



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCE

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département d'Ecologie et Environnement

Laboratoire d'Ecologie et Gestion des Ecosystèmes Naturels

THÈSE

Présentée par

M. BEKKAL BRIKCI Sohayb

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctorat LMD

En : « Ecologie Animale »

THÈME

Lutte biologique contre le nématode des citrus *Tylenchulus semipenetrans* (Cobb, 1913) par des méthodes de modélisation moléculaire à base des plantes dans l'Algérie occidentale

Soutenue publiquement, le 20/07/2025, devant le jury composé de :

Présidente :	Mme MEZIANE Hassiba	Professeur	Université de Tlemcen
Directeur de thèse :	M. HASSANI Faïçal	Professeur	Université de Tlemcen
Co- Directrice de thèse :	Mme ABDELLI Imane	Professeur	ESSA-Tlemcen
Examineurs :	M. MESLI Lotfi	Professeur	Université de Tlemcen
	Mme CHEMOURI Hafida	Professeur	ESSA-Tlemcen

Année universitaire 2024-2025

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

PUBLICATIONS

➤ Onze (11) publications internationales

- ❖ Publication internationale dans le journal « Journal of Biomolecular Structure and Dynamics » de catégorie « A » avec ISSN 0739-1102, EISSN 1538-0254, Volume 39, 2021 - Issue 9 Pages 3263-3276, intitulée « In silico study the inhibition of angiotensin converting enzyme 2 receptor of COVID-19 by *Ammoides verticillata* components harvested from Western Algeria » publiée le 14 Mai 2020, avec Imane Abdelli, Faïçal Hassani, Sohayb Bekkal Brikci & Said Ghalem comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « Plant Archive » de catégorie “B” avec ISSN 0972-5210, EISSN 2581-6063, intitulée “THE IMPACT OF ESSENTIAL OILS OF THE LAMIACEAE FAMILY AGAINST *TYLENCHULUS SEMIPENETRANS* USING MOLECULAR MODELING METHODS”, dans le Vol. 21 No.1 April, 2021,” avec BEKKAL BRIKCI Sohayb, ABDELLI I., HASSANI F, et BEREKSI REGUIG M comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « Indian Journal of Ecology » de catégorie “B” avec ISSN 0304-5250 (2021) 48(3): 716-721) intitulée « Impact of Essential Oils of Lamiaceae Family Against *Tylenchulus semipenetrans* » et BEKKAL BRIKCI S., ABDELLI I., HASSANI F, et BEREKSI.REGUIG M comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « Genetics and Biodiversity Journal » de catégorie “B” avec ISSN 2602-5582, EISSN 2588-185X, *Special issue(Aromatic and Medicinal Plants)*, 39-48, intitulée “Study of the bio- insecticidal power of *Pistacia lentiscus* and *Pisatciaatlantica* from Tlemcen region”, avec BEREKSI REGUIG MERYEM, ABDELLI IMANE, HASSANI FAICAL and BEKKAL BRIKCI Sohayb comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « Biologija » de catégorie “B” avec ISSN 1392-0146, Vol 68 No 4 (2022) intitulée” An in silico study into the bioacaricide power of the Algerian argan tree against *Varroa destructor*» et Amina Belhadji, Imane Abdelli,

Faiçal Hassani, Sohayb Bekkal Brikci, Sarra Ghalem, Hafiz Muzzammel Rehman, et Réda Kechairi comme auteurs.

- ❖ Publication internationale dans le journal «Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca» de catégorie « A » avec ISSN 0255-965X, EISSN 1842-4309 intitulée« The floristic composition, morphometric and the adaptation of a new species: *Malva subovata* in the matorral of Algeria (Djbel fellaoucen) »,dans le Vol. 51 No. 2 (2023) , et Sarra GHALEM, Faiçal HASSANI, Imane ABDELLI, Amina BELHADJI,et Sohayb BEKKAL BRIKCI comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology» de catégorie « A » avec ISSN 1126-3504, EISSN 1724-5575 intitulée« Enzyme inhibitory, antioxidant and anti-inflammatory activities of *Anabasis articulata* phenolic-rich extract; in vitro, in vivo, and in silico studies» dans le Vol. 158,2024- issu 4, et Dounia Ben Menni, Nabila Belyagoubi-Benhammou, Imane Abdelli, Sohayb Bekkal Brikci, Assia Benmahieddine,Hanane Ben Menni,Otmane Boutrif,Angelo Gismondi,Gabriele Di Marco,Alessia D'Agostino,Antonella Canini,Houari Benamar,Mohammad Saeed Kharazmi,Miguel Angel Prieto Lage et Seid Mahdi Jafari comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal «Brazilian Journal of Animal and Environmental Research» de catégorie « B » avec ISSN 2595-573X, intitulée «Control of the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans* using natural compounds through molecular modeling methods»vol.7, n.4, p. 1-17, et Sohayb BEKKAL BRIKCI, Imane ABDELLI, Faiçal HASSANI, Sarah GHALEM, et Yamina HAOUAS comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « Biologija» de catégorie “B” avec ISSN 1392-0146, intitulée «Screening the phytochemical components of *Ruta montana* L. for their inhibitory activity to reduce the progress of osteoarthritis: an in silico study»vol.70.N°4, et Imane Abdelli Faiçal Hassani, Sarra Ghalem, Sohayb Bekkal Brikci, Ihab Sid Ahmed Nour, Andrés Reyes Chaparro, Amina Belhadji, Mohamed El Hadi Ghalem, Abdelkarim Ferouani comme auteurs.

- ❖ Publication internationale dans le journal «Brazilian Journal of Animal and Environmental Research» de catégorie « B » avec ISSN 2595-573X, intitulée «In silico evaluation of the impact of biomolecules on the resistance of *Calliptamus barbarus*», vol.7, n.4,et Boukli Hacem Ahmed Sofiane, Faïçal Hassani, Imane Abdelli, Sarra Ghalem, Yamina Haouas, Babali Brahim, Sohayb Bekkal Brikci,et Belhadji Amina comme auteurs.
- ❖ Publication internationale dans le journal « BANGLADESH JOURNAL OF BOTANY» de catégorie « A » avec ISSN 0253-5416, EISSN 2079-9926, Volume 54(1): 145-152, 2025 (Mars), intitulée « IMPORTANCE OF ESSENTIAL OILS FOR THE BIOCONTROL OF *TYLENCHULUS SEMIPENETRANS* NEMATODE POPULATIONS THROUGH MOLECULAR MODELING METHODS” avec Sohayb Bekkal Brikci, Imane Abdelli, & Faïçal Hassani comme auteurs.

➤ Une (01) publication nationale

- ❖ Publication nationale dans le journal « Journal of Materials and Structures» de catégorie “B” avec ISSN 2716-8077 intitulée “ A MOLECULAR DOCKING APPROACH FOR EXPLORING HERBAL INHIBITORS OF XANTHINE OXIDASE IN GOUT DISEASE USING *FOENICULUM VULGARE* PLANT” dans le Vol.07 (2021), P.1-17 et ABDELLI Imane, HASSANI Faïçal, BEKKAL BRIKCI Sohayb, BEREKSI REGUIG Meriem, ZERIOUH-GHALEM Sara, KERZABI Rachida comme auteurs.

COMMUNICATIONS

- 23 Communications dont : 14 communications internationales et 9 communications nationales.
- Participation à la première et la deuxième semaine doctorale, avec le titre de meilleure présentation orale du département d'écologie et de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université Abou Bekr Belkaïd - Tlemcen.

Control of the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans* using natural compounds through molecular modeling methods

Controle do nematoide dos citros *Tylenchulus semipenetrans* usando compostos naturais por meio de métodos de modelagem molecular

Control del nematodo de los cítricos *Tylenchulus semipenetrans* utilizando compuestos naturales mediante métodos de modelización molecular

DOI: 10.34188/bjaerv7n4-095

Submetido: 01/08/2024

Aprovado: 30/09/2024

Sohayb Bekkal Brikci

Doctorate in Animal Ecology at the University of Tlemcen, Algeria,
Laboratory of Ecology and Management of Natural Ecosystems, Department of Ecology and
Environment - Faculty of Nature and Life Sciences, Abou Bekr Belkaid University
Tlemcen. Algeria
sohaybtlemcen@gmail.com, sohayb.bekkalbrikci@univ-tlemcen.dz

Imane Abdelli

Higher School of Applied Sciences
Laboratory of Natural and bio-actives Substances, Faculty of Science - University Tlemcen.
Algeria
i_abdelli@yahoo.fr

Faïçal Hassani

Ecology and Management of Natural Ecosystems Laboratory, Department of Ecology and
Environment - Faculty of Nature and Life Sciences, Abou Bekr Belkaid University
Tlemcen. Algeria
faicalhassani@yahoo.fr

Sarah Ghalem

Ecology and Management of Natural Ecosystems Laboratory, Department of Ecology and
Environment-Faculty SNV-STU-University
Tlemcen. Algeria
sarah.ghalem@outlook.com

Yamina Haouas

Doctorate in Plant Ecology at the University of Tlemcen, Algeria,

Laboratory of Ecology and Management of Natural Ecosystems, Department of Ecology and Environment- Faculty of Nature and Life Sciences, Abou Bekr Belkaid University

Tlemcen. Algeria
yaminahouas6@gmail.com

ABSTRACT

Tylenchulus semipenetrans is a key nematode pest of citrus, responsible for the 'slow decline' disease. It is distributed in almost all citrus-growing countries worldwide. These nematodes primarily infect feeder roots, which affects the uptake of water and soil nutrients. Plants infected by the nematode yield fewer fruits, which are also smaller in size. Chemical control is widely used for protection, improvement, and acceleration of agricultural yield; however, it poses risks to human health and the environment, affecting fruit toxicity and harming beneficial fauna. This highlights the need for specific alternatives. In this study, we will conduct *in silico* experiments to identify the most effective enzyme-ligand complexes that lead to the best inhibitors of Acetyl CoA Carboxylase in the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans*. The Acetyl CoA Carboxylase enzyme is responsible for fatty acid synthesis in *Tylenchulus semipenetrans*, and its disruption affects the synthesis of the surface layer. This inhibitory action is based on the essential oils of plants. The advantages of this method include absolute specificity, absence of toxicity, and significant efficiency in crop protection, achieved through molecular modeling techniques.

Keywords: *Tylenchulus semipenetrans*, citrus, Acetyl CoA Carboxylase, essential oils, Molecular modeling methods.

RESUMO

O *Tylenchulus semipenetrans* é uma das principais pragas de nematoides dos cítricos, responsável pela doença do "declínio lento". Ele é distribuído em quase todos os países produtores de citros do mundo. Esses nematoides infectam principalmente as raízes de alimentação, o que afeta a absorção de água e nutrientes do solo. As plantas infectadas pelo nematoide produzem menos frutos, que também são menores em tamanho. O controle químico é amplamente utilizado para proteção, melhoria e aceleração da produção agrícola; no entanto, ele apresenta riscos à saúde humana e ao meio ambiente, afetando a toxicidade dos frutos e prejudicando a fauna benéfica. Isso destaca a necessidade de alternativas específicas. Neste estudo, realizaremos experimentos *in silico* para identificar os complexos enzimáticos-ligantes mais eficazes que levam aos melhores inibidores da Acetil CoA Carboxilase no nematoide dos citros *Tylenchulus semipenetrans*. A enzima Acetil CoA Carboxilase é responsável pela síntese de ácidos graxos no *Tylenchulus semipenetrans*, e sua interrupção afeta a síntese da camada superficial. As vantagens desse método incluem especificidade absoluta, ausência de toxicidade e eficiência significativa na proteção de culturas, obtida por meio de técnicas de modelagem molecular.

Palavras-chave: *Tylenchulus semipenetrans*, citros, Acetil CoA Carboxilase, óleos essenciais, métodos de modelagem molecular.

RESUMEN

Tylenchulus semipenetrans es una plaga clave de nematodos de los cítricos, responsable de la enfermedad del «decaimiento lento». Se distribuye por casi todos los países citrícolas del mundo. Estos nematodos infectan principalmente las raíces alimentadoras, lo que afecta a la absorción de agua y nutrientes del suelo. Las plantas infectadas por el nematodo producen menos frutos, que también son de menor tamaño. El control químico se utiliza ampliamente para proteger, mejorar y acelerar el rendimiento agrícola; sin embargo, plantea riesgos para la salud humana y el medio ambiente, ya que afecta a la toxicidad de los frutos y perjudica a la fauna beneficiosa. Esto pone de manifiesto la necesidad de alternativas específicas. En este estudio, realizaremos experimentos *in silico* para identificar los complejos enzima-ligando más eficaces que den lugar a los mejores inhibidores de la Acetil CoA Carboxilasa en el nematodo de los cítricos *Tylenchulus semipenetrans*. La enzima Acetil CoA Carboxilasa es responsable de la síntesis de ácidos grasos en *Tylenchulus semipenetrans*, y su interrupción afecta a la síntesis de la capa superficial. Las ventajas de este método son la especificidad absoluta, la ausencia de toxicidad y una eficacia significativa en la protección de los cultivos, conseguida mediante técnicas de modelización molecular.

Palabras clave: *Tylenchulus semipenetrans*, cítricos, Acetil CoA Carboxilasa, aceites esenciales, métodos de modelización molecular.

1 INTRODUCTION

Citrus orchards in Algeria cover an area of approximately 71 000 ha and are located mainly along the coastal zones (MADRP, 2018). The genus *Tylenchulus* contains four species in the world. Among them, *T. semipenetrans*, the causal agent of “slow decline” of citrus, has a worldwide distribution and causes significant crop losses in all citrus-growing regions of the world (Siddiqi, 1974; Duncan and Cohn, 1990). This nematode was first observed in orange tree in southern California by Cobb in 1912. It is a semi-endoparasitic nematode of all citrus species (**Figure 1**) which has ability to feed on deeper cortex cells. Due to its feeding on roots tree slowly losses its vigor and productivity which ultimately lead towards slow decline (Abd-Elgawad *et al.*, 2010). Crop losses caused by *T. semipenetrans* are estimated to be in the range of 15% to 30% per year (Duncan, 2005). Symptoms of nematode attack often include reduced vigor, chlorosis, leaf fall, dieback, and reduced production and weakened fruit quality (Cohn, 1969). The fight against nematodes often involves the Use of few nematicides and fumigants has which are restricted due to their health hazard effects on human, environment and non-target organisms (Rich *et al.*, 2004). such as spirotetramat. The latter presents a danger to ecosystems (Brück, *et al.*, 2009) and new control strategies are therefore urgently needed. For this, we thought of looking for bio-nematicides to improve the production and quality of citrus fruits in the world which can be made by certain plant parts and extracts possess nematocidal properties. The application of the plant parts or extracts to nematode infested soil affects nematode directly and stimulates soil microbes that reduce nematode populations (Nandal and Bhatti 1986; Reddy *et al.*, 1996; Ahmad *et al.*, 2004).

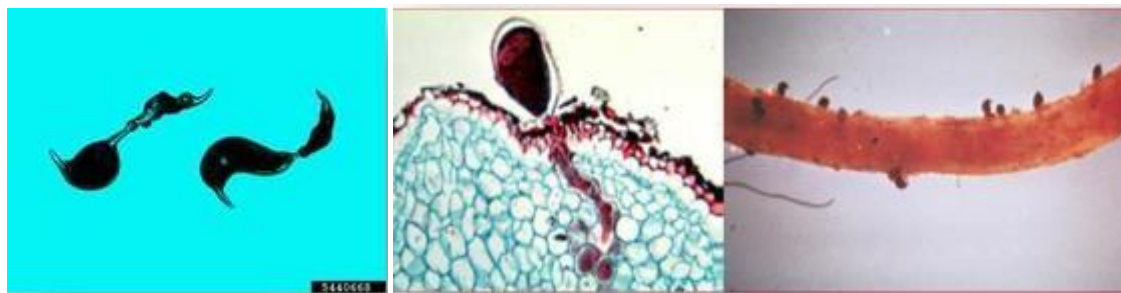


Figure. 1. *Tylenchulus semipenetrans* citrus nematode and his site feeding.

Source: Nemaplex website (2023).

Computational methods are applied at an early stage to provide valuable insights into understanding the chemical systems virtually and thus complement experimental analysis (Bafna, et al 2020). Molecular docking and Molecular dynamics (MD) can calculate the interaction energies and ligand binding mechanism of protein-ligand complexes (Vidal-Limon,2022). Molecular docking is the most commonly used method for precisely predicting the binding energy and binding sites which helps to evaluate the possibility of interactions and predicts binding modes of ligands to protein based on the knowledge of the 3D structure (Zígolo et al,2021; Shakil et al, 2012). MD simulation enables the continuous monitoring of conformational dynamics at the atomic level in the binding protein over a period of time (Collier et al 2024). Homogeneous protein modelling utilizes experimentally determined protein structures (templates) to predict the conformation of a protein with a similar amino acid sequence (target) (Sali;1995). *In silico*, protein modelling can be employed to predict the 3D protein models and their active sites. The critically active amino acid residues in the structural framework can be analysed using homogeneous modelling (Khan et al;2016)

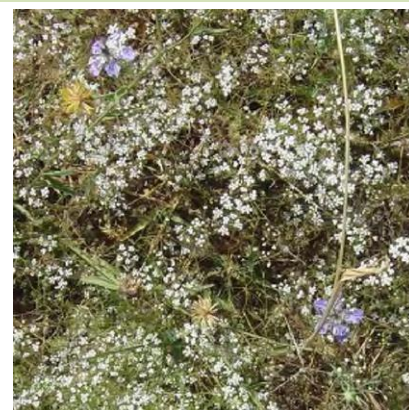
The aim of this present work is to focus on the *in silico* study to studying the inhibition of Acetyl CoA Carboxylase (Acc), the enzyme responsible for the synthesis of fatty acids in *T. semipenetrans*, its alteration disrupts the synthesis of the surface layer (Gutbrod, et al 2018). This inhibitory action is done by ligands derived from *Daucus crinitus*, *Thapsia garganica*, *Mentha × piperita*, *Inula viscosa* and *Ammoides verticillata* widely present in Algeria **Table 1**.

Table 1. All plants used in our study

Species	Descriptions	
<i>Daucus crinitus</i>	Is a perennial flowering plant species in the Apiaceae family and the <i>Daucus</i> genus, native to the western Mediterranean. The antioxidant potential of solvent extracts from <i>D. crinitus</i> , represent a potential source of natural additives for the food and/or pharmaceutical industries (Bendiabdellah et al;2012).	
<i>Thapsia garganica</i>	is a toxic plant species, native to the circum-Mediterranean region, in the Apiaceae family. This plant remains part of the traditional pharmacopoeia of North Africa, where it is used as a remedy for arthritis, herpes, hair loss, hypertension, rheumatism, eczema, and scabies (Abd El-Nasser et al;2020).	
<i>Mentha × piperita</i>	It is a herbaceous plant from the *Lamiaceae* family. Peppermint is a hybrid, hexaploid plant resulting from a spontaneous cross between (water mint) and (spearmint). It contains a higher concentration of menthol, which makes it widely used in cooking. It is also employed as a medicinal plant. Peppermint is used in various forms to flavor candies, ice creams, toothpastes, salads, chewing gums, and confectionery(Rouzbeh et al;2015).	
<i>Inula viscosa</i>	It is a flowering plant species in the Asteraceae family. <i>Inula viscosa</i> is common in the Mediterranean region, where it blooms at the end of summer and early autumn. It thrives in abandoned fields, rubble, and along roadsides and paths, forming abundant green clumps with yellow flower heads. It is considered quite invasive(Reeb ; 2010).	

Ammoides verticillata

It is a genus of flowering plants in the Apiaceae,. It is endemic to northern Africa and southern Europe. This plant, is an aromatic plant widely used in western Algeria for its culinary and therapeutic purposes, it has proven antioxidant and antimicrobial activities of essential oil (Bekhchi et al., 2010)



Source: Elaborated by the authors (2024).

2 MATERIALS AND METHODS

In this study, we will conduct *in silico* experiments to identify the most effective enzyme- ligand complexes that serve as potential inhibitors of the enzyme responsible for fatty acid synthesis in *T. semipenetrans*. Disruption of this enzyme, known as Acetyl CoA Carboxylase, affects the synthesis of the surface layer. To achieve this, we will use advanced computational tools, specifically molecular modelling techniques, including molecular docking and molecular dynamics, which have rapidly become integral to biological research.

Materials

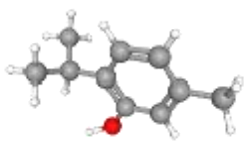
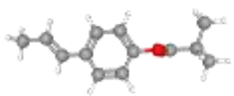
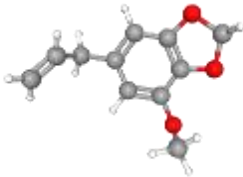
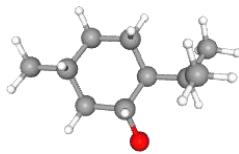
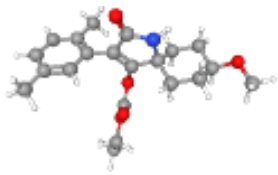
The hardware used for molecular docking consists of a desktop computer with the following specifications: 16 GB of RAM, an AMD Ryzen 53600XT 12-Core processor, and a 1 TB HDD, all connected to the internet and running Windows 10 (64-bit). For molecular dynamics simulations, Ubuntu was also utilized on the same hardware. The software employed includes the Protein Data Bank, PubChem, OpenBabel GUI, PyMOL version 2.5.4, AutoDock version 4.2.6, Biovia Discovery Studio, CHARMM-GUI, GROMACS version 5.1.2, and Grace. The study involved spirotetramat as the chemical pesticide, biotin as the native ligand, and various test ligands, which are active compounds extracted from the selected plants.

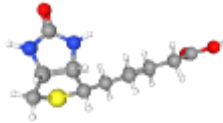
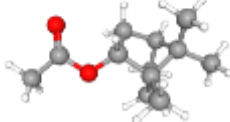
Methods

Ligand Preparation

The essential oils of the studied plants were extracted from the aerial parts (leaves and flowers). The major components identified include isochavicol isobutyrate from *Daucus crinitus* (Lanfranchi, Laouer et al., 2010), myristicin from *Thapsia garganica* (Kadda et al., 2017), menthol from *Mentha × piperita* (Catier et al., 2007), bornyl acetate from *Inula viscosa* (Boumaza, 2011), and thymol from *Ammoides verticillata* (Attou et al., 2017) **Table 2.**

Table 2. 3D Structures of the all ligands used in the experiment

Plants	Ligands	Structures
<i>Ammoides verticillata</i>	Thymol (45.77%)	
<i>Daucus crinitus</i>	Isochavicol isobutyrate	
<i>Thapsia garganica</i>	Myristicin 15.07 %	
<i>Mentha × piperita</i>	Menthol 35 to 70%	
Chemical pest	Spirotetramat	

1BDO Native ligand	Biotine	
<i>Inula viscosa</i>	Bornyl acetate (39,81%)	

The 3D structures of spirotetramat (the chemical pesticide), biotin (the native ligand of the ACC protein), and the phytochemical compound were obtained from PubChem in *.sdf format. The ligands were then converted to *.pdb format using OpenBabel GUI software. Optimization of the ligands was performed with AutoDock Vina by setting up the torsion tree, which involved selecting the root and detecting torsion. Finally, the ligands were saved in *.pdbqt format. **Source: Pubchem Database (2024).**

ACC protein Preparation

The Acc was downloaded from the Protein Data Bank (PDB) with PDB ID:1BDO (Figure 2) and resolution of 1.80 Å in (*.pdb) format. The 1BDO macromolecular complex was separated from the native ligand using the PyMOL software. The receptor was optimized in the AutoDock vina by adding hydrogen and charge and then saving it in (*.pdbqt).

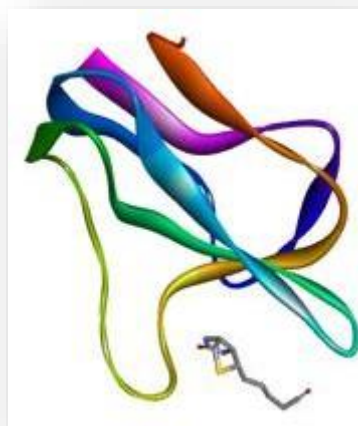


Figure. 2. 3D structure of 1BDO Protein Source: Elaborated by the authors (2024).

Molecular Docking

AutoDock 4.2 was utilized to dock ligands to the ACC, following the protocol outlined by Forli et al. (2016). The PDBQT files for both the ligands and ACC were prepared, and the grid box was configured to encompass the ACC surface, allowing for unrestricted ligand movement. All center grid boxes were standardised across different ligands in this study, with coordinates set to X=10.323, Y=19.083, and Z=-8.657, and a grid box dimension of 20 x 20 x 20. The grid setup was executed using autogrid.exe. Once the grid program was completed, the macromolecule was designated as a rigid filename, and the Lamarckian genetic algorithm (LGA) was selected as the docking method before running the AutoDock program. Ten poses were generated, from which the ones with the best energy scores were selected for further analysis. Finally, the docking results were visualised using Biovia Discovery Studio 2021, focusing on the ligand poses with the most favourable binding energy ($-\Delta G$, kcal/mol) for additional evaluation.

Molecular Dynamics simulation

Molecular dynamics (MD) simulations are widely employed to predict the stability of protein-ligand complexes. They provide insights into conformational changes over time, allowing us to assess the stability of the protein-ligand interactions (Shukla et al., 2017). In this study, the

dynamic behaviour of the most interesting ligands interacting with the 1BDO protein was investigated using GROMACS version 5.1.2 with the CHARMM36 force field on a Linux system (Kutzner et al., 2019; Abraham et al., 2015). The protein topology was prepared using the pdb2gmtool, and the protein complexes were solvated in a triclinic box.

Energy minimization of the system was performed using the steepest descent algorithm (Benson & Daggett, 2012). The protein was solvated using the TIP3P solvent model, and four Na⁺ ions were added to ensure overall neutrality. The complexes, comprising flavonoids and the 1BDO protein, were placed in a water box with a minimum margin of 1.5 Å from any edge to any protein atom. A constant pressure of 1 bar and a temperature of 300 K were maintained, with a time step of 2 fs for system stabilization. Temperature control was achieved using v-rescale, an optimized Berendsen thermostat coupling technique, while the Parrinello-Rahman method was employed for pressure coupling during NPT equilibration.

Energy minimisation was conducted for 50,000 iterations using the steepest descent algorithm, with a cutoff of 1000 kJ/mol to reduce steric clashes. Long-range electrostatic interactions were treated with the Particle Mesh Ewald (PME) method, using a Coulomb cutoff of 1.0 nm. The system underwent a final 100 ns molecular dynamics run, with each step set to 2 fs. Trajectory analysis was performed using various GROMACS tools. The gmtool and gmtool tools were used to calculate the root mean square deviation (RMSD) and root mean square fluctuations (RMSF) of the protein, respectively. Hydrogen bonds were analyzed using the gmtool tool, while the radius of gyration was assessed with the gyrate tool. Finally, plots were generated using Grace Software.

Molecular docking simulation

The optimal conformations of the ligands were analysed for their binding interactions, evaluated through binding free energies and the interactions between ligand atoms and active site residues. The details of the docking calculations for all ligands with the Acetyl CoA Carboxylase 1BDO target are summarized in Table 3. The molecules with the lowest binding energy and docking scores were deemed the most effective inhibitors of the target receptor, as lower binding energy indicates higher binding affinity (Simon ;2017)

Table 3. Docking (binding energy) results; their respective number of hydrogen bonds as well as interacting amino acids.

Docking Score (Binding Energy) (Kcal/mol)		Acetyl CoA Carboxylase 1BDO							
		Names	Color	Distance	Category	Types	From	From chemistry	To chemistry
Spirotetramat	-6.6	LIG1:N - A:ASP130:OD2		5,25935	Electrostatic	Attractive Charge	LIG1:N	Positive	A:ASP130:OD2
		LIG1:O - A:ARG84:O		3,26023	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	LIG1:O	H-Donor	A:ARG84:O
		A:VAL83:CA - :LIG1:O		3,42268	Hydrogen Bond	Carbon Hydrogen Bond	A:VAL83:CA	H-Donor	LIG1:O
		A:ARG84 - :LIG1		5,13231	Hydrophobic	Alkyl	A:ARG84	Alkyl	LIG1
		LIG1:C - A:PRO86		5,0599	Hydrophobic	Alkyl	LIG1:C	Alkyl	A:PRO86
		A:PHE148 - :LIG1:C		4,96939	Hydrophobic	Pi-Alkyl	A:PHE148	Pi-Orbitals	:LIG1:C
Bomyl acetate	-6.3	LIG1:N - A:ASP130:OD2		5,01575	Electrostatic	Attractive Charge	LIG1:N	Positive	A:ASP130:OD2
		LIG1:O - A:ARG84:O		3,11073	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	LIG1:O	H-Donor	A:ARG84:O
		A:PRO86 - :UNL1		4,03579	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	UNL1
		UNL1 - A:ILE127		4,09015	Hydrophobic	Alkyl	UNL1	Alkyl	A:ILE127
Isochavicol isobutyrate	-6.1	A:ARG84:HN - :UNL1:O		3,65187	Electrostatic	Attractive Charge	UNL1:O	Positive	A:ASP130:OD2
		A:PRO86 - :UNL1		2,09208	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:ARG84:HN	H-Donor	UNL1:O
		UNL1 - A:ILE127		4,01569	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	UNL1
		A:ARG84:HN - :UNL1:O		4,07085	Hydrophobic	Alkyl	UNL1	Alkyl	A:ILE127
Biotin		UNL1:O - A:ASP130:OD2		3,65187	Electrostatic	Attractive Charge	UNL1:O	Positive	A:ASP130:OD2
		A:ARG84:HN - :UNL1:O		2,09208	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:ARG84:HN	H-Donor	UNL1:O
		A:PRO86 - :UNL1		4,01569	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	UNL1
		:UNL							

	-5.4	1 - A:ILE 127		4,0708 5	Hydrophobic	Alkyl	UN L1	Alkyl	A:ILE1 27	Alkyl
Thymol		LIG1:O - A:GLU128: O		2,0793 2	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:GLU1 28:HN	H-Donor	LIG1: O	H-Acceptor
		A:PRO86 - :LIG1		3,0664 9	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	LIG 1:O	H-Donor	A:GLU1 28:O	H-Acceptor

	-5.3	A:ILE127 - :LIG1		4,4737 1	Hydrophobic	Alk yl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		LIG1:O - A:GLU128: O		4,2334	Hydrophobic	Alk yl	A:ILE127	Alkyl	LIG1	Alkyl
Menthol		A:GLU128:H N - :LIG1:O		2,0794 1	Hydrogen Bond	Conven tional Hydrog en Bond	A:GLU128: HN	H- Donor	LIG1:O	H- Acceptor
		LIG1:O - A:GLU128: O		3,0656	Hydrogen Bond	Conven tional Hydrog en Bond	:LIG1:O	H- Donor	A:GLU128: O	H- Acceptor
		A:PRO86 - :LIG1		4,4741 4	Hydrophobic	Alk yl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		A:PRO86 - :LIG1		4,8968 1	Hydrophobic	Alk yl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		A:ILE127 - :LIG1		4,2327	Hydrophobic	Alk yl	A:ILE127	Alkyl	LIG1	Alkyl
	-5.3	LIG1 - A:ILE 127		4,1935 4	Hydrophobic	Alk yl	LIG1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl
Myristicin		LIG1:O - A:ASP130:O D2		3,4642	Electrostatic	Attrac tive Char ge	LIG1:O	Positive	A:ASP130:O D2	Negativ e
		LIG1:O - A:ASP130:O D1		4,9077	Electrostatic	Attrac tive Char ge	LIG1:O	Positive	A:ASP130:O D1	Negativ e
	-5.2	LIG1:C - A:GLU128: O		3,5131	Hydrogen Bond	Car bon Hy dro gen Bo nd	LIG1:C	H- Donor	A:GLU128: O	H- Acceptor
		A:PRO86 - :LIG1		4,0571 4	Hydrophobic	Alk yl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		LIG1 - A:ILE 127		4,0264 7	Hydrophobic	Alk yl	:LIG1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl

Discovery studio visualizer was used for interactions that governed drug-target binding.

Hydrogen bonds and hydrophobic interaction (π -alkyl/alkyl) are the predominant occurring interaction

between molecules (Figure 3). Elaborated by the authors (2024).

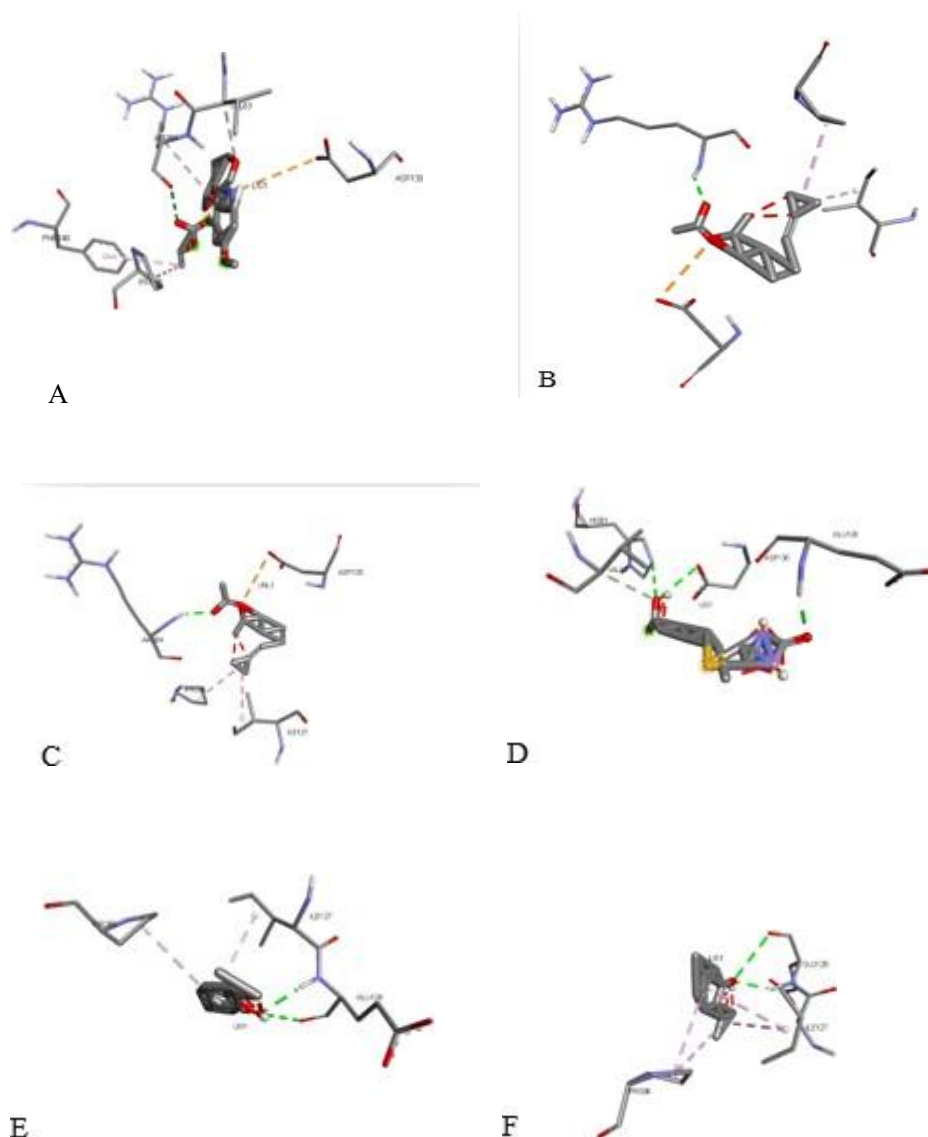


Figure 3. Ligands interactions at the active site of the ACC: A) Spirotetramat, B) Bornyl acetate, C) Isochavicol isobutyrate, D) Biotin, E) Thymol, F) Menthol, G) Myristicin.

Source: Elaborated by the authors (2024).

All phytochemicals from medicinal plants were docked into the active site of the 1BDO target using AutoDock Vina to predict the optimal binding poses of the phytochemicals and the protein, aiming for higher scores and better analysis. The binding free energies for seven selected compounds with the highest docking scores are summarized in Table 3. The two retained molecules are spirotetramat (the chemical pesticide) and bornyl acetate, due to their low binding free energies of -6.6 and -6.3 kcal/mol,

respectively, along with their notable inhibitory effects. Isochavicol isobutyrate follows with a score of -6.1 kcal/mol, while biotin, the native ligand, has a score of -5.4 kcal/mol. The scores for the other compounds are -5.3 kcal/mol for thymol and menthol, and -5.2 kcal/mol for myristicin.

Comparing all the binding scores, we found that the complex formed by 1BDO-spirotetramat has the lowest energy value, yielding the best docking score compared to biotin. Conversely, bornyl acetate produced nearly equivalent scores. Thus, we can consider both the 1BDO-bornyl acetate and 1BDO-spirotetramat complexes to be stable with high binding affinity. Based on these docking results, we classify bornyl acetate as a promising natural inhibitor of the enzyme 1BDO, in comparison to the chemical pesticide spirotetramat and all other studied ligands.

Molecular dynamics simulations

To validate the previous results, a 100 ns molecular dynamics simulation was conducted for the 1BDO-Biotin and 1bdo-Bornyl acetate complexes using GROMACS software version 5.1.2. The stability of the molecules was assessed through RMSD, RMSF, and Rg values. RMSD was used to evaluate the stability of the complexes by measuring the average changes in the protein structure during the simulation. RMSF analysed structural flexibility by calculating the deviation atoms of each residue over time in comparison to the reference structure.

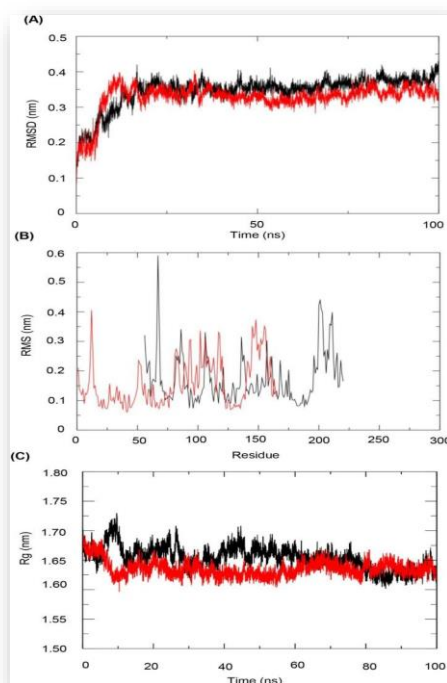


Figure 4. The results of molecular dynamics simulation. (A) RMSD of 1bdo- reference ligand “Biotin” (black) and Bornyl acetate – Acc complex (red) during the entire 100 ns. (B) Backbone RMS fluctuation of 1bdo-Biotin (black) and 1bdo- Bornyl acetate (red) depicts two flexible regions. (C) Showing Radius of gyration (Rg) of 1bdo-Biotin (black) and 1bdo- Bornyl acetate (red). Source: Elaborated by the authors (2024).

In Figure 4A, the RMSD trajectory for the template protein and the predicted structure “1bdo-Bornyl acetate” indicates a sharp increase during the initial few nanoseconds of the simulation. The system eventually reaches a stable state as the trajectories of the template and query structures converge, with variations ranging from 0.15 nm to 0.38 nm (up to 0.4 nm). The RMSF data (B) reveals that fluctuations of the amino acids ranged from 0.06 nm to 0.45 nm, exhibiting a significant divergence of up to 0.4 nm at the start. The Rg data (C) illustrates the compactness of the predicted structure (shown as a black line) in comparison to the template structure (shown as a red line).

3 CONCLUSION

Chemical nematicides, such as spirotetramat, commonly used in agriculture have ecotoxicological effects. As an alternative control method, attention has turned to bio-nematicides, which do not have harmful effects on the ecosystem. For this reason, we focus more on biological control to ensure a healthy and balanced ecological system. The aim of our study is to investigate the potential of natural compounds extracted from five plants widely present in Algeria as inhibitors of Acetyl CoA Carboxylase (PDB ID: 1BDO), the protein responsible for fatty acid synthesis in *T. semipenetrans*. Disruption of this protein alters the synthesis of the surface layer. These compounds were tested in an in-silico study for their inhibition of this protein.

The results of molecular docking showed that bornyl acetate, the major component (39.81%) of *Inula viscosa*, had a ΔG_{bind} score of -6.3 kcal/mol, which is comparable to the chemical pesticide spirotetramat and demonstrates a higher affinity than biotin, the reference ligand, and other tested compounds. Finally, the model of “1BDO-Bornyl acetate” was validated using a 100 ns molecular dynamics simulation. The RMSD, RMSF, and Rg values indicated the stability of the protein.

From this *in silico* study, we suggest that the essential oil components of *Inula viscosa* can inhibit Acetyl-CoA Carboxylase and may serve as effective bio-nematicides compared to spirotetramat, a chemical pesticide used against the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans*, without causing harmful effects on humans or the environment.

The remaining work should focus on the effectiveness and inhibitory power of *Inula viscosa* in the field, in order to protect citrus crops in a biological manner.

REFERENCES

MADRP (2018). Agricultural Statistics, Productions and surfaces, Serial B, 2016. Ministry of agriculture, rural development and fishing of Algeria. 77p.

Siddiqi, M.R. (1974). *Tylenchulus semipenetrans*, CIH descriptions of plant-parasitic nematodes. CAB International Institute of Parasitology, London. Set. 3, No. 34.

Duncan, L.W., & Cohn, E. (1990). Nematode parasites of citrus. In M. Luc, R.A. Sikora & J. Bridge (Eds.), Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture. (pp. 321-346). Wallingford, UK, CABI Publishing.

Sorribas, F. J., S. Verdejo-Lucas, J. Pastor, C. Ornat, J. Pons and J. Valero. 2008. Population densities of *Tylenchulus semipenetrans* related to physicochemical properties of soil and yield of clementine mandarin in Spain. Plant Disease, 92: 445-50.

Abd-Elgawad, M., F. Al-Yahya and Z. Stephan. 2010. Nematodes of citrus. In: WA Abu-Gharbieh, AS Al- Hazmi, ZA Stephan and AA Dawabah (eds.), Plant Nematodes in Arab Countries. Arab Society of Plant Protection. Amman, Jordan.

Duncan, L.W. (2005). Nematode parasites of citrus. In M. Luc, R. A. Sikora & J. Bridge (Eds.), Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture. (pp. 437-466). Wallingford, UK, CABI Publishing.

Cohn, E. (1969). The citrus nematode (*Tylenchulus semipenetrans* Cobb) as a pest of Citrus in Israel. Proceedings First International Citrus Symposium, 2, 1013-1017.

Baines, R., J. Martin, T. DeWolfe, S. Boswell and M. Garber. 1962. Effect of high doses of DD on soil organisms and growth and yield of lemon trees. Journal of Phytopathology, 52: 723-31.

Verdejo-Lucas, S. and M. McKenry. 2004. Management of the citrus nematode, *Tylenchulus semipenetrans*. Journal of Nematology, 36: 424.

Brück E , Elbert A , Fischer R , Krueger S , Kühnhold J,& Klueken AM. 2009.Movento (r), un insecticide ambimobile innovante pour aspirer contrôle des insectes nuisibles en agriculture: biologique profil et performance sur le terrain. Protection des cultures, 10, 838- 844 p.

Nandal SN, Bhatti DS, 1983. Preliminary screening against *Meloidogyne javanica*. Indian Journal of Nematology 13: 123- 127.

Ahmad MS, Tariq M, Riaz A, 2004. Some studies on the control of citrus nematode (*Tylenchulus semipenetrans*) by leaf extracts of three plants and their effects on plant growth variables. Journal of Plant Sciences 3: 544-548.

Reddy PP, Rao MS, Nagesh M, 1996. Management of citrus nematode, *Tylenchulus semipenetrans* by integration of *Trichoderma harzianum* with oil cakes. Nematologia Mediterranea 24: 265-267.

Rich, J. R., R. Dunn and J. Noling. 2004. Nematicides: Pest and present uses. In: Z.X. Chen, S. Y. Chen and D. W. Dickson (eds.), *Nematology: Advances and Perspective, Nematode Management and Utilization*. CABI Publishing. Wallingford, UK.

