. 4700–4708.
40. Hugot, J.P., Baujard, P., Morand, S., 2001. Biodiversity in helminths and nematodes as a field of study: an overview. *Nematology*, 3:199-208.
41. Hunt, D.J., Handoo, Z.A., 2009. Taxonomy, identification and principal species. *Root-knot nematodes*, 1 : 55-88.
42. Hussey, R.S., Davis, E.L., Ray, C., 1994. *Meloidogyne* stylet secretions. In *Advances in molecular plant nematology*. Springer US. p: 233-249.
43. IDRIS, K. M. (2019). Etude de l'influence de quelques techniques. Biskra.
44. Ingham, R.E., Trofymow, J.A., Ingham, E.R., Coleman, D.C., 1985. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecological monographs*, 55:19-140.
45. Jia, Y., Shelhamer, E., Donahue, J., Karayev, S., Long, J., Girshick, R., ... & Darrell, T. (2014, November). Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. In *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia* (pp. 675-678).
46. Jiang, Y. G., Wu, Z., Tang, J., Li, Z., Xue, X., & Chang, S. F. (2018). Modeling multimodal clues in a hybrid deep learning framework for video classification. *IEEE Transactions on Multimedia*, 20(11), 3137-3147.

47. Jones H., Whipps J. A., et Gurr S. J. (2001). The tomato powdery mildew fungus *Oidium neolycopersici*. *Molecular Plant Pathologie*, 2 : 303 - 309. CHIBANE A., 1999 - Tomate sous serre. Fiche Technique. Bulletin mensuel d'information et de liaison du P.N.T.T.A. N° 57, juin 1999, Maroc, 4 p.
48. Jones JT, et al. 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology* 14 : 946–961.
49. Jouni, H. (2018). Cellules analogiques CMOS pour réseaux de neurones. Application à la classification des cellules cancéreuses dans le sein (Doctoral dissertation, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019); Lebanese international university).
50. Krizhevsky, A.; Sutskever, I.; Hinton, G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *NIPS 2012* , 25, 84–90.
51. Lee, D.L., (ed.). 2002. The biology of nematodes. CRC Press. 635 pp.
52. Liu, J.; Wang, X. Plant diseases and pests detection based on deep learning: A review. *Plant Methods* 2021 , 17, 22.
53. Long, J.; Shelhamer, E.; Darrell, T. Fully convolutional networks for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015*, Boston, MA, USA, 7–12 June 2015; pp. 3431–3440.
54. Messiean C M et Lafon R, 1991. Les maladies des plantes maraichères 2 ème édition. Institut Nationale de la Recherche Agronomique. Marcel Bon 70-Vesoul. Edit. INRA : 89-117p.
55. Montavon, G.; Samek, W.; Muller, K.R. Methods for interpreting and understanding deep neural networks. *Digit. Signal Process.* 2018, 73, 1–15.
56. MUDASSAR Iqbal, Iqbal M, Ahmad S, Chishti S.A.S. and Niaz S. (2015) Performance of *Cucumis sativus* L. Accessions under tunnel. *J. Agric. Res.*, 53 (1): 103-107.
57. Naika S., De Jeude J., De Goffau M., Hilmi M., et B. Vam Dam. (2005). La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation, Edition : Wageningen, pays-bas. 105p.
58. Naika S., Jeude J.V.L., Goffau M., Hilmi M., Vandam B., 2005 - La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation, *Agrodok* 17, vol 5, Ed. Wageningen, Pays-Bas, p 105.
59. NYABYENDA, P. 2007.- Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique : Cultures industrielles et d'exportation, cultures fruitières, cultures maraichères, Volume2. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, 128p.
60. Otoum, Y., Liu, D., & Nayak, A. (2022). DL-IDS: a deep learning-based intrusion detection framework for securing IoT. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(3), e3803.
61. Parrochia. 1997, Classifications, histoire et problèmes formels. Cinquièmes Rencontres de la société Francophone de classification SFC'97. Lyon : s.n., Septembre.
62. PERON J,2004. Les cultures maraichères en Algérie tome 1: légumes fruits
63. PLANETOSCOPE.COME. (2012, 06 12). planetoscope-statistiques:production mondiale de melons. Consulté le 04 22, 2021.