Attou, A., Davenne, D., Benmansour, A., & Lazouni, H. A. (2017). Chemical composition and biological activities of *Ammoides verticillata* essential oil from west Algeria. *Phytothérapie*. doi:10.1007/s10298-017-1108-1

Burgos, C., Muñoz-Mingarro, D., Navarro, I., Martín-Cordero, C., & Acero, N. (2020). Neuroprotective Potential of Verbascoside Isolated from *Acanthus mollis* L. Leaves through Its Enzymatic Inhibition and Free Radical Scavenging Ability. *Antioxidants*, 9(12), 1207. doi:10.3390/antiox9121207

Kadda Hachem, Moubarek Mébarki, Abdelkrim Hartani, Yasmina Benabdesslem & Meriem Kaid- Harche (2017) Essential Oil Composition of the Root Bark of *Thapsia garganica* (L.) Growing in Northwestern Algeria, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20:3, 860-863, DOI: 10.1080/0972060X.2017.1332494

BOUMAZA Djamila.2011.Séparation et caractérisation chimique de quelques biomolécules actives de deux plantes médicinales : *Inula viscosa*, *Rosmarinus officinalis* de la région d'Oran.magister Université d'Oran1 - Ahmed Ben Bella.

Catier O., Roux D. (2007). *Botanique, pharmacognosie, phytothérapie*. 3ème édition, Ed Wolters Kluwer, France Trott, O., Olson, A. Autodock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *J. Comput. Chem.* (2010) 31: 455-461.

Akrout A. (2004). Etude des huiles essentielles de quelques plantes pastorales de la région de Matmata (Tunisie). 5.

Lanfranchi, D.-A., Laouer, H., El Kolli, M., Prado, S., Maulay-Bailly, C., & Baldovini, N. (2010). Bioactive Phenylpropanoids from *Daucus crinitus* Desf. from Algeria. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(4), 2174–2179. doi:10.1021/jf903760b

D. Bafna, F. Ban, P.S. Rennie, K. Singh, A. Cherkasov, Computer-Aided ligand discovery for estrogen receptor alpha, *Int. J. Mol. Sci.* 21 (12) (2020).

A. Vidal-Limon, J.E. Aguilar-Toalá, A.M. Liceaga, Integration of molecular docking analysis and molecular dynamics simulations for studying food proteins and bioactive peptides, *J. Agric. Food Chem.* 70 (4) (2022) 934–943. M.A. Zígolo, M.R. Goytia, H.R. Poma, V.B. Rajal, V.P. Irazusta, Virtual screening of plant-derived compounds against SARS-CoV-2 viral proteins using computational tools, *Sci. Total Environ.* 781 (2021) 146400.

S. Shakil, M.A. Kamal, S. Tabrez, A.M. Abuzenadah, A.G. Chaudhary, G.A. Damanhour, Molecular interaction of the antineoplastic drug, methotrexate with human brain acetylcholinesterase: a docking study, *CNS Neurol. Disord.: Drug Targets* 11 (2) (2012) 142–147.

T.A. Collier, T.J. Piggot, J.R. Allison, Molecular dynamics simulation of proteins, *Methods Mol. Biol.* 2073 (2020) 311–327. T. Mao et al. *Heliyon* 10 (2024) e33860 14

A. Sali, Modeling mutations and homologous proteins, Curr. Opin. Biotechnol. 6 (4) (1995) 437– 451.

F.I. Khan, D.Q. Wei, K.R. Gu, M.I. Hassan, S. Tabrez, Current updates on computer aided protein modeling and designing, Int. J. Biol. Macromol. 85 (2016) 48–62.

Gutbrod F, Gutbrod K, Nauen R, Elashry A, Siddique S, Benting J, Dörmann P, Florian M.W. & Grundler. 2018. Inhibition of Acetyl-CoA carboxylase by spirotetramat causes lipid depletion and surface coat deficiency in nematodes.

S. Forli, R. Huey, M.E. Pique, M.F. Sanner, D.S. Goodsell, A.J. Olson, Computational protein- ligand docking and virtual drug screening with the AutoDock suite, Nat. Protoc. 11 (5) (2016) 905– 919.

Shukla R, Chetri P, Sonkar A, Pakharukova M, Mordvinov V, Tripathi T. Identification of novel natural inhibitors of *Opisthorchis felinus* cytochrome P450 using structure-based screening and molecular dynamic simulation. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2017;36(13):3541-56.

Kutzner C, Páll S, Fechner M, Esztermann A, de Groot BL, Grubmüller H. More bang for your buck: Improved use of GPU nodes for GROMACS 2018. J Comput Chem 2019; 40: 2418-2431.

Abraham MJ, Murtola T, Schulz R, Pall S, Smith JC, Hess B, Lindahl E. GROMACS: High performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers. SoftwareX 2015; 1: 19-25.

Benson NC, Daggett V. A comparison of multiscale methods for the analysis of molecular dynamics simulations. The Journal of Physical Chemistry B. 2012; 116(29):8722–31.

<https://doi.org/10.1021/jp302103t> PMID: 22494262

Simon L, Imane A, Srinivasan K. Pathak KL and Daoud I 2017. *In silico* drug-designing studies on flavanoids as anticolon cancer agents: Pharmacophore mapping, molecular docking, and Monte Carlo method-based QSAR Modeling. Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences 9(3):

445-458.

Abd El-Nasser S. Al Borki, Abdulhamid K. Alzerbi, Hanan F. Kabil et Ahmad K. Hegazy,

« ‘Variations in phenological and functional traits in *Thapsia garganica* populations in Al Jebel Al Akhdar, Libya’ », African Journal of Ecology, vol. 58, no 4, décembre 2020, p. 639–648.

Amel Bendiabdellah, Mohammed El Amine Dib, Nawel Meliani, Nassim Djabou, Hocine Allali et Boufeldja Tabti, « Preliminary phytochemical screening and antioxidant activities of solvent extracts from *Daucus crinitus* Desf., from Algeria », Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2012 ,

Rouzbeh Sham, Edward C. Oldfield, Jennifer Copare and David A. Johnson, «

Peppermint Oil: Clinical Uses in the Treatment of Gastrointestinal Diseases », JSM Gastroenterol Hepatol, vol. 3, no 1, 2015.

Catherine Reeb, « Plantes mellifères : L'Inule visqueuse », Abeilles & Fleurs, no 720 - octobre 2010 p. 19–20.

Bekhechia, C., Brice Botib, J., Atik Bekkaraa, F., Eddine Abdelouahida, D., Casanovab, J., & Tomib, F. (2010). Isothymol in Ajowan essential oil. Naturel Product Communication, 5(7), 71107– 71110.

IMPORTANCE OF ESSENTIAL OILS FOR THE BIOCONTROL OF *TYLENCHULUS SEMIPENETRANS* NEMATODE POPULATIONS THROUGH MOLECULAR MODELING METHODS

BEKKAL BRIKCI SOHAYB *, ABDELLI IMANE^{1,2} AND HASSANI FAÏÇAL

*Ecology and Management of Natural Ecosystems Laboratory, Department of Ecology and
Environment-Faculty SNV-STU- University- Tlemcen-Algeria*

Keywords: Citrus, *Tylenchulus semipenetrans*, Bio-nematicides, Essential oil, Ligand, Acetyl CoA carboxylase, Molecular modeling.

Abstract

In Algeria, the number of citrus trees ranks second after olive trees, but their economic importance clearly places them at the top of fruit production. The nematode *Tylenchulus semipenetrans* attaches to citrus roots and causes slow citrus dieback. The chemical nematicides used in agriculture have eco-toxicological effects, whereas bio-nematicides do not harm the ecosystem. In this context, the present study focuses on essential oils from aromatic plants, specifically from the Lamiaceae family, using two species: *Thymus algeriensis* and *Rosmarinus officinalis*. Some ligands derived from these essential oils have an inhibitory effect on Acetyl-CoA Carboxylase, an enzyme responsible for the biosynthesis of fatty acids in *Tylenchulus semipenetrans*. Using molecular modeling methods, including molecular docking with the Molecular Operating Environment (MOE) software, the study reveals for the first time that linalool, a major component of *Thymus algeriensis*, is a functional inhibitor of Acetyl-CoA Carboxylase activities and can be used as an effective bio-insecticide against *Tylenchulus semipenetrans* to protect citrus trees.

Introduction

Algeria enjoys favorable conditions for the development of citrus due to Mediterranean climate and geomorphological characteristics (Hassani 2006). The overall production of citrus has been estimated at more than 14 million of quintals in 2018 (Bouazghi 2019).

Agriculture is often threatened by phytophagous insects and nematodes. Chemical control is a popular method of protecting agricultural yields, but it is likely to be harmful to humans and the environment. This results in fruit toxicity as well as the destruction of beneficial fauna, highlighting the need to use specific attractants (Ros 1997).

The use of aromatic plants has a broad spectrum. The technique consists in extracting ligands from essential oils of these aromatic plants to fight against the different pests of crops. The advantages of this method consist in an absolute specificity of absence of toxicity and in an important efficiency in the frame of the protection of cultures.

However, the rate of production could have been better with the use of bio-nematicides to improve the quantity and quality of citrus fruits, since 10 to 30% of crop loss is caused by *Tylenchulus semipenetrans*, a major parasite of Citrus Fig.1. This nematode is widely distributed in the world (Duncan 2005, Sorribas 2008, Verdejo-Lucas *et al.* 1992) and in the Mediterranean (Verdejo-Lucas 1992, Inserra 1994, Duncan *et al.* 1992).

*Author for correspondence: sohaybtlemcen@gmail.com. ¹Abou Bakr Belkaid University, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Laboratory of Natural and Bioactive Substances (LASNABIO), Tlemcen-Algeria. ²Ecole Supérieure en Sciences Appliquées, ESSA-Tlemcen, BP 165 RP Bel Horizon, Tlemcen 13000, Algeria.

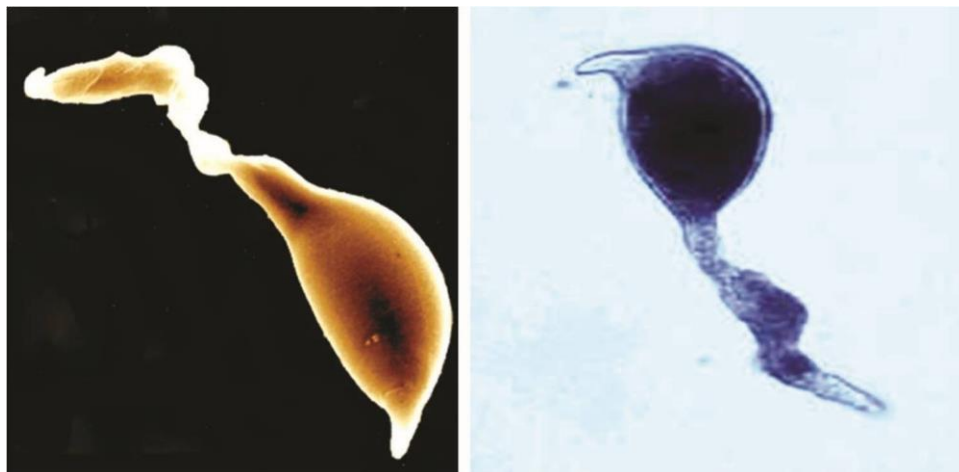


Fig. 1. *Tylenchulus semipenetrans* citrus nematode.

It is an obligate parasite which means that it needs living plant tissues (roots) in order to live and reproduce. It is responsible for the slow decline of citrus fruit Fig. 2 (El-Borai *et al.* 2002).

Algeria, by its geographical situation, offers a rich and diverse vegetation. A large number of aromatic plants such as Lamiaceae grow there spontaneously. Interest in these plants has continued to grow in recent years (Kholkhal 2014). Because of their abundance in nature and their properties to be used in agriculture as bio-insecticides thanks to their essential oils.



Fig. 2. Slow decline of citrus fruit caused by *Tylenchulus semipenetrans*.

To do so, with the development of computer tools, molecular modeling and more precisely molecular docking quickly invested the field of biological research. The main purpose of molecular docking is to predict the most favorable conformation (position and relative orientation) of the ligand within its receptor. Our work consists in studying the inhibition of Acetyl CoA Carboxylase, the enzyme responsible for the synthesis of fatty acids in *Tylenchulus semipenetrans*, its alteration disrupts the synthesis of the surface layer. This

inhibitory action is done by ligands derived from two plants from the Lamiaceae family *Thymus algeriensis* and *Rosmarinus officinalis*, Fig. 3 to produce a bio-nematicide.



Fig. 3. *Thymus algeriensis* and *Rosmarinus officinalis*.

The purpose of the study is to carry out the *in silico* experiments in order to find the most coherent (Enzyme-Ligand) complex (s) to lead to the best inhibitors of Acetyl CoA Carboxylase in Citrus *Tylenchulus semipenetrans* nematode.

Materials and Methods

Ligand and protein preparation: The ligands used in this work are chosen according to the most important yield in each part of these two plants (leaf and fruit), Linalool was by far the major component (43,3 %) of *Thymus algeriensis* (Dob *et al.* 1994), and camphor is the major component in *Rosmarinus officinalis* (39,27%) (Tahri 2013). The chemical structure of these ligands was obtained from the database “Pubchem” (Table 1), and ligands were drawn from the software “Chemdraw” version 12.0.2.1076; and saved in format “Mol”, and then optimized the ligands with the software “Hyperchem” "version 8.0.10 and saved in “Mol” format, for molecular docking with the Molecular Operating Environment" MOE "software version 2013 .

Downloaded Acetyl CoA Carboxylase enzyme with 1BDO code from “RCSB” or “PDB” (Protein Data Bank) with a resolution of 1.80Å°. In general, the protein structure with a resolution between 1.5 and 2.5 Å have a good quality for further studies (Clément and Slenzka 2006), whereas, the resolution value of 1BDO “1.80Å°” belongs to this interval.

The method is based on molecular modeling. Docking basically consists of two steps:

- Molecular Docking is the step of the selection which consists of placing the ligand in the active site of the protein and sampling the positions, conformations and orientation (poses) possible to have the most stable complex.
- Scoring is the ranking step, which consists in evaluating the affinity between the ligand and the protein and giving a score to poses obtained during the Docking phase. This score helps us to remember the best pose among all that proposed (Boucherit 2012).

Docking calculations were carried out using standard default parameter settings in the MOE software package (Molecular Operating Environment). In this molecular docking program, the flexibility of ligands is considered while the proteins are considered as a rigid structure. At the end of molecular docking, the best conformations of the ligands were analyzed for their binding interactions and were evaluated by the binding free energies (S-score, kcal/mol) and bonds interactions between ligand atom and active site residues.

The molecular dynamics simulation study was carried out for the ligand that was declared as the best among the selected molecules. The molecular dynamics simulation study was performed by iMODS. It is a fast, user-friendly and effective molecular dynamics simulation tool that can be used efficiently to investigate the structural dynamics of the protein complexes. It provides the values of deformability, B-factor (mobility profiles), eigenvalues, variance, co-variance map and elastic network. For a complex or protein, the deformability depends on the ability to deform at each of its amino acid residues. The eigenvalue has relation with the energy that is required to deform the given structure and the lower the eigenvalue, the easier the deformability of the complex. Moreover, the eigenvalue also represents the motion stiffness of the protein complex. IMODS is a fast and easy server for determining and measuring the protein flexibility (López- Blanco *et al.* 2014, Prabhakar *et al.* 2016, Awan *et al.* 2017).

Results and discussion

The results calculations docking details received after dock all ligands with Acetyl CoA Carboxylase target are listed in the Table 1.

Table 1. Docking results of ligands and the controls along their respective number of hydrogen bonds as well as interacting amino acids.

Names of ligands	SP docking score (Kcal/mol)	Interacting residues	Types of bonds	Distance (Å)	Energies (kcal-mol)
Spirotetramat	-4.9816	No interactions	No interactions	No interactions	No interactions
Biotine	-4.6061	O -ILE 138	H-donor	2.97	-3.8
		N -SER 142	H-accepteur	2.95	-4.7
		NH1-ARG 93	H-accepteur	3.05	-4.7
		N -SER 142	H-accepteur	3.32	-1.2
		NH1-ARG 93	ionic	3.05	-4.1
Linalool	-4.3169	N - SER 142	H-accepteur	3.07	-0.6
Camphor	-3.5505	No interactions	No interactions	No interactions	No interactions

The molecules that had the lowest binding energy of docking score were considered the best molecule and inhibiting the target receptor as the lower binding energy corresponds to higher binding affinity (Simon *et al* 2017).

The 1BDO-ligands complexes formed are shown in Figs 5-8.

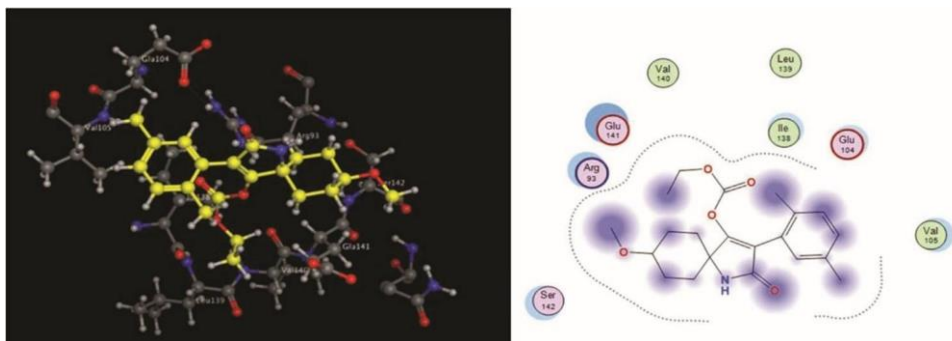


Fig. 5. 1BDO-Spirotetramat complex.

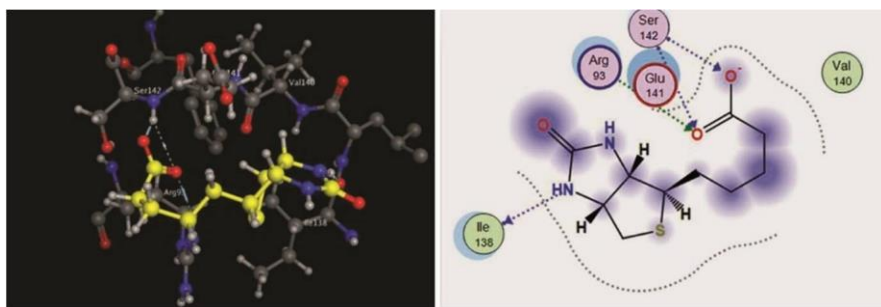


Fig. 6. 1BDO-Biotine complex.

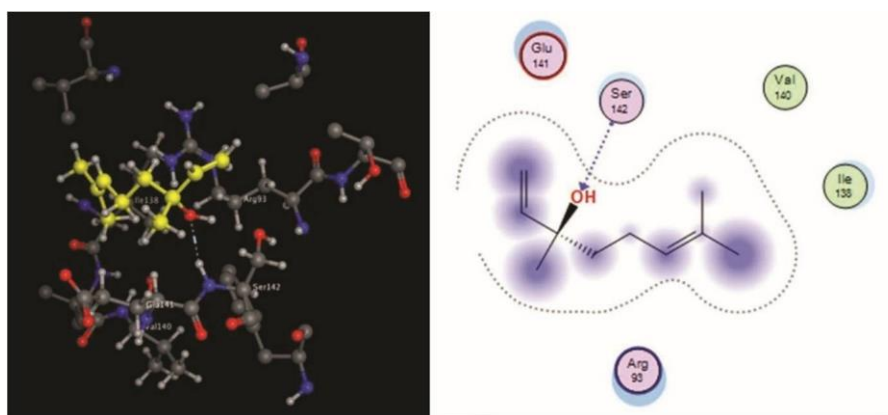


Fig. 7. 1BDO-Linalool complex.

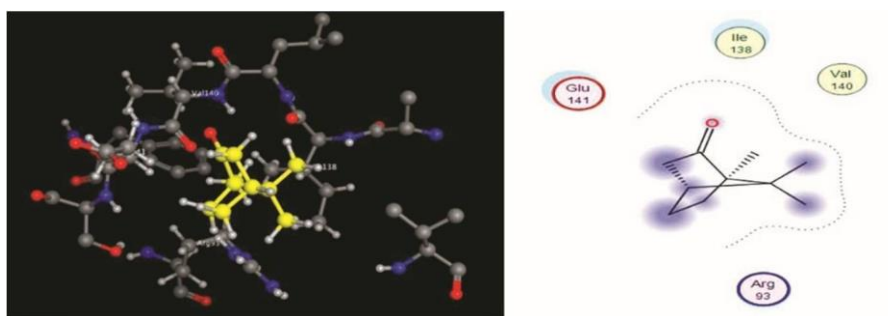


Fig. 8. 1BDO- Camphor complex.

The best score obtained after docking is that of Spirotetramat, with a score of -4.9816 kcal/mol, followed by Biotine, the reference ligand, with a score of -4.6061 kcal/mol. Other scores include -4.3169 kcal/mol for Linalool and -3.5505 kcal/mol for Camphor. All the score values for the complexes were compared, and it was found that the complex formed by 1BDO - Spirotetramat has the lowest energy value, giving the best docking score compared to the Biotine co-crystallized inhibitor. On the other hand, Linalool has one hydrogen interaction with SER 142, while the 1BDO-Spirotetramat complex has no hydrogen interactions. Despite

this, both complexes yield almost identical scores (-4.3169 kcal/mol and -4.9816 kcal/mol, respectively), indicating that the two complexes, 1BDO -Linalool and 1BDO -Spirrotetramat, are stable and have higher binding affinities. Based on these docking results, Linalool can be classified as a good inhibitor of the enzyme 1BDO when compared to all the ligands studied.

The Molecular Dynamics Simulation results are showed in the Fig 9 .

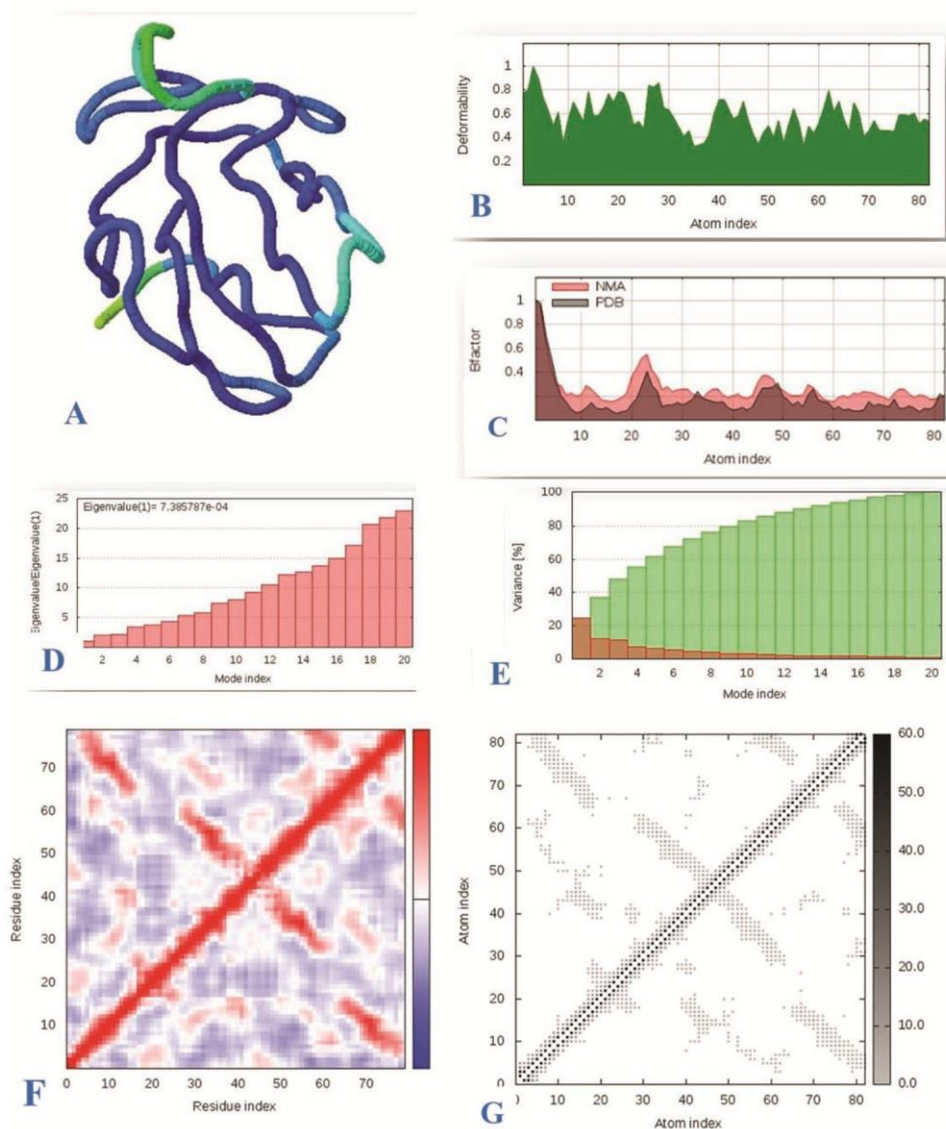


Fig. 9. Results of molecular dynamics simulation of 1BDO - Linalool Receptor. (a) NMA mobility, (b) deformability, (c) B-factor, (d) eigenvalues, (e) variance (red color indicates individual variances and green color indicates cumulative variances), (f) co-variance map (correlated (red), uncorrelated (white) or anti-correlated (blue) motions) and (g) elastic network (darker gray regions indicate more stiffer regions) of the complex.

Fig. 9A illustrates the normal mode analysis (NMA) of 1BDO - Linalool complex. The deformability graph of the complex illustrates the peak in the graphs correspond to the regions in the protein with deformability (Fig. 9 B). The B-factor graph of the complex gives easy visualization and understanding of the comparison between the NMA and the PDB field of the complex (Fig. 9C). The eigenvalue of the complex is illustrated in (Fig. 9D) . The docked complex generated eigenvalue of $7.385787\text{e-}04$. The variance graph indicates the individual variance by red colored bars and cumulative variance by green colored bars (Fig. 9E). (Fig. 9 F). illustrates the co- variance map of the complexes where the correlated motion between a pair of residues is indicated by red color, uncorrelated motion is indicated by white color and anti-correlated motion is indicated by blue color. The elastic map of the complex shows the connection between the atoms and darker gray regions indicate stiffer regions (Fig. 9G) .

From the molecular dynamics study of 1BDO- Linalool docked complex, it is clear that the complex had a very good amount of deformability (Fig. 9B) as well as it had high eigenvalue of $7.385787\text{e-}04$, for this reason, the deformability would be quite difficult for the complex (Fig. 9D) and also represents the motion stiffness of the protein complex.

However, the variance map showed high degree of cumulative variances than individual variances (Fig. 9E). The co-variance and elastic network map also produced satisfactory results (Fig. 9F) and (9G) .

This present research interested to the molecular interactions of Acetyl CoA Carboxylase enzyme responsible for the biosynthesis of fatty acids of *Tylenchulus semipenetrans*, and inhibitory ligands resulting from the extraction of essential oils from Lamiaceae family, using molecular docking which is one of the methods of molecular modeling. The results obtained using the software "MOE" reveal that the complex (1BDO-Linalool) with the lowest score, resembles that of Spirotetramat with a small difference. Nevertheless, the latter is a chemical insecticide against Acetyl CoA Carboxylase. It is considered that *Thymus algeriensis* is a good bio-nematicide against *Tylenchulus semipenetrans*.

This study revealed that Linalool is a functional inhibitor of Acetyl CoA Carboxylase activities, and it can be concluded that the essential oil components of *Thymus algeriensis* (Lamiaceae family) present strong potential as a bio-insecticide against *Tylenchulus semipenetrans*.

References

- Awan F, Obaid A, Ikram A and Janjua H 2017. Mutation-structure-function relationship based integrated strategy reveals the potential impact of deleterious missense mutations in autophagy related proteins on hepatocellular carcinoma (HCC): A comprehensive informatics approach. *Int. J. Mol. Sci.* **18**(1): 139.
- Bouazghi A 2019. Production d'agrumes en Algérie. Ministère de l'agriculture, du développement rural et de la pêche. Article du journal El Moudjahed.
- Boucherit H 2012. Etude théorique des interactions intervenant dans l'inhibition de la méthionine aminopeptidase de *Mycobacterium tuberculosis* par diverses molécules. Thèse de magister en biochimie. Constantine: Université Mentouri Constantine. Algérie. pp. 71.
- Brück E, Elbert A, Fischer R, Krueger S, Kühnhold J and Klueken AM 2009. Movento (r), un insecticide ambimobile innovant pour le contrôle des insectes nuisibles en agriculture: Profil biologique et performance sur le terrain. *Prot. Crop.* **10**: 838-844.
- Clément G , and Slenzka K 2006. Fundamentals of space biology: Research on cells, animals, and plants in space. Springer Sci. Business Media. pp. 18.
- Dob T, Darhmane D, Benabdelkader T and Chelghoum TC 2006. Studies on the essential oils and antimicrobial activity of *Thymus algeriensis* Boiss. & Reut. *Int. J. Aromatherapy* **16**(2): 95-100.
- Duncan LW 2005. Nematode parasites of citrus. In: Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture (eds. M. Luc, RA Sikora, and J. Bridge). 2nd ed. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 593-607.
- El-Borai FE, Duncan LW and Graham JH 2002. Infection of citrus roots by *Tylenchulus semipenetrans* reduces root infection by *Phytophthora nicotianae*. *J. Nematol.* **34**: 384-389.
- Hassani I 2006. Laboratoire de biotechnologies végétales, équipe plante du sud. Faculté des Sciences d'Agadir, Maroc.
- Inserra RN, Duncan LW, O'Bannon H and Fuller SA 1994. Citrus nematode biotypes and resistance of citrus rootstocks in Florida, *Nematol. Circ.* 205: 4.
- Kholkhal F 2014. Etude phytochimique et activité antioxydante des extraits des composés phénoliques de *Thymus ciliatus* ssp. *coloratus* et ssp. *euciliatus*. Thèse. Université de Tlemcen.

- López-Blanco JR, Aliaga JI, Quintana-Ortí ES and Chacón P 2014. iMODS: Internal coordinates normal mode analysis server. *Nucleic Acids Res.* **42**(W1): W271-276.
- Prabhakar PK, Srivastava A, Rao KK and Balaji PV 2016. Monomerization alters the dynamics of the lid region in *Campylobacter jejuni* CstII: An MD simulation study. *J. Biomol. Struct. Dyn.* **34**(4): 778-791.
- Ros JP 1997. A general view of recent advances of attractants and traps against *Ceratitis capitata* (Wied) (Dipt.: Teph.). *Proc. (IOBC/WPRS) Bull.* **20**(8): 137-144.
- Sorribas FJ, Verdejo-Lucas S, Pastor J, Ornat C, Pons J and Valero J 2008. Population densities of *Tylenchulus semipenetrans* related to physicochemical properties of soil and yield of Clementine mandarin in Spain. *Plant Dis.* **92**: 445-450.
- Simon L, Imane A, Srinivasan K, Pathak KL and Daoud I 2017. *In silico* drug-designing studies on flavanoids as anticolon cancer agents: Pharmacophore mapping, molecular docking, and Monte Carlo method-based QSAR Modeling. *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences* 9(3): 445-458.
- Tahri M 2013. Les composés organiques et minéraux des aromatiques médicinaux *Rosmarinus tournefortii* et *Rosmarinus officinalis*, qui poussent dans l'est du Maroc. Université Mohammed Premier.
- Verdejo-Lucas S 1992. Seasonal population fluctuations of *Meloidogyne* spp. and the *Pasteuria penetrans* group in kiwi orchards. *Plant Dis.* **76**: 1275-1279.

(Manuscript received on 01 May, 2021; revised on 15 March, 2025)



Impact of Essential Oils of Lamiaceae Family Against *Tylenchulus semipenetrans*

S. Bekkal Brikci, I. Abdelli¹, F. Hassani and M. Bereksi Reguig

Ecology and Management of Natural Ecosystems Laboratory, Department of Ecology and Environment-Faculty SNV-STU- University- Tlemcen-Algeria

¹ Laboratory of Natural and bio-actives Substances, Faculty of Science- University- Tlemcen –Algeria
E-mail: sohaybtlemcen@gmail.com

Abstract: The nematode of citrus *Tylenchulus semipenetrans* Cobb 1913, is an important parasitic nematode of plants, very widespread in citrus growing regions of the world, and it is responsible of slow decline of citrus fruits. The aim of the present study focuses on the molecular docking approach to inhibition of the “Acetyl CoA Carboxylase” enzyme responsible for fatty acid synthesis in *Tylenchulus semipenetrans* and alteration disrupting the synthesis of the surface layer, this inhibitory action is based on essential oils of aromatic plants, taking as an example the Lamiaceae family, using four species *Lavandula multifida*, *Lavandula stoechas*, *Rosmarinus officinalis*, and *Thymus ciliatus*. This study revealed that Carvacrol from *Lavandula multifida* gives the best docking scores compared to Biotine, the co-crystallized inhibitor of the Acetyl CoA Carboxylase, to spirotetramat as chemical insecticide already used against citrus nematode, and to the other complexes. Molecular Dynamics Simulation study showed a good result for the carvacrol- Acetyl CoA Carboxylase docked complex, for that can consider that carvacrol extracted from *Lavandula multifida*'s essential oil as a functional inhibitor of Acetyl CoA Carboxylase activities and it can be used as good Bio-nematicides against *Tylenchulus semipenetrans* for the protection of the human health and environment.

Keywords: Nematode, *Tylenchulus semipenetrans*, Molecular docking, Bio-nematicides, Lamiaceae, Molecular dynamics simulation

Tylenchulus semipenetrans (citrus root nematode) is a species of plant pathogenic nematodes and the causal agent of slow decline of citrus. This pest causes damage most citrus production areas and diverse soil textures worldwide. Their feeding strategy is semi-endoparasitic and has a very narrow host range among commonly grown crops. These nematodes are considered as major plant-parasitic nematode because they can cause 10-30% losses (Verdejo- Lucas, and Mckenry 2004). The fight against nematodes often involves the use of chemical nematicides such as spirotetramat. The latter presents a danger to ecosystems (Brück et al 2009) and new control strategies are therefore urgently needed. For this, bio-nematicides is option to improve the production and quality of citrus fruits in the world which can be made by certain plant parts and extracts possess nematicidal properties. The application of the plant parts or extracts to nematode infested soil affects nematode directly and stimulates soil microbes that reduce nematode populations (Ahmad et al 2004). The present consists in studying the inhibition of Acetyl CoA carboxylase, the enzyme responsible for the synthesis of fatty acids in *Tylenchulus semipenetrans* and its alteration disrupts the synthesis of the surface layer. This inhibitory action

done by ligands derived from four plants from the Lamiaceae family *Lavandula multifida*, *L. stoechas*, *Rosmarinus officinalis*, and *Thymus ciliatus*, to produce a bio-nematicide. The essential oils of these plants, growing spontaneously in Algeria, was isolated from the aerial parts of the plant (leaves and flowers), the major component being carvacrol (57.9%) for *L. multifida* (Laghchimi et al 2014), thymol (44.2%) in *Thymus ciliatus*. (Bousmaha et al 2007), α -pinène is one of the major components in *Rosmarinus officinalis* (19.6%) (Bousmaha et al 2007), and fenchone (68.2%) in *Lavandula stoechas*. (Bouzouita et al 2005). The *in scilico* experiments in order to find the most coherent (Enzyme-Ligand) complex(s) to lead to the best inhibitors of acetyl CoA carboxylase in *Tylenchulus semipenetrans* nematode. The main purpose of molecular docking is to predict the most favorable conformation (position and relative orientation) of the ligand within its recep



Plant Archives

Journal home page: www.plantarchives.org

THE IMPACT OF ESSENTIAL OILS OF THE LAMIACEAE FAMILY AGAINST *TYLENCHULUS SEMIPENETRANS* USING MOLECULAR MODELING METHODS

Bekkal Brikci S.¹, Abdelli I.^{2,3}, Hassani F.¹ and Bereksi Reguig M.¹

¹Ecology and Management of Natural Ecosystems Laboratory, Department of Ecology and Environment- Faculty SNV-STU- University- Tlemcen-Algeria

²Higher School of Applied Sciences- Tlemcen-Algeria

³Laboratory of Natural and bio-actives Substances, Faculty of Science- University- Tlemcen -Algeria

*Email: sohaybtlemcen@gmail.com

(Date of Receiving-12-01-2021; Date of Acceptance-21-03-2021)

Tylenchulus semipenetrans is an economically important plant-parasitic nematode occurring in all citrus-producing regions of the world and causing a disease called "slow decline". Chemical nematicides commonly used in agriculture have ecotoxicological effects. As a control method, attention has been paid to bio-nematicides that do not exhibit harmful effects on the ecosystem. In this study we will carry out the *in silico* experiments in order to find the most coherent Enzyme-Ligand complex to lead to the best inhibitors of Acetyl CoA Carboxylase in Citrus *Tylenchulus semipenetrans* nematode. "Acetyl CoA Carboxylase" enzyme responsible for fatty acid synthesis in *Tylenchulus semipenetrans*, its alteration disrupting the synthesis of the surface layer, this inhibitory action is based on essential oils of aromatic plants, taking as an example the Lamiaceae family, using natural compounds extract from essential oils of *Salvia verbenaca*, *Lavandula stoechas*, *Rosmarinus*

ABSTRACT *officinalis*, and *Thymus ciliatus*. This study revealed for the first time that β -phellandrène from *Salvia verbenaca* gives the best docking scores compared to Biotine, the co-crystallized inhibitor of the Acetyl CoA Carboxylase, to spirotetramat as chemical insecticide already used against citrus nematode, and to the other complexes. After that, the Molecular Dynamics Simulation study showed a good result for the β -phellandrène- Acetyl CoA Carboxylase docked complex, for that we can consider that β -phellandrène extracted from *Salvia verbenaca*'s essential oil as a functional inhibitor of Acetyl CoA Carboxylase activities and it can be used as good bio-nematicides against *Tylenchulus semipenetrans*.

INTRODUCTION

Citrus is grown on grafted trees worldwide in Mediterranean and subtropical climates. Numerous species of plant-parasitic nematodes have been associated with the citrus rhizosphere but few reproduce on citrus and cause damage to the trees. *Tylenchulus semipenetrans* (Fig. 1) is considered as major nematode pests, because he causes significant economic losses in multiple regions of the world (Duncan 1999). This pest is the dominant pathogenic species in most citrus regions and among diverse soil textures, information on control measures is most extensive for this nematode, whereas, a lot of studies estimate yield losses due to *Tylenchulus semipenetrans* to be in the range of 10% to 30%

depending on the level of infection (Duncan and Cohn 1990).

The fight against nematodes often involves the use of chemical nematicides such as spirotetramat. The latter presents a danger to ecosystems (Brück, *et al.*, 2009) new control strategies are therefore urgently needed. For this, we thought of looking for bio-nematicides to improve the production and quality of citrus fruits in the world which can be made by certain plant parts and extracts possess nematicidal properties. The application of the plant parts or extracts to nematode infested soil affects nematode directly

and stimulates soil microbes that reduce nematode populations (Nandal and Bhatti 1986; Reddy *et al.*, 1996; Ahmad *et al.*, 2004). Our work consists in studying the inhibition of Acetyl CoA Carboxylase, the enzyme responsible for the synthesis of fatty acids in *Tylenchulus semipenetrans*, its alteration disrupts the synthesis of the surface layer. This inhibitory action is done by ligands derived from four plants from the Lamiaceae family *Salvia verbenaca*, *Lavandula stoechas*, *Rosmarinus officinalis*, and *Thymus ciliatus*, (Fig.2) to produce a bio-nematicide.

The Lamiaceae family is very present in Algerian flora. A large part of these plants is aromatic, rich in essential oil, hence their economic and medicinal interest. The essential oils of this family are highly sought after, as they are generally endowed with interesting biological properties. The essential oils of these plants, was isolated from the aerial parts of the plant (leaves and flowers), the major component being β -phellandrène (30.3%) for *Salvia verbenaca* (Bahar *et al.*, 2004), Thymol (44,2 %) in *Thymus ciliatus*. (Bousmaha *et al* 2007), α -pinène is one of the major components in *Rosmarinus officinalis* (19.6%) (Albert *et al.*, 1996), and Fenchone (68.2%) in *Lavandula stoechas*. (Bouzouita *et al.*, 2005). In this study we will carry out the *in silico* experiments in order to find the most coherent (Enzyme-Ligand) complex (s) to lead

to the best inhibitors of Acetyl CoA Carboxylase in Citrus *Tylenchulus semipenetrans* nematode. To do so, with the development of computer tools, molecular modeling and more precisely molecular docking quickly invested the field of biological research. The aim of molecular docking is to determine the mode of interaction of a complex composed of two or more molecules, by looking for orientations in space and favourable conformations for the binding of a ligand to a receptor.

Remerciements

*Tout d'abord, il est primordial de remercier « **ALLAH** » le Tout-Puissant pour m'avoir donné la volonté, la force et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.*

*J'adresse mes profonds remerciements et ma gratitude à mes directeurs de thèse, à Mr **HASSANI Faïçal**, Professeur et chef du département d'écologie et environnement à l'Université de Tlemcen, et à Mme **HASSANI-ABDELLI Imane**, Professeur à l'École Supérieure en Sciences Appliquées (ESSA), pour leur disponibilité tout au long de la réalisation de cette thèse, ainsi que pour la confiance, l'orientation, les conseils précieux et le temps qu'ils m'ont consacrés. Leur soutien a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bien.*

*Mes plus vifs remerciements vont à Mme **MEZIANE Hassiba**, Professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider le jury. Je remercie également Mr **MESLI Lotfi**, Professeur à l'Université de Tlemcen, et Mme **CHEMOURI Hafida**, Professeur à l'ESSA-Tlemcen, pour m'avoir honoré en acceptant d'examiner ma thèse de doctorat.*

*J'exprime ma reconnaissance et mes remerciements à Mr **SLIMANI Mohammed**, ingénieur de la ferme pilote « **BELAIDOUNI Mohammed** », et à tout le staff, pour leur collaboration, ainsi que pour m'avoir accueilli et facilité l'accès afin de réaliser l'échantillonnage à partir du verger d'agrumes.*

Je remercie également tout le service des statistiques de la Direction des Services Agricoles (DSA) de la wilaya de Tlemcen, pour les orientations et les documents qu'ils ont mis à ma disposition.

*Un grand remerciement à Mr le directeur du parc national de « **Lalla Setti** » et à son équipe de m'avoir autorisé à réaliser l'extraction des huiles essentielles au sein du parc.*

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à tous mes chers professeurs, tout au long de mon cursus académique, pour m'avoir fait bénéficier de leurs connaissances, de leur encadrement et de leurs orientations.

Sohayb BEKKAL BRIKCI

Dédicaces

À mes chers parents, votre amour et votre soutien inconditionnels ont été la source de ma persévérance tout au long de ce parcours académique. Votre foi en moi m'a toujours donné la force de continuer. Je vous aime du plus profond de mon cœur.

À mes frères et à ma sœur, votre présence, votre affection et votre soutien ont été un pilier solide tout au long de ce parcours.

À ma femme dévouée, ton encouragement, ta compréhension et ton soutien indéfectible ont été mon ancre dans les moments de doute. Cette réussite est notre victoire commune, je suis tellement reconnaissant de t'avoir à mes côtés.

À ma fille adorée, ton sourire m'apporte l'énergie et la motivation indispensables pour affronter les défis.

À ma précieuse famille, Chacun de vous a été une pierre angulaire dans ma vie, m'insufflant courage et inspiration. Cette réussite est aussi la vôtre.

À la mémoire de mon cher grand père que dieu lui accorde sa miséricorde, ton impact sur ma vie restera gravé à jamais, et cette réussite est un témoignage de l'influence positive que vous avez eu sur mon parcours éducatif.

À tous ceux qui ont contribué à cette réussite, Je vous dédie cette thèse avec une profonde gratitude. Vos encouragements, vos conseils et votre amour m'ont propulsé vers cette réalisation. Merci du fond du cœur.

Sohayb BEKKAL BRIKCI

TABLE DE MATIÈRE

Introduction générale.....	1
Partie bibliographique	5
Chapitre I : Présentation du nématode des citrus le <i>Tylenchulus</i>	
<i>semipenetrans</i>	5
I-1- Généralités sur les nématodes	5
I-2- Nématodes phytoparasites.....	6
I-3- <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	9
I-3-1-Historique.....	10
I-3-2-Taxonomie	10
I-3-3-Caractéristiques morphologiques et anatomiques de l'espèce :.....	11
a. Larves	11
b. Males	12
c. Femelles	13
I-3-4-Biologie et cycle de vie.....	15
I-3-5-Plantes hôtes du <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	16
I-3-6-Écologie du <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	17
I-3-7- Influence des facteurs de l'environnement sur le <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	18
I-3-8-Symptômes dus au <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	20
I-3-9-La lutte contre le <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	23
a. Lutte chimique.....	23
b. Pratiques culturales	24
c. Lutte variétale.....	24
d. Lutte biologique	24
Chapitre II : Agrumes.....	27
II-1-Généralités sur les agrumes.....	27
II-2-Définition	28
II-3- Origine	29
II-4- Systématique et Caractéristiques botaniques	31
II-4-1- Systématique.....	31

II-4-2- Description botanique	32
1. Partie souterraine	33
2. Partie aérienne	34
II-5- Cycle biologique des agrumes	36
II-5-1- Étapes de la croissance des agrumes	36
a. Période d'entrée en production	36
b. Période de pleine production	37
c. Période de vieillissement	37
d. Période de décrépitude	37
II-5-2- Cycle annuel de développement	38
a. Croissance végétative	38
b. Développement floral et fructification	39
☐ La Floraison	39
☐ La Pollinisation	39
☐ La Fécondation	40
☐ La Nouaison et le Grossissement du Fruit	40
☐ La Maturation des Fruits	40
II-6-Variétés d'agrumes	41
II-6-1- Mandarines	41
Satsuma Miho et Satsuma Wase (<i>Citrus unshiu</i>)	42
Clémentinier	42
Clémentine Caffin (<i>Citrus clementina</i>)	42
Clémentine Ragheb (synonyme : Kuneyl)	43
Clémentine commune (Synonymes : Fine de Corse, Fina, Algerian)	43
Mandarine Méditerranéenne	43
II-6-2- Citrons	44
<i>Citrus limon</i> (Citron EurekaFrost)	44
Citron Feminello	44
II-6-3-Limes acides	45
Lime Mexicaine (<i>Citrus aurantifolia</i>)	45
Lime Tahiti (<i>Citrus latifolia</i>)	45
II-6-4-Limes douces	46

II-6-5-Pamplemousses.....	46
Pamplemousse Goliath L	46
II-6-6-Pomelos (Hybride entre pamplemousse et orange)	46
Pomelo March (<i>Citrus paradisi</i>)	47
II-6-7-Kumquats (Fortunella sp.)	47
<i>Kumquat Marumi</i>	47
II-6-8- Les orangers (<i>Citrus sinensis</i>)	48
Main de Bouddha	48
Orange Double fine améliorée	48
Oranges sanguines.....	48
Oranges douce	49
Orange Navelina.....	49
Orange Salustiana.....	49
Orange Thomson Navel	50
Orange Washington navel (Synonymes Bahia).....	50
1. Généralités.....	50
2. Historique	50
3. Systématique	51
4. Les caractéristiques de la variété Washington navel.....	51
II-7- Exigences de l'espèce	55
II-7-1- Exigences climatiques	55
a. Température.....	55
b. Pluviométrie	55
c. Humidité de l'air	55
II-7-2- Aléas climatiques.....	55
a. Vent	55
b. Gelées	56
II-7-3- Exigences pédologiques	56
II-8- Portes-greffes	57
II-8-1- Les principales caractéristiques des porte-greffes	58
a. <i>Bigaradier Citrus aurantium</i>	58
b. <i>Poncirus trifoliata</i>	58

c. <i>Citrangue troyer</i>	59
d. <i>Citrangue carrizo</i>	60
e. <i>Citrus volkameriana</i>	60
f. Mandarinier cléopâtre (<i>Citrus reticulata blanco</i>)	60
II-9- Maladies et ravageurs.....	60
II-9-1- Maladies.....	60
a. Les maladies virales	60
☐ L'Exocortis (<i>Citrus Exocortis Viroïde</i>).....	60
☐ Psorose (<i>Citrus psorosis</i>)	61
☐ Tristeza	63
☐ Cachexie	64
b. Maladies bactériennes	64
☐ Stubborn (<i>Spiroplasma citri</i>)	64
☐ Chancre bactérien des agrumes (<i>Xanthomonas campestris</i>)	65
c. Maladies cryptogamiques.....	66
☐ Pourriture sèche racinaire (<i>Fusarium sp</i>)	66
☐ Mal Secco (<i>Phomatracheiphila</i>)	66
☐ Gommose à <i>Phytophthora</i>	66
☐ Pourridié (pourriture des racines).....	66
☐ Fumagine	66
☐ Anthracnose.....	66
II-9-2- Ravageurs	67
a. Pucerons	67
b. Cératite (Mouche méditerranéenne des fruits)	67
c. Cochenille.....	67
d. Acarie.....	67
e. Aleurode (mouche blanche)	67
f. Nématodes	68
II-10- Répartition géographique.....	70
II-11- Production d'agrumes dans le monde	70
II-12-Production d'agrumes en Algérie.....	71
II-13- Production d'agrumes à Tlemcen	73

Milieu physique	77
I-Présentation de la région d'étude.....	78
I-1-Présentation de la ferme	79
I-2-Lieu d'expérimentation	83
II- Etude bioclimatique.....	84
II-1-Les facteurs climatiques.....	85
a. Précipitations	85
b. Les Régimes Pluviométriques	85
c. Régimes saisonniers	85
d. Températures	87
e. Amplitudes thermiques, continentalité.....	89
□ Amplitudes thermiques	89
II-2- Synthèse bioclimatique	90
a. Diagrammes ombrothermiques	90
b. Indice d'aridité de De Martonne	91
c. Quotient pluviothermique D'EMBERGER	92
Etude <i>In Silico</i>.....	94
I-Introduction	94
II-Modélisation moléculaire	95
II-1-Généralité	95
II-2-Mécanique moléculaire (MM)	96
II-3-Mécanique quantique (MQ)	96
II-4-Docking moléculaire.....	97
II-5-La Dynamique Moléculaire (DM)	98
III-Acétyl-CoA Carboxylase (ACC)	99
III-1-Présentation de l'Acétyl-CoA Carboxylase (ACC).....	99
III-2-Rôle de l'Acétyl-CoA Carboxylase chez les Nématodes : Cas du <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	100
IV-Matériel et méthodes.....	100
IV-1-Matériel informatique.....	100
IV-2-Matériel végétal.....	101
IV-2-1-Les huiles essentielles	101

a.	Généralités.....	101
b.	Définition	102
c.	Propriétés physico-chimiques des huiles essentielles	102
d.	Activité biologique des huiles essentielles.....	102
e.	Méthodes d'extraction des huiles essentielles.....	103
IV-2-2-	Les plantes étudiées	106
a.	<i>Ammoides verticillata</i>	106
b.	<i>Foeniculum vulgare</i>	107
c.	<i>Daucus carota</i>	108
<u>d.</u>	<i>Daucus maritimus</i>	108
<u>e.</u>	<i>Daucus gummifera</i>	109
<u>f.</u>	<i>Caucalis maritima (Orlaya grandiflora</i>	110
<u>g.</u>	<i>Thapsia garganica</i>	110
<u>h.</u>	<i>Ferula communi</i>	111
<u>i.</u>	<i>Daucus crinitus</i>	112
<u>j.</u>	<i>Phlomis herba-venti</i>	112
<u>k.</u>	<i>Thymus ciliatus</i>	113
<u>l.</u>	<i>Mentha piperita</i>	113
<u>m.</u>	<i>Lavandula dentata</i>	114
<u>n.</u>	<i>Lavandula multifida</i>	115
o.	<i>Salvia officinalis</i>	115
p.	<i>Salvia verbenaca</i>	116
q.	<i>Thymus capitatus</i>	117
r.	<i>Rosmarinus officinalis</i>	117
s.	<i>Inula viscosa</i>	118
IV-3-	Méthode.....	119
IV-3-1-	Préparation des ligands	119
IV-3-2-	Préparation de la protéine « Acetyl coA carboxylase »	125
IV-3-3-	Docking moléculaire	126
IV-3-4-	Simulation de la dynamique moléculaire	127
IV-3-5-	Règle de Lipenski.....	129
IV-3-6-	Test ADME	130

V-Résultats et discussion	130
V-1-Simulation du Docking Moléculaire.....	131
V-1-1-Interactions ACC-Ligand	139
V-1-2-Propriété des Inhibiteurs.....	142
V-2-Simulations de la dynamique moléculaire	143
Etude expérimentale	145
I-Introduction.....	145
II-Matériel et Méthodes d'analyses nématologiques	145
II-1-Prélèvement et échantillonnage	146
II-2-Extraction des nématodes	149
A partir du sol (Méthode de Baermann).....	150
1. Matériel.....	150
2. Méthode d'extraction	150
A partir des racines (Méthode de Tarjan).....	153
1. Matériel.....	153
2. Méthode d'extraction.....	154
❖ Préparation des racines.....	154
❖ Traitement à l'eau oxygénée.....	154
❖ Récupération des nématodes	155
❖ Décantation	156
II-3-Observation sous microscope optique et dénombrement.....	156
II-4- Application des résultats	157
II-4-1-Extraction de l'huile essentielle d' <i>Inula viscosa</i>	157
II-4-2-Tester l'efficacité de l'huile essentielle d' <i>Inula viscosa</i> sur le <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	158
a. Matériel	158
b. Traitement des nématodes par l'huile essentielle d' <i>Inula viscosa</i>	159
c. Incubation.....	160
d. Observation des résultats.....	160
III-Résultats et Discussions	161
III-1-Différenciation des nématodes vivants et morts.....	163
III-2-Calcul du pourcentage de mortalité dans chaque boîte de Petri.....	169

III-3-Analyse des résultats	170
III-4-Détermination de la dose létale 50 (DL50)	171
IV- Discussion.....	173
Conclusion générale et perspectives	175
Références bibliographiques	177

Listes des figures

Figure 01. Illustration d'un nématode phytoparasite.

Figure 02. Schéma illustrant la structure d'un nématode phytoparasite.

Figure 03. Nématode semi endoparasite sous microscope optique « *Tylenchulus semipenetrans* ».

Figure 04. Coupe transversale d'une racine de bigaradier (*Citrus aurantium*) infestée par *Tylenchulus semipenetrans*.

Figure 05. Différenciation des larves du *Tylenchulus semipenetrans*.

Figure 06. Caractéristiques morphologiques du *Tylenchulus semipenetrans*.

Figure 07. Schématisation de l'anatomie de la femelle.

Figure 08. Cycle de vie du *Tylenchulus semipenetrans*.

Figure 09. Dépérissement lent d'un arbre d'agrumes.

Figure 10. Différentes variétés d'agrumes.

Figure 11. Région d'origine, dispersion et zones de diversification des agrumes cultivés.

Figure 12. Classification des agrumes et origine génétique des *Citrus* cultivés.

Figure 13. Structure d'un fruit d'agrumes.

Figure 14. Structure de la fleur d'agrumes.

Figure 15. Fleurs et formation des fruits du Citron.

Figure 16. Quelques variétés de fruits des agrumes.

Figure 17. Cycle de croissance d'un agrume.

Figure 18. Schématisation du développement floral et de la fructification d'un *Citrus limon*.

Figure 19. *Citrus unshiu*.

Figure 20. Clémentiner.

Figure 21. *Citrus clementina*.

Figure 22. Clémentine Ragheb.

Figure 23. Clémentine commune.

Figure 24. Mandarine méditerranéenne.

Figure 25. *Citrus limon*.

Figure 26. Citron Feminello.

Figure 27. *Citrus aurantifolia*.

Figure 28. *Citrus latifolia*.

Figure 29. Lime douce de Palestine.

Figure 30. Pamplemousse Goliath.

Figure 31. *Citrus paradisi*.

Figure 32. Kumquat Marumi.

Figure 33. Main de Bouddha.

Figure 34. Washington sanguine.

Figure 35. Orange sanguine.

Figure 36. Orange douce.

Figure 37. Orange Navelina.

Figure 38. Orange Salustiana.

Figure 39. Thomson Navel.

Figure 40. Washington navel.

Figure 41. Arbre de Washington navel.

Figure 42. Pollinisation d'une fleur de Washington navel.

Figure 43. Visualisation de la variété Washington navel.

Figure 44. Washington navel.

Figure 45. Ecaillage de porte-greffes affectés par l'Exocortis.

Figure 46. Ecaillage sur le tronc et branches suite à une attaque de Psorose.

Figure 47. Nécrose du phloème.

Figure 48. Aspect des arbres affectés par la Tristeza.

Figure 49. Inversion de coloration des fruits.

Figure 50. Des lésions et taches ponctuelles sur fruit et feuilles.

Figure 51. Patrimoine Agrumicole en Algérie.

Figure 52. Verger d'agrumes.

Figure 53. Histogramme comparant la production d'agrumes en Algérie durant la dernière décennie.

Figure 54. Production d'agrumes à Tlemcen.

Figure 55. Géolocalisation de la région d'El fehoul.

Figure 56. Plan parcellaire de la ferme BELAIDOUNI Mohamed.

Figure 57. Localisation du verger d'étude « Washington Navel ».

Figure 58. Verger de Washington Navel.

Figure 59. Variations mensuelles des précipitations pour la station de Zenâta (Tlemcen).

Figure 60. Variations mensuelles des températures pour la station de Zenâta (Tlemcen).

Figure 61. Diagramme Ombrothermique de la station Zenata (2004-2024).

Figure 62. Graphique d'indice de De Martonne.

Figure 63. Climagramme pluviothermique d'EMBERGER.

Figure 64. Complexe Enzyme- ligand.

Figure 65. Biosynthèse du malonyl-CoA.

Figure 66. Extraction des huiles essentielles par hydrodistillation.

Figure 67. *Ammoides verticillata*.

Figure 68. *Foeniculum vulgare*.

Figure 69. *Daucus carota*.

Figure 70. *Daucus maritimus*.

Figure 71. *Daucus gummifer*.

Figure 72. *Caucalis maritima*

Figure 73. *Thapsia garganica*.

Figure 74. *Ferula communis*.

Figure 75. *Daucus crinitus*.

Figure 76. *Phlomis herba-venti*.

Figure 77. *Thymus ciliatus*.

Figure 78. *Mentha piperita*.

Figure 79. *Lavandula dentata*.

Figure 80. *Lavandula multifida*.

Figure 81. *Salvia officinalis*.

Figure 82. *Salvia verbenaca*.

Figure 83. *Thymus capitatus*

Figure 84. *Rosmarinus officinalis*.

Figure 85. *Inula viscosa*.

Figure 86. Structure 3D de la protéine étudiée.

Figure 87. Protocole suivi pour les calculs de Docking moléculaire.

Figure 88. Etapes suivies pour le calcul de dynamique moléculaire.

Figure 89. Complexe 1BDO-Spirotetramat

Figure 90. Complexe 1BDO- Acetate de Bornyl

Figure 91. Complexe 1BDO- Isochavicol isobutyrate

Figure 92. Complexe 1BDO- Biotine

Figure 93. Complexe 1BDO- Thymol

Figure 94. Complexe 1BDO- Menthol.

Figure 95. Complexe 1BDO- Myristicin.

Figure 96. Interactions des ligands au niveau du site actif de l'ACC.

Figure 97. Sonde agrologique.

Figure 98. Echantillonnage en diagonale.

Figure 99. Les neufs échantillons prélevés du verger.

Figure 100. Lavage et élimination des éléments grossiers par la passoire.

Figure 101. Décantation des échantillons.

Figure 102. Tamisage et concentration des nématodes.

Figure 103. Récupération des nématodes à partir d'entonnoir de BAERMANN.

Figure 104. Arbre présentant les symptômes du dépérissement lent.

Figure 105. Immersion des racines dans la solution de peroxyde d'hydrogène.

Figure 106. Tamis de 45µm.

Figure 107. Résultats de la simulation de dynamique moléculaire.

Figure 108. Dispositif d'hydrodistillation.

Figure 109. Décanteur contenant l'huile essentielle extraite.

Figure 110. Traitement des échantillons de nématodes par l'huile essentielle d'*Inula viscosa*.

Figure 111. Nématode male sous microscope optique.

Figure 112. Nématode femelle sous microscope optique.

Figure 113. Organes internes visible chez un male.

Figure 114. Nématode femelle morte après traitement par *Inula viscosa*.

Figure 115. Nématode male mort sous microscope optique.

Figure 116. Nématode mort non coloré après coloration par le Bleu de Méthylène.

Figure 117. Régression linéaire entre le logarithme des doses d'*Inula viscosa* et les probits de mortalité en utilisant le logiciel MINITAB.

Liste des tableaux

Tableau 01. Evolution de la production d'agrumes en Algérie.

Tableau 02. Production d'agrumes à Tlemcen durant les 10 dernières années.

Tableau 03. Rendement des cultures pérennes de la ferme BELAIDOUNI (2021/2022).

Tableau 04. Station météorologique de Tlemcen (Zenâta).

Tableau 05. Données pluviométriques de la station de Zenâta pour la période (2004-2024).

Tableau 06. Données de températures de la station de Zenâta pour la période (2004-2024).

Tableau 07. Principes actifs des espèces concernées par notre étude.

Tableau 08. Caractéristiques d'Acétyl coA carboxylase (1BDO).

Tableau 09. Résultats du Docking moléculaire.

Tableau 10. Les composés ayant obtenus les meilleurs scores du Docking.

Tableau 11. Caractéristiques des Ligands étudiés.

Tableau 12. Résultats après l'observation sous la loupe binoculaire.

Tableau 13. Résultats obtenus pour chaque concentration d'huile essentielle.

Liste des abréviations

g : Gramme.

mm : Millimètre.

NPP : Nématodes phytoparasites.

Ct : Cellule trophique.

N : Nématode.

μ : Micro.

°C : Degré Celsius.

pH : Potentiel hydrogène.

% : Pourcent.

cc : Centimètre Cubique.

Ex : Exemple.

Etc : Et cetera.

FAO : Food and Agriculture Organization.

XXe : 20^{ème} siècle.

N : Nord.

S : Sud.

O : Ouest.

E : Est.

M : Mètre.

Kg : Kilogramme.

XIX : 19^{ème} siècle.

Cm : Centimètre.

WCO : World Citrus Organisation.

ITAFV : Institut technique de l'arboriculture fruitière et de la vigne.

Ha : Hectare.

EURL : Entreprise Unipersonnelle à Responsabilité Limitée.

EPE-SOTRAVIT : Entreprise Publique Économique - Société de Transformation Viticole.

GVAPRO : Groupe de Valorisation des Produits Agricoles.

SAT : Superficie Agricole Totale.

SAU : Superficie Agricole Utile.

L/S : Litre par seconde.

m³ : Mètre cube.

m² : Mètre carré.

N°: Numéro.

Wn : Washington Navel.

W : West.

J : Janvier.

F : Février.

M : Mars.

A : Avril.

M : Mai.

J : Juin.

JT : Juillet.

A : Aout.

S : Septembre.

O : Octobre.

N : Novembre.

D : Décembre.

H : Hiver.

A : Automne.

P : Printemps.

E : Eté.

T : Température moyenne mensuelle.

M : Température maximale.

m : Température minimale .

P : précipitation moyenne du mois en mm.

T : température moyenne du mois même en °C.

Q2 : Quotient pluviothermique D'EMBERGER.

K° : Kelvin.

MQ : Mécanique quantique.

MM : Mécanique moléculaire.

DM : Dynamique moléculaire.

ACC : Acétyl CoA Carboxylase.

Co : Coenzyme.

ATP : Adénosine TriPhosphate.

AMPK : Activated Protein Kinase.

AMP : Adénosine MonoPhosphate.

AGTLC : Acides gras à très longues chaines.

VLCFA : Very long chain fatty acid.

RAM : Random Access Memory.

Go : Gigaoctet.

AMD : Advanced Micro Devices.

To : Téraoctet.

3D : Trois dimensions.

Sdf : Structure-Data File.

Pdb : Protein Data Bank.

RCSB : Research Collaboratory for Structural Bioinformatics.

Å : Angström.

-ΔG : Energie libre de Gibbs.

NPT : Nombre de particules, Pression, et Température.

kJ/mol : kilojoules par mole.

Fs : Femtoseconde.

PME : Particle Mesh Ewald.

Ns : Nanoseconde.

RMSD : Root Mean Square Deviation.

RMSF : Root Mean Square Fluctuation.

Gmx : Gromax.

ADME : Absorption, Distribution, Métabolisme et Excrétion.

Da : Dalton.

HO : Hydroxyle.

O: Oxygène.

N : Azote.

Log : Logarithme.

LogP : Logarithme de partage Lipophilie.

ml: Millilitre.

SPT : Spirotetramat.

Kcal/mol: Kilocalorie par mole.

LIG : Ligand.

AH : Accepteur d'Hydrogène.

DH : Donneur d'Hydrogène.

Rg : Rayon de Gyration.

DL50 : Dose létale médiane.

MC : Mortalité corrigée.

M : Pourcentage de morts observées dans la population traitée.

Mt : Pourcentage de morts dans la population témoin.

ملخص

في الجزائر، تحتل الحمضيات المرتبة الثانية من حيث المساحة المزروعة بعد شجرة الزيتون، إلا أن أهميتها الاقتصادية تجعلها في طليعة الإنتاج الفلاحي الوطني. تواجه الزراعة العديد من التهديدات، من بينها الديدان الثعبانية النباتية (النيماتودا/)، والتي تؤدي إلى خسائر كبيرة في المحصول. ومن بين هذه الطفيليات، يُعتبر *Tylenchulus semipenetrans*، موضوع هذه الدراسة، من أخطر الأنواع، حيث يهاجم جذور الحمضيات من خلال التثبيت عليها واختراقها جزئياً، مما يتسبب في تدهور تدريجي للأشجار. تُستخدم المبيدات النيماتودية الكيميائية على نطاق واسع لمكافحة هذه الطفيليات، لكنها تُشكل مخاطر بيئية خطيرة بسبب آثارها السامة على الأنظمة البيئية. لذلك، برز الاهتمام بتطوير مبيدات نيماتودية بيولوجية توفر بديلاً مستداماً وصديقاً للبيئة. تعتمد هذه الدراسة على الزيوت الأساسية المستخلصة من النباتات المنتشرة على نطاق واسع في غرب الجزائر. وقد أظهرت بعض المركبات الفعالة المشتقة من هذه الزيوت قدرة تثبيطية على إنزيم Acetyl-CoA Carboxylase، وهو إنزيم أساسي في عملية التخليق الحيوي للأحماض الدهنية لدى *Tylenchulus semipenetrans*. بفضل تقنيات النمذجة الجزيئية، تم تحديد أن أسيتات البورنيل المستخلصة من نبات *Inula viscosa* كأقوى مثبط، كما يتضح من نتائج الالتحام الجزيئي (docking) وقد تم تأكيد هذه النتائج من خلال التجارب الحيوية (in vivo)، حيث أظهرت فعالية واعدة في الحد من أعداد *Tylenchulus semipenetrans* دون التسبب في آثار ضارة على النظام البيئي.

الكلمات المفتاحية: *Tylenchulus semipenetrans*، المبيدات النيماتودية البيولوجية، الزيت العطري، Acetyl-CoA Carboxylase، النمذجة الجزيئية، *Inula viscosa*.

Résumé

En Algérie, les agrumes occupent le deuxième rang en termes de superficie arboricole après l'olivier. Toutefois, leur importance économique les place au premier plan des productions fruitières nationales. L'agriculture est confrontée à de nombreuses menaces, notamment les nématodes phytophages, qui entraînent des pertes significatives du rendement. Parmi eux, *Tylenchulus semipenetrans*, le nématode étudié dans ce travail, s'attaque aux racines des agrumes en s'y fixant et en y pénétrant partiellement, provoquant ainsi un dépérissement lent des arbres. Les nématicides chimiques, couramment utilisés pour lutter contre ces parasites, présentent des effets écotoxicologiques préoccupants. Dans cette optique, l'intérêt s'est porté sur le développement de bio-nématicides, qui offrent une alternative durable et respectueuse de l'environnement. La présente étude s'appuie sur les huiles essentielles extraites de plantes largement répandues dans l'ouest de l'Algérie. Certains ligands issus de ces huiles essentielles ont démontré une capacité inhibitrice sur l'Acétyl-CoA Carboxylase, une enzyme clé de la biosynthèse des acides gras chez le *Tylenchulus semipenetrans*. Grâce à la modélisation moléculaire, il a été mis en évidence que l'acétate de bornyle, issu d'*Inula viscosa*, constitue le meilleur inhibiteur, comme l'indique son score du docking. Les résultats obtenus par cette étude *in silico* ont ensuite été validés *in vivo*, montrant une efficacité satisfaisante pour le contrôle des populations du *Tylenchulus semipenetrans* sans impact négatif sur l'écosystème.

Mots clés : *Tylenchulus semipenetrans*, Bio-nématicides, Huile essentielle, Acetyl CoA Carboxylase, Modélisation moléculaire. *Inula viscosa*.

Abstract

In Algeria, citrus fruits occupy the second rank in terms of orchard area, following the olive tree. However, their economic importance places them at the forefront of national fruit production. Agriculture faces numerous threats, including phytophagous nematodes, which cause significant yield losses. Among them, *Tylenchulus semipenetrans*, the nematode studied in this work, targets the roots of citrus plants by attaching to them and partially penetrating them, thus causing a slow decline of the trees. Chemical nematicides, commonly used to combat these pests, pose concerning ecotoxicological effects. Therefore, there has been growing interest in developing bio-nematicides, which offer a sustainable and environmentally friendly alternative. This study focuses on essential oils extracted from plants widely distributed in western Algeria. Some ligands derived from these essential oils have shown inhibitory activity on Acetyl-CoA Carboxylase, a key enzyme in the biosynthesis of fatty acids in *Tylenchulus semipenetrans*. Using molecular modeling, it was found that bornyl acetate, derived from *Inula viscosa*, is the most effective inhibitor, as indicated by its docking score. The results obtained from this *in silico* study were then validated *in vivo*, demonstrating satisfactory effectiveness in controlling *Tylenchulus semipenetrans* populations without causing negative impacts on the ecosystem.

Keywords: *Tylenchulus semipenetrans*, Bio-nematicides, Essential oil, Acetyl-CoA Carboxylase, Molecular modeling, *Inula viscosa*.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'antiquité, l'homme a manifesté un intérêt particulier pour la culture des agrumes. La facilité d'hybridation de ces espèces, leur mode naturel de multiplication ainsi que leur fort potentiel de mutation ont favorisé l'émergence d'une grande diversité variétale.

À la fin du VI^e siècle, les agrumes étaient largement répandus dans la plupart des régions tropicales et subtropicales. Leur introduction en Afrique du Nord est attribuée aux Arabes (**Praloran., 1971**).

Actuellement, les agrumes figurent parmi les fruits les plus consommés à l'échelle mondiale. La production globale de ces fruits, toutes espèces confondues, dépasse 110 millions de tonnes par an, sur une superficie avoisinant 7,5 millions d'hectares (**USDA., 2023**).

En Algérie, la culture des agrumes bénéficie de conditions naturelles particulièrement propices, permettant ainsi au pays de s'affirmer comme l'un des principaux acteurs de l'exportation. Les vergers se concentrent essentiellement dans trois grandes zones géographiques : les plaines du littoral, du sublittoral et les régions méditerranéennes, caractérisées par un climat combinant des influences maritimes et continentales. Ces régions se distinguent par la présence de sols généralement fertiles et profonds, ainsi qu'une altitude moyenne relativement basse.

La production totale d'agrumes pour la campagne agricole de 2024 a été estimée à plus de 18 millions de quintaux. Au cours de la saison 2023-2024, la valeur de la production des différentes variétés d'agrumes a enregistré une augmentation significative, atteignant environ 186 milliards de dinars, soit 5 % de la production agricole nationale totale (**Bouazghi.,2024**).

Dans la wilaya de Tlemcen, l'agrumiculture constitue un secteur stratégique, au même titre que les autres filières agricoles. Ces dernières années, elle a bénéficié d'un essor grâce à diverses mesures incitatives mises en place par l'État, englobant des aspects financiers, socio-économiques, technico-scientifiques et organisationnels. En 2024, une superficie de 3524 hectares était dédiée à la culture des agrumes, permettant une récolte de 873695 quintaux (**DSA., 2025**).

Mais depuis leur implantation et leur culture en vergers, les agrumes sont vulnérables à un parasitisme animal très varié. Les ravageurs constituent la principale cible des traitements appliqués dans les orangeries. Parmi eux, on peut citer les diptères, les cochenilles, les thrips, les pucerons, les acariens, les lépidoptères ainsi que les nématodes. La plupart des nématodes

phytophages sont des parasites des racines. Parmi ces phytophages des *Citrus* les plus répandus, nous avons deux espèces. La première *Radopholus similis* qui accuse une nématose d'une extrême gravité, et la deuxième espèce qui fait l'objet de notre étude, est le nématode des agrumes le *Tylenchulus semipenetrans* Cobb 1913. Il s'agit d'un parasite obligatoire, ce qui signifie qu'il dépend de tissus végétaux vivants, en particulier des racines, pour assurer sa survie et sa reproduction. Ce nématode est largement répandu à l'échelle mondiale (**Sorribas et al., 2008**) ainsi que dans le bassin méditerranéen (**Inserra., 1994**).

Il est principalement responsable du dépérissement lent des agrumes, également connu sous le terme slow decline (**El-Borai et al., 2002**). Les pertes de rendement attribuées au *Tylenchulus semipenetrans* sont estimées entre 10 % et 30 % de la production totale (**Duncan., 2005**).

L'agriculture est fréquemment menacée par les insectes phytophages et les nématodes, dont l'impact peut compromettre la productivité des cultures. La lutte chimique constitue une méthode largement utilisée pour protéger, améliorer et accroître les rendements agricoles. Cependant, son usage intensif présente des risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement, notamment en raison de la toxicité résiduelle et de l'altération de la faune auxiliaire. Ces effets néfastes justifient le recours à des attractifs spécifiques comme alternative (**Ros., 1997**). Dans cette perspective, la lutte biologique apparaît comme une approche privilégiée, favorisant le maintien d'un écosystème sain et équilibré.

La lutte contre les nématodes repose souvent sur l'utilisation de nématicides chimiques, tels que le spirotétramat. Toutefois, en raison de son impact potentiellement néfaste sur les écosystèmes (**Brück., 2009**), le développement de nouvelles stratégies de contrôle s'impose comme une nécessité urgente. Dans cette optique, la recherche de bio-nématicides constitue une alternative prometteuse visant à améliorer la production et la qualité des agrumes à l'échelle mondiale tout en préservant l'équilibre des écosystèmes.

Grâce à sa situation géographique, l'Algérie possède une végétation particulièrement riche et diversifiée, abritant un grand nombre de plantes aromatiques à croissance spontanée. L'intérêt scientifique et économique porté à ces plantes s'est accru ces dernières années (**Kholkhal., 2014**), en raison de leur abondance dans la nature et de leur potentiel d'utilisation en agriculture comme bio-insecticides, notamment par l'extraction de leurs huiles essentielles.

L'exploitation des plantes aromatiques dans la protection des cultures repose sur un large éventail d'applications. La technique consiste principalement à extraire des ligands à partir des huiles essentielles de ces plantes afin de lutter contre divers ravageurs agricoles. Cette approche présente plusieurs avantages, notamment une spécificité accrue, une absence de toxicité et une efficacité significative dans la préservation des cultures.

Dans cette perspective, l'essor des outils informatiques a favorisé l'intégration des méthodes de la modélisation moléculaire dans la recherche biologique. Ces méthodes reposent sur des calculs théoriques permettant d'analyser la réactivité chimique et la structure moléculaire des composés, afin de simuler et de prédire le comportement des systèmes moléculaires ciblés.

L'utilisation de ces méthodes est justifiée par la possibilité de réaliser des études préparatoires, généralement peu coûteuses et rapides par rapport à la méthode expérimentale.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux interactions des molécules qui sont à la base de la majorité des mécanismes biologiques. La partie *in silico* consiste à étudier l'inhibition de l'Acetyl CoA Carboxylase, l'enzyme responsable de la synthèse des acides gras chez le *Tylenchulus semipenetrans*, son altération perturbe la synthèse de la couche de surface. Cette action inhibitrice se fait par des ligands issus d'une série de plantes largement répandues dans l'Algérie occidentale, afin de produire un bio-nématocide et cela à l'aide des méthodes de la modélisation moléculaire.

Ensuite nous avons abordé la partie expérimentale au niveau de la ferme pilote Belaidouni Mohammed, commune d'El fehoul, wilaya de Tlemcen, par l'application des résultats obtenus dans la partie *in silico* sur le nématode « *Tylenchulus semipenetrans* » au sein des laboratoires d'Ecologie et environnement, Université de Tlemcen.

Pour réaliser notre objectif, le travail sera basé sur les chapitres suivants :

- Partie bibliographique comportant deux chapitres :
 1. Présentation du nématode des *Citrus* le *Tylenchulus semipenetrans*.
 2. Les agrumes.
- Etude du milieu physique.

- Etude *In Silico*.
- Etude expérimentale.
- Conclusion et perspectives.

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I :

PRÉSENTATION DU NÉMATODE DES
CITRUS LE *TYLENCHULUS*
SEMIPENETRANS

I-1- Généralités sur les nématodes

Les nématodes (Némathelminthes) sont des organismes vermiformes, cylindriques non segmentés occupant des niches écologiques très diverses sur la planète. Ils comprennent différentes formes, libres ou parasites de végétaux ou d'animaux.

Ils sont ubiquistes en exploitant différents milieux tels que les océans, les mers, les eaux douces, les fluides corporels et les films d'eau dans le sol ou sur les végétaux.

Ce sont les organismes les plus abondants de tous les métazoaires en termes de nombre d'individus dans de nombreux écosystèmes, notamment ceux du sol (**Jones et al., 2011**). Ils comptent de 100 à 1000 individus/g de terre.

On les différencie en fonction de leur mode trophique : ils peuvent être bactériophage, mycophages, saprophages, prédateurs d'autres organismes du sol, Zooparasites et phytoparasites (**Yeates et al., 1993**).

La majorité des nématodes telluriques mesurent entre 0.6 et 0.8mm de long et entre 0.025 à 0.5 mm de large (**Sumenkova., 1988**). Certains comme les Longidoridées atteignant 4mm (**Coyne et al., 2010**).

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 (**Bonger., 1990**).

Les nématodes sont majoritairement présents dans les couches superficielles du sol, mais peuvent également se trouver dans les zones de prospection racinaire profonde (cas des espèces ligneuses).

Les communautés de nématodes du sol ont fait l'objet de plusieurs études dans le but d'estimer l'impact de certaines perturbations sur l'activité biologique des sols par l'utilisation d'indices de biodiversité.

Les conclusions fournies par (**Neher et al., 1995**) montrent que les meilleurs indicateurs de l'état sanitaire des sols sont basés sur la structure des communautés de nématodes. En raison de leur impact direct sur la production végétale, la présente recherche met l'accent sur les nématodes phytoparasites (**Figure 01**).



Figure 01. Illustration d'un nématode phytoparasite (Agriculture du Maghreb., 2017).

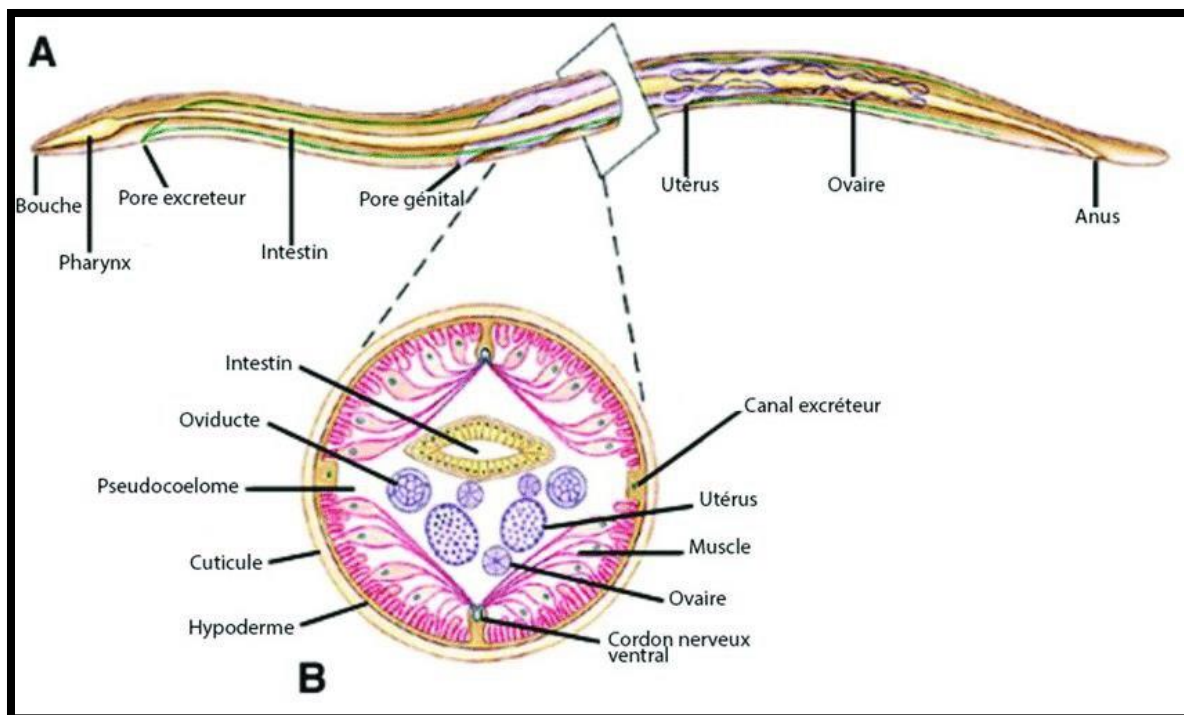
I-2- Nématodes phytoparasites

Les nématodes phytophages, à l'inverse des nématodes zooparasites connus depuis toujours, sont passés longtemps inaperçus, et le sont souvent encore, en raison de leur taille microscopique et du fait qu'ils se trouvent toujours cachés dans le sol ou à l'intérieur des tissus végétaux. (Cayrol et al., 1992).

Les problèmes phytosanitaires causés par ces ravageurs ont une incidence économique très importante à l'échelle mondiale, car ils s'attaquent aussi bien aux grandes cultures qu'aux cultures maraîchères, florales et fruitières (Cayrol et al., 1992).

Les nématodes phytoparasites occasionnent des dégâts qui se manifestent, à l'examen microscopique, par l'apparition de cellules nécrosées dans les tissus racinaires (Dropkin ., 1969) (Mateille ., 1994).

Ils se distinguent des autres groupes de nématodes du sol par la présence d'une pièce buccale spécialisée : **le stylet (Figure 02)** qui leur sert à perforer les cellules végétales, y injecter des enzymes lytiques et en extraire la sève végétale (Coyne et al., 2010). Les glandes salivaires des nématodes sécrètent des substances susceptibles d'entraîner des modifications dans les tissus environnants.



(A) Morphologie générale d'un nématode phytoparasite.

(B) Coupe transversale mettant en évidence l'organisation schématique d'un nématode.

Figure 02. Schéma illustrant la structure d'un nématode phytoparasite

(Biocyclopédia., 2019).

Le développement des nématodes suit un cycle de six stades, comprenant un stade œuf, quatre stades juvéniles et un stade adulte. La durée de ces stades ainsi que celle du cycle biologique complet varient en fonction des espèces, mais aussi des facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité et la plante hôte. Dans des conditions idéales, notamment dans les régions tropicales, de nombreuses espèces connaissent des cycles de développement très courts, souvent plusieurs par saison. Ces conditions permettent à la population de se multiplier rapidement à partir d'un seul individu (auto-fécondation) ou de deux individus (reproduction sexuée).

En outre, les nématodes sont capables de résister à des conditions défavorables, telles que la sécheresse saisonnière ou les hivers rigoureux (Coyne *et al.*, 2010).

Certains nématodes phytoparasites (NPP) attaquent les parties aériennes ou les graines des plantes, tandis que d'autres parasitent principalement les racines, provoquant des dommages au système racinaire (prolifération des poils racinaires, déformations), ce qui entrave la capacité de la plante à absorber l'eau et les nutriments essentiels à son développement.

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Les stratégies de parasitisme chez les NPP sont variées. En effet, dans des sols parfois soumis à des conditions environnementales difficiles, de nombreux ennemis naturels coexistent, et certains groupes de NPP ont développé un mode de vie endoparasitique. Ces derniers pénètrent rapidement dans les tissus végétaux au début de leur cycle de vie, afin de minimiser leur exposition au sol. Cependant, ces NPP dépendent fortement de l'état et de la survie de leur hôte.

En revanche, les NPP ectoparasites, bien qu'ils limitent leur exposition au risque de dégradation par leur hôte en restant principalement dans le sol, sont davantage vulnérables aux agents pathogènes et prédateurs.

Ainsi, les parasites racinaires peuvent être classés selon deux critères : leur capacité à pénétrer ou non dans les tissus (ecto ou endoparasites), ainsi que leur capacité à maintenir leur mobilité au stade adulte (migration ou sédentarité) (**Garcia., 2017**).

Donc ils peuvent être regroupés selon leur comportement alimentaire et leur mobilité en trois groupes principaux :

- Les endoparasites sédentaires ou migrants deviennent adultes et pondent toujours à l'intérieur des tissus végétaux, le plus souvent dans les racines (**Lacroix., 2006**).
- Les ectoparasites sédentaires ou migrants se tiennent dans le sol à l'extérieur de la racine (**Luc et al., 1990**).
- Les semi endoparasites, on range dans cette catégorie les individus qui pénètrent partiellement dans la racine pour se nourrir (**Luc et al., 1990**). Ils se fixent en un point de la racine. Une seule partie du corps, la tête, pénètre dans la racine, le reste du corps se trouvant à l'extérieur (**Figure 03**). C'est le cas du *Thylenchulus semipenetrans* dont le corps de la femelle se renfle ; celle-ci devenant sessile (**Ferris et al., 2001**).

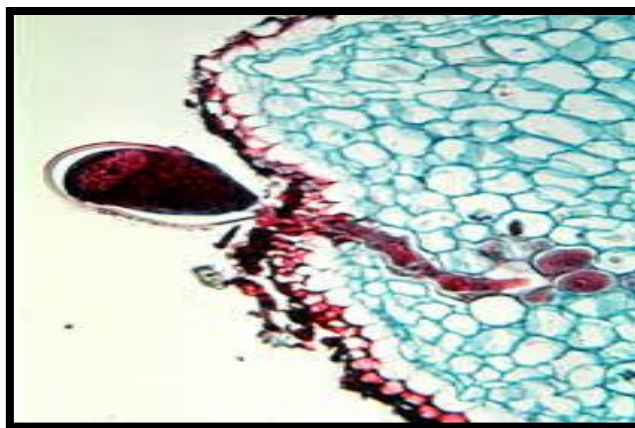


Figure 03. Nématode semi endoparasite sous microscope optique « *Tylenchulus semipenetrans* » (Ferris., 2024).

I-3- *Tylenchulus semipenetrans*

Le nématode *Tylenchulus semipenetrans*, également connu sous le nom de nématode des racines des agrumes (**Figure 04**), constitue l'un des principaux parasites affectant les cultures d'agrumes à l'échelle mondiale.

Ce nématode semi-endoparasite sédentaire se fixe principalement aux racines des plantes, où il provoque des lésions et des déformations qui perturbent l'absorption de l'eau et des nutriments essentiels à la croissance des plantes.

L'infestation par *Tylenchulus semipenetrans* entraîne une réduction significative des rendements et de la qualité des fruits, générant ainsi d'importantes pertes économiques dans les vergers d'agrumes.

Actuellement, la gestion de ce nématode repose principalement sur l'utilisation de traitements chimiques, qui bien que souvent efficaces, posent des risques environnementaux et sanitaires, en raison de la toxicité de certains produits et de la résistance croissante des nématodes.

Face à ces défis, l'utilisation de méthodes de lutte biologiques et écologiques, telles que l'emploi d'huiles essentielles, émerge comme une alternative prometteuse.

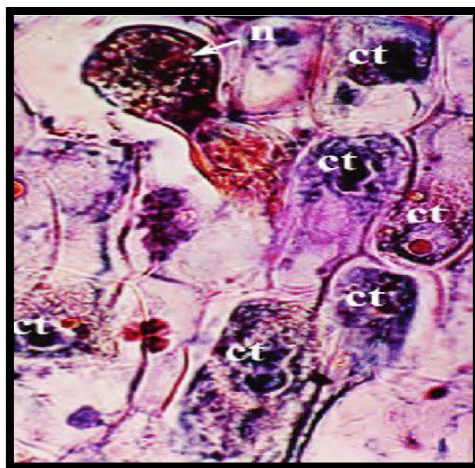


Figure 04. Coupe transversale d'une racine de bigaradier (*Citrus aurantium*) infestée par *Tylenchulus semipenetrans* « ct : cellule trophique n : nématode » (Kallel et al., 2005).