64. Powell, N.T., 1971. Interactions between nematodes and fungi in disease complexes. *Annual Review of Phytopathology*, 9: 253-274.
65. Ren, S.Q.; He, K.M.; Girshick, R.; Sun, J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. In *Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Montreal, QC, Canada, 7–12 December 2015.
66. Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention 2015*, Munich, Germany, 5–9 October 2015; pp. 234–241.
67. Seck P.A., 2005 - Manuel sur les principaux ravageurs et maladies des cultures maraichères dans la zone des Niayes, DPV, Thiaroye, pp 119.
68. Seignobos C., Iyébi-Mandjek O., 2000 - Atlas de la province extrême-nord Cameroun, Planche 19, Cultures maraichères, Ed Institut de recherche pour le développement, Paris, pp102.
69. Seignobos C., Iyébi-Mandjek O., 2000 - Atlas de la province extrême-nord Cameroun, Planche 19, Cultures maraichères, Ed Institut de recherche pour le développement, Paris, pp102.
70. Seinhorst, J.W., 1962. Modifications of the elutriation method for extracting nematodes from soil. *Nematologica*, 8: 117-128.
71. Sellami, S., Lounici, M., 1999. Distribution et plantes hotes associees aux Meloidogyne sous abrisplastiques en Algérie, *Namatol. Medit*, 27 : 295-301.
72. Siddiqi, M.R., 2000. *Tylenchida: parasites of plants and insects.*, (Ed. 2). CABI. 833 pp.
73. Siddiqi, M.R., 2000. *Tylenchida: parasites of plants and insects.*, (Ed. 2). CABI. 833 pp.
74. Simonyan, K.; Zisserman, A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv 2014*, arXiv:1409.1556.
75. Srivastava, N., & Salakhutdinov, R. R. (2013). Discriminative transfer learning with tree based priors. *Advances in neural information processing systems*, 26.
76. Sumenkova, N.I., 1988. *Nematodes of plants and soils: Neotylenchoidea*. Brill. 280 pp.
77. Szegedy, C.; Vanhoucke, V.; Ioffe, S.; Shlens, J.; Wojna, Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2016*, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016; pp. 2818–2826.
78. Taylor, C.E., Brown, D.J., 1997. *Nematode vectors of plant viruses*. CAB INTERNATIONAL.
79. Wesemael W, Viaene N, Moens M. 2011. Root-knot nematodes (Meloidogyne spp.) in Europe. *Nematology* 13 : 3–16.
80. Williamson, V.M., Gleason, C.A., 2003. Plant-nematode interactions. *Current opinion in plant biology*, 6: 327-333.
81. Y. LeCun, B.Boser, J.S.Denker, D.Henderson, R.E .Howard, W.Hubbard , L.D. Jackel, 1990 “Handwritten digit recognition with a back propagation network.

- In: *Advances in Neural Information Processing Systems*”, Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, pp. 396–404,
82. Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner: 1998 “Gradient-based learning applied to document recognition”, *Proc. IEEE* , vol.86, pp.2278– 2324,
 83. Yeates, G.W., Bongers, T., De Goede, R.G.M., Freckman, D.W., Georgieva, S.S., 1993. Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 25: 315-331.
 84. Zaccone G, 2017. MD REZAUL Karim, MENSRAWY Ahmed. Deep learning with tensorflow.
 85. Zoph, B.; Le, Q.V. Neural architecture search with reinforcement learning. arXiv 2016, arXiv:1611.01578.

Références électroniques

1. (www.eppo.int/QUARANTINE/listA2.htm).
2. R.P. Esser (<http://www.congo.ird.fr/html/nematode.htm>).



ANNEXE

Annexe

Annexe 1 : Fiche d'enquête sur les nématodes à galle du genre *Meloidogyne* Spp. sur les cultures maraichères.