I-3-1-Historique

Découvert pour la première fois en Californie par J.R Hodges en 1913, ce nématode phytoparasite fût associé par Thomas au dépérissement des agrumes durant la même année, Cobb le décrit et le nomma *Tylenchulus semipenetrans* (Cobb., 1913), et une année après, en 1914, ce même chercheur publia sa description, son développement et sa structure (Van Guandy., 1958).

En Algérie et selon Scotto La Massesse en 1966, le mérite de sa découverte revient à Trabut en 1915 sur vigne dans la région de Mostaganem (Hassani., 1996).

I-3-2-Taxonomie

Ce nématode, connu sous le nom de nématode des agrumes, est un semi endoparasite qui est signalé dans toutes les zones agrumicoles dans le monde (Cobb., 1913).

Reddy en 1983 donne la classification suivante de l'espèce étudiée :

- **Règne :** Animalia.
- **Embranchement :** Némathelminthes.
- **Classe :** Nematoda.
- **Ordre :** Tylenchida.
- **Famille :** Tylenchidae.
- **Genre :** *Tylenchulus*.

- **Espèce :** *Tylenchulus semipenetrans* (Cobb., 1913).

I-3-3-Caractéristiques morphologiques et anatomiques de l'espèce :

Cette espèce se distingue par un dimorphisme sexuel prononcé, avec une hypertrophie notable chez la femelle. La partie antérieure est engagée dans les racines, cependant la partie postérieure est allongée enfilée, sacciforme et terminée par une queue qui reste à l'extérieur des racines. La tête dépourvue d'armature céphalique est munie d'un stylet robuste avec des renflements basaux larges (Sellami., 2008).

a. Larves

Les œufs du *Tylenchulus semipenetrans* éclosent dans le sol, les larves qui en sortent ont déjà subi une mue à l'intérieur de l'œuf comme il est de règle chez le groupe (Tylenchida) auquel appartient cette espèce, ces larves sont donc dites larves de 2^{ème} stade.

Elles se présentent sous la forme d'un fuseau, arrondi à l'avant et assez effilé vers l'arrière, long de 300µ à 350 µ ; elles possèdent un stylet bien développé long de 12 à 13µ orné de trois boutons basaux arrondis ; l'œsophage comprend un bulbe médian valvulaire moyennement développé suivi d'une assez longue partie mince (l'isthme) se terminant par un bulbe basal glandulaire renflé ne recouvrant pas l'intestin. Le pore excréteur situé sur la moitié postérieure du corps œsophago-intestinale est très distinct, est perpendiculaire au grand axe du corps (Viladerbo et Luc., 1961).

Dès ce stade on peut reconnaître les larves qui donneront des femelles de celles qui donneront des mâles, les premières sont plus minces et plus effilées à l'arrière que les secondes et ont un œsophage plus long (**Figure 05**). L'évolution des larves mâles et des larves femelles est très différente (Van Gundy.,1958).

A : Larve femelle, 2^{ème} stade.

B : Larve mâle, 2^{ème} stade.

C : Mâle adulte.

D : Jeune femelle adulte

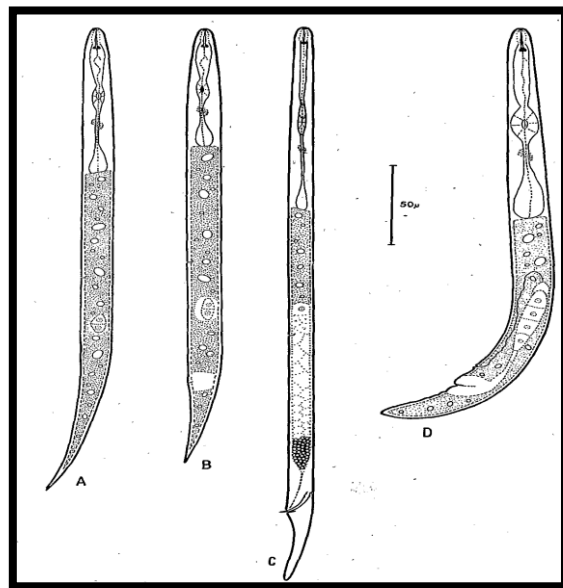


Figure 05. Différenciation des larves du *Tylenchulus semipenetrans* (Van Gundy., 1958).

b. Males

Les larves mâles demeurent très peu de temps au second stade (2 à 3 jours) et subissent rapidement trois autres mues pour se transformer en mâle adulte. L'ensemble du processus depuis l'éclosion de l'œuf peut ne prendre que 180 heures.

Les mâles adultes, longs de 330 à 410 µ, possèdent un œsophage réduit non fonctionnel, le stylet n'est pratiquement plus visible, les organes sexuels par contre sont très développés et le testicule unique remplit plus du tiers du corps (**Figure 06**).

Ne pouvant se nourrir et vivant sur leurs réserves, les mâles doivent avoir une durée de vie courte. Pendant toute la durée de leur développement ils vivent dans le sol, le développement entier peut se passer en l'absence d'hôte, les mâles ne sont donc pas des parasites obligatoires (**Baines., 1950**).

A : Nématode male.

B : Nématode femelle.

C : Extrémité antérieure du juvénile.

D : Larve du 2^{ème} stade.

E-F-G-I : extrémité postérieure de la larve du 2^{ème} stade.

« en E et F : la flèche indique le primordium génital ».

H : extrémité postérieure masculine

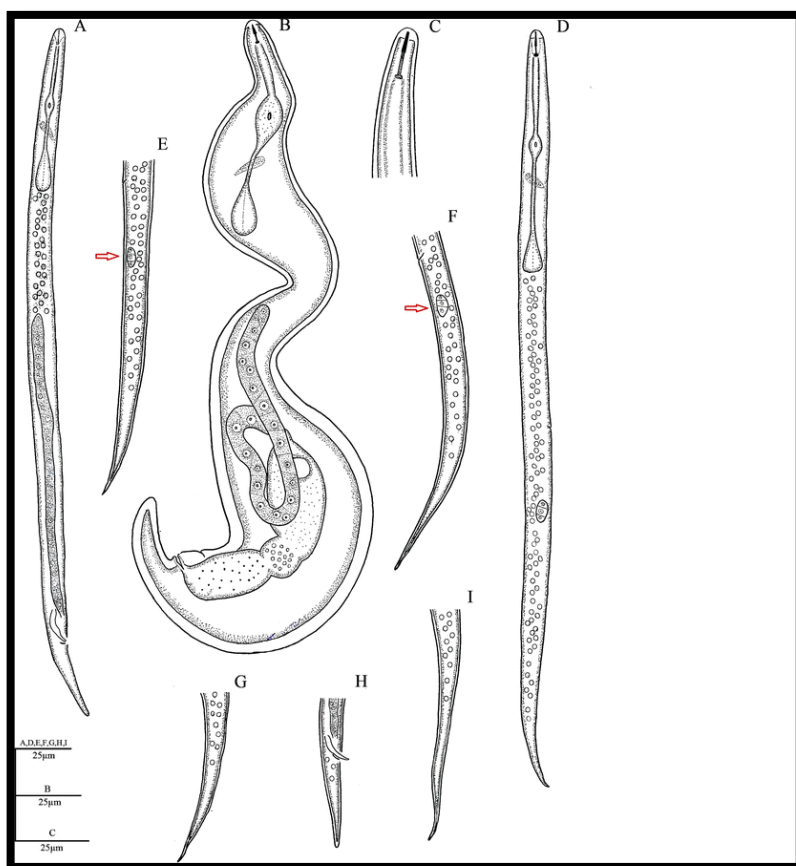


Figure 06. Caractéristiques morphologiques du *Tylenchulus semipenetrans*

(Rashidifard et al., 2015)

c. Femelles

Les larves femelles peuvent demeurer par contre très longtemps au deuxième stade qui constitue le stade de résistance du nématode, cette durée dépend essentiellement de la température du sol et peut varier de deux ans et demi pour un sol à 150°C à deux mois et demi pour un sol à 32,5°C (Baines., 1950).

Avant de se transformer en femelles adultes, les larves de deuxième stade subissent elles aussi trois mues successives. Au cours de ces mues leur morphologie change : la queue se raccourcit et s'arrondit, le corps s'épaissit, l'œsophage se développe en longueur et en largeur, les jeunes femelles sont plus trapues avec une queue courte, la portion postérieure du corps arquée ventralement. L'œsophage atteignant presque la moitié du corps, les lèvres de la vulve situées très postérieurement se renflent. Entre la deuxième mue et la quatrième conduisant à l'adulte, il s'écoule environ sept jours.

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Les larves femelles ne semblent pas pénétrer dans les racines, mais vivent à la surface de celles-ci, les jeunes femelles pénètrent ensuite assez rapidement dans les racines.

La partie antérieure du corps jusqu'après la jonction oesophago-intestinale s'insère entre les cellules du parenchyme radiculaire, la partie postérieure restant à l'extérieur de la racine d'où le nom de l'espèce. Cette partie postérieure se gonfle considérablement par suite du grand développement pris par la gonade femelle (**Baines., 1950**).

A pleine maturité la femelle se présente avec une partie antérieure d'abord effilée, droite, puis montrant des renflements très variables en nombre et en forme, car ils proviennent du moulage de l'animal dans les espaces intercellulaires.

Cette portion antérieure contient le stylet, l'œsophage, pourvu d'un volumineux bulbe médian à valvules très développées, faisant office de pompe aspirante et foulante, et un bulbe basal glandulaire à trois noyaux.

La portion postérieure du corps est en forme de cornemuse, renflée avec une queue courte. Il n'y a pas d'anus visible, par contre l'appareil excréteur est bien développé et le pore excréteur est situé près de la vulve. La cuticule de la partie postérieure est nettement plus épaisse que celle de la partie antérieure engagée dans les tissus radiculaires (**Figure 07**).

7 : Portion antérieure du corps de la femelle.

8 : Portion postérieure du corps de la femelle

9 : Vulve et pore excréteur.

11 : Appareil génital

12 : canal excréteur.

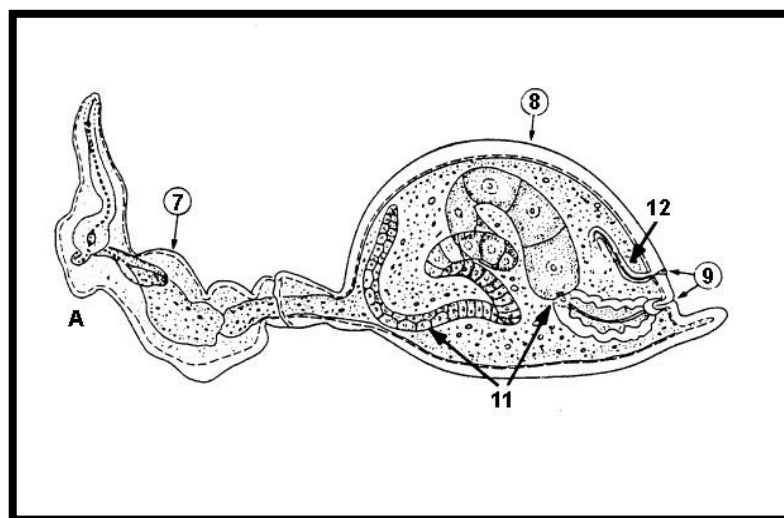


Figure 07. Schématisation de l'anatomie de la femelle (**Luc Sikora et Bridge ., 1990**).

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Une seule femelle peut pondre un assez grand nombre d'œufs (75 à 100). Ces œufs mêlés à une substance gélatineuse restent agglomérés en masse autour de la femelle en formant de petites boules irrégulières, auxquelles adhèrent des particules de sol.

La fécondation des femelles a lieu alors que celles-ci n'ont pas encore pénétré dans les racines. Cette fécondation n'est d'ailleurs pas obligatoire, et des femelles non fécondées peuvent pondre des œufs contenant des larves, mâles et femelles, parfaitement viables (**Baines., 1950**).

I-3-4-Biologie et cycle de vie

Selon Grasse en 1965, la biologie des semis endoparasites qui regroupent les représentants de la famille des Tylenchidae présente des caractères originaux.

Tylenchulus semipenetrans est une espèce particulièrement cosmopolite qui se rencontre au voisinage des racines des *Citrus* dans la plupart des régions où ils sont cultivés.

Pour le cycle de développement (**Figure 08**), l'espèce du nématode *Tylenchulus semipenetrans* présente une reproduction bisexuée, elle peut être aussi parthénogénétique facultative sans avoir besoin des mâles (**Cobb., 1913**) (**Al hazmi., 1992**).

Le cycle évolutif de ce nématode comprend cinq stades bien visibles, avec quatre mues larvaires durant les quatre premiers stades (**Taylor., 1968**). Pour Verdejo Luca en 1992, le cycle de développement du nématode des *Citrus* dure entre six à quinze semaines en climat méditerranéen, par contre Cobb (1914)) rapporte que le cycle complet de l'œuf jusqu'à l'œuf dure 6 à 8 semaines.

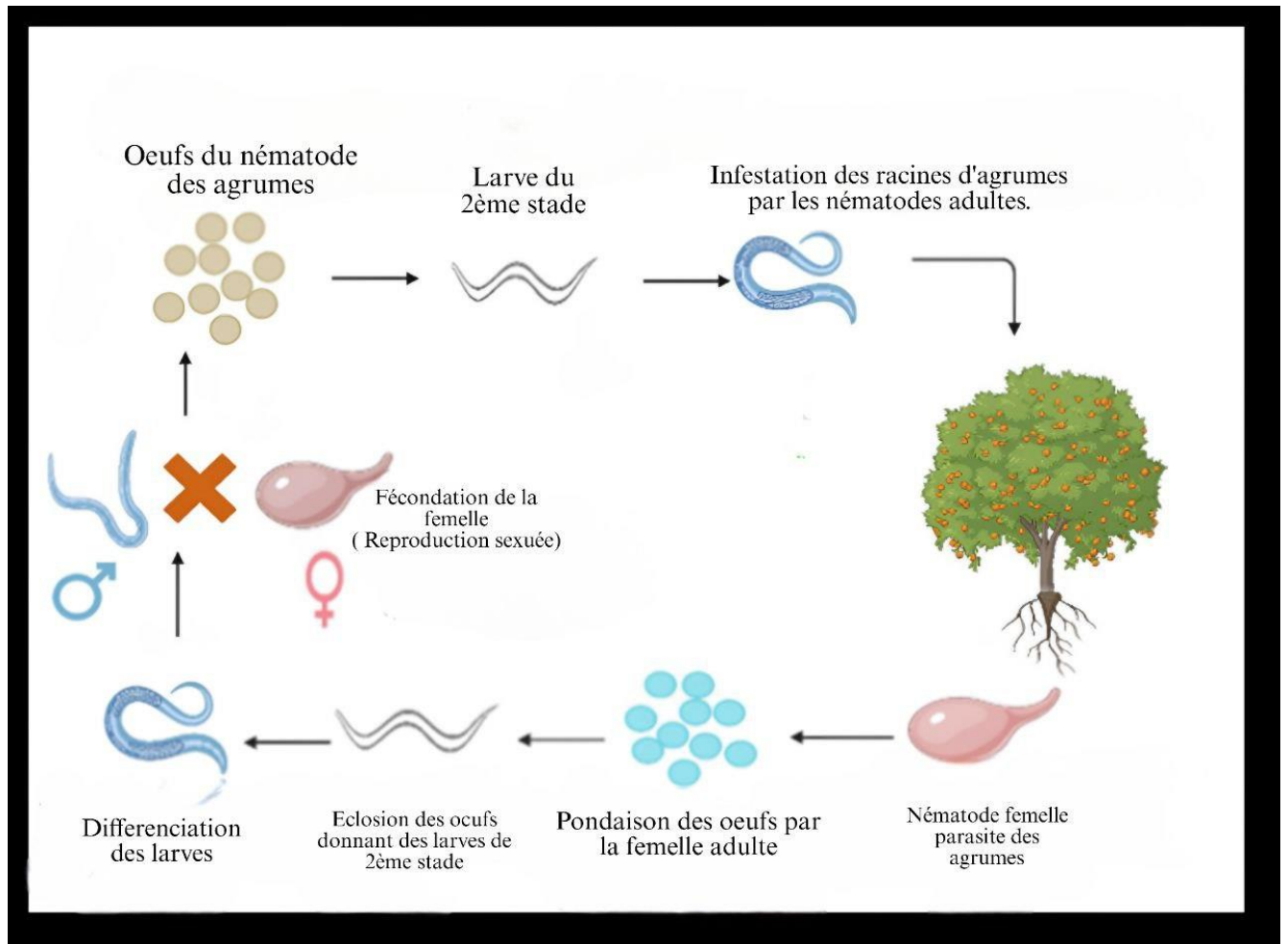


Figure 08. Cycle de vie du *Tylenchulus semipenetrans* (Ankit et al., 2023).

I-3-5-Plantes hôtes du *Tylenchulus semipenetrans*

Les hôtes préférés du *Tylenchulus semipenetrans* sont les espèces d'agrumes (CABI., 2019). En raison de la différenciation des hôtes, trois biotypes de *Tylenchulus semipenetrans* sont reconnus : biotype *Citrus*, biotype Méditerranéen, et biotype *Poncirus* (Verdejo-Lucas., 1992).

Contrairement à de nombreux nématodes, le *Tylenchulus semipenetrans* a une gamme d'hôtes restreinte, qui comprend les agrumes, l'orange trifoliée « *Poncirus trifoliata* », la vigne, le kaki, le lilas et l'olivier (Inserra et al., 1994).

Tylenchulus semipenetrans est un pathogène léger à modéré des agrumes. Ce nématode est le seul nématode phytoparasite qui est omniprésent dans les vergers des agrumes du monde entier (CABI., 2019).

I-3-6-Écologie du *Tylenchulus semipenetrans*

L'écologie du *Tylenchulus semipenetrans* est influencée par son étroite coévolution avec les agrumes, ce qui a entraîné une relation parasitaire très développée. Les preuves de cette association intime sont l'étroite gamme d'hôtes du nématode, la structure hautement développée des cellules nourricières et le nombre exceptionnellement élevé de nématodes qui peuvent être soutenus par des arbres ne présentant qu'un déclin léger à modéré (**Reynolds et O'bannon., 1963**). En revanche, contrairement aux nématodes du genre *Meloidogyne*, les stades juvéniles du *Tylenchulus semipenetrans* peuvent survivre pendant des mois, voire des années, en l'absence de racines hôtes, en fonction de la température (**Baines., 1958**), sans épuiser leurs réserves lipidiques nécessaires à la motilité et à l'infection (**Van Gundy et al., 1967**).

Tylenchulus semipenetrans peut prospérer dans tout environnement non tempéré qui favorise la croissance de ses plantes hôtes. En règle générale, les populations de ce nématode sont plus denses dans les climats arides et méditerranéens que dans les régions subtropicales ou tropicales humides (**Duncan et El-Morshedy., 1996**). Un faible potentiel hydrique, plutôt qu'un excès d'humidité, favorise l'augmentation des populations dans les sols lourds (**Van Gundy et al., 1964**) ainsi que dans les sols légers (**Duncan et El-Morshedy., 1996**), tant que certaines zones du système racinaire peuvent accéder à une humidité suffisante

L'impact des différents types de sol sur le déplacement et le taux d'infection de *Tylenchulus semipenetrans* sur les agrumes a été étudié en conditions de culture en pots. La mobilité des nématodes et le taux maximal d'infection des plants ont été observés dans un sol sableux-limoneux, suivi du sol limoneux-sableux et du sable grossier. En revanche, les pots contenant un substrat de tourbe et de sable ont permis à un nombre minimal de jeunes femelles d'infester les racines des agrumes (**Iqbal et al., 2007**).

Les populations de *Tylenchulus semipenetrans* les plus élevées se trouvent généralement dans les vergers d'agrumes établis dans des sols à texture fine ou dans des sols sableux à forte teneur en matière organique (**Timmer et al., 2003**).

I-3-7- Influence des facteurs de l'environnement sur le *Tylenchulus semipenetrans*

L'infestation des *Citrus* est en fonction des facteurs édaphiques : température, humidité, pH, salinité, texture et du stade physiologique de la plante.

a. Facteurs liés à la plante hôte

Scotto en 1966 a observé que le bigaradier et le *Citrangle Troyer* sont particulièrement susceptibles à l'infestation. Cependant, bien que le bigaradier soit un excellent hôte, le *Citrangle Troyer* ne permet qu'une multiplication très limitée des nématodes.

Et Al Hazmi (1992) a constaté que les arbres adultes sont beaucoup plus fortement infestés que les jeunes arbres. La vigueur, l'état de santé et l'activité métabolique des arbres jouent un rôle crucial dans l'infection par ce nématode.

b. Facteurs abiotiques

- **Texture du sol**

Quelque soit leur groupe ou leur mode de parasitisme, tous les nématodes vivent en interaction étroite avec le sol. Selon Sweelam et Abou-Taka (1989), l'infestation par les nématodes est plus importante et leur nombre plus élevé dans les sols de texture légère.

Reddy (1983) souligne que les sols sableux favorisent particulièrement la croissance des nématodes, une observation également partagée par Scotto en 1986.

Le taux de reproduction des nématodes des agrumes est élevé dans les sols sableux, modéré dans les sols sableux-limoneux et faible dans les sols argileux-limoneux (Timmer et al., 2003). Ces auteurs rapportent également que le passage des larves femelles aux femelles adultes suit un schéma similaire dans les trois types de sol, à l'exception des sols argileux-limoneux.

- **pH du sol**

L'émergence de la plupart des larves de nématodes est perturbée en présence d'un environnement alcalin ou fortement acide.

En ce qui concerne *Tylenchulus semipenetrans*, **Scotto La Massese** (1986) indique que l'optimum de développement se situe entre un pH de 4,5 et 7,7, tandis que **Mashela et al.** (1992) le situent entre 6 et 8.

Baines (1973) explique que la diminution de la population de cette espèce dans un milieu à pH acide est due à la limitation des migrations des larves vers les racines.

- **Humidité**

Les migrations horizontales et surtout verticales des nématodes sont influencées par l'humidité du milieu. Un dessèchement du sol entraîne leur dessiccation (**Bachelier., 1978**).

Selon **Scotto La Massese** (1986), l'humidité joue un rôle important en modifiant les seuils de distribution géographique et en influençant la fluctuation saisonnière des populations.

Reddy (1983) a montré que les nématodes sont actifs dans des sols ayant un taux d'humidité compris entre 40 et 60 %. Toutefois, pour **Taylor** (1968) et **Reddy** (1983), un sol saturé d'eau devient défavorable à leur activité.

Sweellam et Abou El Ghar (1988) estiment que 15 % d'humidité est le niveau optimal pour la multiplication des nématodes.

- **Température**

En ce qui concerne la température, les nématodes sont inactifs à des températures comprises entre 5 et 15 °C, et entre 30 et 40 °C. Leurs activités optimales se situent entre 15 et 30 °C, mais au-delà de ces extrêmes, la température devient létale (**Reddy., 1983**).

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Grasse (1965) ajoute que les températures entre 25 et 30 °C diminuent la dissémination des larves. **Scotto La Massese** (1986) a observé que le *Tylenchulus semipenetrans* est particulièrement sensible à ce facteur.

- **Salinité**

Duncan (1992) a indiqué qu'une forte concentration en sel favorise le développement des femelles et leur reproduction sur les racines, ainsi que la production d'œufs en peu de temps. Cependant, cela réduit la résistance des porte-greffes aux nématodes des agrumes.

Cette affinité pour la salinité serait due au caractère euryhalin des nématodes, ce qui crée une similitude entre les nématodes terrestres et marins, comme l'ont soutenu plusieurs chercheurs.

- **Matière organique**

Enfin, concernant la matière organique, **Baines** (1973) a montré que le mélange de sable avec de la tourbe limite la migration larvaire en raison des acides organiques présents. Pour **Al Hazmi et al.** (1988), la matière organique réduit le nombre de nématodes en libérant des composés toxiques lors de sa décomposition, ce qui diminue leur population.

I-3-8-Symptômes dus au *Tylenchulus semipenetrans*

Les symptômes du dépérissement lent « slow declin » peuvent varier en fonction du niveau d'infestation du *Tylenchulus semipenetrans*, de l'âge des arbres et du moment de l'infection.

Dans les vergers d'agrumes récemment plantés, aucun symptôme n'apparaît tant que les populations du *Tylenchulus semipenetrans* n'ont pas atteint des niveaux élevés (au moins 2000 individus par 100 cc de sol) (**Sekora et Crow., 2012**).

Les symptômes sont plus prononcés dans les vergers déjà sous stress, que ce soit en raison de conditions de croissance sous-optimales, de sécheresse, ou de rabougrissement et de pourriture des racines causés par l'infection par *Tylenchulus semipenetrans* (**Duncan., 2005**).

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Par contre les symptômes sont beaucoup moins prononcés sur les parties aériennes. Les feuilles des arbres infectés sont plus petites que la normale et sont généralement chlorotiques à cause de l'intoxication et la malnutrition (**Figure 09**).

Sous stress hydrique, le flétrissement des arbres infectés est plus marqué que celui des arbres sains. La concentration de potassium dans les feuilles des agrumes est inversement proportionnelle au niveau d'infection par les nématodes. En conditions salines, un excès de sodium s'accumule dans les feuilles des arbres infectés, ce qui aggrave les problèmes liés à la salinité (**Mashela et al., 1992**).

Les symptômes caractéristiques doivent être recherchés sur les radicelles. Celles, qui sont gravement infectées montrent des nécroses étendues, ont un aspect contourné, irrégulier, et sont plus épaisses et plus courtes que les racines saines. Les particules de sol y restent adhérentes.

Tylenchulus semipenetrans ne tue d'ailleurs pas les *Citrus* atteints mais diminue, parfois considérablement, leur vigueur (**Viladerbo et Luc., 1961**).

Les arbres infectés sont généralement plus petits, avec moins de feuilles, qui sont plus petites et plus pâles comparées à celles des arbres sains. La production de fruits est réduite, et ceux-ci sont de plus petit calibre. Le besoin d'engrais se fait sentir plus rapidement, et les reprises de croissance au printemps sont moins vigoureuses. Les symptômes se détériorent avec l'âge de l'arbre, au point où celui-ci peut finir par ne produire que des fruits de qualité non commercialisable (**Viladerbo et Luc., 1961**).



Figure 09. Dépérissement lent « slow declin » (Photo originale)

Donc les nématodes profitent d'une partie du métabolisme de la plante par :

- Réduction et destruction des racines et des radicelles, ils endommagent le système racinaire de la plante ce qui réduit l'alimentation en eau et en sels minéraux.
- Ils injectent dans les cellules des sécrétions, glandulaires qui liquéfient le contenu cellulaire et l'absorbe. Ces sécrétions sont le plus souvent toxiques pour les cellules et les tuent.
- Les nématodes endoparasites sécrètent en général des substances qui affectent les cellules du cortex et du cylindre central résultant la formation de cellules géantes, ce qui entraîne la formation de galles. Suite à cette déformation, la circulation des sèves brute et élaborée est perturbée.
- En s'infiltrant entre les cellules, en les perforant pour se déplacer et se nourrir,

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

ils provoquent des lésions par lesquelles peuvent s'introduire d'autres agents pathogènes tels que des bactéries et champignons (Verdejo-Lucas et al., 2000).

Des expériences d'infestation artificielle réalisées par Baines et Clarke en 1952 ont permis de chiffrer la diminution de vigueur causée par le *Tylenchulus semipenetrans*. La diminution du volume des racines peut atteindre 40% par rapport au témoin sain. La diminution du poids frais des organes aériens varie de 10% en cas d'infestation légère à 50% en cas d'infestation forte, la diminution du diamètre du tronc atteint 35%, celle de la hauteur des arbres 43%.

D'après d'autres observations (Baines et al., 1959) la croissance des *Citrus* gravement parasités par *Tylenchulus semipenetrans* était de 40 à 50% plus faible que celle des témoins indemnes.

En fait les symptômes aériens sont peu caractéristiques et ont même quelquefois été confondus avec ceux de la tristeza, maladie à virus. Les symptômes sur les parties radiculaires sont plus nets, mais le dégagement de celles-ci, leur lavage et leur examen sont longs. La meilleure méthode de repérage des foyers de slow declin reste certainement le prélèvement de sol de rhizosphère et l'examen du peuplement nématologique (Viladerbo et Luc., 1961).

I-3-9-Lutte contre le *Tylenchulus semipenetrans*

En raison de leur résistance aux conditions extrêmes, de l'exceptionnelle longévité des formes résistantes et de leur habitat, la lutte contre les Nématodes phytopathogènes n'est pas facile, le sol étant un milieu difficile à traiter par des moyens conventionnels. Les méthodes de lutte sont proches à celles utilisées contre les Insectes. La lutte est de préférence préventive (Prot., 1985).

a. Lutte chimique

Elle reste la méthode la plus employée malgré les dangers sur l'Homme et son environnement, pour sa facilité de mise en œuvre, et pour des raisons économiques. Elle consiste soit en précurseurs de fumigeant (bromure de méthyl ; dichloropropane dichloropropylène) ou une désinfection des sols à l'aide de produits fumigeant, soit en un traitement de végétaux à récolte tardive ou à production non comestible, par des produits systémiques tel que le spirotetramat (Nauen et al., 2008) véhiculés par la sève (carbamates : organophosphorés et aldicarbe).

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Mais, pour de multiples raisons évoquées, les nématicides chimiques sont progressivement mis à l'index (Prot., 1985).

b. Pratiques culturales

Elles sont très variées telles que la rotation des cultures et la culture des plantes pièges.

Ainsi, plusieurs cultivars de Crucifères (oléifères radis fourragers, moutardes blanches) utilisés comme engrais verts stimulent la sortie des larves hors des kystes et empêchent la différenciation des formes femelles. Elles constituent autant de plantes-pièges ou androgènes pour protéger les plantes.

L'inondation des sols infestés ou le drainage, la déforestation pour mise en culture de terres neuves et les longues jachères sont des procédés onéreux. Les moyens physiques (solarisation, désinfection à la vapeur) ne peuvent être utilisés que dans des cas exceptionnels (serres). (Prot., 1985).

c. Lutte variétale

En raison de leur mobilité, les nématodes sont contrôlés difficilement, ils piquent plusieurs fois la radicule, provoquant d'importantes ponctions. Néanmoins, des solutions ont été proposées. Par exemple les hybrides entre la vigne et un genre sauvage voisin résistant aux nématodes *Muscadina rotundifolia* a permis d'avoir des porte-greffes résistants à *Xiphinema index*, phytophage et vecteur du virus agent du court-noué de la vigne.

Le contrôle des nématodes endoparasites mobiles est aussi difficile et nulles des méthodes proposées n'est efficace actuellement. Le contrôle des nématodes peut bénéficier de la sélection de cultivars naturellement résistants à *Tylenchulus semipenetrans* (Prot., 1985).

d. Lutte biologique

Le rejet des nématicides chimiques donne aux diverses voies de la lutte biologique un regain d'activité. Les champignons prédateurs sont capables de prendre au piège (pièges en réseaux, en anneaux, boutons collants, spires) certains nématodes et de s'en nourrir.

Ces champignons naturellement présents dans le sol, mais en petites quantités, identifient leurs nématodes cibles grâce à une lectine, protéine qui se lie de manière spécifique à un sucre présent à la surface de la cuticule.

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

Des résultats positifs ont été acquis par exemple contre les strongles, nématodes zoo-parasites vivant temporairement dans les sols et contre *Meloidogyne* (Prot., 1985).

- Les champignons ovicides ont la propriété de tuer les œufs des nématodes, ils percent la coque de l'œuf grâce à des enzymes appropriées puis pénètrent et parasitent l'embryon. Il peut, en région tropicale, protéger les cultures contre une large gamme de nématodes phytoparasites.
- Les champignons nématophages à spores adhésives appartiennent à plusieurs classes : Oomycètes (*Catenaria anguillulae*), Zygomycètes (*Meristacrum asterospermum*), Deutéromycètes (*Merya coniospora*), Basidiomycètes (*Nematoctonus-leiosporus*) et Hypomycètes (*Hirsutella*). Les spores adhèrent au corps du nématode, germent, produisent un filament qui s'enfonce dans l'hôte où ils prolifèrent au détriment de l'hôte qui meurt. Il se formera ultérieurement de nombreux conidiophores externes qui libèrent de nouvelles spores dans le sol. Tous ces champignons pourraient a priori devenir d'intéressants agents de lutte biologique.
- Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules (Endogonacées) sont des champignons associés aux racines des végétaux et certains les protègent contre les Nématodes.

Ainsi, *Glomus mosseae* protège les Citrus contre le *Tylenchulus semipenetrans* en réduisant sa population de 50%. Si l'effet protecteur des endomycorhizes est bien établi, le mode d'action reste à préciser avant leur utilisation (Prot., 1985).

- Les Bactéries antagonistes des nématodes sécrètent des métabolites toxiques. Les spores de *Pasteuria penetrans*, disséminées dans le sol, se fixent à la cuticule des nématodes mobiles (interactions spécifiques lectines-sucre), germent, produisent un tube germinatif qui perce la cuticule, pénètre dans la cavité viscérale où il prolifère, envahit tous les organes et se résout en nombreuses spores. Le nématode parasité éclate et libère des spores très résistantes dans le sol. Cette bactérie deviendra certainement un agent de lutte biologique fiable (Prot., 1985).
- Les toxines de micro-organismes nématocides agissent à très faible dose par contact (répulsives, nématostatiques, ovicides, larvicides, etc.) et méritera

Chapitre I : Présentation du nématode des Citrus le *Tylenchulus semipenetrans*

attention soutenue (Ex.: *Paecylomyces lilacinus*, *Trichoderma longibrachium*, *Fusarium roseum*, *Streptomyces avermitilis*) est à l'origine d'une toxine, l'ivermectine, lactone pentacyclique, remarquable par ses propriétés insecticides, acarides et nématicides.

- Les plantes nématicides qui produisent des toxines sont bien connues et font partie des traditions de certaines ethnies. Les substances actives peuvent, selon les espèces, inhiber la pénétration racinaire des larves (*Sesamium orientale*), inhiber l'éclosion des œufs (*Eragrostis curvula*), empoisonner les nématodes (pervenche de Madagascar : *Cataranthus roseus* ; Asperge : *Asparagus officinale*) (Prot., 1985).
- L'utilisation des huiles essentielles comme nématicides naturels est une approche prometteuse dans la lutte biologique contre les nématodes. Ces huiles, extraites de plantes aromatiques, contiennent des composés actifs qui peuvent inhiber la croissance, la reproduction ou la survie des nématodes. Parmi les huiles les plus étudiées figurent l'huile essentielle de neem, de citronnelle, et de clou de girofle, qui ont montré des effets répulsifs et toxicologiques contre les nématodes du sol, comme *Meloidogyne* et *Heterodera*. Ces huiles essentielles peuvent être utilisées en complément à d'autres méthodes biologiques pour réduire la dépendance aux produits chimiques et limiter les risques d'effets secondaires sur l'environnement et la biodiversité.

Les recherches indiquent que l'application d'huiles essentielles dans le sol ou sur les racines des plantes infestées permet non seulement de contrôler les populations de nématodes, mais aussi de stimuler la croissance des plantes en améliorant la santé du sol. Cependant, l'efficacité de ces huiles dépend de divers facteurs, tels que la concentration, la méthode d'application, et le type de nématode ciblé (El-Badry et al., 2020).

Cet inventaire de moyens biologiques divers, déjà développés ou en cours d'étude permet d'envisager de manière optimiste l'interdiction prochaine des nématicides chimiques afin de préserver l'équilibre des écosystèmes et réduire l'impact environnemental permettant ainsi de protéger à la fois la santé des sols, des plantes et des êtres vivants qui en dépendent. (Prot., 1985).

CHAPITRE II :

AGRUMES

II-1-Généralité sur les agrumes

Les agrumes figurent parmi les fruits les plus consommés au monde, attirant les amateurs de saveurs fraîches et vitaminées. En 2022, la production mondiale d'agrumes a atteint environ 158,5 millions de tonnes selon la FAO, témoignant de leur popularité croissante et de leur rôle essentiel dans l'alimentation humaine.

Originaire des régions subtropicales et tropicales de l'Asie, selon (**Manner et al .,2005**), l'agrumiculture s'est progressivement étendue à travers les siècles. Les premiers échanges entre l'Orient et l'Occident ont permis l'introduction de ces fruits dans le bassin méditerranéen, une diffusion qui a été amplifiée au XVe siècle par les navigateurs européens, facilitant leur propagation vers l'Afrique et l'Amérique (**Aubert et Vullin., 1997**).

Aujourd'hui, la culture des agrumes dans les pays méditerranéens est extrêmement diversifiée, avec une multitude de variétés cultivées, allant des oranges et mandarines aux citrons, limes, pomelos et pamplemousses (**Figure 10**). Cette diversité reflète à la fois la richesse et l'adaptabilité des agrumes aux différents climats et sols, et illustre l'étendue de leur expansion à travers le monde (**Virbel-Alonso., 2011**).

En Algérie, près de 70 500 hectares de terres sont consacrés à la culture des agrumes, répartis sur 32 wilayas en 2018 (**Web2**). La production d'agrumes pour la saison agricole 2023-2024 a atteint plus de 18 millions de quintaux (soit plus de 1,8 million de tonnes), en hausse par rapport aux 16 millions de quintaux de la saison précédente. Cette augmentation est attribuée au développement de la filière, notamment dans les wilayas du sud telles qu'El Oued, El Menia et Ouargla (**Web1**).

Les agrumes, au-delà de leur goût rafraîchissant et de leurs multiples bienfaits nutritionnels, incarnent l'histoire de l'échange culturel et commercial à travers le temps. Leur présence dans notre alimentation quotidienne témoigne non seulement de leur importance nutritionnelle, mais aussi de leur rôle fondamental dans les économies agricoles mondiales.



Figure 10. Différentes variétés d'agrumes (Degrave., 2024).

II-2-Définition

Les agrumes, également appelés Hespérides, sont des arbres produisant des fruits au zeste riche en glandes contenant des huiles essentielles. Leur pulpe est composée de quartiers renfermant des pépins et de nombreux poils succulents remplis de jus (**Kara., 2018**).

Le terme "agrumes" provient du mot latin *acrumen*, qui désignait, dans l'Antiquité, des arbres à fruits acides appartenant à la famille des Rutacées et au genre botanique *Citrus*, originaires de Chine, d'Inde et d'Indonésie (**Bénédictie et Bachès., 2011**). Ces fruits se distinguent par la grande diversité de leurs espèces, familles et ordres, reflétant une remarquable variété au sein de cette catégorie végétale.

Selon **Benedictie et Baches (2002)**, les espèces d'agrumes se divisent principalement en trois genres :

- Le genre *Poncirus*
- Le genre *Fortunella*
- Le genre *Citrus*

Le genre *Citrus* est le plus vaste, avec 145 espèces répertoriées. C'est dans ce genre que l'on trouve les principales espèces cultivées, telles que :

- L'orange (*Citrus sinensis*).
- Le mandarinier (*Citrus reticulata*).
- Le clémentinier (*Citrus clementina*).
- Le citronnier (*Citrus limon*).
- Le pomelo (*Citrus paradisi*).
- Le cédratier (*Citrus medica*).
- Le bigaradier (*Citrus aurantium*)(Loussert., 1989).

II-3- Origine

Parmi les six genres botaniques de la famille des Rutacées ; qui regroupe les agrumes, les plus célèbres proviennent principalement du Sud-Est asiatique : *Citrus*, *Fortunella* et *Poncirus*.

Les agrumes des genres *Poncirus* et *Fortunella* trouvent leur origine dans les régions septentrionales de l'Est de la Chine, tandis que ceux du genre *Citrus* proviennent de zones méridionales, entre l'Inde et l'Indonésie (**Figure11**).

La diversité du genre *Citrus* se concentre principalement sur quatre espèces majeures, à partir desquelles la grande majorité des agrumes cultivés ont évolué : *Citrus maxima* (les pamplemoussiers), *Citrus reticulata* (les mandariniers), *Citrus medica* (les cédratiers) et les papédas, qui regroupent plusieurs espèces.

Ces trois premières espèces, qualifiées d'espèces ancestrales, ont évolué indépendamment dans trois régions géographiques distinctes : l'archipel malaisien pour le pamplemoussier, le sud de la Chine pour le mandarinier et le nord-est de l'Inde pour le cédratier.

C'est au cours de cette évolution séparée que ces espèces ont acquis des caractéristiques spécifiques, telles que la taille et la couleur des fruits, la reproduction asexuée, la résistance aux contraintes environnementales et même la taille du génome, tout en maintenant un nombre constant de 18 chromosomes.

Plus tard, des croisements sexués ont eu lieu dans des zones de peuplement mixtes, donnant naissance à des hybrides interspécifiques qui ont été classés en tant qu'espèces distinctes : l'oranger (*Citrus sinensis*) et le bigaradier (*Citrus aurantium*), issus de croisements entre pamplemoussiers et mandariniers, le citronnier (*Citrus limon*), hybride de cédratier et de bigaradier et le limettier (*Citrus aurantifolia*) produit par le croisement entre un papéda (*Citrus micrantha*) et un cédratier (Luro., 2015).

En ce qui concerne la variété *Washington Navel* de l'espèce *Citrus sinensis*, la particularité de sa "navélisation" ; qui résulte du développement embryonnaire d'un second fruit à l'apex du premier, créant ainsi une cicatrice stylaire qui prend souvent la forme d'un petit "nombril" (d'où son nom "navel", en anglais). Ce phénomène est un exemple frappant de la variation génétique provoquée par les mutations au cours du temps (Wu et al., 2014).



Figure 11. Région d'origine, dispersion et zones de diversification des agrumes cultivés (Jacquemond et al., 2013).

II-4- Systématique et Caractéristiques botaniques

II-4-1- Systématique

Les agrumes font partie de la famille des Rutacées, l'une des 21 familles qui composent l'ordre des Géraniales. Cette famille regroupe environ 1 600 espèces réparties sur 150 genres, organisés en 7 sous-familles et 12 tribus. Selon (Swingle et Reece., 1967), le terme « agrumes vrais » désigne six genres sexuellement compatibles au sein de la famille des Rutacées, de la sous-famille des Aurantioideae et de la tribu des Citreae (Figure12) (Loussert., 1989).

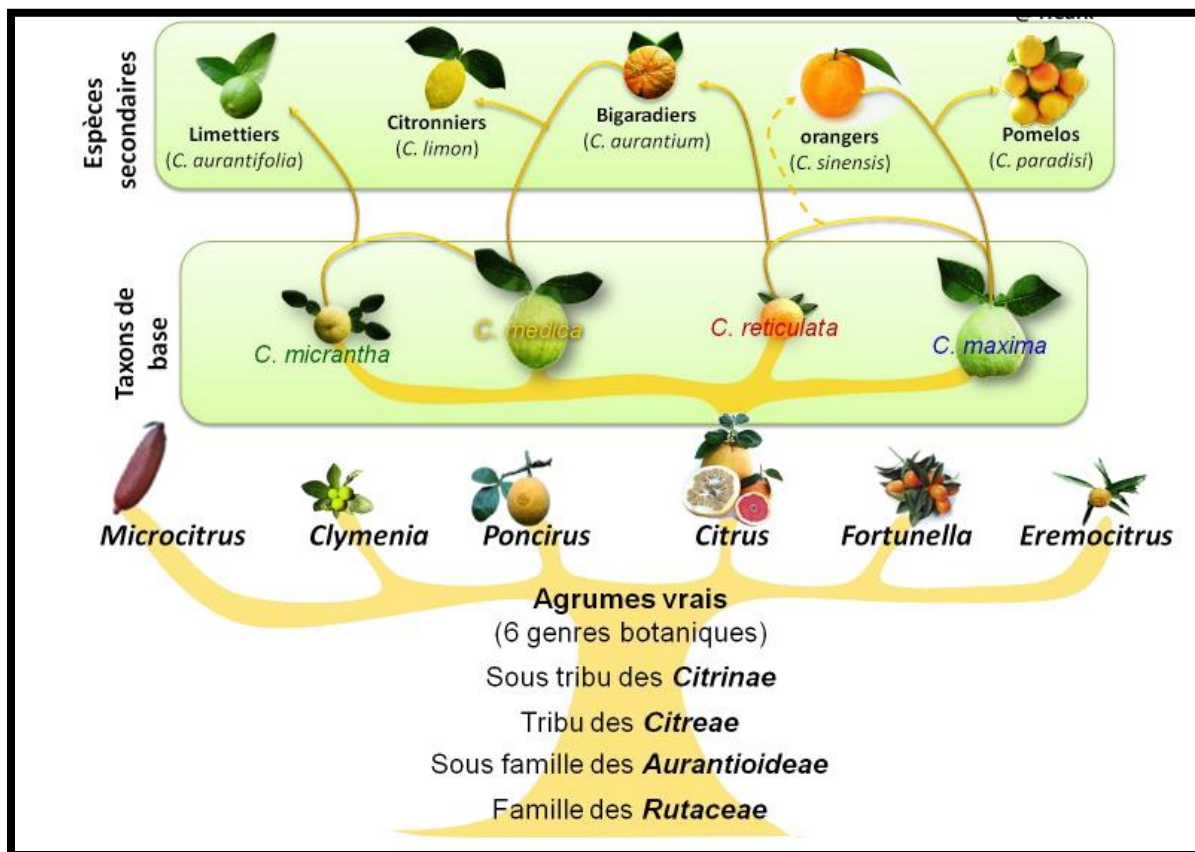


Figure 12. Classification des agrumes et origine génétique des *Citrus* cultivés (Khefifi., 2015).

Au cours du XXe siècle, de nombreux travaux ont été réalisés pour classer les différentes variétés et espèces d'agrumes. Il est désormais largement admis que ces fruits se divisent en trois genres botaniques compatibles entre eux : *Poncirus*, *Fortunella* et *Citrus*, tous appartenant à la tribu des Citreae.

Les espèces du genre *Poncirus* ne produisent pas de fruits comestibles, mais sont largement utilisées comme porte-greffes en raison de certaines résistances intéressantes qu'elles confèrent. Le genre *Fortunella*, quant à lui, comprend des espèces produisant de petits

fruits dont la peau est consommée. Enfin, le genre *Citrus*, qui regroupe la majorité des espèces d'agrumes cultivées, contient environ 145 espèces, selon les taxonomistes (**Jacquemond et al., 2009**).

La position taxonomique des agrumes est indiquée comme suit (**Swingle et Reece., 1967**) :

Règne : Végétale.

Embranchement : Angiospermes.

Classe : Eudicots.

Sous classe : Archichlomydeae.

Ordre : Geraniales (Rutales).

Famille : Rutaceae.

Sous-famille : Aurantioideae.

Tribus : Citreae.

Sous-tribu : Citrinae.

Genre : *Poncirus*, *Fortunella* et *Citrus*. (**Praloran., 1971**).

II-4-2- Description botanique

Les agrumes sont de petits arbres, ou des arbustes, atteignant de 5 à 15 m de hauteur, assez souvent épineux. C'est des plantes vivaces, certains sont âgés de 200 à 300 ans, avec un enracinement fortement pivotant. Chez les espèces composant les agrumes, elles présentent habituellement un tronc presque cylindrique. Et à feuillage dense, persistant à l'exception de quelques variétés hybrides dont les feuilles sont caduques ou semi-persistantes. D'un vert généralement très foncé, les jeunes plantes et les jeunes pousses étant d'un vert nettement plus clair.

Les bourgeons du genre *Citrus* sont caractérisés par une mutation très fréquente qui aboutit à de nouvelles variétés, ainsi qu'une absence presque totale d'écailles protectrices, avec une dominance marquée du bourgeon terminal sur les bourgeons axillaires.

La fleur d'agrumes se compose d'un calice de trois à cinq sépales soudés, d'une corolle de quatre à huit pétales (le plus souvent cinq) et un verticille de vingt à quarante étamines plus ou moins soudées à la base. A l'intérieur du verticille et juste au-dessus, se trouve le disque

nectarifère sur lequel l'ovaire est fixé, ce dernier est pluriloculaire de cinq à dix-huit loges. (Praloran., 1971) (Raymond., 1987).

Les fleurs apparaissent sur le bois de la même année, elles sont isolées en grappes selon les espèces.

Le fruit est de forme et de couleur variable, oblongue à sphérique, du jaune-verdâtre terne à l'orange foncé brillant à maturité. Il est formé de segments contenant les graines. Les segments sont entourés d'un endocarpe blanc à l'extérieur duquel est une écorce à très nombreuses glandes à essence (**Figure 13**). La distinction des espèces entre elles s'effectue à partir des caractères notés dans la clef dichotomique de Swingle (Praloran., 1971) (Raymond., 1987).

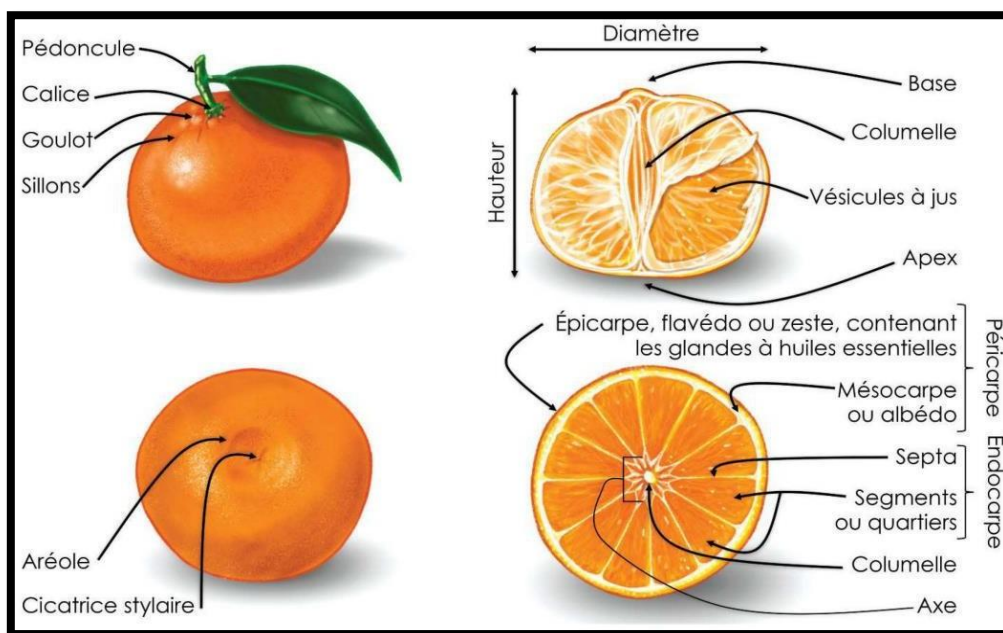


Figure 13. Structure d'un fruit d'agrumes (Luro., 2022).

Les agrumes sont composés de deux parties : la partie souterraine qui forme le porte-greffe et la partie aérienne (greffon) qui porte les fruits de la variété de l'espèce cultivée (Rocha et al., 1995).

1. Partie souterraine

Les racines principales sont robustes et jouent un rôle crucial dans la stabilité de l'arbre, en particulier en maintenant l'arbre fermement ancré au sol. Cette fonction est particulièrement

importante pour les arbres dont la frondaison, dense et persistante, peut être fortement exposée au vent.

Quant aux racines secondaires, elles sont responsables de l'absorption des éléments minéraux essentiels à l'alimentation de l'arbre, en fournissant les nutriments nécessaires à sa croissance (Rocha et al., 1995).

2. Partie aérienne

- **Le tronc** : C'est sur le tronc, à quelques dizaines de centimètres du sol, que l'on greffe la variété choisie. Il joue un rôle essentiel en conduisant la sève riche en éléments minéraux vers la frondaison.
- **Les branches charpentières** : Ces branches naissent du tronc et sont généralement limitées à trois ou quatre principales, qui porteront les sous-mères. Celles-ci, à leur tour, soutiendront les rameaux végétatifs et fructifères.
- **Les feuilles** : Selon l'espèce, la variété, ainsi que l'âge et la taille de l'arbre, les feuilles présentent une grande diversité de formes et de tailles. Par exemple, les feuilles du citronnier sont plus larges, plus grandes et plus claires que celles de l'oranger, qui sont ovales et d'un vert sombre.
- **Les fleurs** : Le calice de la fleur d'agrumes est composé de 3 à 5 sépales verts, tandis que les pétales sont généralement blancs pour l'oranger et pourpres pour le citronnier. Les étamines, au nombre de 20 à 30, sont soudées à leur base en groupes de trois ou quatre. Le pistil, formé de plusieurs carpelles, a un ovaire qui constitue la base du stigmate, sur lequel se fixe le pollen libéré au printemps (Figure 14).

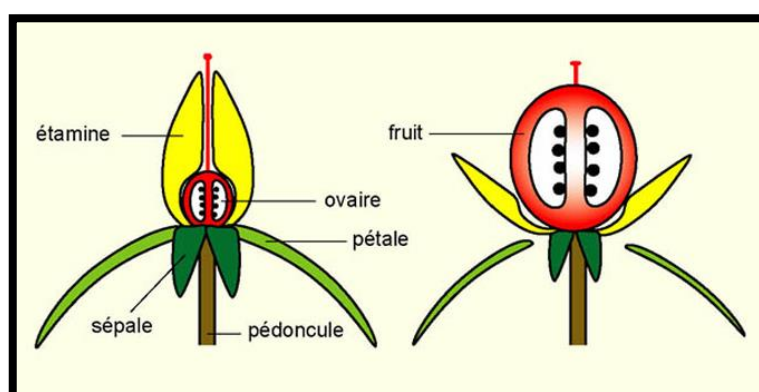


Figure 14. Structure de la fleur d'agrumes (JdF., 2012)



Figure 15. Fleurs et formation des fruits du Citron (Photo originale).

- **Les fruits :** Les fruits varient en fonction des espèces et des variétés, présentant des tailles et des poids divers (**Figure 16**). Ils peuvent être oblongs ou sphériques. L'épiderme, ou écorce, est jaune ou verte et renferme des glandes riches en huiles essentielles largement utilisées en aromathérapie. La pulpe, la chair du fruit, contient plus ou moins du jus et se divise en quartiers, qui sont de 8 à 11 pour les citrons (**Rocha et al., 1995**).



Figure 16. Quelques variétés d'agrumes (Photo originale).

II-5- Cycle biologique des agrumes

II-5-1- Étapes de la croissance des agrumes

a. Période de production en pépinière

Cette phase, qui dure entre 12 et 36 mois, se déroule en pépinière. Elle commence par le semis des graines pour produire le porte-greffe, puis se poursuit par le greffage de la variété sur ce porte-greffe, et se termine par l'élevage des jeunes plants (Loussert., 1989).

b. Période improductive

Une fois les jeunes plants issus de la pépinière mis en place dans le champ de plantation, ils développent simultanément leur système racinaire et leur frondaison. Durant cette période, qui dure généralement de 2 à 3 ans, des soins réguliers sont nécessaires (fertilisation, irrigation, taille de formation, traitements phytosanitaires, etc.). Cette phase représente un investissement technique et économique important pour l'agrumiculteur (Loussert., 1989).

c. Période d'entrée en production

Les premières floraisons marquent le début de la production de fruits. Au fur et à

mesure que l'arbre fleurit, la fructification devient plus abondante pendant une période de 5 à 7 ans (**Figure 17**) (**Loussert., 1989**).

d. Période de pleine production

C'est la période la plus rentable pour l'agrumiculteur. Le développement végétatif de l'arbre se stabilise, et l'arbre concentre son énergie sur la floraison, la fructification, ainsi que sur le renouvellement de ses ramifications, feuilles et racines. Grâce à des soins appropriés, l'agrumiculteur peut prolonger cette phase, essentielle à la rentabilité de son verger. La durée de cette période ne dépasse généralement pas 20 ans (**Loussert., 1989**).

e. Période de vieillissement

Au bout de 30 à 40 ans, les arbres voient leur production diminuer progressivement. Le renouvellement des pousses fructifères ralentit, et la frondaison devient moins dense. Des mesures spécifiques peuvent être prises pour revitaliser la végétation et stimuler la production à nouveau (**Loussert., 1989**).

f. Période de décrépitude

Lors de cette phase, les arbres deviennent de plus en plus faibles et vulnérables aux attaques parasitaires, souvent exacerbées par des carences alimentaires. Les récoltes sont faibles et la qualité des fruits se dégrade. À ce stade, il devient nécessaire de prendre la décision d'arracher les arbres, car les coûts d'entretien ne sont plus compensés par les ventes de récolte (**Loussert., 1989**).

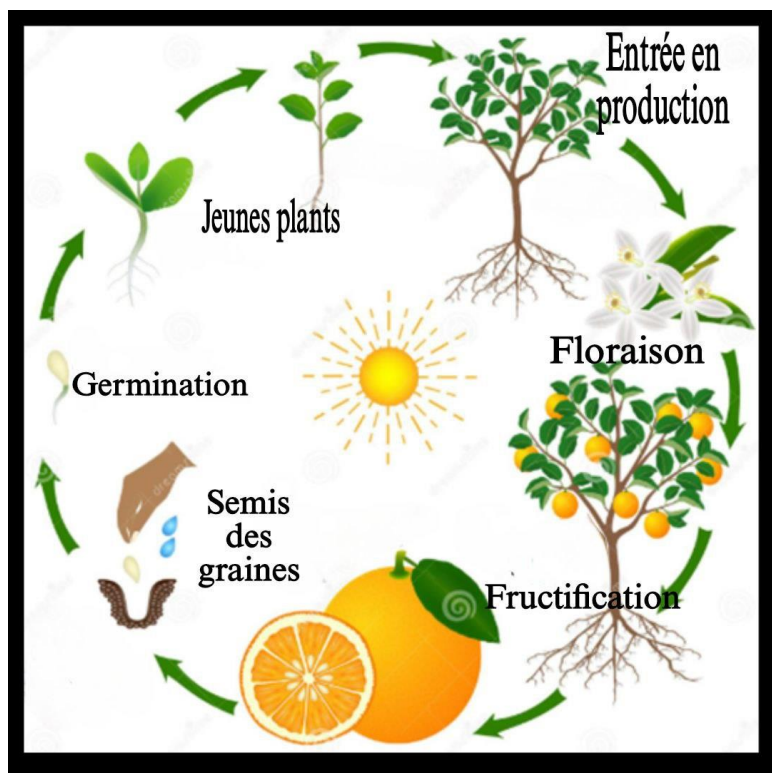


Figure 17. Cycle de croissance d'un agrume (web04)

II-5-2- Cycle annuel de développement

Bien que le cycle annuel des *Citrus* soit moins marqué que celui des espèces fruitières à feuilles caduques, il est possible de distinguer plusieurs étapes importantes dans leur développement :

a.Croissance végétative

Cette phase se manifeste par la croissance des jeunes rameaux, également appelés pousses de sève, et se répartit sur trois périodes :

- **Première poussée de sève au printemps (de fin février à début mai) :** Les nouvelles ramifications s'allongent et produisent des feuilles jeunes de couleur vert clair, bien distinctes des feuilles plus anciennes, de couleur vert foncé. C'est à cette période que les premières pousses fructifères apparaissent, avec des boutons floraux puis les fleurs, généralement entre avril et mai (Loussert., 1989).
- **Deuxième poussée de sève en été (juillet-août) :** Moins vigoureuse que la poussée de printemps, cette phase dépend des conditions climatiques, de l'irrigation et de la vigueur

des arbres. Elle est généralement plus faible comparée aux pousses du printemps et de l'automne (Loussert., 1989).

- **Troisième poussée de sève en automne (octobre à fin novembre) :** Elle participe au renouvellement du feuillage (Loussert., 1989).

b. Développement floral et fructification

Le développement floral et la fructification des agrumes comprend plusieurs étapes clés qui sont cruciales pour la production de fruits (**Figure 18**).

Ces étapes incluent la floraison, la pollinisation, la fécondation, la nouaison et la maturation des fruits qui sont interdépendantes et influencent directement la quantité et la qualité des récoltes.

- **La Floraison**

La floraison des agrumes commence généralement au printemps. Les agrumes produisent des fleurs hermaphrodites, contenant à la fois des organes mâles (étamines) et des organes femelles (pistil), ce qui leur permet de se reproduire de manière autogame ou allogame (croisement avec des fleurs d'autres arbres).

La floraison des agrumes est souvent spectaculaire, avec des fleurs blanches très parfumées (**Figure 18**), ce qui attire des pollinisateurs tels que les abeilles, qui sont essentiels à la pollinisation.

La période de floraison peut durer plusieurs semaines, pendant lesquelles les arbres produisent de nombreux boutons floraux qui se transforment en fleurs (Sinha et al., 2012).

- **La Pollinisation**

La pollinisation est le processus par lequel le pollen, produit par les étamines des fleurs, est transféré vers le pistil des fleurs d'une même plante ou d'une autre plante, généralement par l'intermédiaire d'insectes pollinisateurs (comme les abeilles).

Bien que de nombreux agrumes soient capables de s'auto-polliniser, la pollinisation croisée (entre différentes fleurs ou arbres) peut améliorer la diversité génétique et la qualité des fruits. En outre, les conditions climatiques, la présence de pollinisateurs et la gestion des vergers influencent l'efficacité de la pollinisation.

Certaines variétés d'agrumes, comme les mandarines ou les clémentines, peuvent nécessiter une pollinisation croisée pour une production optimale (Nagy et Attaway., 1980).

- **La Fécondation**

La fécondation se produit lorsque le pollen atteint le pistil et que les spermatozoïdes du pollen fusionnent avec l'ovule dans l'ovaire de la fleur. Ce processus marque le début du développement du fruit.

Après la fécondation, l'ovaire commence à se développer en fruit, et les autres parties de la fleur, comme les pétales et les sépales, tombent généralement. La fécondation réussie assure la formation de graines dans les fruits, ce qui est essentiel pour la reproduction des agrumes (Sinha et al., 2012).

- **La Nouaison et le Grossissement du Fruit**

Après la fécondation, la phase de nouaison commence, marquée par la formation des jeunes fruits. En mai et juin, ces fruits commencent à grossir. Ils accumulent des nutriments nécessaires à leur développement, et leur taille augmente progressivement. Cette phase de croissance est essentielle pour assurer une production de fruits de bonne qualité (Sinha et al., 2012).

- **La Maturation des Fruits**

La maturation des fruits commence après leur croissance initiale, et les fruits atteignent leur taille finale généralement en octobre. Au cours de cette période, les fruits accumulent des sucres et des composés qui leur donnent leur couleur, leur texture et leur goût caractéristiques (Sinha et al., 2012).



Figure 18. Schématisation du développement floral et de la fructification d'un *Citrus limon* (Köhler., 2007)

II-6-Variétés d'agrumes

Les agrumes, d'une grande diversité, ne cessent d'enrichir leur palette avec de nouvelles variétés et hybrides qui apparaissent régulièrement sur les marchés de l'agrumiculture, notamment dans les pays du bassin méditerranéen. Cette région, caractérisée par une production variée, comprend de nombreuses espèces telles que les oranges, mandarines, clémentines, pomelos, citrons, limes et pamplemousses. Cette diversité témoigne de la richesse et de la flexibilité des arbres fruitiers, influencées par l'extension de cette culture à travers le monde (Virbel-alonso., 2011).

Il est indéniable que le nombre de variétés d'agrumes est impressionnant. Un choix variétal judicieux permet non seulement d'assurer des rendements élevés, mais aussi d'optimiser la qualité des récoltes (Jacquemond et al., 2009).

II-6-1- Mandarines

La culture des mandarines a été introduite en Algérie dès 1850 (Brebion et al., 1999). Parmi les principales variétés, on retrouve :

- ***Satsuma Miho* et *Satsuma Wase* (*Citrus unshiu*)**

Les Satsuma sont des mandarines japonaises, réputées pour leur précocité, leur absence de pépins et leur grande résistance au froid. Les fruits, pesant entre 80 et 120 g, sont d'une couleur vert-jaune, tandis que leur pulpe orangée est particulièrement éclatante (**Figure 19**). Ces variétés se distinguent par une mise à fruit rapide et une productivité élevée. (**Jacquemond et al., 2009**).



Figure 19. *Citrus unshiu* (web07)

- **Clémentinier**

Le clémentinier tire son nom des frères Cléments, qui ont créé cet hybride entre un mandarinier et un bigaradier près d'Oran en Algérie, vers 1902 (**Brebion et al., 1999**).



Figure 20. Clémentinier (web 08)

- **Clémentine Caffin (*Citrus clementina*) (Synonymes: Azem, Bekri)**

Cette variété provient d'une sélection de clémentines communes, découverte au Maroc par Caffin en 1968. L'arbre, de forme sphérique et au port étalé, possède une frondaison dense.

Les feuilles, de couleur vert foncé, sont petites et lancéolées, tandis que les rameaux sont nombreux, fins et à entre-nœuds courts

(**Jacquemond et al., 2009**).



Figure 21. *Citrus clementina* (web 09)

- **Clémentine Ragheb (synonyme : Kuneyl)**

Originnaire d'une sélection de clémentine commune découverte dans la région d'Annaba, en Algérie, à la fin des années 50, cette variété est dite « précoce » (Ragheb). L'arbre présente une forme ellipsoïdale, un port dressé et une frondaison dense. Il est vigoureux, avec une floraison précoce, bien que l'entrée en production soit lente et la productivité initiale faible (Jacquemond et al., 2009).



Figure 22. Clémentine Ragheb (web 10)

- **Clémentine commune (Synonymes : Fine de Corse, Fina, Algerian)**

Cette variété, cultivée principalement sur le pourtour occidental de la Méditerranée, produit des fruits proches de la mandarine (Bénédict et Bachès., 2011). L'arbre a une forme sphérique, un port dressé et une frondaison dense, et est de forte vigueur. Sa floraison précoce est suivie d'une production variable, allant de moyenne à forte (Jacquemond et al., 2009).



Figure 23. Clémentine commune (Santini., 2022)

- **Mandarine Méditerranéenne (Synonymes : Commune, Blida, Willowleaf)**

Elle est très parfumée et d'un jaune doré, elle est facile à éplucher mais contient de nombreux pépins (Jacquemond et al., 2009).



Figure 24. Mandarine méditerranéenne

(Citrus center., 2025)

II-6-2- Citrons

- ***Citrus limon* (Citron EurekaFrost)**

Cette variété de citron est très vigoureuse, avec une floraison remontante et une excellente productivité. Les feuilles sont relativement fines. Les fruits, pesant entre 80 et 150 g, ont une forme régulière et légèrement arrondie, avec une peau lisse. Ils sont juteux et contiennent quelques pépins. Le citron EurekaFrost est la variété la plus cultivée dans le monde (Jacquemond et al., 2009).



Figure 25. *Citrus limon* (web11)

- **Citron Feminello**

Le citron Feminello se distingue par ses feuilles plus larges et ses fruits plus allongés que ceux de l'Eureka, avec un mamelon proéminent. C'est une variété extrêmement productive, produisant des fruits de 100 à 200 g, contenant quelques pépins. Ces fruits sont juteux et possèdent une excellente tenue sur l'arbre (Jacquemond et al, 2009).



Figure 26. Citron Feminello (web03)

II-6-3-Limes acides

- **Lime Mexicaine (*Citrus aurantifolia*)**
(Synonymes : Citron vert, Lime antillaise, Citron Gallet)

Cette variété est cultivée dans de nombreuses régions du monde, dès lors que les conditions climatiques le permettent. Elle est facile à multiplier par semis, bien qu'elle soit très sensible aux Phytophthora.



Figure27. *Citrus aurantifolia* (web 12)

L'arbre est vigoureux et produit de petits citrons ronds, pesant de 40 à 60 g, à la pulpe verte, au parfum distinctement différent de celui des citrons jaunes (*Citrus limon*). En fonction du climat, la peau des fruits peut être jaune dans les zones froides ou rester verte dans les régions plus chaudes (Jacquemond et al., 2009).

- **Lime Tahiti (*Citrus latifolia*) (Synonymes : Citron vert, Lime de Perse)**
Les fruits de cette variété, généralement allongés, pèsent entre 70 et 80 g. Ils sont caractérisés par une pulpe verte, très juteuse et sans pépin, avec un parfum distinct de celui des citrons jaunes (*Citrus limon*) (Jacquemond et al., 2009).



Figure 28. *Citrus latifolia* (web 03)

II-6-4-Limes douces

Il existe plusieurs variétés de limes douces, dont les fruits sont généralement dépourvus d'acidité. Ces fruits, qui mûrissent en jaune, sont souvent allongés avec un mamelon distinct. La lime douce de Palestine ou lime douce du Brésil (*Citrus limetioïdes*) est un fruit à la peau lisse, de forme arrondie, contenant quelques pépins (**Jacquemond et al., 2009**).



Figure29. Lime douce de Palestine (web 13)

II-6-5-Pamplemousses

Le pamplemousse (*Citrus grandis*), fruit volumineux pouvant atteindre jusqu'à 30 cm de circonférence, est surtout utilisé pour la confection de marmelades ou de jus, et parfois dans la fabrication de médicaments (**Brebion et al., 1999**).

- **Pamplemousse Goliath L**

Les pamplemousses nécessitent une grande quantité de chaleur et d'humidité pour atteindre leur pleine maturité. Les arbres se développent de manière importante, et les fruits se forment en grappes, souvent très volumineuses, allant de 500 g à plus de 3 kg. Leur peau est généralement épaisse, et la chair est blanche. Ces fruits sont légèrement plus gros que les pomelos jaunes

(**Jacquemond et al., 2009**).



Figure 30. Pamplemousse Goliath (web 14)

II-6-6-Pomelos (Hybride entre pamplemousse et orange)

Le pomelo est une hybridation ou mutation du pamplemoussier, apparue aux Antilles au début du XIXe siècle. La variété à chair acide, "Duncan", est principalement utilisée pour la fabrication de jus, tandis que les variétés à chair rosée et douce, comme "Ruby" et "Star Ruby", gagnent en popularité sur les tables (**Brebion et al., 1999**).

- **Pomelo March (*Citrus paradisi*)**

Le pomelo March, à la chair blanche et très amère, fut l'une des premières variétés commercialisées, et se distingue par sa quasi-absence de pépins. Les fruits, pesant entre 200 et 400 g, se développent en grappes et sont généralement trouvés à l'intérieur de la frondaison. Leur peau est lisse et de couleur jaune, et leur forme est sphérique, légèrement aplatie aux deux pôles (Jacquemond et al., 2009).



Figure 31. *Citrus paradisi* (web 15)

II-6-7-Kumquats (*Fortunella* sp.)

Le kumquat est un petit fruit que l'on peut consommer entier, y compris la peau, qui ne contient pas les huiles essentielles brûlantes caractéristiques des autres agrumes. Un autre atout de cet arbre est sa résistance au froid, certains auteurs mentionnant une tolérance jusqu'à -16 °C (Virbel-alonso., 2011).

- **Kumquat Marumi**

Le kumquat Marumi est l'une des rares variétés d'agrumes que l'on consomme avec la peau. Les deux principales variétés sont le Nagami (*Fortunella margarita*), à fruits longs et acidulés, et le Marumi (*Fortunella japonica*), à fruits ronds et doux, mais plus fragiles. Ces petits fruits, de couleur orange et pesant entre 25 et 40 g, contiennent généralement 2 à 5 pépins. Ils tiennent bien sur l'arbre, et l'arbre lui-même a une vigueur moyenne (Jacquemond et al., 2009).



Figure 32. Kumquat Marumi (web 16)

II-6-8- Les orangers (*Citrus sinensis*)

L'oranger est une variété traditionnelle particulièrement prisée des consommateurs pour ses qualités gustatives et ses rendements élevés chaque année. Plusieurs variétés sont disponibles sur le marché (B.I.H.A., 2009).

- **Main de Bouddha**

Parmi les agrumes les plus singuliers, la Main de Bouddha se distingue par sa forme unique, ressemblant à des gants gonflés, souvent à sept, huit ou dix doigts, disposés en étoile ou face à face (Virbel-alonso., 2011).



Figure 33. Main de Bouddha (web 17)

- **Orange Double fine améliorée (Synonymes : Washington sanguine, Grosse sanguine)**

Les arbres de cette variété présentent un port sphérique avec un feuillage clairsemé. Les fruits, de forme oblongue, sont d'un orange éclatant, avec des reflets rouges sur la peau. La pulpe, demi-sanguine, est peu juteuse et offre une saveur agréable, avec quelques pépins (Jacquemond et al., 2009).



Figure 34. Washington sanguine (web 18)

- **Oranges sanguines**

Ces oranges se caractérisent par une pulpe rouge ou rouge violacée, couleur due à la forte présence de pigments. Leur chair est très juteuse et acidulée, parfois avec une légère touche musquée (Brebion et al., 1999).

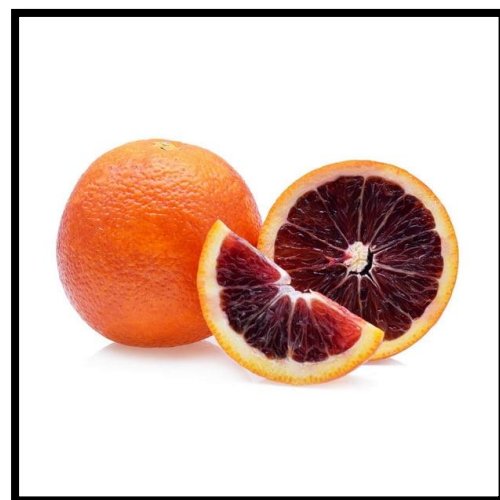


Figure 35. Orange sanguine (web 19)

- **Oranges douces**

Ce groupe d'oranges, peu acides et rarement rencontré, est néanmoins particulièrement apprécié dans certaines régions. Les fruits, généralement ronds et de couleur orange, contiennent des pépins (Jacquemond et al., 2009).



Figure 36. Orange douce (web 20)

- **Orange Navelina**

L'orange Navelina est un arbre vigoureux au feuillage dense et aux grandes feuilles vert foncé. Les fruits, de calibre moyen (de 100 à 200 g), sont sans pépins, de couleur orange-rouge foncé et faciles à éplucher (Jacquemond et al., 2009).



Figure 37. Orange Navelina (web 21)

- **Orange Salustiana**

L'orange Salustiana, issue d'une mutation d'orange commune sélectionnée en Espagne dans les années 1950, est une variété très productive et juteuse, idéale tant pour la consommation fraîche que pour la production de jus. L'arbre est vigoureux, avec une frondaison dense. Les fruits, de forme sphérique et couleur orange, possèdent une peau fine mais difficile à éplucher, et sont très juteux avec quelques pépins (Jacquemond et al., 2009) (B.I.H.A., 2009).



Figure 38. Orange Salustiana (web 22)

- **Orange Thomson Navel**

La Thomson Navel, mutation précoce de la Washington Navel introduite en Californie en 1891, produit des fruits assez gros (de 100 à plus de 200 g) de qualité moyenne. Ces fruits, de couleur orange, sont sans pépins et faciles à éplucher. Cependant, cette variété ancienne est aujourd'hui largement remplacée par des sélections plus précoces et de meilleure qualité (Jacquemond et al., 2009).



Figure 39. Thomson Navel (web 23)

- **Orange Washington navel (Synonymes Bahia)**

Notre étude s'intéresse à la variété Washington navel de l'espèce *Citrus sinensis*.

1. Généralité

L'Oranger Washington Navel, appartenant à l'espèce *Citrus sinensis*, est un arbre fruitier au port arrondi et à croissance rapide. Cette variété est largement reconnue pour sa grande productivité, sa robustesse et la qualité exceptionnelle de ses oranges. Celles-ci se pèlent aisément et offrent une chair croquante et juteuse, sans pépins, avec un parfait équilibre entre douceur et acidité. La récolte se déroule de décembre à mars (web03).



Figure 40. Washington navel (Photo originale)

2. Historique

L'Oranger est un arbre originaire du Sud-Est de l'Asie, introduit en Europe du Sud, sur les bords de la Méditerranée, par les Arabes vers l'an 1000. Cultivé à grande échelle dans les vergers californiens, il bénéficie d'un climat idéal pour se développer. Le Washington navel est également connue sous le nom de 'Bahia', en référence à la ville brésilienne d'où il fut importé

aux États-Unis en 1870 (**Web03**). Le Washington Navel est probablement l'un des plus anciens hybrides interspécifiques cultivés de nos jours. Son origine remonterait à plusieurs millénaires, résultant d'un croisement entre deux hybrides (mandarine x pamplemousse) (**Wu et al., 2014**).

Ce fruit est le produit unique d'une fécondation, où un grain de pollen a fertilisé un ovule, donnant naissance à une mutation particulière. Ce phénomène, appelé « navélisation », est un exemple fascinant de variation génétique. Il résulte du développement embryonnaire d'un deuxième fruit à l'extrémité du premier, créant ainsi une cicatrice styloïde qui lui donne l'apparence d'un nombril, d'où le terme "navel" en anglais (**Wu et al., 2014**).

3. Systématique

- Règne : Végétale.
- Sous-règne : Viridiplantae.
- Embranchement: Tracheophyta.
- Sous-embranchement : Spermatophytina.
- Clade: Angiospermes.
- Ordre : Sapindales.
- Sous ordre : Géraneae.
- Classe : Eudicots.
- Sous classe : Archichlamydeae.
- Famille : Rutaceae.
- Sous-famille : Aurantiodeae.
- Tribu : Citreae.
- Sous-tribu : Citrinae.
- Genre : *Citrus*.
- Espèce : *Citrus sinensis*.
- Variété : Washington navel (**Pena et al., 2007**).

4. Les caractéristiques de la variété Washington navel

La variété Washington Navel est un agrume largement apprécié pour ses caractéristiques uniques et son rendement élevé. Cet oranger, doté d'un port érigé et d'une forme sphéroïdale, est parsemé de courtes épines solides, dont la fréquence et la longueur augmentent particulièrement sur les gourmands (**Curk et al., 2022**).

C'est un arbuste vigoureux, avec un feuillage dense et persistant. Les feuilles, caducifoliées, sont allongées, pointues et vernissées sur le dessus, d'un vert foncé brillant, créant un contraste esthétique agréable avec la floraison et les fruits (**Figure 41**).



Figure 41. Arbre de Washington navel (**Photo originale**)

Auto-fertile, l'Oranger Washington Navel ne nécessite qu'un seul individu pour assurer une pollinisation complète et garantir la fructification. Au début du printemps (mars-avril), l'arbre produit une abondance de petites fleurs blanches, solitaires, au parfum délicat et à la texture cireuse. Ces fleurs, d'environ 1 cm de diamètre, se distinguent par leur visibilité sur l'arbre. De plus, étant mellifère, cette variété attire de nombreux pollinisateurs, contribuant ainsi à la biodiversité locale (**Figure 42**) (**Web03**).



Figure 42. Pollinisation d'une fleur de Washington navel (**Photo originale**)

Après la pollinisation, les fruits prennent forme : d'un orange vif, mesurant environ 7 à 10 cm de diamètre, ils se caractérisent par une dépression marquée à leur sommet, appelée "navel" (terme anglais pour "ombilic"), et sont presque totalement dépourvus de pépins (**Kreedom., 1970**) (**Ollitrault et Navarro., 2012**). Sous une peau fine et lisse se cache une chair pulpeuse, juteuse et savoureuse, ce qui fait de cette variété un choix de prédilection tant pour la consommation directe que pour la production de jus (**Figure 43**).

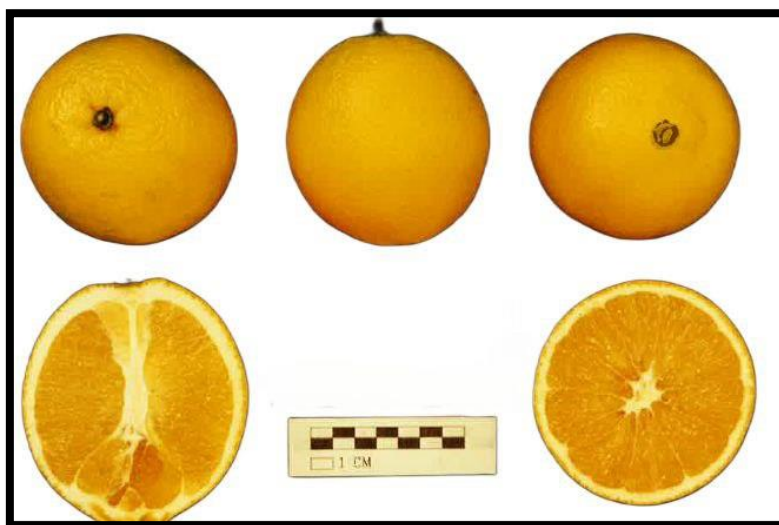


Figure 43. Visualisation d'une coupe de Washington navel (**Photo originale**)

La couleur orange des fruits se développe uniquement sous l'effet du froid, et n'est donc pas un indicateur de maturité. Ces fruits, qui mettent près d'un an à mûrir, sont récoltés de décembre à février, offrant ainsi une période de production hivernale.

Comme tous les agrumes, l'Oranger Washington Navel contient des poches d'essence dans ses feuilles, fleurs et fruits. Ces poches, souvent visibles à l'œil nu, permettent l'extraction d'huile essentielle par distillation (fleurs et feuilles) ou par pression (zeste) (**Figure 44**) (**Web03**).



Figure 44. Washington navel (**Photo originale**)

Concernant les conditions de culture, cet agrume préfère un sol argilo-limoneux, léger, bien drainé et fertile, avec un pH légèrement acide à neutre, idéal pour favoriser une croissance saine et un bon développement des fruits.

Les orangers prospèrent particulièrement dans les régions littorales méditerranéennes, où la chaleur constante tout au long de l'année est essentielle à leur développement. Dans d'autres régions, ils peuvent être cultivés en pot et protégés des premiers froids. Peu rustique, l'Oranger Washington Navel commence à souffrir dès que les températures descendent sous -5°C et peut disparaître si la température atteint -8°C (Web03).

II-7- Exigences de l'espèce

II-7-1- Exigences climatiques

a. Température

Les agrumes sont des arbres adaptés aux climats chauds, les températures minimales et maximales représentent des facteurs limitants pour leur développement. Leur zéro végétatif se situe autour de 8°C . La température idéale pour leur croissance se situe entre 25 et 26°C . Au-delà de 38 à 40°C , leur activité décroît, voire s'arrête (Loussert., 1989).

b. Pluviométrie

Les agrumes, arbres à feuilles persistantes, ont des besoins en eau importants, variant entre 900 et 1200 mm par an. Ces besoins sont particulièrement marqués pendant la phase de grossissement des fruits, qui coïncide généralement avec la période estivale (Loussert., 1989).

c. Humidité de l'air

Si l'humidité de l'air est insuffisante, elle entraîne une transpiration accrue des agrumes, augmentant ainsi leurs besoins en eau. Cette faible humidité peut être aggravée par des vents chauds et desséchants, qui risquent de provoquer des brûlures sur le feuillage et les fruits (Loussert., 1989).

II-7-2- Aléas climatiques

a. Vent

Le vent représente un facteur climatique redoutable pour les agrumes. Son action mécanique peut entraîner des dommages significatifs, tels que la chute des fruits et des altérations de l'écorce, entraînant ainsi d'importantes pertes de production. Il est donc crucial d'installer des dispositifs de protection, tels que des « brise-vents », pour atténuer ces effets

(Loussert., 1989).

b. Gelées

Les agrumes sont particulièrement vulnérables aux gelées, qu'elles soient printanières ou tardives en hiver, surtout lorsqu'elles coïncident avec des stades sensibles comme la floraison ou la maturation des fruits de certaines variétés de clémentiniers et mandariniers.

Des températures inférieures à -1°C et -2°C peuvent endommager les fruits, tandis que des températures sous -3°C et -4°C affectent les parties aériennes de l'arbre. En dessous de -8°C , l'arbre risque de dépérir (Loussert., 1989).

II-7-3- Exigences pédologiques

Les agrumes sont des arbres exigeants en termes de sol, notamment en raison de leur système racinaire étendu et profond, qui nécessite un sol suffisamment profond et bien drainé pour se développer correctement. Un sol adapté permet non seulement une croissance optimale, mais aussi une meilleure absorption des nutriments et de l'eau nécessaires à leur développement.

Les porte-greffes, qui jouent un rôle crucial dans l'adaptation des agrumes à différents types de sols, offrent une grande flexibilité. En effet, en fonction des variétés de porte-greffes utilisées, il est possible d'implanter des agrumes dans des sols très variés, même ceux ayant un pH, une texture ou un équilibre chimique moins favorables à la culture d'origine. Le choix judicieux de ces porte-greffes permet d'améliorer la résistance des arbres aux maladies du sol, ainsi que leur capacité à supporter des sols plus ou moins acides ou basiques (Webster., 2012).

En termes de pH, les agrumes préfèrent généralement des sols légèrement acides, avec un pH compris entre 6 et 7. Un pH trop élevé ou trop bas peut limiter la disponibilité des nutriments, ce qui affecte la croissance des arbres et leur production (Loussert., 1989).

D'un point de vue physique, les sols destinés à la culture des agrumes doivent remplir plusieurs critères. Premièrement, un sol meuble et bien aéré est crucial pour favoriser la respiration des racines et permettre une bonne circulation de l'eau. Les racines des agrumes ont besoin d'un apport constant en oxygène, et un sol compacté peut entraîner une stagnation de l'eau, augmentant ainsi le risque de pourriture des racines. Un sol à texture grossière, comme les sols sableux ou limoneux, est donc préférable. À l'inverse, les sols lourds et argileux, riches

en particules fines, doivent être évités, car ils ont tendance à se compacter facilement et à limiter le drainage (**Loussert., 1989**).

De plus, un sol homogène et profond, d'au moins un mètre, est essentiel pour permettre un développement racinaire en profondeur. Un sol superficiel ou trop peu profond ne pourra pas nourrir adéquatement les racines, ce qui limitera la croissance de l'arbre. Un bon drainage est aussi indispensable : le sol doit permettre une évacuation efficace de l'eau excédentaire, aussi bien en surface qu'en profondeur. Un drainage insuffisant peut provoquer des inondations temporaires des racines et ainsi nuire à la santé de l'arbre en favorisant des pathologies racinaires (**Yuan et al., 2015**).

Pour une culture réussie des agrumes, il est crucial de choisir des sols bien adaptés à leurs besoins. Un sol légèrement acide, bien aéré, profond et bien drainé constitue l'environnement idéal pour garantir une croissance optimale et une production abondante. Le choix des porte-greffes et une gestion soignée du sol permettent d'adapter les conditions de culture aux spécificités de chaque type de sol et de chaque variété d'agrumes (**Loussert., 1989**).

II-8- Portes-greffes

Le porte-greffe désigne la partie d'un arbre, généralement composée d'une portion de tronc et de racines, qui est greffée à un autre arbre, le greffon, constitué du tronc et des branches. Ce dernier est responsable de la production des fruits, tandis que le porte-greffe assure l'alimentation en eau et en sels minéraux, en puisant dans le sol.

Le choix du porte-greffe est crucial pour les agrumes, car il permet d'adapter une même variété de fruit à différents types de sols.

De plus, le porte-greffe peut conférer au greffon une résistance accrue à certaines maladies ou conditions de culture défavorables. Il aide également à limiter la vigueur de certaines variétés, ce qui facilite leur gestion et favorise la production de fruits sur des arbres jeunes. En cas de besoin, il est possible de changer une variété insatisfaisante par un regreffeage.

Un bon porte-greffe doit être :

- Résistant à la gommose et au phytophthora, une maladie cryptogamique qui attaque les tissus conducteurs de sève des racines et du tronc.
- Facile à multiplier et à cultiver, offrant des plants homogènes et une bonne affinité au

greffage avec les principales espèces et variétés commerciales. Il doit également favoriser une production précoce de fruits (Kara., 2018).

II-8-1-Les principales caractéristiques des porte-greffes

a. *Bigaradier Citrus aurantium*

Le Bigaradier est un porte-greffe qui présente de nombreuses qualités pour la culture des agrumes. Il possède une excellente affinité avec les principales variétés cultivées et se multiplie facilement par semis ou greffage.

Ce porte-greffe est très adaptable aux conditions édaphiques, offrant une grande souplesse face aux différents types de sols. Il est également relativement tolérant aux chlorures et au calcaire, ce qui en fait un choix adapté à des sols parfois difficiles. Bien qu'il induise une qualité de fruit acceptable, sa productivité reste moyenne. Le bigaradier présente une bonne affinité avec toutes les variétés d'agrumes, à l'exception du kumquat et de la Satsuma.

De plus, il est résistant à la sécheresse, mais il redoute l'excès d'eau et les sols lourds (ITAFV., 2021).

b. *Poncirus trifoliata*

Le *Poncirus trifoliata* est une espèce à feuilles caduques qui présente plusieurs caractéristiques intéressantes en tant que porte-greffe. Il est particulièrement résistant au froid, pouvant supporter des températures allant jusqu'à -15°C, une résistance partiellement conférée au scion, et son enracinement est puissant, à la fois traçant et pivotant.