Fiche d'enquête n° :	date ... /...../2024
1. Identification de l'exploitation :	
<input type="checkbox"/> Wilaya :..... Commune :Région <input type="checkbox"/> Superficie totale de l'exploitation : <input type="checkbox"/> Type de l'exploitation : <input type="checkbox"/> Etes-vous : propriétaires locataire	
2. Destination :	
<input type="checkbox"/> Superficie étudiée.....ha <input type="checkbox"/> Superficie totale la tomate.....ha <input type="checkbox"/> Superficie totale plantes herbacéesha <input type="checkbox"/> Superficie totale exploitation.....ha	
3. Niveau de technicité de Gérant	
<input type="checkbox"/> Pas de formation <input type="checkbox"/> Agriculteur qualifié <input type="checkbox"/> Technicien <input type="checkbox"/> Ingénieur agronome	
4. Caractéristiques du site et mode de conduite de la culture	
<input type="checkbox"/> Culture en place.....Variété..... <input type="checkbox"/> Précédant cultural (n°1)Variété..... <input type="checkbox"/> Précédant cultural (n°2)Variété..... <input type="checkbox"/> Précédant cultural (n°3)Variété.....	
5. Système de culture	
<input type="checkbox"/> Intensif <input type="checkbox"/> Traditionnel	
6. Environnement de la parcelle	
<input type="checkbox"/> Même culture <input type="checkbox"/> Autre culture <input type="checkbox"/> Autres	
7. Bordure :	
<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
8. Pratique de la jachère	
<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
9. Mécanisation	
<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
10. Type d'irrigation	
<input type="checkbox"/> Absence d'irrigation <input type="checkbox"/> Rigoles <input type="checkbox"/> Aspersion <input type="checkbox"/> Goute à goutte	

<p>11. Utilisez-vous la fumure organique sur vos terres :</p> <p><input type="checkbox"/> Oui</p> <p><input type="checkbox"/> Non</p>	
<p>12. Quel type de fumure organique utilisée :</p> <p><input type="checkbox"/> Volaille</p> <p><input type="checkbox"/> Bovin</p> <p><input type="checkbox"/> Ovin</p>	
<p>13. Environnement de la parcelle :</p> <p><input type="checkbox"/> Même culture</p> <p><input type="checkbox"/> Autre culture</p> <p><input type="checkbox"/> Autres</p>	
<p>14. Pratique de la jachère :</p> <p><input type="checkbox"/> Oui</p> <p><input type="checkbox"/> Non</p>	
<p>15. Type de jachère :</p> <p><input type="checkbox"/> Travillée</p> <p><input type="checkbox"/> Non travaillée</p>	
<p>16. Type de labour :</p> <p><input type="checkbox"/> Profond</p> <p><input type="checkbox"/> Labour d'été</p>	
<p>17. Type de charrue :</p> <p><input type="checkbox"/> A disque</p> <p><input type="checkbox"/> A c</p> <p><input type="checkbox"/> Autre</p>	
Connaissance des nématodes Meloidogynes	
<p>18. Connaissez-vous les Nématodes meloidogynes ?</p> <p><input type="checkbox"/> Oui</p> <p><input type="checkbox"/> Non</p>	
<p>19. Depuis quand ?.....</p>	
<p>20. Désinfection du sol avant culture :</p> <p><input type="checkbox"/> Oui</p> <p><input type="checkbox"/> Non</p>	
<p>21. Quels sont les symptômes de ces nématodes ?</p> <p><input type="checkbox"/> Sur feuilles.....</p> <p><input type="checkbox"/> Sur racines.....</p>	
<p>22. Méthodes de lutte utilisées contre les nématodes</p> <p><input type="checkbox"/> Rotation culturale</p> <p><input type="checkbox"/> Monoculture</p> <p><input type="checkbox"/> Polyculture</p> <p><input type="checkbox"/> Labour d'été</p> <p><input type="checkbox"/> Produit chimique (Nématicides)</p>	
<p>23. Nématicide utilisé :</p> <p><input type="checkbox"/> Nom commercial.....</p> <p><input type="checkbox"/> Matière active</p> <p><input type="checkbox"/> Dose.....</p> <p><input type="checkbox"/> Mode 'action.....</p> <p><input type="checkbox"/> Mode d'application</p>	