Les arbres issus de ce porte-greffe ont une faible vigueur, ce qui permet de limiter la croissance excessive des arbres (effet nanisant).

Le *Poncirus trifoliata* est adapté aux sols humides et peut tolérer une certaine asphyxie racinaire, mais il reste sensible au calcaire, aux chlorures et à l'excès de bore. Il améliore la qualité des fruits, notamment en augmentant le taux de sucre.

Ce porte-greffe convient particulièrement aux variétés à petits fruits, telles que les Clémentiniers, Mandariniers et Kumquats. Cependant, il induit une mise à fruit tardive (ITAFV., 2021).

c. *Citrangle troyer*

Le Citronnier *Citrangle troyer* est un porte-greffe vigoureux par rapport au *Poncirus trifoliata*. Il présente l'avantage que ses jeunes plantes sont peu sensibles à la fonte de semis, ce qui en fait un choix fiable lors de la plantation.

Son enracinement est de type pivotant, ce qui permet une bonne stabilité et une absorption efficace des nutriments. Ce porte-greffe supporte des sols moyennement humides, mais reste peu tolérant au calcaire et aux chlorures.

Bien qu'il offre une amélioration très légère de la sensibilité au froid, il n'atteint pas les niveaux de résistance au froid du *Poncirus trifoliata*. Ce porte-greffe est donc particulièrement adapté aux conditions modérées en termes de sol et de climat, tout en conservant des caractéristiques de vigueur intéressantes pour les cultures d'agrumes (ITAFV., 2021).

d. *Citrangle carrizo*

Le *Citrangle carrizo* est un hybride similaire au *Citrangle troyer*, présentant un enracinement pivotant, dense et profond.

Ce porte-greffe vigoureux est actuellement l'un des plus utilisés en raison de ses nombreuses qualités. Il supporte bien les sols moyennement humides, bien que sa tolérance au calcaire et aux chlorures reste limitée. Le *Citrangle carrizo* offre une productivité élevée et de bonne qualité, ce qui en fait un choix privilégié pour les cultures commerciales.

Il confère à la variété greffée une croissance robuste et une bonne qualité de fruits, tout en étant particulièrement adapté aux conditions de culture modérées (ITAFV., 2021).

e. *Citrus volkameriana*

Le *Citrus volkameriana* est un excellent porte-greffe, particulièrement compatible avec les citronniers et les pomélos. Il possède un bon enracinement et une résistance notable au froid, ce qui lui permet de s'adapter à des conditions climatiques variées.

Très vigoureux, il favorise une mise à fruit rapide, ce qui est un atout majeur pour les producteurs.

Ce porte-greffe est également adapté aux sols secs et aérés, et il est résistant aux chlorures, ce qui le rend approprié pour certains types de sols. Cependant, en pépinière en plein champ, il se montre très sensible aux fortes gelées, ce qui limite son utilisation dans des régions où les températures hivernales sont particulièrement basses (ITAFV., 2021).

f. Mandarinier cléopâtre (*Citrus reticulata blanco*)

Le *Citrus reticulata blanco* est un porte-greffe qui s'adapte mieux aux sols légers et bien drainés, offrant ainsi de bonnes conditions de croissance dans ce type de sols. Il tolère le calcaire et les chlorures, ce qui le rend résistant à certaines conditions de sol difficiles. Sa productivité reste cependant moyenne, ce qui peut limiter son efficacité pour certaines cultures commerciales.

Ce porte-greffe présente une mauvaise reprise au greffage, ce qui en fait un choix moins favorable dans certaines situations. De plus, la germination des graines en pépinières est très difficile, en raison de la fonte de semis, ce qui complique son utilisation en production à grande échelle (ITAFV., 2021).

II-9- Maladies et ravageurs

II-9-1- Maladies

Bien que le bassin méditerranéen soit encore indemne de nombreuses maladies graves, les agrumes y sont néanmoins confrontés à des pathogènes endémiques et à d'autres émergents. Certains de ces pathogènes peuvent avoir des conséquences sévères, et leur transmission par des insectes vecteurs rend leur gestion particulièrement complexe (Rocha et al., 1995).

Les agrumes sont vulnérables à diverses maladies virales, bactériennes et cryptogamiques pouvant affecter les feuilles, les racines et les fruits.

a. Les maladies virales

Parmi ces maladies, on distingue :

- **L'Exocortis (*Citrus Exocortis* Viroïde)**

L'Exocortis est une maladie virale présente dans tout le bassin méditerranéen. Le principal symptôme de cette maladie est un écaillage plus ou moins marqué de l'écorce du porte-greffe, dont l'intensité varie en fonction de la virulence de l'infection.

Cet écaillage perturbe la circulation de la sève, ce qui conduit à un affaiblissement général de l'arbre, se manifestant par un nanisme, un jaunissement du feuillage et une réduction de la production (**Figure 45**).

Certaines combinaisons de porte-greffes, comme les mandarines « Satsumas » greffées sur *Poncirus trifoliata*, ne montrent cependant pas de symptômes.



Figure 45. Ecaillage de porte-greffes affectés par l'Exocortis
(La culture des agrumes ITAFV., 2021).

- **Psorose (*Citrus psorosis*)**

La Psorose est une maladie virale largement répandue, particulièrement rencontrée dans les vergers, où sa forme écailleuse est la plus fréquemment observée. Elle touche principalement les orangers, les mandariniers, les clémentiniers et les pomelos, tandis que les citronniers restent épargnés. Cette forme de Psorose est la plus courante et cause des dégâts considérables. Bien qu'elle ne mène pas à la mort des arbres, elle entraîne un affaiblissement général des plants, une réduction du calibre des fruits et une chute prématurée de ces derniers.

D'autres formes de Psorose existent, telles que :

- **La Psorose alvéolaire (concave gum)**, qui est particulièrement problématique sur l'oranger Washington Navel et certaines variétés de mandariniers.
- **La Psorose en poches (Blind pocket)**, qui affecte principalement l'oranger Washington Navel.

Les symptômes de la Psorose incluent :

- La formation d'écailles ou de desquamations sur le tronc, qui se propagent progressivement aux branches principales. Lorsqu'on gratte l'écorce craquelée, les tissus sous-jacents restent d'un vert caractéristique (due aux pigments chlorophylliens).
- La présence de la Psorose peut également être détectée avant que les symptômes n'apparaissent sur l'écorce. Au printemps, les feuilles montrent une décoloration particulière de part et d'autre de la nervure centrale, ressemblant à une feuille de chêne. (Figure 46).



Figure 46. Ecaillage sur le tronc et branches suite à une attaque de Psorose

(La culture des agrumes ITAFV., 2021)

- **Tristeza**

La maladie la plus redoutable pour l'agrumiculture méditerranéenne, représentant une menace sérieuse pour cette culture, est transmise principalement par le greffage, le bouturage, ainsi que par plusieurs vecteurs, notamment :

- Le puceron brun ou puceron tropical (*Toxoptera citricidus*).
- Le puceron noir des agrumes (*Toxoptera aurantii*) présent dans le bassin méditerranéen.
- Le puceron vert (*Aphis spiraecola*) et le puceron du melon ou du cotonnier (*Aphis gossypii*), bien que moins actifs, sont également largement répandus dans la région méditerranéenne.

Les symptômes de cette maladie sont variés et graves :

- Nécrose du phloème au niveau de la zone de soudure entre le greffon et le porte-greffe (**Figure 47**).
- Dégénérescence des tubes criblés et des cellules-compagnes sous le point de greffage, entraînant un blocage du transport de la sève élaborée vers les racines, ce qui provoque un rétrécissement du porte-greffe par rapport à la variété, donnant l'apparence d'un « étranglement » ou « goulot de bouteille renversé ».
- Les arbres affectés montrent des signes de dépérissement, de rabougrissement et souvent un déclin total.
- Les feuilles prennent une coloration bronzée, se recroquevillent et se dessèchent, tombant généralement en totalité ou partiellement (**Figure 48**).

Les fruits des arbres infectés sont souvent de petite taille et de qualité médiocre.



Figure 47. Nécrose du phloème
(La culture des agrumes ITAFV., 2021).

Figure 48. Aspect des arbres affectés par la
Tristeza
(La culture des agrumes ITAFV., 2021).

- **Cachexie**

La Xyloporose, également appelée maladie du viroïde *Citrus cachexia*, est largement répandue dans les zones de culture d'agrumes à travers le monde. Elle touche aussi bien les porte-greffes hybrides du *Poncirus* (tels que *Citrangle Troyer* et *Citrangle Carrizo*) que certaines variétés de greffons d'oranges, mandarines et clémentines.

Les principaux symptômes incluent une réduction de la vigueur des arbres, entraînant un phénomène de rachitisme, des feuilles plus petites aux extrémités des rameaux, un jaunissement des limbes, ainsi que des dépôts de gomme sur l'écorce, qui peut varier du châtain au noir. L'écorce peut se détacher par morceaux sous forme d'écailles, mais aucun symptôme n'est observé sur les fruits.

b. Maladies bactériennes

- **Stubborn (*Spiroplasma citri*)**

Causé par un mycoplasme, micro-organisme similaire à un virus ou à une bactérie, est l'une des plus répandues et graves, en particulier lorsqu'elle coexiste avec d'autres viroses, comme la Psorose. Elle peut être transmise en pépinière par greffage et en verger par les cicadelles, notamment *Circulifer tenellus* et *Neolaiturus haematocephus*.

Les symptômes incluent une déformation des fruits en forme de gland, des fruits de petite taille et de maturité échelonnée, des jeunes ramifications avec des entre-nœuds courts (balai de sorcière), des feuilles de forme cuillère et de port érigé, ainsi qu'une inversion de la coloration des fruits (**Figure 49**) (La culture des agrumes ITAFV., 2021).



Figure 49. Inversion de coloration des fruits (La culture des agrumes ITAFV., 2021).

- **Chancre bactérien des agrumes (*Xanthomonas campestris*)**

Le chancre bactérien des agrumes, causé par *Xanthomonas campestris*, infecte toutes les parties aériennes de la plante. Les symptômes débutent par de petites taches ponctuelles qui évoluent en pustules surélevées ou en éruptions. Les lésions commencent par une couleur claire, puis deviennent brunes, entourées d'un halo jaune avec des bordures huileuses ou graisseuses. (Figure 50) (La culture des agrumes ITAFV., 2021).



Figure 50. Des lésions et taches ponctuelles sur fruit et feuilles
(La culture des agrumes ITAFV., 2021).

c. Maladies cryptogamiques

Les maladies cryptogamiques des agrumes sont variées et affectent différentes parties de la plante, tels que les racines, le tronc et les fruits.

- **Pourriture sèche racinaire (*Fusarium* sp)**

Cette maladie se manifeste par une mort rapide des arbres, souvent de manière unilatérale. Elle est causée par la pourriture sèche des racines, qui prennent une couleur brune ou marron. Les arbres affectés présentent un dépérissement et peuvent mourir brusquement (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

- **Mal Secco (*Phomatracheiphila*)**

Le Mal Secco est causé par le champignon *Phomatracheiphila*, qui envahit les tissus conducteurs, perturbant la circulation de la sève. Cela entraîne un dessèchement des grosses branches et un dépérissement rapide de l'arbre en une à deux ans. Les symptômes incluent la chlorose des pousses et la présence de petits points noirs sur les rameaux flétris (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

- **Gommose à *Phytophthora***

Cette maladie est causée par un champignon qui infecte la base des charpentières. Il provoque des craquelures de l'écorce avec l'exsudation de gomme, entraînant un flétrissement des branches et, à long terme, la mort de l'arbre (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

- **Pourridié (pourriture des racines)**

Le pourridié survient généralement après une blessure ou sur certaines variétés sensibles, où le mycélium de champignons envahit les racines. Cela bloque la circulation de la sève, ce qui conduit à la mort de l'arbre (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

- **Fumagine**

La fumagine est souvent le résultat d'attaques de cochenilles, de pucerons ou d'aleurodes. Ces insectes excrètent un miellat sur lequel se développe le champignon *Capnodium citri*, créant une couche noire sur les feuilles et les rameaux (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

- **Anthraxnose**

L'anthraxnose, causée par *Colletotrichum gloeosporioides*, touche principalement les arbres affaiblis, souvent en raison d'un déséquilibre minéral ou hydrique. Elle se propage avec les premières pluies automnales et provoque le dessèchement des jeunes

rameaux et des extrémités des branches, entraînant la chute des feuilles. Des taches foncées apparaissent sur les feuilles et les rameaux desséchés (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

II-9-2- Ravageurs

Les insectes qui se développent sur les organes des agrumes sont nombreux et causent des dommages considérables. En plus de dégrader les plantes, ils agissent également comme vecteurs de maladies virales et bactériennes (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

a. Pucerons

Les pucerons se trouvent principalement sur la face inférieure des feuilles et sur les jeunes pousses des agrumes. Sous leur action, les jeunes pousses s'enroulent et les feuilles tendres prennent une forme incurvée (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**). Ils secrètent également un miellat qui favorise le développement de la fumagine.

b. Cératite (Mouche méditerranéenne des fruits)

La cératite est l'insecte le plus nuisible pour les agrumes. La femelle de cette mouche de 4 à 5 mm, jaune avec des taches, peut pondre de 300 à 1000 œufs au cours de sa vie. L'attaque de l'insecte se manifeste par une décoloration du fruit et peut entraîner un mûrissement prématuré suivi de la chute des fruits (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

c. Cochenille

La cochenille est un insecte polyphage que l'on retrouve sur de nombreuses plantes, notamment les agrumes. Elle secrète un abondant miellat sur les fruits, le feuillage et les rameaux, ce qui favorise le développement de fumagine (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

d. Acariens

Les acariens provoquent des déformations, des décolorations et des nécroses, entraînant la chute des bourgeons, des fruits et des feuilles (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

e. Aleurode (mouche blanche)

Les aleurodes provoquent l'exsudation de miellat sur les feuilles, ce qui conduit à la formation de fumagine. Cette couche de fumagine bloque la lumière et nuit à la photosynthèse, compromettant ainsi la santé de l'arbre (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

f. Nématodes :

Les nématodes sont de petits vers microscopiques vivant dans le sol et s'attaquant aux racines des agrumes, causant des dégâts significatifs tel que le dépérissement lent (slow decline), un trouble particulièrement associé à l'infestation par *Tylenchulus semipenetrans* (**La culture des agrumes ITAFV., 2021**).

Ce type de dépérissement est insidieux, car les arbres peuvent montrer des signes de faiblesse progressive avant que des symptômes évidents ne soient visibles. Les symptômes du dépérissement lent (slow decline) peuvent varier en fonction du niveau d'infestation par le *Tylenchulus semipenetrans*, de l'âge des arbres et du moment de l'infection (**Sekora et Crow., 2018**).

En fonction de leur mode d'alimentation, les nématodes peuvent causer une diminution significative du rendement des agrumes à travers :

- **L'exploitation du métabolisme végétal** : Les nématodes exploitent une partie des ressources métaboliques de l'arbre, affectant ainsi sa croissance et son développement global.
- **La destruction des racines** : En endommageant les racines et les radicelles, les nématodes altèrent le système racinaire, ce qui réduit l'efficacité de l'absorption d'eau et de sels minéraux essentiels à la survie des arbres.
- **Les sécrétions toxiques** : Les nématodes injectent des sécrétions glandulaires dans les cellules végétales, lesquelles liquéfient le contenu cellulaire. Ces sécrétions sont souvent toxiques pour les cellules, provoquant leur nécrose et leur mort.
- **La formation de galles** : Les nématodes endoparasites sécrètent des substances qui altèrent les cellules du cortex et du cylindre central des racines, provoquant la formation de cellules géantes. Cette déformation perturbe la circulation des sèves brute et élaborée, affectant gravement la nutrition des arbres.
- **La perturbation de la symbiose avec les rhizobiums** : Certaines espèces de nématodes, comme *Scutellonema cavenessi*, entravent l'établissement des bactéries fixatrices d'azote (rhizobiums) sur les racines, compromettant ainsi l'approvisionnement en azote de ces arbres.
- **Vecteurs de virus** : Des nématodes appartenant aux genres *Longidorus*, *Trichodorus* et *Xiphinema* sont capables de transmettre des virus en injectant leur salive contenant des agents pathogènes directement dans les tissus de la plante.

- **Porte d'entrée pour d'autres pathogènes** : En perforant les cellules pour se déplacer et se nourrir, les nématodes causent des lésions qui permettent l'entrée d'autres agents pathogènes, tels que des bactéries et des champignons, aggravant ainsi les infections végétales (Verdejo-Lucas et al., 2000).

Ces effets combinés entraînent un affaiblissement progressif de l'arbre, réduisant sa capacité à produire et à se défendre contre d'autres menaces.

II-10- Répartition géographique

Aujourd'hui, la majorité des espèces d'agrumes sont principalement cultivées en arboriculture, bien que quelques-unes puissent encore être observées à l'état sauvage. Ces plantes ont été largement cultivées à travers le monde, non seulement pour leurs fruits et leur jus, mais aussi pour leurs propriétés médicinales (**Manner et al., 2005**).

En Algérie, la culture commerciale des agrumes est concentrée dans les zones irrigables du nord du pays, où les conditions climatiques modérées favorisent leur développement (**Figure 51**) (**Karboa., 2001**).

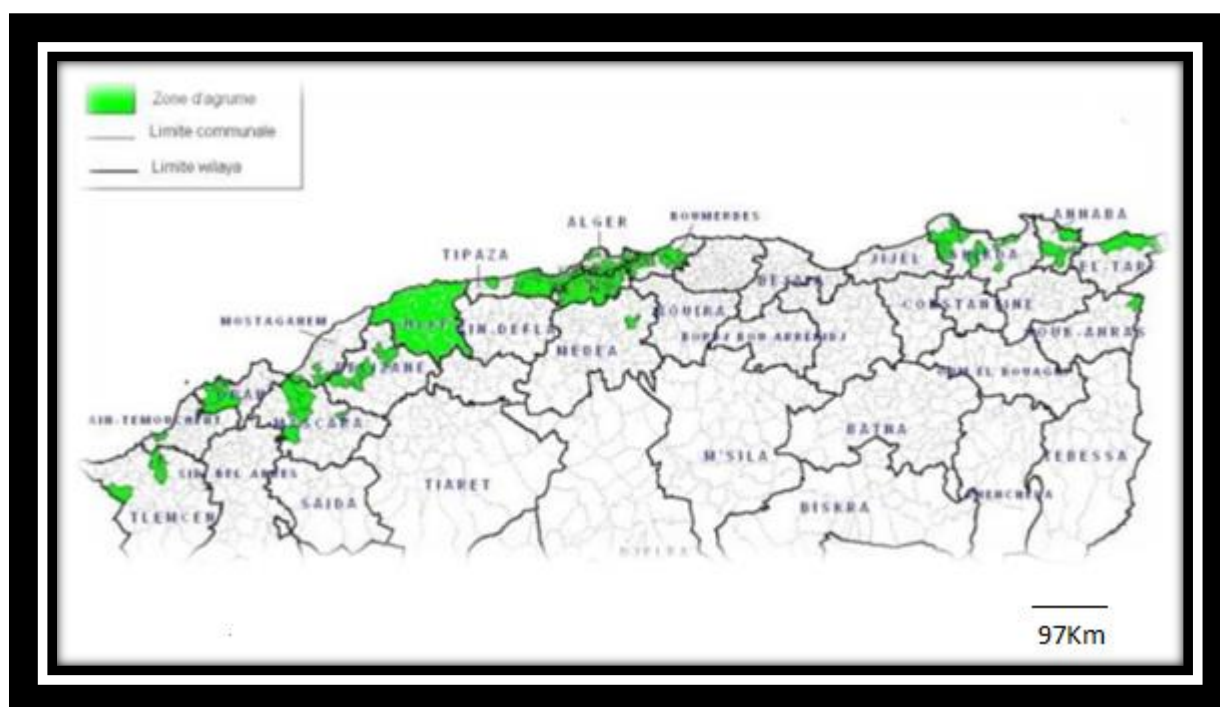


Figure 51. Patrimoine Agrumicole en Algérie (Patrimoine Agrumicole par ITAFV).

En effet, le verger agrumicole Algérien se localise essentiellement dans la plaine de la Mitidja en raison de son exigence en eau et sa qualité (**Figure 52**) (**Rebour., 1948**) .



Figure 52. Verger d'agrumes (**Photo originale**).

II-11- production d'agrumes dans le monde

Selon la World Citrus Organisation (WCO), la production mondiale d'agrumes, toutes variétés confondues, atteint plus de 110 millions de tonnes chaque année, sur une surface d'environ 7,5 millions d'hectares. Pendant la saison agricole 2022-2023 la production mondiale d'agrumes a été estimée à environ **112,3 millions de tonnes (USDA., 2023)**.

Les oranges représentent près de 60 % de cette production, tandis que les Tangerines, Mandarines, Clémentines et Satsumas totalisent environ 23 %. Environ 13,7 millions de tonnes de citrons et de limes, ainsi que 4,4 millions de tonnes de pamplemousses et de pomelos, sont également produites annuellement.

Les rendements moyens se situent entre 5,3 et 6,7 tonnes par hectare par an, bien que certains pays à production plus intensive atteignent entre 11 et 15,5 tonnes par hectare. Dans les zones les plus favorables, les meilleurs producteurs peuvent obtenir entre 20 et 26 tonnes par hectare.

Le Brésil, qui produit environ un quart des agrumes mondiaux, transforme 75 % de cette récolte en jus. La Chine et les États-Unis sont également des producteurs majeurs, avec respectivement 17,6 millions et 11 millions de tonnes (FAO., 2022).

Ensemble, le Brésil et les États-Unis représentent plus de 90 % de la production mondiale de jus d'orange.

Environ 22 millions de tonnes d'agrumes sont cultivées dans la région méditerranéenne, principalement destinées à la consommation de fruits frais. Les principaux producteurs dans cette région sont l'Espagne, l'Italie, l'Égypte, la Turquie et la Grèce.

La région méditerranéenne se distingue comme le plus grand exportateur de fruits frais, avec l'Allemagne, la France, les Pays-Bas et le Royaume-Uni comme principaux importateurs (web 05).

II-12-Production d'agrumes en Algérie

La production d'agrumes en Algérie a enregistré une augmentation significative lors de la saison agricole 2023-2024, atteignant plus de 18 millions de quintaux (CNIF agrumes., 2024). Cette hausse notable est attribuée au développement de la filière agrumicole, notamment dans les wilayas du sud, telles qu'El Oued, El Menia et Ouargla, qui ont joué un rôle central dans cette expansion. La production nationale a ainsi dépassé les 16 millions de quintaux de la saison précédente, marquant une croissance de 2 millions de quintaux (web04).

L'extension des superficies dédiées à la culture des agrumes est un facteur majeur de cette augmentation. En effet, les surfaces cultivées connaissent une expansion annuelle de 5 000 hectares. Cette dynamique est accompagnée de la nécessité d'encourager les agriculteurs à réintroduire certaines variétés anciennes, tout en cherchant à réduire les importations de produits destinés à la transformation, notamment pendant la période de récolte selon le Conseil interprofessionnel de la filière d'agrumes (CNIF/agrumes).

L'agriculture intensive devient de plus en plus populaire parmi les producteurs, avec une densité de plantation atteignant 700 arbres par hectare. Cette pratique permet de maximiser les rendements par unité de surface.

D'après les données du ministère de l'Agriculture et du Développement rural, la production d'agrumes en Algérie pour la saison 2022-2023 a atteint 16 millions de quintaux, cultivés sur plus de 80 000 hectares. Parmi ces surfaces, 62 % se trouvent dans la région centrale

du pays.

En termes de répartition des cultures, l'orange est prédominante, avec 54 227 hectares consacrés à sa culture (67,77 %), suivie par la clémentine (17 263 hectares, soit 21,57 %), le citron (5 833 hectares, soit 7,28 %) et la mandarine (2 577 hectares, soit 3,22 %).

Les wilayas de Blida, Chlef et Mostaganem figurent parmi les principales zones de production d'agrumes en Algérie, avec des rendements respectifs de 4 millions de quintaux, 1,7 million de quintaux et 1,5 million de quintaux. Ces régions dominent la production nationale (Web04).

L'Institut technique de l'arboriculture fruitière et de la vigne (ITAFV) souligne que l'Algérie bénéficie d'une grande diversité climatique, ce qui lui permet d'étendre la culture des agrumes à d'autres régions au-delà des zones traditionnelles.

Le pays dispose également d'un patrimoine génétique riche, avec 309 espèces d'agrumes recensées, dont 34 locales et 275 étrangères (ITAFV., 2024).

Le tableau suivant (**Tableau 01**) illustre l'évolution de la production d'agrumes en Algérie durant les 10 dernières années selon la Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche en Algérie.

Tableau 01. Evolution de la production d'agrumes en Algérie

Saison agricole	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2022/2023	2023/2024
Production d'agrumes (millions de quintaux)	13.4	12.03	13.4	14.8	15.8	15.6	15.1	15	16	18

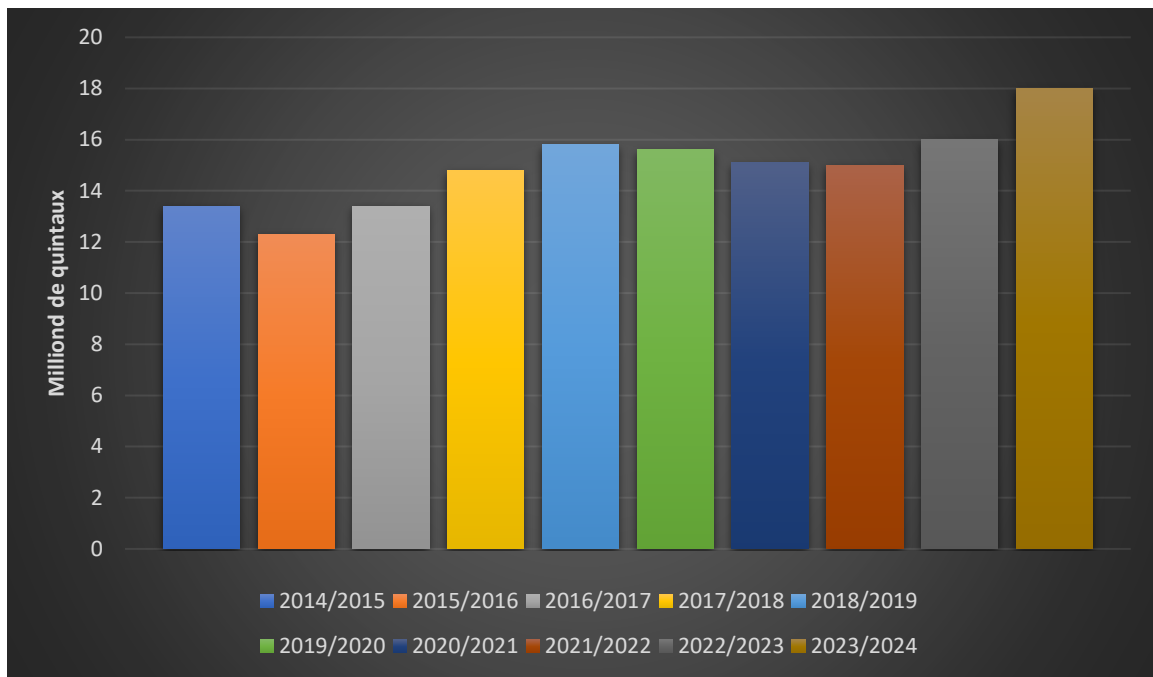


Figure 53. Histogramme comparant la production d’agrumes en Algérie durant la dernière décennie.

II-13- Production d’agrumes à Tlemcen

La production d'agrumes à Tlemcen, bénéficie de conditions climatiques favorables, notamment un climat méditerranéen doux avec des hivers modérés et des étés chauds et secs. Tlemcen se caractérise par un relief varié, entre montagnes et plaines, ce qui permet une diversité dans les types de sols et microclimats, idéaux pour l’agriculture. Les températures douces et les précipitations modérées créent des conditions propices à la croissance des agrumes, tout en permettant une bonne régulation des besoins en eau pendant les périodes de sécheresse. Les agrumes cultivés à Tlemcen incluent principalement des oranges, des citrons, des mandarines et des pamplemousses très prisées pour leur qualité. Ce secteur représente une source importante de revenus pour les producteurs locaux, avec une partie de la production destinée à l'exportation, ce qui soutient l'économie régionale et nationale.

Toutefois, les défis liés au changement climatique et à la concurrence sur les marchés mondiaux demandent des innovations et des investissements dans la gestion durable de l'agriculture (Akkache., 2018).

Le **Tableau 02** montre les statistiques de production d’agrumes à Tlemcen durant les 10 dernières années selon la Direction du Secteur Agricole (DSA., 2025) :

Tableau 02. Production d’agrumes à Tlemcen durant les 10 dernières années (DSA., 2025)

Saison agricole	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2022/2023	2023/2024
Superficie (Ha)	2470	2568	2676	2884	2948	2980	3100	3148	3250	3524
Production d’agrumes (Quintaux)	326240	364080	363930	657410	730830	784560	774440	822419	852378	873695

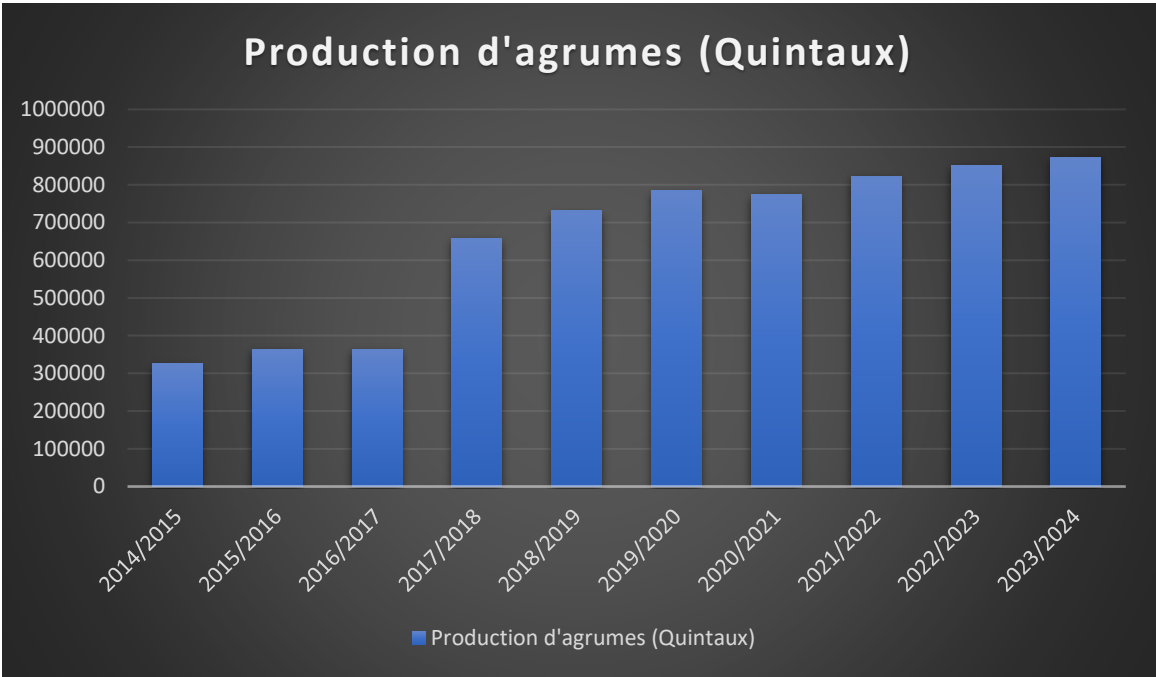


Figure 54. Production d’agrumes à Tlemcen (DSA., 2025)

MILIEU PHYSIQUE

I-Présentation de la région d'étude

La commune d'El Fehoul, référencée sous le code géographique (ONS) 13.05, est localisée au Nord-Est de la wilaya de Tlemcen, en Algérie. Ses coordonnées géographiques sont $35^{\circ} 07' 04''$ N et $1^{\circ} 20' 03''$ O. Elle se situe à environ 25 km au nord-est du chef-lieu de la wilaya de Tlemcen. Avec une superficie de 142 km², la commune dispose d'un territoire favorable au développement de diverses activités, en particulier agricoles.

Au 31 décembre 2022, la population d'El Fehoul était estimée à 7 456 habitants, ce qui confère à la commune une densité de population relativement faible et un environnement calme. La localité est desservie par le code postal 13033 pour les correspondances. Grâce à sa situation géographique avantageuse et à son espace rural, El Fehoul joue un rôle important dans le développement local tout en préservant un cadre naturel agréable (**Wilaya de Tlemcen., 2023**).

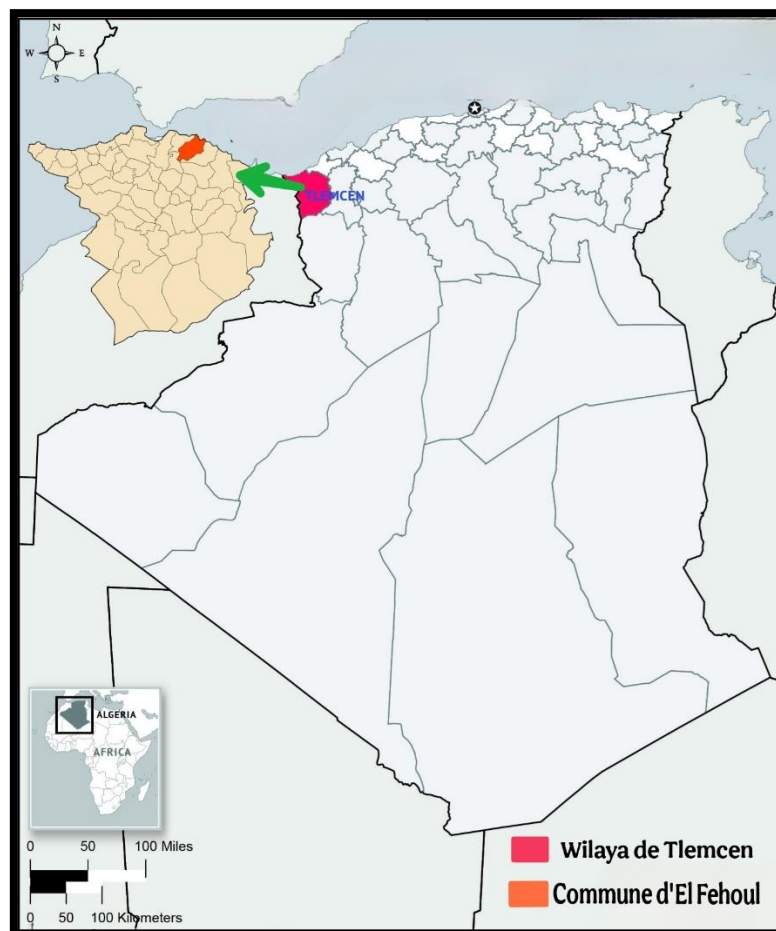


Figure 55. Géolocalisation de la région d'El fehoul (Wilaya de Tlemcen)

La zone d'étude se situe dans la région de Tlemcen, à l'extrême nord-ouest de l'Algérie. Elle fait partie de la commune d'El Fehoul et de la daïra de Remchi, à une altitude moyenne de 170 mètres. Cette zone est délimitée à l'est par la wilaya d'Ain Témouchent, au sud par la commune de Ben Sekrane, au nord-ouest par la commune d'Ain Youcef, et au nord par la commune de Sebaa Chioukh. Elle se trouve entre la commune d'Ain Youcef et celle d'El Fehoul. La présente étude est menée au sein de la ferme pilote « Belaidouni Mohamed ».

I-1-Présentation de la ferme

La ferme pilote BELAIDOUNI Mohammed est une entreprise « EURL », située dans la commune d'El Fehoul, daïra de Remchi. Elle est limitée au sud par la route nationale reliant Aïn Youcef et EL Fehoul, à l'ouest par des exploitations privées, au nord et à l'est par l'oued Isser. L'EURL BELAIDOUNI Mohammed dépend de la société EPE-SOTRAVIT, filiale du groupe GVAPRO. Cette ferme présente des caractéristiques intéressantes pour le développement de solutions innovantes et de meilleures pratiques agricoles afin d'améliorer la quantité et la qualité du rendement agricole.

- La ferme pilote Belaidouni se distingue par sa vocation agricole axée sur la production d'agrumes et de céréales. Elle s'étend sur une Superficie Agricole Totale (SAT) de 211,95 hectares, dont une Superficie Agricole Utile (SAU) de 203,00 hectares. Parmi cette surface utile, 50,00 hectares sont irrigués, permettant ainsi une diversification des cultures et une optimisation des rendements. Les terres incultes, comprenant des bois et des parcours, occupent 8,95 hectares, contribuant à l'équilibre environnemental et à la préservation des écosystèmes locaux.
- La ferme pilote Belaidouni possède un fort potentiel agricole, reflété dans l'occupation du sol prévue pour la campagne 2022/2023. Une superficie totale de 157,20 hectares est consacrée aux terres nues, répartie entre plusieurs cultures stratégiques. Le blé dur occupe la plus grande part avec 100,00 hectares, suivi par le blé tendre sur 37,00 hectares. Les légumineuses, telles que le pois chiche et la lentille, couvrent respectivement 6,00 hectares et 4,20 hectares, tandis que la culture de la pomme de terre s'étend sur 10,00 hectares, renforçant la diversité et la rentabilité des productions de la ferme.

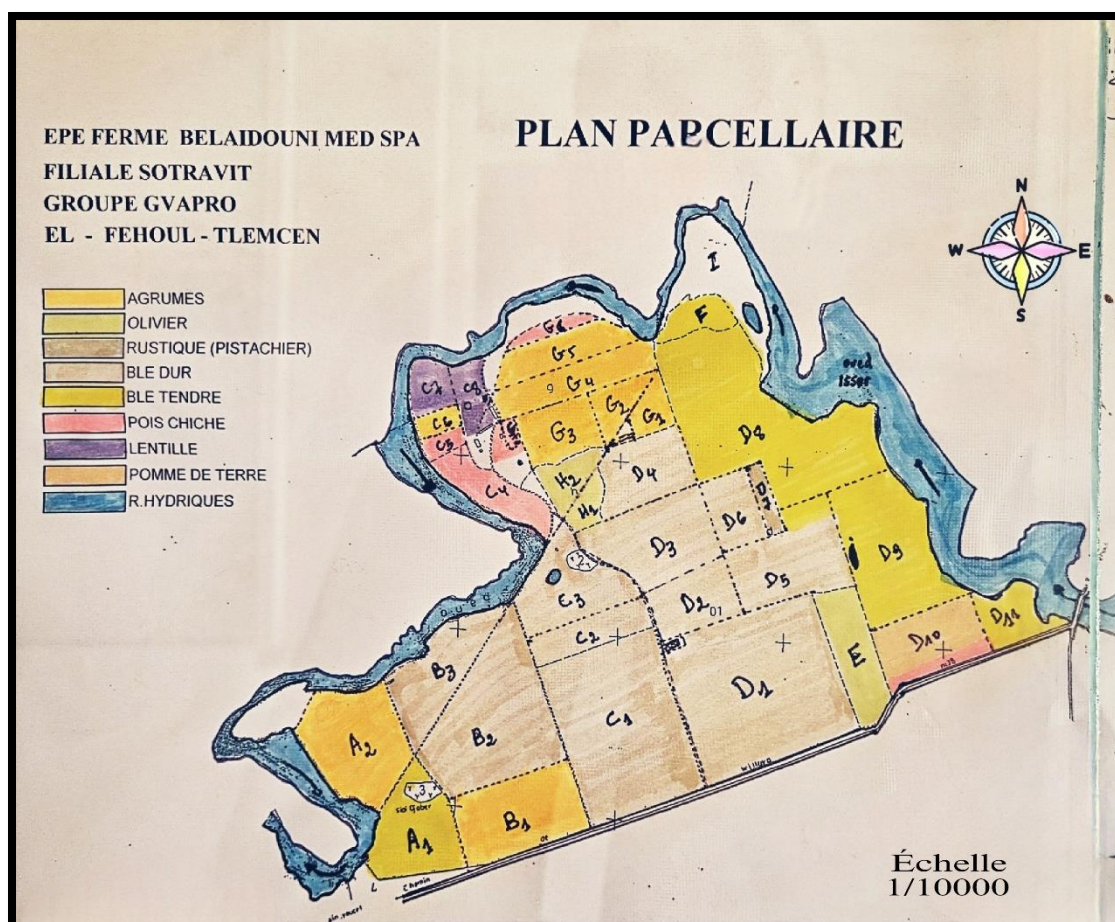


Figure 56. Plan parcellaire de la ferme BELAIDOUNI Mohamed.

- Les cultures pérennes jouent un rôle clé dans l'exploitation agricole de la ferme pilote Belaidouni, avec une superficie totale de 45,80 hectares. Les agrumes occupent 35,00 hectares, constituant une activité phare de la ferme. L'olivier est également largement présent avec 10,30 hectares plantés en masse, dont 5 hectares correspondent à de jeunes plantations, complétés par 1 037 pieds isolés, avec un total de 500 pieds récemment implantés. En outre, le pistachier s'étend sur 0,50 hectare, (**Tableau 03**) Cette diversité dans les cultures pérennes reflète une stratégie agricole axée sur la durabilité et la valorisation des ressources locales.
- La production animale de la ferme intègre une activité apicole dynamique, avec 25 ruches pleines. Cette exploitation apicole contribue non seulement à la production de miel, mais joue également un rôle crucial dans la pollinisation des cultures environnantes, renforçant ainsi la productivité agricole et la biodiversité de la ferme.
- Les potentialités hydriques de la ferme pilote Belaidouni se répartissent entre diverses

Milieu physique

sources, dont certaines sont fonctionnelles et d'autres nécessitent des améliorations. La ferme dispose d'un puits et d'un forage, tous deux à sec et en mauvais état. Une source naturelle, en revanche, est en bon état, avec une capacité de 01 L/S. L'oued Isser constitue une ressource saisonnière, actif de décembre à avril, alimentant deux bassins en dur d'une capacité de 200 m³, tous en bon état. La ferme compte également deux bassins en géomembrane : le premier, de 5 000 m³, est en état moyen, tandis que le second, avec une capacité de 9 000 m³, est en mauvais état. Ces données soulignent la nécessité d'optimiser la gestion et la maintenance des infrastructures hydriques pour soutenir les activités agricoles.

Tableau 03. Rendement des cultures pérennes de la ferme BELAIDOUNI (2021/2022)

Agrumes					
N° de parcelle	Sup (ha)	Variete	Annee de plantation	Nature du sol	Densité Ecartement
A2	9	Thomson.w.n	1984	Sablo-limoneux	6x6
B1	10	Valencialate	1984	Argilo-limoneux	6X6
C6	1.75	Citron eureka	1984	Sablo-limoneux	5X5
G1	1	Verger etalon	1948	Sablo-limoneux	5X5
G2	2.25	Portugaise	1948	Sablo-limoneux	5X5
G3	4	Clementine	1984	Sablo-limoneux	5X5
G4	4	Thomson.n	1948	Sablo-limoneux	5X5
G5	3	Thomson.n	1948	Sablo-limoneux	5X5
Total	35				

Oliviers					
N° de parcelle	Sup (ha)	Variete	Annee de plantation	Nature du sol	Densité Ecartement
E	5	Chemlel	2003	<u>Argilo-limoneux</u>	8x8
H1	2	Sigoise	1986	Sablo-limoneux	8x8
H6	3.3	Sigoise	1986	Sablo-limoneux	8x8
Total	10.3				
Pistachiers					
N° de parcelle	Sup (ha)	Variete	Annee de plantation	Nature du sol	Densité Ecartement
<u>D7</u>	0.5	Vera	1984	Sablo-limoneux	6x6
Total	0.5				
Total cultures pérennes	45.8				

I-2-Lieu d'expérimentation

Dans notre site expérimental, les agrumes occupent une grande superficie (35 hectares) par rapport aux autres cultures, avec une diversité de variétés, notamment le clémentinier, le citronnier, la Portugaise, la Thomson, la Valencia Late et la Washington Navel. Cette dernière variété est présente dans le verger « A2 », qui a été choisi comme lieu d'expérimentation pour la présente étude.

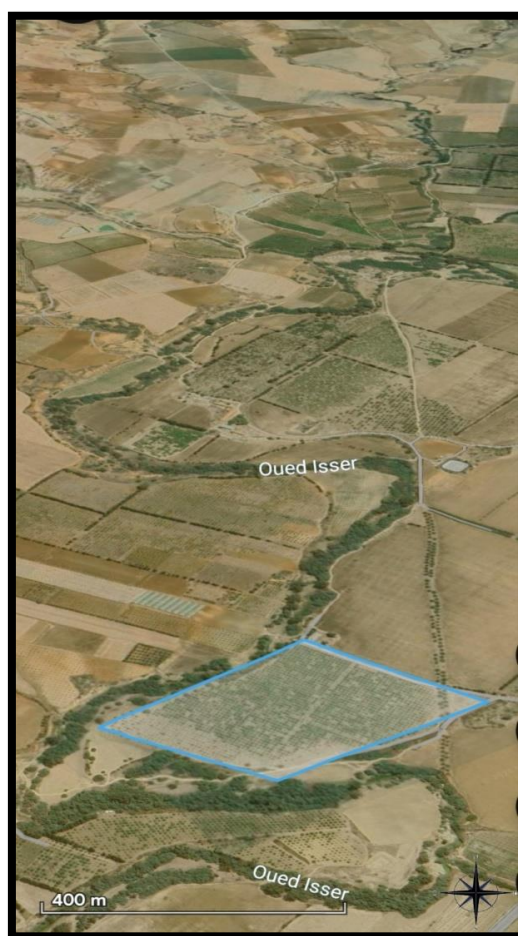


Figure 57. Localisation du verger d'étude « Washington Navel »

Le verger d'agrumes de la parcelle « A2 » s'étend sur une superficie de 9 hectares et est entièrement consacré à la variété Washington Navel. Ce verger, planté en 1984, repose sur un sol de nature sablo-limoneuse, idéal pour la culture des agrumes. La densité de plantation et l'écartement des arbres sont respectivement de 6×6 mètres, offrant un équilibre optimal entre productivité et aération des arbres.



Figure 58. Verger de Washington Navel (**Photo originale**)

II- Etude bioclimatique

Le climat désigne l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression atmosphérique, vents, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution au fil du temps dans une région donnée. Il constitue un élément fondamental dans l'analyse des diverses régions du monde, étant le facteur préalable à toute étude portant sur le fonctionnement des écosystèmes écologiques (**Thinthoin., 1948**).

Les données climatiques de la région d'étude sont fournies de la station météorologique de Zenâta (ONM), au niveau de la commune de Zenâta qui se trouve à une vingtaine de kilomètres de notre verger à El fehoul.

Tableau 04. Station météorologique de Tlemcen (Zenâta)

Station	Longitude	Latitude	Altitude	Période	Station d'étude
Zenâta	1°27 W	35°02'N	247 m	2004-2024	El fehoul

II-1-Les facteurs climatiques

La pluie et la température sont la charnière du climat (**Bary et al., 1979**). Pour mieux appréhender le bioclimat de la zone d'étude deux paramètres essentiels sont pris en considération, à savoir les précipitations et la température.

a. Précipitations

La pluviométrie constitue le principal facteur déterminant le type de climat. En effet, elle influence à la fois le maintien et la répartition de la couverture végétale ainsi que la dégradation du milieu naturel par l'érosion, notamment au début du printemps (**Djebaïli., 1978**).

b. Les Régimes Pluviométriques

Bien que la connaissance de la pluviométrie annuelle moyenne soit essentielle, elle demeure insuffisante pour une analyse complète de la répartition des précipitations. Il est donc nécessaire d'examiner le régime pluviométrique, c'est-à-dire la répartition saisonnière des précipitations au cours de l'année (**Angot., 1916**).

c. Régimes saisonniers

La méthode repose sur l'organisation des saisons selon un ordre décroissant de pluviosité, permettant ainsi d'établir un indicateur saisonnier propre à notre station. Cette répartition saisonnière revêt une importance particulière pour le développement des espèces annuelles, dont l'influence est souvent déterminante dans la structuration et la dynamique des communautés végétales et animales.

Tableau 05. Données pluviométriques de la station de Zenâta pour la période (2004-2024) (ONM .,2025)

Moyennes mensuelles des précipitations (mm)																Régime saisonnier	
J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D	H	P	E	A	Type	Moyenne annuelle de Précipitation
43,4	29,2	32,0	33,8	20,1	7,0	2,4	3,4	16,5	28,5	31,1	38,1	110,7	85,9	12 ,8	76,1	HPAE	285,5

Le **Tableau 05** présente les données pluviométriques mensuelles de la station de Zenâta pour la période de 2004 à 2024, mesurées en millimètres (mm). On remarque que Les mois les plus pluvieux sont novembre (110,7 mm), décembre (38,1 mm) et janvier (43,4 mm). Et Les mois les moins pluvieux sont juillet (2,4 mm), et août (3,4 mm). Ces mois correspondent à la saison estivale.

- Le **Tableau 05** regroupe les données par saisons, L’Hiver (H) c'est la saison la plus pluvieuse, le printemps (P), l’automne (A), puis l’été (E) qu’est la saison la moins pluvieuse.
- Le type de climat est indiqué par HPAE, ce qui peut correspondre à un climat à dominance hivernale, avec des précipitations concentrées en hiver et en automne.
- La moyenne annuelle est de 285,5 mm, indiquant un climat semi-aride à tendance méditerranéenne, caractérisé par une sécheresse estivale et des pluies concentrées en automne et en hiver.

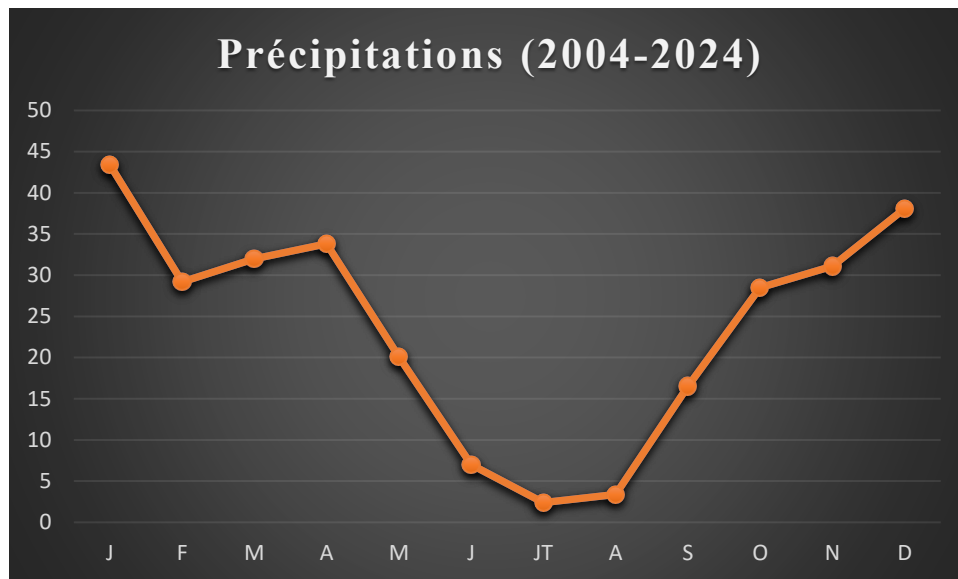


Figure 59. Variations mensuelles des précipitations pour la station de Zenâta (Tlemcen)

d. Températures

La température constitue le second facteur essentiel du climat, influençant directement le développement des espèces végétales et animales. Les températures moyennes annuelles jouent un rôle déterminant dans le degré d'aridité d'un climat. Toutefois, ce sont principalement les températures extrêmes qui impactent les espèces, sauf lorsqu'il s'agit de variations exceptionnelles et de courte durée (**Greco.,1966**).

Tableau 06. Données de températures de la station de Zenâta pour la période (2004-2024) (ONM .,2025)

Moyennes mensuelles des températures (mm)												Moyenne annuelle de température	Moyenne du mois le plus chaud	Moyenne du mois le plus froid
J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D			
11,5	12,4	14,3	16,5	19,8	23,3	26,9	27,5	24,2	20,9	15,8	12,7	18,8	34,3	5,9

L’analyse des caractéristiques thermiques d’un lieu repose généralement sur l’étude des variables suivantes :

- **Température moyenne mensuelle (T)**
- **Température maximale (M)**
- **Température minimale (m)**

La température joue un rôle fondamental dans le déroulement des processus biologiques, influençant la croissance, la reproduction et la survie des espèces. Par conséquent, elle conditionne leur répartition géographique et contribue à la diversité des paysages (Soltner., 1987).

- **Températures moyennes mensuelles**

Les climatologues utilisent fréquemment les moyennes mensuelles ou trimestrielles, car elles fournissent des résultats plus représentatifs et significatifs (Quézel et Médail., 2003). L’analyse des températures moyennes mensuelles révèle que janvier est le mois le plus froid. En revanche, les températures moyennes les plus élevées sont enregistrées en août, notamment pour la station de Zenâta.

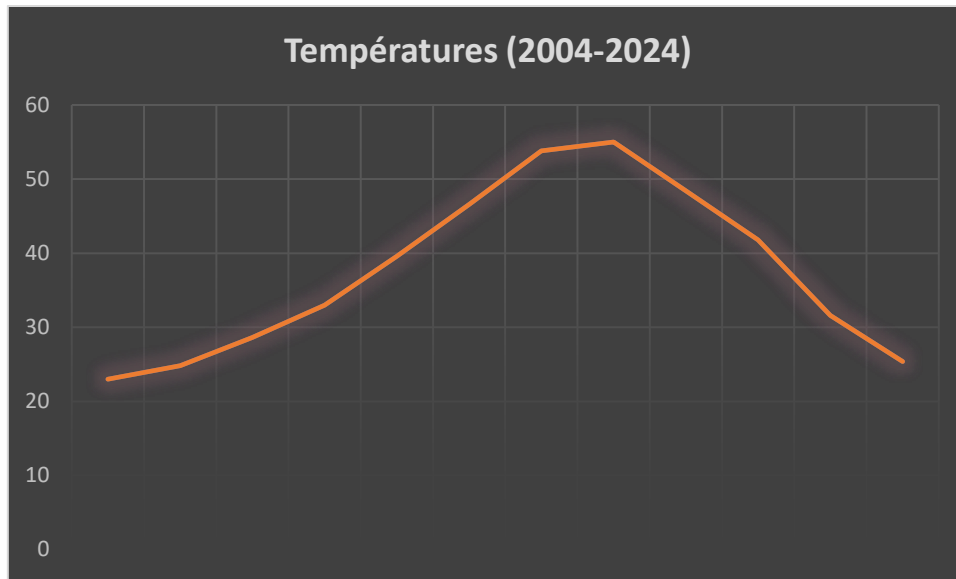


Figure 60. Variations mensuelles des températures pour la station de Zenâta (Tlemcen)

e. Amplitudes thermiques, continentalité

- **Amplitudes thermiques**

Elle est définie par l'écart entre les températures maxima extrêmes et les températures minima extrêmes. Sa valeur revêt une importance écologique majeure, car elle représente la limite thermique maximale et minimale à laquelle les espèces doivent s'adapter et survivre chaque année (Djebaili.,1984).

Indice de continentalité

(Debrach., 1959) a proposé quatre types de climats peuvent être calculés à partir de M et m.

- $M - m < 15^{\circ}\text{C}$: climat insulaire
- $15^{\circ}\text{C} < M - m < 25^{\circ}\text{C}$: climat littoral
- $25^{\circ}\text{C} < M - m < 35^{\circ}\text{C}$: climat semi continental
- $M - m > 35^{\circ}\text{C}$: climat continent

Pour la période de (2004-2024) la station de Zenâta a estimé une valeur de $34,3^{\circ}\text{C}$ comme température maximale « M » et $5,9^{\circ}\text{C}$ comme température minimale « m » :

$$34,3 - 5,9 = 28,4^{\circ}\text{C}$$

Donc la station de Zenâta a un climat semi continental avec une amplitude thermique de 28,4 °C.

II-2- Synthèse bioclimatique

L'une des préoccupations majeures des phytogéographes, climatologues et écologues est d'analyser et d'exploiter les données climatiques disponibles afin d'identifier des indicateurs capables de refléter de manière globale et pertinente l'interaction des différentes variables climatiques influençant le développement et la répartition des espèces (Djellouli., 1981).

a. Diagrammes ombrothermiques

(Bagnouls et Gaussen., 1954) ont élaboré un diagramme permettant de déterminer la durée de la période sèche en comparant les moyennes mensuelles des températures (en °C) et des précipitations (en mm). Selon leur approche, un mois est considéré comme sec lorsque « P est inférieur ou égal à 2T ».

P : précipitation moyenne du mois en mm

T : température moyenne du mois même en °C.

Pour représenter ces diagrammes, (Bagnouls et Gaussen.,1953) proposent une méthode consistant à tracer sur un même graphique les valeurs de température et de pluviométrie, en adoptant une échelle où l'unité des températures est le double de celle des précipitations. Une période est considérée comme sèche lorsque la courbe des précipitations se situe en dessous de celle des températures (**Figure 61**).

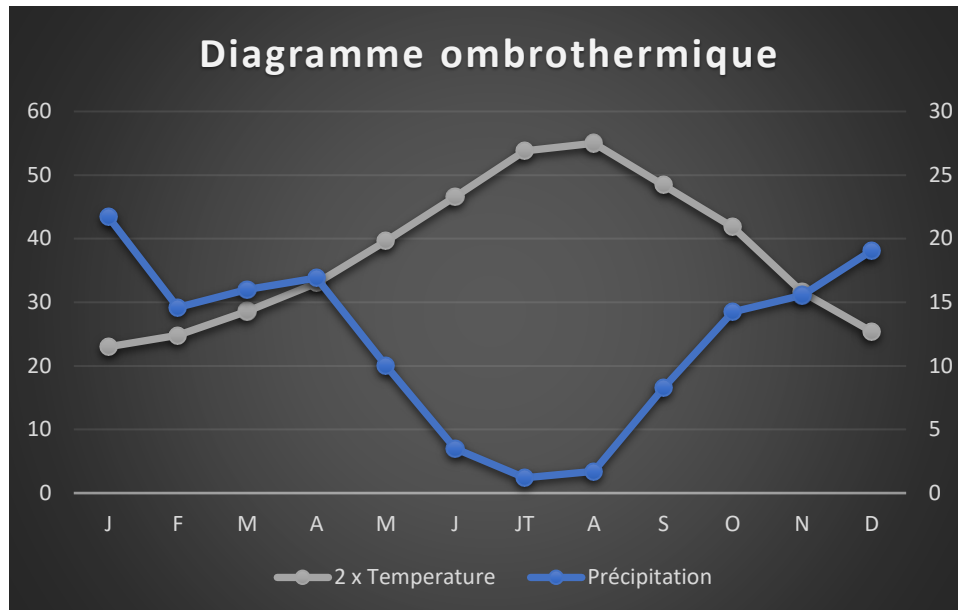


Figure 61. Diagramme Ombrothermique de la station Zenata (2004-2024).

L'interprétation de la courbe ombrothermique nous montre qu'il y a 7 à 8 mois de sécheresse qui s'étale d'Avril jusqu'à Novembre pour la période (2004-2024) de la station météorologique de Zenâta qu'elle est à proximité de notre lieu expérimentale El fehoul.

b. Indice d'aridité de De Martonne

En 1926, De Martonne a proposé un indice permettant de quantifier l'aridité du climat en associant les précipitations moyennes annuelles aux températures moyennes annuelles. Cet indice permet d'évaluer l'intensité de la sécheresse et s'exprime par la relation suivante :

$$I = P / (T + 10)$$

P : Pluviométrie moyenne annuelle (mm)

T : Température moyenne annuelle (C°)

$$I = 285,5 / (18,8 + 10)$$

Donc : **I = 9,91 mm/ C°**

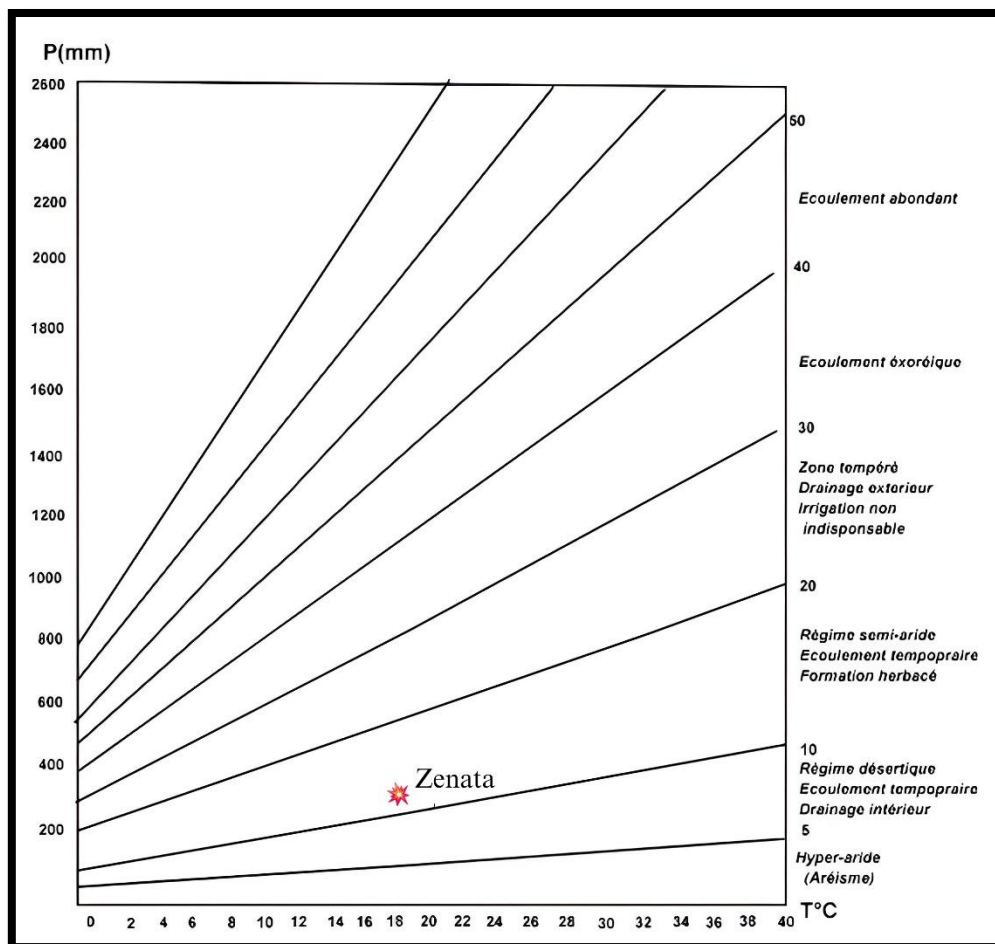


Figure 62. Graphique d'indice de De Martonne (2004-2024)..

En se basant sur l'interprétation du graphique d'indice de De Martonne, la région de Zenâta se situe dans la catégorie du régime semi-aride, qui se caractérise par une prédominance de formation végétale herbacées, un écoulement temporaire lié aux périodes de précipitations, les cultures nécessitent des méthodes comme l'irrigation pour prospérer.

c. Quotient pluviothermique D'EMBERGER

Emberger (1930, 1955) a développé un quotient pluviothermique, noté **Q2**, spécifiquement conçu pour caractériser le climat méditerranéen. Cet indice, largement utilisé en Afrique du Nord, permet de déterminer l'ambiance bioclimatique des stations étudiées. Une valeur faible de **Q2** indique un climat plus aride.

La formule initiale du quotient **Q2** d'Emberger a été modifiée par Sauvage et Daget (1963) et s'exprime selon la relation suivante :

$$Q_2 = \frac{2000P}{(M+m)(M-m)} = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

P : Pluviosité moyenne annuelle

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud ($T+273K^\circ$)

m : Moyenne des minimas du mois le plus froid ($T+273K^\circ$)

Pour la région de Zenâta :

$$Q_2 = 34,3$$

Sur le Climagramme **D'EMBERGER (1933)**, la station de Zenâta s'agence en ordonnées selon le gradient d'aridité du climat (Q_2) d'une part et en abscisse en fonction de la rigueur du froid (m) en C° d'autre part.

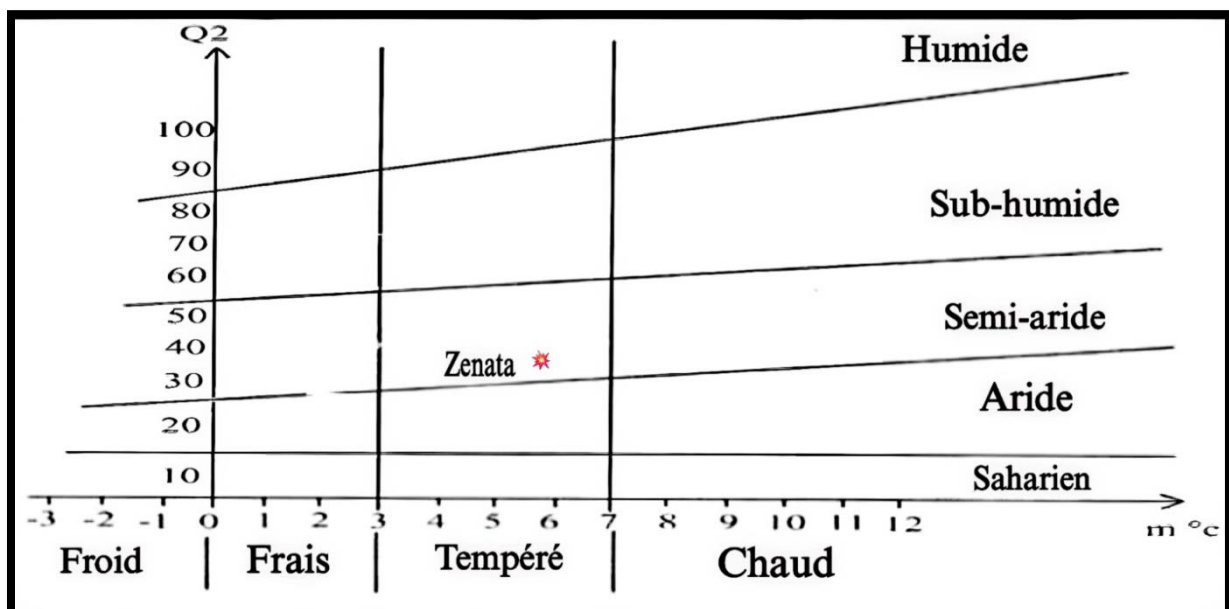


Figure 63. Climagramme pluviothermique d'EMBERGER (2004-2024).

D'après le climagramme pluviothermique d'EMBERGER la station de Zenâta se caractérise par un étage bioclimatique semi-aride inférieur à hiver tempéré doux.

Ces résultats concordent donc avec ceux de (**Lionello et al.,2006**) sur les changements globaux, ils signalent que la région méditerranéenne pouvait être soumise à des variations climatiques complexes.

L'Ouest algérien a connu ces deux dernières décennies une baisse de la pluviométrie. Ce déficit pluviométrique a engendré une sécheresse prolongée et grave. L'exploitation des données a mis en évidence la saison sèche qui s'est débiter en Avril et se prolonge jusqu'à Novembre.

ETUDE *IN SILICO*

I-Introduction

L'Algérie, par sa diversité géographique et climatique, bénéficie d'une richesse végétale exceptionnelle. En effet, le pays abrite une grande variété de plantes qui présentent un potentiel considérable pour diverses applications, notamment en agriculture. Parmi leurs multiples propriétés, l'une des plus prometteuses réside dans leur capacité à agir comme bio-nématicides, grâce aux huiles essentielles qu'elles produisent. Ces huiles, extraites de différentes plantes, offrent des solutions naturelles et écologiques pour lutter contre les nuisibles qui menacent les cultures agricoles, et cela sans recourir à des produits chimiques potentiellement nocifs pour l'environnement.

Dans ce cadre, le développement rapide des technologies informatiques et des outils de modélisation moléculaire a ouvert de nouvelles perspectives dans les domaines de la recherche biologique et pharmaceutique. La modélisation moléculaire, en particulier, est devenue un outil clé pour explorer et comprendre les mécanismes d'action des composés bioactifs des plantes, permettant ainsi d'identifier des substances ayant un potentiel thérapeutique ou phytosanitaire. En combinant la richesse de la biodiversité algérienne et les avancées technologiques, il devient possible d'identifier des solutions innovantes pour la gestion des cultures, en réduisant l'usage des produits chimiques.

L'objectif de ce travail est de mettre en lumière un nématicide naturel, extrait des huiles essentielles de plantes largement répandues dans l'ouest de l'Algérie. Ce nématicide a pour but de contrôler la population du nématode *Tylenchulus semipenetrans*, un parasite majeur des agrumes, tout en minimisant les impacts négatifs sur l'écosystème local.

Dans ce contexte, ce chapitre propose une approche en deux étapes. Tout d'abord, nous présenterons le matériel végétal utilisé dans cette étude, en identifiant les principes actifs présents dans les huiles essentielles des plantes sélectionnées. Ensuite, ces substances seront étudiées à travers des simulations *in silico* pour évaluer leur efficacité en tant qu'inhibiteurs du nématode.

Grâce aux outils informatiques de modélisation moléculaire, nous avons pu identifier un inhibiteur potentiel du *Tylenchulus semipenetrans*, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles méthodes de gestion biologique des nuisibles.

II-Modélisation moléculaire

Dans le cadre de cette étude, nous réaliserons des expériences *in silico* afin d'identifier les complexes enzyme-ligand les plus prometteurs, susceptibles de constituer des inhibiteurs efficaces de l'enzyme responsable de la synthèse des acides gras chez le *Tylenchulus semipenetrans*. La perturbation de cette enzyme, l'acétyl-CoA carboxylase, altère la biosynthèse de la couche superficielle. Pour ce faire, nous recourrons à des outils informatiques avancés, en particulier à des techniques de modélisation moléculaire telles que l'amarrage moléculaire (Docking) et la dynamique moléculaire, qui sont désormais des instruments essentiels dans la recherche biologique.

II-1-Généralité

La recherche de nouveaux composés chimiques et leur synthèse sont aujourd'hui fréquemment associées à des études par modélisation moléculaire. Cette approche consiste à représenter les réactions et les propriétés chimiques, ainsi qu'à manipuler des modèles de structures en deux ou trois dimensions (**Fayet., 2010**). Elle constitue une discipline clé de la chimie théorique, qui intègre l'intelligence artificielle et les sciences des données pour répondre aux défis actuels de la société et de l'innovation en chimie.

La modélisation moléculaire est un outil scientifique multidisciplinaire, essentiel tant pour des domaines fondamentaux (tels que la chimie et la biologie) que pour des domaines appliqués (comme la pharmacie et les ingénieries). Il s'agit de l'application de méthodes de calcul théorique permettant d'étudier la réactivité chimique et la structure moléculaire, afin de simuler le comportement d'un système moléculaire, tant de manière dynamique que statique (**Debord., 2004**).

L'utilisation de ces méthodes est justifiée par la possibilité de réaliser des études préparatoires, généralement peu coûteuses et rapides par rapport à la méthode expérimentale, qui est plus onéreuse. Cette approche permet ainsi d'éviter les gaspillages et les mauvaises gestions, tout en réduisant la durée des expériences.

Ces méthodes connaissent un développement et une utilisation croissants, grâce à plusieurs avancées majeures :

1. **L'amélioration des outils informatiques**, qui a permis l'intégration des concepts de chimie théorique dans des algorithmes capables d'exécuter des calculs numériques complexes (tels que les calculs de minimisation et de dynamique moléculaire) et de stocker les données générées (**Frinkel et Smit., 2002**).
2. **L'élucidation des structures tridimensionnelles de nombreuses protéines**, rendue possible par les progrès de la génomique, des techniques de cristallisation et de la résolution structurale par diffraction des rayons X. Cette avancée a permis la réalisation de simulations visant à comprendre les interactions de ces biomolécules, entre elles ou avec de petites molécules, et a ainsi contribué à expliquer un grand nombre de phénomènes chimiques, biologiques et biochimiques (**Mala et Tekenchi., 2008**).

Les méthodes de modélisation moléculaire peuvent être classées en trois catégories selon le niveau théorique ou le type de calcul qu'elles utilisent (**Audouze., 2003**) :

- La mécanique moléculaire (MM)
- La mécanique quantique (MQ).
- Le Docking moléculaire.
- La dynamique moléculaire (DM).

II-2-Mécanique moléculaire (MM)

La mécanique moléculaire repose sur l'application des lois de la physique classique pour prédire les structures et propriétés des systèmes moléculaires étudiés, telles que l'énergie. Il s'agit d'une méthode empirique distincte des approches quantiques (**Chaquin., 2000**), également appelée calcul par champ de force, car elle repose sur un modèle mathématique qui décrit l'énergie potentielle d'une molécule dans le cadre de la mécanique moléculaire (**Jensen., 2007**).

II-3-Mécanique quantique (MQ)

Les différentes méthodes de mécanique quantique considèrent la distribution des électrons répartis en orbitales autour de la molécule. Ces méthodes nécessitent des calculs souvent longs, limitant ainsi leur application aux petites molécules ou requérant plusieurs approximations. Elles sont particulièrement adaptées au calcul des charges et des potentiels électrostatiques, à l'étude de la polarisabilité, ainsi qu'à l'analyse des mécanismes réactionnels.

L'objectif principal de la mécanique quantique est de déterminer l'énergie et la distribution électronique (**Hermann., 2006**).

La chimie quantique décrit la structure moléculaire comme un noyau autour duquel gravitent des électrons, lesquels sont représentés par leur probabilité de présence en un point donné et par leurs orbitales (**Boyd et al., 1982**).

II-4-Docking moléculaire

Le Docking moléculaire est une méthode qui prédit la conformation (position et orientation relatives) la plus favorable de deux molécules en interaction, formant un complexe stable. Connaître cette conformation préférentielle permet ensuite d'estimer la force d'association (affinité de liaison) entre ces deux molécules. Actuellement, plusieurs programmes de Docking moléculaire existent, et leur protocole suit deux étapes complémentaires :

- La première étape (Docking) consiste à placer le ligand dans le site actif de la protéine et à explorer les conformations, positions et orientations possibles (poses) de ce dernier (**Sohayb et al., 2025**).
- La seconde étape (scoring) permet de classer ces poses en évaluant l'affinité entre le ligand et la protéine, en attribuant un score à chaque pose obtenue lors de la phase de Docking. Ce score permet de retenir la meilleure pose parmi toutes celles proposées (**Boucherit., 2012**).

L'objectif du Docking moléculaire est de déterminer le mode d'interaction d'un complexe constitué de deux ou plusieurs molécules, en recherchant les orientations spatiales et les conformations les plus favorables pour la fixation d'un ligand à un récepteur (**Mekelleche., 2001**).

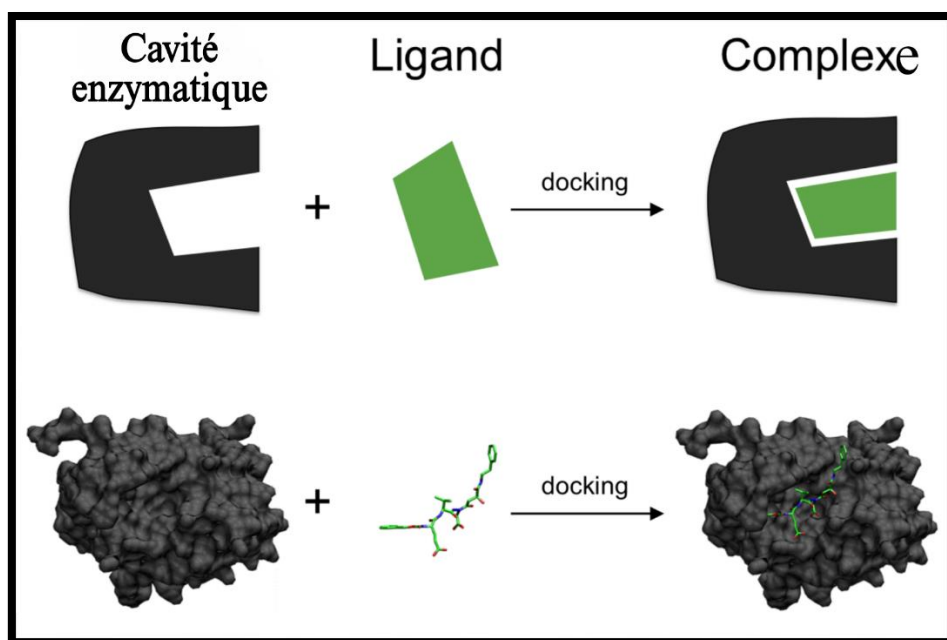


Figure 64. Complexe Enzyme- ligand (Web 32)

II-5- Dynamique Moléculaire (DM)

La dynamique moléculaire (DM) est une technique de simulation qui modélise la matière à l'échelle atomique en simulant le mouvement des atomes au cours du temps, en fonction de leurs interactions mutuelles et des équations dynamiques correspondantes. L'un des principaux avantages de la DM réside dans sa capacité à restituer la physique des phénomènes sans nécessiter de modèles spécifiques à ces phénomènes. Grâce à cette caractéristique, elle est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment :

- En chimie, pour la découverte de nouvelles molécules ou pour comprendre les interactions entre différentes molécules.
- En biologie, pour étudier le repliement des protéines et leurs interactions potentielles.
- En physique de la matière condensée, pour analyser la structure de la matière.

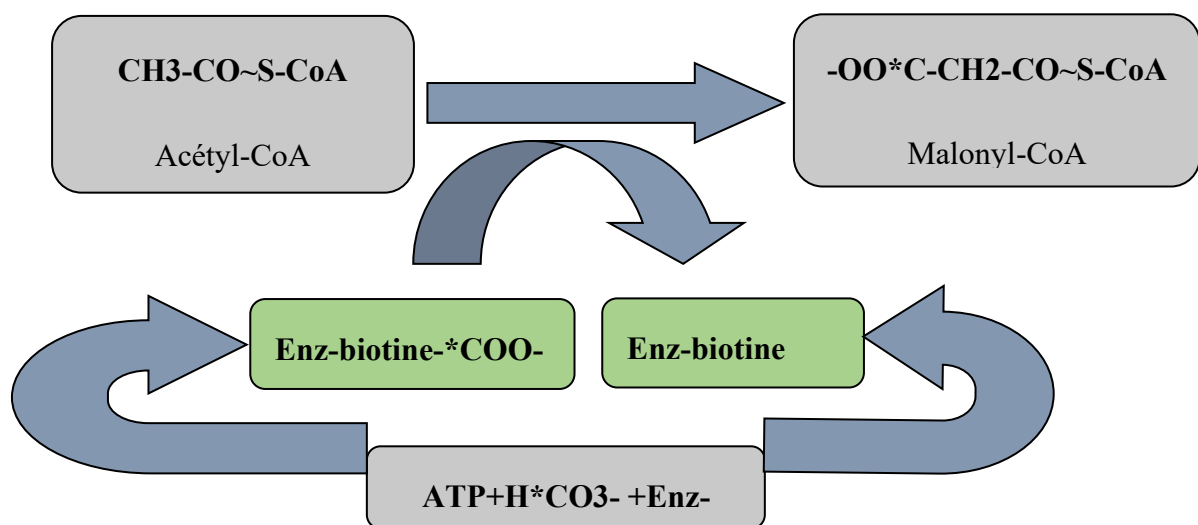
Toutefois, un des défis majeurs réside dans la description précise des interactions entre atomes. Le développement des supercalculateurs a favorisé la croissance de la DM, car ces simulations nécessitent des ressources de calcul considérables. Le coût des calculs dépend du nombre d'atomes simulés et du type de potentiel utilisé. L'intérêt principal de la dynamique moléculaire est de permettre l'étude du comportement de la matière en ne se basant que sur le calcul des forces interatomiques (Babilotte., 2024).

III-Acétyl-CoA Carboxylase (ACC)

III-1-Présentation de l'Acétyl-CoA Carboxylase (ACC)

L'acétyl-CoA carboxylase (ACC) est une enzyme largement présente chez les êtres vivants. Elle joue un rôle crucial dans la première étape de la biosynthèse des acides gras. La synthèse des acides gras est essentielle au développement et à la survie des plantes. L'ACC catalyse la formation du malonyl-CoA en condensant une molécule d'acétyl-CoA avec une molécule de CO₂, en utilisant la biotine comme cofacteur et en présence d'ATP. Le malonyl-CoA est le premier précurseur de la biosynthèse des acides gras à chaîne ramifiée (Duhoux.,2011).

La synthèse du malonyl-CoA se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, la biotine est carboxylée, ce qui nécessite l'ATP. Ensuite, le groupement carboxyle est transféré de la biotine à l'acétyl-CoA, formant ainsi le malonyl-CoA (Murray et al., 2000).



Enz = acétyl-CoA carboxylase,

* = groupement carboxyle

Figure 65. Biosynthèse du malonyl-CoA (Murray et al.,2000).

L'activité de l'acétyl-CoA carboxylase (ACC) est principalement régulée par le statut énergétique global d'une cellule, qui à son tour est modulé par des signaux nutritionnels. La transduction du signal est médiée par la protéine kinase activée par l'AMP (AMPK), qui, en période de jeûne (caractérisée par une forte concentration d'AMP, une faible insuline et une faible concentration d'ATP), maintient l'ACC sous forme phosphorylée, ce qui la rend inactive. En revanche, lors d'une charge énergétique élevée (avec un faible taux d'AMP, un taux élevé d'ATP et d'insuline), en présence d'une abondance de nutriments, l'AMPK devient inactive, entraînant une augmentation de la proportion d'ACC déphosphorylé, ce qui favorise la synthèse accrue de malonyl-CoA (Berg et al., 2002 ; Gutbrod et al., 2018).

III-2-Rôle de l'Acétyl-CoA Carboxylase chez les Nématodes : Cas du *Tylenchulus semipenetrans*

L'inhibition de l'ACC perturbe la formation de la couche de surface des nématodes. Cette couche sous-cristalline, qui contient des acides gras à très longue chaîne (AGTLC), joue probablement plusieurs rôles, notamment en formant une barrière physique qui protège le nématode contre le stress environnemental et en contribuant à ses interactions avec d'autres organismes (Brown et al., 1971 ; Davis et Curtis., 2011). L'inhibition de l'ACC, en réduisant la synthèse de malonyl-CoA, empêche la formation des acides gras à très longue chaîne (VLCFA), perturbant ainsi la formation de cette couche de surface. Par conséquent, les stratégies de lutte contre les nématodes sur le terrain peuvent également résulter d'effets indirects liés à la modification des interactions biotiques ou à la perte de cette barrière de protection (Gutbrod et al., 2018).

IV- Matériel et méthodes

IV-1-Matériel informatique

Le matériel utilisé pour l'amarrage moléculaire se compose d'un ordinateur de bureau avec les spécifications suivantes : 16 Go de RAM, un processeur AMD Ryzen 53600XT 12 cœurs et un disque dur de 1 To, tous connectés à Internet et exécutant Windows 10 (64 bits). Pour les simulations de dynamique moléculaire, Ubuntu a également été utilisé sur le même ordinateur. Les serveurs utilisés comprennent la banque de données des protéines (PDB), PubChem, SwissADME et l'interface graphique OpenBabel, PyMOL version 2.5.4, HyperChem 8.0.10, AutoDock version 4.2.6, Biovia Discovery Studio, CHARMM-GUI, GROMACS version 5.1.2 et Grace comme logiciels. L'étude a impliqué du spirotetramat

comme pesticide chimique, de la biotine comme ligand de référence (Co-cristallisation) et divers ligands d'essai, qui sont des principes actifs extraits des plantes sélectionnées.

IV-2-Matériel végétal

L'Algérie se distingue par une flore exceptionnellement riche et variée, qui inclut des espèces méditerranéennes, sahariennes, et des plantes issues d'une flore paléotropicale. Avec un total estimé à plus de 3000 espèces végétales appartenant à une multitude de familles botaniques, cette diversité est remarquable (**Tehami., 2017**). Pour valoriser cette richesse botanique algérienne, Dans le cadre de la lutte biologique contre les nématodes des citrus les efforts se sont concentrés sur les huiles essentielles des espèces présentent dans l'Algérie occidentale.

La technique consiste à extraire des ligands à partir des huiles essentielles (principes actifs) de ces plantes aromatiques pour lutter contre les différents ravageurs de cultures. Les avantages de cette méthode consistent en une spécificité absolue d'absence de toxicité et en une efficacité importante dans le cadre de la protection des cultures.

IV-2-1-Les huiles essentielles

a. Généralités

Depuis l'Antiquité, les plantes ont joué un rôle central dans la vie humaine. Elles étaient utilisées pour leurs vertus esthétiques, médicinales et agricoles. Cependant, pendant des siècles, les connaissances sur ces plantes étaient principalement empiriques, basées sur l'observation et la transmission de savoirs populaires, mais sans véritable compréhension scientifique de leurs effets (**Pierron., 2014**).

Ce n'est qu'au Moyen Âge que les découvertes liées aux huiles essentielles commencent à émerger. Grâce aux premières distillations, les alchimistes et médecins de l'époque ont réussi à extraire les essences concentrées de certaines plantes, marquant ainsi une avancée significative dans la compréhension de leurs propriétés.

Puis à partir du XIXe siècle, avec l'avènement de la chimie moderne, la véritable nature des huiles essentielles a vu le jour. Les recherches scientifiques ont permis d'identifier les molécules bioactives présentes dans ces huiles, d'étudier leurs propriétés et de comprendre leurs mécanismes d'action et leur capacité à agir sur de nombreux

systèmes biologiques. De nombreuses études ont révélé l'efficacité de certaines huiles essentielles dans le domaine de l'agriculture, notamment pour leurs propriétés antifongiques, insecticides et répulsives (**Bergman., 2014**).

La chimie a ainsi transformé l'aromathérapie d'une pratique empirique et instinctive en une discipline fondée sur des bases scientifiques solides.

b. Définition

Les huiles essentielles, ou essences végétales (en latin : *essentia*, « la nature des choses »), sont des produits odorants, généralement de composition complexe, obtenus à partir d'une matière première végétale botaniquement définie, soit par entraînement par la vapeur d'eau, soit par distillation sèche, ou par un procédé mécanique approprié sans chauffage (**Herbarom., 2023**)

Les huiles essentielles sont localisées dans toutes les parties vivantes des plantes (fleurs, feuilles, écorces, arbres, racines, rhizomes, fruits ou graines) et prédomine dans les parties supérieures (fleurs et feuilles). Elles sont produites dans le cytoplasme des cellules sécrétoires et sont généralement situées à leur surface et s'accumulent dans des cellules glandulaires spécialisées recouvertes par l'épiderme (**Herzi., 2013**).

Ce sont des substances hydrophobes, qui contiennent des composés aromatiques volatils. Ces composés, issus du métabolisme secondaire des plantes, présentent des caractéristiques physicochimiques spécifiques et jouent un rôle important dans la mise en évidence des propriétés pharmacologiques conférées aux plantes (**Soualeh et al., 2016**).

c. Propriétés physico-chimiques des huiles essentielles

Les huiles essentielles se présentent généralement sous forme de liquides incolores ou jaune pâle à température ambiante. Elles sont volatiles, dégagent une odeur caractéristique et sont inflammables. Leur densité est souvent inférieure à 1. Ces huiles sont peu solubles dans l'eau, mais se dissolvent bien dans les alcools et la majorité des solvants organiques. Elles sont également susceptibles de se dégrader et sont particulièrement sensibles à l'oxydation (**Jacques Paltz., 1997**).

d. Activité biologique des huiles essentielles

Les plantes aromatiques possèdent diverses activités biologiques, telles que des effets fongicides, insecticides, herbicides, bactéricides, et bien d'autres.

Les huiles essentielles sont connues pour être douées de propriétés antiseptiques et antimicrobiennes. Beaucoup d'entre elles, ont des propriétés antitoxiques, antivenimeuses, antivirales, anti-oxydantes, et antiparasitaires. Plus récemment, on leur reconnaît également des propriétés anticancéreuses (**Lahlou ., 2004**).

L'activité biologique d'une huile essentielle dépend de sa composition chimique ainsi que des éventuels effets synergiques entre ses différents composants. Sa valeur réside dans l'ensemble de ses constituants et pas seulement dans ses composés majoritaires.

e. Méthodes d'extraction des huiles essentielles

Il est possible d'obtenir les huiles essentielles via 7 modes de production :

- **L'hydrodistillation**

Il s'agit de la méthode la plus ancienne et la plus simple d'extraction des huiles essentielles. Dans ce procédé, le matériel végétal est plongé directement dans un alambic contenant de l'eau, qui est ensuite chauffée jusqu'à ébullition. Les vapeurs générées sont condensées dans un réfrigérant, permettant à l'huile essentielle de se séparer de l'hydrolat en raison de la différence de densité. Comme l'huile essentielle est généralement plus légère que l'eau, elle flotte au-dessus de l'hydrolat (**Lucchesi., 2005**).

Bien que cette méthode entraîne une plus grande hydrolyse que la distillation à la vapeur, elle reste efficace pour extraire des huiles essentielles de produits difficiles à distiller, tels que la rose, l'encens ou la myrrhe (**Herbarom., 2023**).

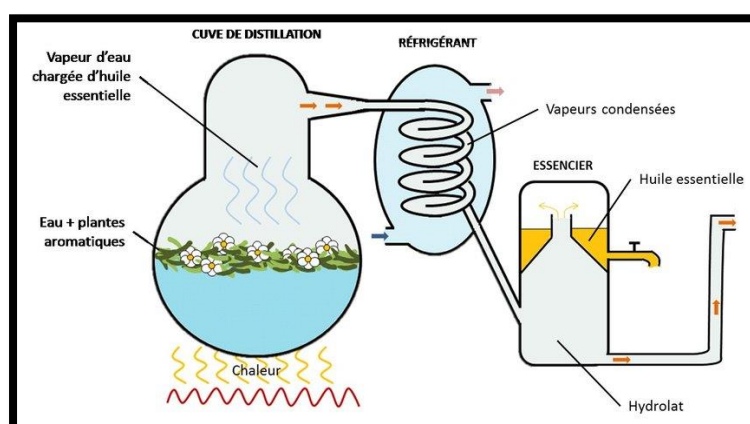


Figure 66. Extraction des huiles essentielles par hydrodistillation (**Labadie., 2015**)

- **La distillation à la vapeur**

Contrairement à l'hydrodistillation, cette méthode ne met pas en contact direct l'eau et la matière végétale. De la vapeur d'eau, générée par une chaudière, traverse la matière végétale placée au-dessus d'une grille. La vapeur endommage les cellules végétales, libérant ainsi les molécules volatiles, qui forment un mélange d'eau et d'huile essentielle. Ce mélange est ensuite dirigé vers un condenseur et un essencier, où il est séparé en une phase aqueuse et une phase organique, l'huile essentielle. L'absence de contact direct entre l'eau et la matière végétale, ainsi qu'entre l'eau et les molécules aromatiques, prévient certains phénomènes d'hydrolyse ou de dégradation qui pourraient altérer la qualité de l'huile (**Lucchesi., 2005**). Ce procédé convient à quasiment toutes les plantes ou parties de plantes, comme celles de la lavande, du lavandin, de la camomille, de l'immortelle, du géranium, de l'eucalyptus (**Herbarom., 2023**).

- **L'expression à froid**

Ce procédé mécanique, permet d'extraire non seulement des molécules volatiles, mais aussi des composés non-volatils. Il est spécifiquement utilisé pour les épicarpes des agrumes. Le processus repose sur la rupture des péricarpes, qui sont les réservoirs des essences olfactives, en faisant passer les agrumes sur des récipients recouverts de pics métalliques. Cela libère l'essence, qui est ensuite récupérée par un courant d'eau avant d'être décantée (**Pierron., 2014**). Cependant, l'utilisation de l'eau peut entraîner des risques d'hydrolyse, de contamination par des pesticides résiduels ou par des micro-organismes. Une méthode plus récente propose d'ouvrir les sacs oléifères par éclatement, soit sous l'effet d'une dépression, soit par abrasion de l'écorce fraîche, ce qui permettrait d'éliminer l'eau et de réduire les effets d'oxydation des composés présents dans les essences (**Herbarom., 2023**).

- **L'Hydrodiffusion**

Cette méthode consiste à pulvériser de la vapeur d'eau à travers la masse végétale dans un flux descendant, contrairement aux techniques traditionnelles de distillation où la vapeur monte. L'avantage de cette approche réside dans l'amélioration tant qualitative que quantitative de l'huile obtenue, tout en permettant des économies de temps, de vapeur et d'énergie (**Bassereau et al., 2007**).

- **Extraction par solvants**

L'extraction par solvant consiste à placer la matière végétale et un solvant volatil dans un extracteur. Par des lavages successifs, le solvant se charge en molécules aromatiques, puis il est envoyé vers un concentrateur où il est distillé à pression atmosphérique. Le produit obtenu à cette étape est appelé "concrète". Cette concrète peut ensuite être mélangée avec de l'alcool absolu, filtrée et glacée pour séparer les cires végétales. Après une dernière étape de concentration, on obtient une "absolue".

- Les rendements de cette méthode sont généralement plus élevés que ceux de la distillation.
- L'utilisation de solvants organiques peut entraîner des risques d'artéfacts et des contaminations par des impuretés difficiles à éliminer.
- Les solvants couramment utilisés pour cette méthode incluent le méthanol, l'éthanol, l'éther de pétrole et le dichlorométhane.
- Cette technique d'extraction a récemment été améliorée par l'utilisation de micro-ondes et d'ultrasons (BENOUALI., 2016).

- **Extraction par micro-ondes**

Le procédé d'extraction par micro-ondes, appelé Solvent-Free Microwave Extraction (SFME), consiste à extraire l'huile essentielle en utilisant des micro-ondes à énergie constante, couplées à une séquence de mise sous vide. Cette technique sans solvant a été développée principalement pour les applications en laboratoire, permettant l'extraction d'huiles essentielles de plantes aromatiques. Elle combine le chauffage par micro-ondes et une distillation à pression atmosphérique.

Le principe de base est simple : le matériel végétal est placé dans un réacteur à micro-ondes, sans ajout de solvant organique ni d'eau. Le chauffage de l'eau contenue dans la plante entraîne la rupture des glandes renfermant l'huile essentielle. Cette rupture libère l'huile, qui est ensuite entraînée par la vapeur d'eau générée par le végétal. Un système de refroidissement extérieur au four micro-ondes permet la condensation du distillat, qui se compose d'eau et d'huile essentielle. Ce mélange est ensuite facilement séparé par décantation (Lucchesi et al., 2004).

- **Extraction par les corps gras**

La méthode d'extraction par les corps gras, utilisée principalement en fleurage, est idéale pour traiter les parties fragiles des plantes, comme les fleurs, qui sont particulièrement sensibles à la chaleur. Cette technique exploite la solubilité des composés odorants des végétaux dans les corps gras. Le procédé consiste à placer les fleurs en contact avec un corps gras afin de le saturer avec leur essence végétale. Le produit obtenu, une pommade florale, est ensuite extrait à l'aide d'un solvant, qui est éliminé par évaporation sous pression réduite. Cette méthode se décline en deux variations : l'enfleurage, où la saturation du corps gras en arômes se fait par diffusion à température ambiante, et la digestion, qui consiste à immerger les organes végétaux dans le corps gras à chaud (Lawrence., 1995).

IV-2-2-Plantes étudiées

Notre étude est basée sur le principe actif inclus dans des huiles essentielles des espèces de plantes suivantes.

a. *Ammoides verticillata*

Ammoides verticillata, connue sous le nom de Nounkha ou Nûnkha en Algérie, C'est une plante aromatique appartenant à la famille des Apiaceae, présente principalement en Afrique du Nord et en Asie, notamment dans les pelouses, les zones montagneuses et les forêts (Quézel et Santa, 1963). Elle est largement distribuée dans l'ouest de l'Algérie (Abdelli et al., 2020). C'est une plante médicinale annuelle, à tiges ramifiées mesurant entre 10 et 40 cm, avec un cycle de croissance tardif qui s'étend de mai à juillet (Felidj et al., 2010).



Figure 67. *Ammoides verticillata*
(Senouci., 2020)

Elle se distingue par sa tige creuse, ses feuilles alternes et découpées en folioles, ainsi que par ses inflorescences en ombelles typiques de la famille des Apiacées. Les

fleurs sont petites, généralement blanches ou jaunâtres, avec 5 pétales et 5 étamines, et un ovaire infère à deux carpelles. L'ovaire possède deux styles qui se terminent par un coussinet nectarifère. Les fruits, secs, sont des schizocarpes, se divisent en deux à maturité, chaque partie contenant une graine, et présentent une grande diversité de formes externes, notamment des crochets, des épines, des protubérances ou des poils, utiles pour la détermination des espèces. En médecine traditionnelle, cette plante est utilisée pour traiter diverses affections telles que la fièvre typhoïde, les douleurs gastriques, l'asthme et les maladies broncho-pulmonaires, par ses propriétés antispasmodiques et dépuratives.

L'huile essentielle de *Ammoides verticillata* possède également des propriétés antioxydantes, antibactériennes et antivirales, attribuées à sa richesse en composés phénoliques comme le thymol et le carvacrol (Knobloch et al., 1989).

b. Foeniculum vulgare

Foeniculum vulgare est une plante vivace, parfois bisannuelle, appartenant à la famille des Apiacées (ombellifères). Elle peut atteindre une hauteur de 1,5 à 2,5 mètres et présente un port léger. Ses racines fusiformes sont généralement bifides. Les feuilles basales, finement divisées, sont composées de lanières filiformes, très longues, tandis que les feuilles supérieures possèdent une gaine plus longue que le limbe.



Figure 68. *Foeniculum vulgare* (web 03)

Les tiges, cannelées et brillantes, portent des fleurs jaunes regroupées en ombelles plates de 7 à 10 cm, constituées de 5 pétales arrondis et enroulés, sans sépales. Ces fleurs, qui apparaissent généralement en août-septembre, dégagent un parfum distinctement anisé. Le fruit est constitué de deux akènes ovoïdes, rainurés par cinq côtes (Beloued., 1998).

c. *Daucus carota*

Daucus carota, communément appelée carotte sauvage, est une plante herbacée de la famille des Apiaceae (MNHN & OFB., 2003),

généralement annuelle mais parfois bisannuelle. Elle peut atteindre jusqu'à 50 cm de hauteur à l'état végétatif et jusqu'à 150 cm lors de la floraison (Zhenghao Xu, Le Chang., 2017).



Figure 69. *Daucus carota* (web 24)

Sa racine pivotante est conique à cylindrique, avec de nombreuses racines secondaires fibreuses. La tige est solide, striée et hispide, parfois ramifiée en partie supérieure, et traverse la plante avec des canaux sécréteurs, surtout dans la hampe florale (G. J. H. Grubben., 2004) Les feuilles basales sont pennées, formées de folioles linéaires ou lancéolées, tandis que les feuilles caulinaires sont plus petites et minces (Valérie Boutin et al., 2015).

Les fleurs blanches ou roses, regroupées en ombelles denses, sont souvent accompagnées d'une petite fleur rouge ou bordeaux au centre. Le fruit, un diakène oblong-ovoïde, se divise à maturité en deux méricarpes, dont la surface est couverte de côtes et d'épines qui facilitent la dispersion des graines. Ces fruits se dispersent progressivement selon l'humidité, un mécanisme qui augmente les chances de germination dans un environnement propice (Arvy et Gallouin., 2015).

d. *Daucus maritimus*

Daucus maritimus est une plante herbacée de la famille des Apiaceae, elle est bisannuelle et atteint généralement une hauteur de 30 à 40 cm. Ses rameaux sont étalés-dressés et ses feuilles sont molles, les inférieures étant oblongues et bipennatiséquées, avec des segments lancéolés ou linéaires.



Figure 70. *Daucus maritimus* (web25)

Les fleurs de cette plante sont petites, blanchâtres ou rougeâtres, avec une ombelle modeste composée de 10 à 15 rayons grêles et dressés, qui ne se courbent pas en dedans. L'involucelle est formée de folioles linéaires-acuminées, entières et membraneuses. Le fruit de *Daucus maritimus* est ovoïde, avec des aiguillons en alêne non connés, qui sont presque aussi larges que le fruit lui-même. Cette plante se trouve principalement dans les sables du littoral méditerranéen, Sa floraison se produit entre mai et juin. Elle se distingue par son habitat côtier et ses caractéristiques morphologiques uniques qui permettent son identification parmi d'autres espèces de la même famille (web25).

e. Daucus gummifera

Daucus gummifer est une plante bisannuelle ou pérennante, robuste et trapue, mesurant entre 15 et 50 cm de hauteur. Elle possède une racine pivotante et une tige épaisse, ramifiée et recouverte de poils longs (1 à 1,5 mm), raides et sécrétant une gomme-résine lorsqu'elle est coupée.



Figure 71. *Daucus gummifer* (web26).

Ses feuilles sont pennatiséquées, de 2 à 3 divisions, épaissies, vertes et lisses sur la face supérieure, et glauques et velues sur la face inférieure.

Les segments des feuilles, larges de 3 à 5 mm, sont généralement subobtus.

Les ombelles de *Daucus gummifer* sont relativement petites, convexes à la floraison et ont un pédoncule court. Composées de 15 à 30 (parfois 40) rayons inégaux et épais, les ombelles sont entourées de 5 à 9 bractées, divisées, trifides ou entières, et velues. Les ombellules présentent des bractéoles larges et entières, avec des fleurs petites à pétales blanc-jaunâtre. Les pétales externes sont plus rayonnants que les autres.

Le fruit, d'une taille de 2,5 à 3,5 mm, est ovoïde, et chaque méricarpe présente des côtes secondaires armées de petits aiguillons rigides, de couleur blanc-doré, qui s'élargissent à la base et se rejoignent en une crête. L'apex du fruit est glochidique, favorisant ainsi sa dispersion.

Ecologiquement, *Daucus gummifer* se développe sur des rochers ensablés du littoral atlantique et méditerranéen. Sa floraison a lieu entre avril et juin (Castroviejo et al., 2003).

f. *Caucalis maritima* (*Orlaya grandiflora*)

Orlaya grandiflora, communément appelée "White Lace Flower", est une plante herbacée annuelle de la famille des Apiaceae, répartie dans le sud, le centre et l'ouest de l'Europe, dans le bassin méditerranéen, le Caucase, ainsi qu'en Asie centrale et du sud-ouest.



Figure 72. *Caucalis maritima* (web 26)

Cette espèce est souvent considérée comme une mauvaise herbe, mais elle est aussi utilisée comme plante ornementale (Delipavlov., 2011).

Orlaya grandiflora a été étudiée pour ses activités insecticides et pour son action inhibitrice sur la croissance des larves de *Spodoptera littoralis*, un ravageur des cultures (Pavela., 2011).

g. *Thapsia garganica*

Thapsia garganica est une plante médicinale antique contenant des thapsigargines, des composés actifs aux propriétés biologiques importantes, notamment la thapsigargine, reconnue pour son action anticancéreuse ciblant les tumeurs de la prostate.



Figure 73. *Thapsia garganica*

(Chemical Institute of Canada., 2017)

Il s'agit d'une plante vivace robuste, mesurant de 40 à 100 cm de hauteur, avec des feuilles basales disposées en rosette, profondément divisées en lobes étroits, vert foncé sur le dessus et cendrées en dessous (Rasmussen., 1978) (Broegger Christensen et al., 1982). Le reste de la plante est glabre, sans feuilles ni bractées,

les feuilles caulinaires étant réduites à une gaine. Elle pousse sur des sols pierreux et sableux, ainsi que le long des routes du bassin méditerranéen. Les fruits, sont des akènes doubles avec des méricarpes dotés de côtes secondaires élargies en ailes membraneuses. La plante contient également une résine rubéfiante, présente dans de nombreux canaux. La floraison se produit en mai (**Rachid Meddour., 2012**).

h. Ferula communis

Ferula communis, également connue sous le nom de "fenouil géant", est une plante vivace originaire du bassin méditerranéen (**Mamoci et al., 2011**). Bien que plusieurs espèces du genre *Ferula* aient été utilisées dans la médecine traditionnelle, *Ferula communis* est réputée pour sa grande toxicité, tant pour les animaux que pour les humains (**Marchi et al., 2003**).



Figure 74. *Ferula communis* (web 27)

Les extraits de cette plante ont montré de nombreuses propriétés bioactives. Le ferulénol extrait de ses racines et de ses fruits a démontré une activité cytotoxique contre diverses lignées de cellules tumorales humaines (**Bocca et al., 2002**). De plus, cette plante possède des effets antimicrobiens (**Appendino et al., 2004**), anticoagulants (**Monti et al. 2007**) et pourrait provoquer des dysfonctionnements mitochondriaux (**Lahouel et al., 2007**). *Ferula communis* montre également des effets défensifs contre certains herbivores insectes tels que *Spodoptera littoralis* et *Myzus persicae*, ce qui en fait une plante intéressante dans le cadre de la lutte biologique contre certains nuisibles (**Mamoci et al., 2012**).

i. *Daucus crinitus*

Daucus crinitus, un arbuste vivace de la famille des Apiaceae, se distingue par ses ombelles pédonculées, où les rayons sont inégaux, créant une inflorescence caractéristique. Ses feuilles, à contours linéaires, sont divisées en 2 à 3 segments pennatiséqués, dont les folioles sont fines et aigües (Saad et al., 1995).



Figure 75. *Daucus crinitus* (IPNI., 2021)

Le fruit de *Daucus crinitus* est finement pubescent, avec des côtes portant une rangée d'aiguillons mous, souvent teintés de jaune ou de rose (Bendiabdellah., 2014). Les racines de cette plante sont tubéreuses, atteignant une longueur d'environ 6 cm (Lanfranchi et al., 2010).

j. *Phlomis herba-venti*

Phlomis herba-venti, de la famille des Lamiacées, est une plante annuelle caractérisée par une tige très ramifiée et pyramidale, atteignant de 20 à 50 cm de hauteur. Les feuilles inférieures sont lancéolées et pétiolées, tandis que les feuilles supérieures sont lancéolées et linéaires, devenant rapidement sessiles. Le calice présente une dentelure épineuse longue, plus longue que le tube de la fleur (Caroline et al., 2003).



Figure 76. *Phlomis herba-venti* (web 28)

Cette plante se trouve principalement dans la région méditerranéenne occidentale, notamment en Algérie, Tunisie, Maroc, Espagne (Fernández-Ocaña et al., 1996).

Cette plante est connue pour ses propriétés anti-inflammatoires et anti-infectieuses (Jafari Footami et al., 2017).

k. Thymus ciliatus

Le *Thymus ciliatus* est une plante aromatique basse, sous-ligneuse, atteignant environ 40 cm de hauteur. Elle présente de petites feuilles recourbées sur les bords, de couleur vert foncé, couvertes de poils et de glandes sécrétrices d'huile essentielle, principalement composée de monoterpènes (Alcaraz., 1991).



Figure 77. *Thymus ciliatus* (web29)

Ces glandes sont également présentes sur les calices et jeunes tiges, libérant l'essence au contact. Ses fleurs, qui varient du blanc au violet en passant par le rose, sont regroupées en glomérules. Le thym préfère les sols calcaires et argileux, et est souvent trouvé dans les montagnes du bassin méditerranéen, notamment en Algérie où il est appelé Zaïtra, particulièrement autour de la région de Tlemcen. Le *Thymus ciliatus* possède un système racinaire pivotant et se multiplie par rhizome (Quezel et Santa., 1963). Ses fleurs sont grandes, rouge ou violacées, et dépassent 1 cm de long, avec une corolle bilabée et un gynécée composé de deux carpelles soudés. Le fruit est un tétrakène lisse, restant longtemps dans le calice desséché (Soto-Mendivil et al., 2006).

l. Mentha piperita

La menthe poivrée (*Mentha piperita*) est une plante vivace de la famille des Lamiaceae, caractérisée par un rhizome long et rampant, souvent chevelu. Elle atteint une hauteur de 50 à 80 cm, avec une tige dressée ou ascendante, qui se divise en rameaux opposés. Ses feuilles, d'une longueur de 4 à 10 cm, sont ovales, opposées, courtement pétiolées, lancéolées et dentées.



Figure 78. *Mentha piperita* (web30)

Leur couleur varie du vert éclatant aux teintes rougeâtres lorsqu'elles sont exposées au soleil, et rouge cuivré à l'ombre.

Elles sont recouvertes de poils sécréteurs arrondis, dans lesquels s'accumulent les substances volatiles responsables de son odeur caractéristique (**Edrissi., 1982**). Les fleurs, de couleur violacée, se regroupent en épis courts et ovoïdes à l'extrémité des rameaux. Le fruit est divisé en quatre parties, entouré d'un calice persistant. La menthe poivrée se distingue par son odeur puissante et sa saveur piquante, qui lui confèrent une forte capacité rafraîchissante (**Benayad., 2008**).

m. Lavandula dentata

Lavandula dentata, communément appelée lavande frangée, est une plante aromatique vivace de la famille des Lamiacées, que l'on trouve fréquemment à l'état sauvage (**Li et al., 2019**). Elle se distingue par sa forme dressée et très ramifiée, atteignant généralement une hauteur d'environ 1 mètre. Ses feuilles opposées sont allongées, linéaires et dentelées. Elles présentent un côté supérieur gris-vert et un dessous feutré gris (**Bayer et al., 2016**), tandis que les tiges sont ligneuses et quadrangulaires (**Couplan et Lazarin, 2010**).



Figure 79. *Lavandula dentata* (web31)

Les fleurs, regroupées en épis pédonculés de 2,5 à 5 cm, sont plus ou moins denses et possèdent des bractées ovoïdes ou rondes, pointues et d'un brun-violet marqué. Le calice mesure entre 5 et 6 mm de long et possède cinq dents, dont les supérieures se terminent par un appendice en forme de cœur inversé (**Bayer et al., 2016**). La corolle, d'environ 4 à 5 mm de profondeur, contient quatre étamines, la paire antérieure étant plus longue. Le pistil est bicarpellé, avec des branches du style aplaties (**Nuru et al., 2015**).

n. Lavandula multifida

Lavandula multifida est une plante sous-frutescente de la famille des Lamiacées, à souche épaisse et de nombreuses tiges quadrangulaires, atteignant généralement 50 cm de hauteur. Ses feuilles, profondément divisées et pétiolées, sont couvertes d'une pilosité qui est plus dense à la base des tiges qu'au sommet (Bellakhdar et Coll., 1986).

Les fleurs, mesurant entre 7 et 8 mm, sont regroupées en épis qui varient en longueur. Elles présentent une couleur bleu violacé, typique de cette espèce (Quezel et Santa., 1963 ; Brickell et Mioulane., 2002).



Figure 80. *Lavandula multifida* (The Plant List., 2013).

Les inflorescences sont particulièrement denses, les fleurs étant insérées à l'aisselle de bractées velues, un caractère distinctif important au sein de ce genre (Bellakhdar et Coll., 1986).

En plus de son attrait esthétique et de son parfum agréable, *Lavandula multifida* est reconnue pour ses vertus antispasmodiques et désinfectantes qui en font un remède efficace pour lutter contre certaines infections.

o. Salvia officinalis

Salvia officinalis, ou sauge officinale, est une plante vivace originaire du bassin méditerranéen, mais elle est aujourd'hui cultivée dans de nombreuses régions au climat tempéré, y compris en Algérie où elle est largement répandue (Chevallier., 2001).



Figure 81. *Salvia officinalis*

(Dobignard et Chatelain ., 2012)

Cette plante sous-arbrisseau possède des tiges lignifiées de section carrée, atteignant généralement une hauteur de 30 à 70 cm avec une couleur gris-verdâtre sur le dessus et un fond blanchâtre. Les feuilles, opposées et pétiolées, mesurent de 3 à 10 cm de long, présentent un duvet soyeux et ont des bords légèrement crénelés. Les fleurs, zygomorphes et bilabiées, sont regroupées en glomérules spiciformes, chaque groupe comportant de 5 à 10 fleurs. Elles ont une corolle violette, parfois rose ou bleue, et un calice couvert de poils sécréteurs. Les fruits sont des tétrakènes sphériques de couleur brun foncé à noir. Très prisée en phytothérapie, la sauge officinale est réputée pour ses nombreuses propriétés médicinales, notamment anti-inflammatoires et digestives, et elle est couramment utilisée tant dans les préparations thérapeutiques que culinaires (Amamra et Hedhoud., 2022).

p. Salvia verbenaca

Salvia verbenaca est une plante herbacée, caractérisée par un calice bilabié, avec une lèvre supérieure tridentée et une lèvre inférieure bidentée. La corolle, également bilabiée, présente des fleurs de couleur bleu-violet, parfois pâles ou légèrement bleuâtres, et plus rarement avec une lèvre inférieure rose. La taille de ces plantes peut aller de 8 à 80 cm. Les feuilles sont de forme ovale ou ovale-allongée, avec des bords fortement crénelés ou découpés en lobes, et les feuilles inférieures sont généralement dotées de longs pétioles.



Figure 82. *Salvia verbenaca* (SIP., 2018)

Les fleurs se regroupent en faux verticilles, formant des grappes plus ou moins allongées. Le calice est recouvert de longs poils blanchâtres, et la lèvre supérieure du calice est légèrement élargie, se terminant par trois petites dents, avec la dent médiane plus petite. La lèvre inférieure, quant à elle, est formée par deux lobes aigus, beaucoup plus grands que les dents de la lèvre supérieure. Cette espèce préfère les terrains calcaires et argileux, et se trouve généralement à basse altitude, bien qu'elle puisse atteindre jusqu'à 865 mètres d'altitude. On la trouve en Europe, au sud-ouest de l'Asie,

au nord de l'Afrique et elle est également naturalisée en Amérique du Nord (**Bonnier., 1990**).

q. *Thymus capitatus*

Le *Thymus capitatus* est un petit arbuste aromatique de la famille des Lamiacées, mesurant généralement entre 20 et 50 cm de hauteur. Ses branches sont dressées et érigées, et son bois est transparent lorsqu'il est jeune, présentant une teinte blanche, souvent avec de petites touffes de feuilles axillaires. Les feuilles, caduques une fois sèches, sont sessiles, de forme subtraingulaire à linéaire et acuminées. Les bords des feuilles sont plats, glabres et légèrement ciliés à la base, tandis que des glandes gris-vert sont visibles sur les deux faces.

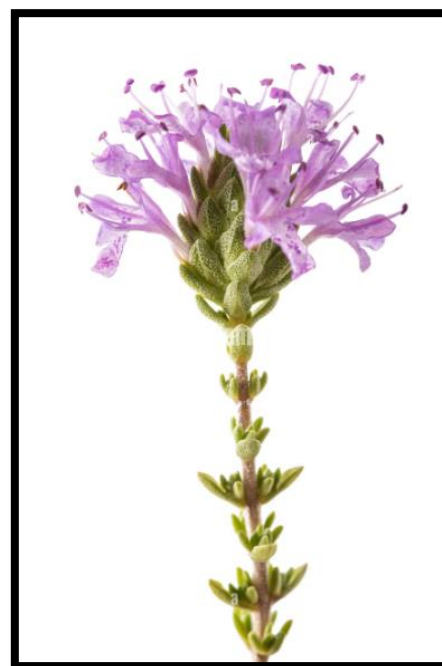


Figure 83. *Thymus capitatus*

(Photo originale)

L'inflorescence est dense, constituée de pseudo-verticilles. Le calice mesure environ 1 mm de long et présente une lèvre supérieure à trois dents, plus courtes que les deux dents inférieures, toutes ciliées. Contrairement aux autres types de thymus, les conduits du calice du *Thymus capitatus* sont caractérisés par 20 à 22 veines, et son dos est plat. La corolle, de couleur pourpre, est bilabée et mesure jusqu'à 1 cm de long, avec une lèvre supérieure à deux échancrures. Ce thym est doté de quatre étamines (**Bayer et al., 2005**).

r. *Rosmarinus officinalis*

Le romarin, est une plante méditerranéenne qui prospère sur les coteaux arides, les garrigues et les terrains rocheux. Il s'étend même un peu plus au sud, jusqu'aux confins sahariens.



Figure 84. *Rosmarinus officinalis* (web 17)

Depuis l'Antiquité, il est apprécié non seulement pour ses qualités culinaires, mais aussi pour ses vertus thérapeutiques (**Boullard., 2010**).

Botaniquement, le romarin se distingue par ses feuilles étroitement lancéolées et coriaces, tandis que ses fleurs, de couleur bleu pâle et parsemées de nuances violettes, se regroupent en petites grappes denses, s'épanouissant presque toute l'année (**Gonzalez-Trujano et al., 2007**) (**Atik Bekkara et al., 2007**). De plus, cette plante est réputée pour ses multiples propriétés médicinales, notamment antibactérienne, antifongique, antivirale, antioxydante, anti-cancérigène, ainsi que pour ses effets bénéfiques sur la santé du foie et son action hypoglycémiante.

s. Inula viscosa

Inula viscosa, connue en Algérie sous le nom de magramen (**Zeguerrou et al., 2013**), est une plante vivace de la famille des Astéracées, largement répandue dans le nord de l'Algérie. Elle pousse principalement dans des zones peu propices à la végétation, telles que les bords de chemins, les terrains abandonnés, ou les jachères, et préfère les sols secs, calcaires, argileux et perturbés (**Ciccarelli et al., 2007**).



Figure 85. *Inula viscosa*

(Photo originale)

Cette plante herbacée, souvent décrite comme annuelle ou vivace, atteint entre 0,5 et 1 mètre de hauteur. Elle se caractérise par une forte odeur et des poils glanduleux visqueux qui libèrent une résine collante. Ses feuilles sont alternes, lancéolées, sans pétioles, avec des bords dentés ou lisses, et ses fleurs jaunes forment des capitules regroupés en

longues grappes terminales. La floraison débute en septembre, et les fruits sont des akènes velus, portés par une petite aigrette de soies denticulées (**Baydar., 1998**). *Inula viscosa* est reconnue pour ses propriétés insecticides, notamment contre la mouche de l'olive, grâce à l'action d'un parasite de *Bactrocera oleae* (**Warlop., 2005**). Cette plante est également utilisée en médecine traditionnelle pour ses vertus diverses, renforçant sa place dans la biodiversité et l'agriculture de la région méditerranéenne.

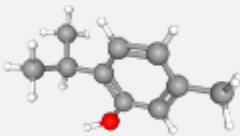
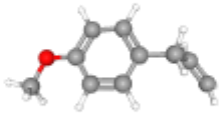
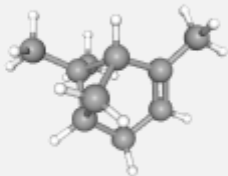
IV-3-Méthode

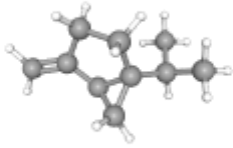
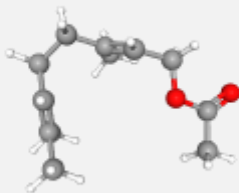
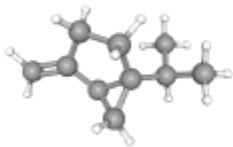
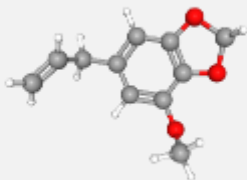
Notre travail consiste à étudier l'inhibition de l'Acetyl coA carboxylase par le principe actif (Ligand) de chaque plante utilisée, afin de contrôler la population des nématodes des *Citrus* le *Tylenchulus semipenetrans*.

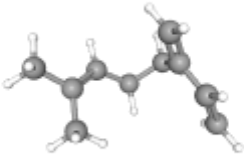
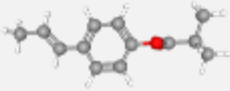
IV-3-1-Préparation des ligands

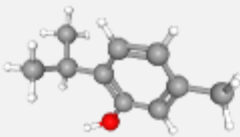
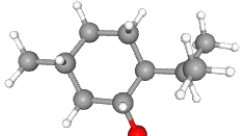
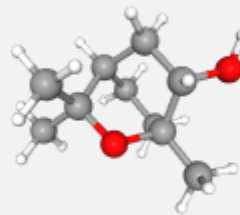
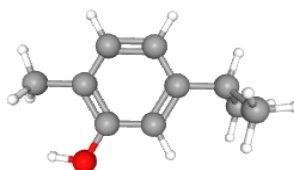
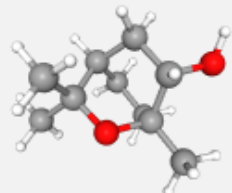
Les huiles essentielles des plantes étudiées ont été extraites des parties aériennes (feuilles et fleurs). Les principes actifs de chaque plante et leurs structures sont présentés dans le tableau :

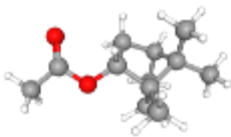
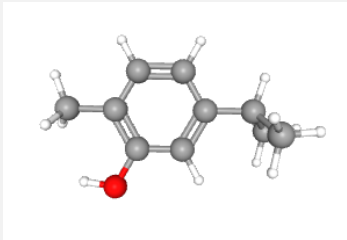
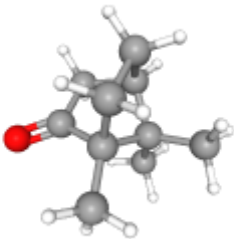
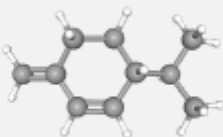
Tableau 07. Principes actifs des espèces concernées par notre étude.

Espece	Huiles essentielles	Structures 3D (Pubchem., 2025).
<i>Ammoides verticillata</i>	Thymol (45.77%) p-cymene (20.19%), limonene (15.70%), γ-terpinene (8.42%) (Attou et al.,2017)	
<i>Foeniculum vulgare</i>	Estragole (84.8%) limonene (7.8%) fenchone (3.1%) α-pinene (1.3%) (Belabdelli et al.,2020)	
<i>Daucus carota</i>	α-pinene (21.3 %) asarone (18.4 %) β-bisabolene (9.3 %) (Mohammedi et al.,2015)	

<i>Daucus maritimus</i>	Sabinene (51.6%) terpinen-4-ol (11.0%) (Jabrane et al.,2009)	
<i>Daucus gummifera</i>	Geranyl acetate (51.74–76.95%) (Pinilla et al.,1995)	
<i>Caucalis maritima (Orlaya grandiflora)</i>	Sabinene, α -pinene, γ -terpinene β -caryophyllene germacrene D (Widelski,et al.,2021)	
<i>Thapsia garganica</i>	Myristicin 15.07 % β -thujone 14.86 %, elemicin 13.06 % (Kadda et al.,2017)	

<i>Ferula communis</i>	Myrcene 52.5 % α-pinene 20.9% β- PHELLANDRENE 7.7 % (Chibani et al .,2011)	
<i>Daucus crinitus</i>	Isochavicol isobutyrate 39% octyl acetate 12.3 % α-pinene 9.9% (Lanfranchi,et al.,2010)	
<i>Phlomis herba- venti</i>	Hexadecanoic acid (33.1%), 6,10,14- trimethylpentadecan- 2- one (16.2%) 3-methyltetradecane (6.7%) Germacrene D (6.7%) (Amor,et al 2009)	

<i>Thymus ciliatus</i>	Thymol 44,2 % (Bousmaha et al.,2007)	
<i>Mentha × piperita</i>	Menthol 35 à 70% (Catier et Roux.,2007)	
<i>Lavendula dentata</i>	1,8-cineole 38.4% (Tahar et al., 2005)	
<i>Lavendula multifida</i>	Carvacrol 57. 9% (Laghchimi et al.,2014)	
<i>Salvia officinalis</i>	1,8-cineole 41.7 % (Taleb., 2015)	

<i>Inula viscosa</i>	Acétate de bornyle (39,81%) (BOUMAZA., 2011)	
<i>Thymus capitatus</i>	Carvacrol 69,9% (Tabti et al., 2014)	
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Camphre 15-25% (Albert et Foste., 1996)	
<i>Salvia verbenaca</i>	β-phellandrène 30.3% (Bahar et al., 2004)	

Les structures 3D des composés photochimiques ont été obtenues de la base des données « PubChem » au format sdf. Les ligands ont ensuite été convertis au format pdb à l'aide du logiciel d'interface graphique OpenBabel. L'optimisation des ligands a été réalisée avec HyperChem 8.0.10 par la méthode semi empirique AM1, AutoDock Vina en mettant en place

la torsion, ce qui impliquait la sélection de la racine et la détection de la torsion. Enfin, les ligands ont été enregistrés au format pdbqt.

IV-3-2-Préparation de la protéine « Acetyl coA carboxylase »

En règle générale, les structures protéiques ayant une résolution comprise entre 1,5 et 2,5 Å sont considérées comme les mieux adaptées pour mener des études. Parmi les nombreux complexes disponibles dans la banque de données « RCSB », nous avons sélectionné le code 1BDO, en raison de la qualité de ses structures, correctement définies, et de sa résolution optimale estimée à 1,8 Å (**Figure 86**).



Figure 86. Structure 3D de la protéine étudiée (PDB ID : 1BDO)

Le **Tableau 08** nous montre quelques propriétés d'Acc :

Tableau 08 : Caractéristiques de l'Acétyl coA carboxylase (1BDO)

Protéine (PDB ID)	Classification	Méthode	Résolution	Nombre de chaines	Longueur de chaîne	Ligand de référence
1BDO	Transférase	X-ray diffraction	1.8Å	Une seule chaîne « A »	80 Résidus	BIOTIN C10 H16 N2 O3 S

L'Acc a été téléchargé au format (*.pdb) et le complexe macromoléculaire 1BDO a été séparé du ligand de référence (Co-cristallisation) à l'aide du logiciel PyMOL. Le récepteur a été optimisé dans le logiciel « AutoDock vina » en ajoutant de l'hydrogène et de la charge, puis en l'enregistrant sous format (*.pdbqt).

IV-3-3-Docking moléculaire

AutoDock 4.2 a été utilisé pour docker les ligands à l'ACC, conformément au protocole décrit par (Forli et al., 2016). Les fichiers PDBQT pour les ligands et l'ACC ont été préparés, et la boîte de grille a été configurée pour englober la surface de l'ACC, permettant un mouvement sans restriction des ligands. Toutes les boîtes de grille centrales ont été normalisées sur différents ligands dans cette étude, avec des coordonnées de cavité enzymatique définies à X=10,323, Y=19,083 et Z=-8,657, et une dimension de boîte de grille de 20 x 20 x 20. La configuration de la grille a été exécutée à l'aide de autogrid.exe. Une fois le programme de grille terminé, la macromolécule a été désignée comme un nom de fichier rigide, et l'algorithme génétique lamarckien, LGA, a été sélectionné comme méthode d'amarrage avant d'exécuter le programme AutoDock. Dix poses ont été générées, à partir desquelles celles ayant les meilleurs scores d'énergie ont été sélectionnées pour une analyse plus approfondie. Enfin, les résultats du docking ont été visualisés à l'aide de Biovia Discovery Studio 2021, en se concentrant sur les poses de ligand avec l'énergie de liaison la plus favorable ($-\Delta G$, kcal/mol) pour une évaluation supplémentaire. On peut résumer ce protocole par l'organigramme suivant :

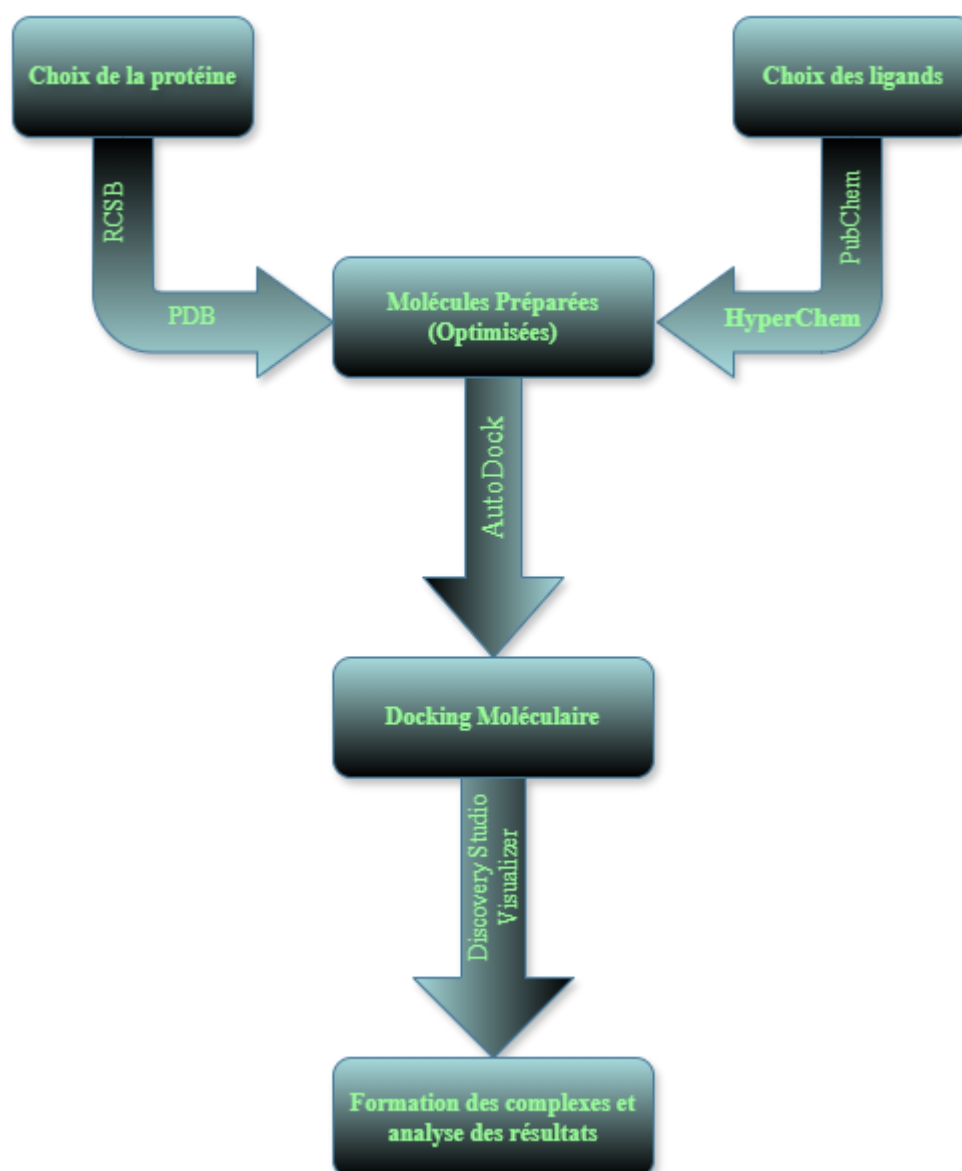


Figure 87. Protocole suivi pour les calculs du Docking moléculaire.

IV-3-4-Simulation de la dynamique moléculaire

Les simulations de la dynamique moléculaire (DM) sont largement utilisées pour prédire la stabilité des complexes protéine-ligand. Ils fournissent des informations sur les changements conformationnels au fil du temps, ce qui nous permet d'évaluer la stabilité des interactions protéine-ligand (Shukla et al., 2017). Dans cette étude, le comportement dynamique des ligands les plus intéressants interagissant avec la protéine 1BDO a été étudié à l'aide de la version 5.1.2 de GROMACS avec le champ de force CHARMM36 sur un système Linux

(Kutzner et al., 2019 ; Abraham et coll., 2015). La topologie des protéines a été préparée à l'aide de l'outil pdb2gmx, et les complexes protéiques ont été solvée dans une boîte triclinique.

La minimisation de l'énergie du système a été réalisée à l'aide de l'algorithme de descente la plus raide (Benson et Daggett, 2012). La protéine a été solvée à l'aide du modèle de solvant TIP3P, et quatre ions Na^+ ont été ajoutés pour assurer la neutralité globale. Les complexes, comprenant des flavonoïdes et la protéine 1BDO, ont été placés dans une boîte d'eau avec une marge minimale de 1,5 Å de n'importe quel bord à n'importe quel atome de protéine. Une pression constante de 1 bar et une température de 300 K ont été maintenues, avec un pas de temps de 2 fs pour la stabilisation du système. Le contrôle de la température a été réalisé à l'aide de v-rescale, une technique de couplage de thermostat Berendsen optimisée, tandis que la méthode Parrinello-Rahman a été utilisée pour le couplage de pression lors de l'équilibrage NPT.

La minimisation de l'énergie a été réalisée pendant 50 000 itérations à l'aide de l'algorithme de descente la plus abrupte, avec une coupure de 1000 kJ/mol pour réduire les collisions stériques. Les interactions électrostatiques à longue portée ont été traitées avec la méthode Particle Mesh Ewald (PME), en utilisant une coupure de Coulomb de 1,0 nm. Le système a subi une dernière analyse de dynamique moléculaire de 100 ns, chaque étape étant réglée sur 2 fs. L'analyse de trajectoire a été effectuée à l'aide de différents outils GROMACS. Les outils gmx rms et gmx rmsf ont été utilisés pour calculer l'écart quadratique moyen (RMSD) et les fluctuations quadratiques moyennes (RMSF) de la protéine, respectivement. Les liaisons d'hydrogène ont été analysées à l'aide de l'outil gmx hbond, tandis que le rayon de giration a été évalué à l'aide de l'outil de gyrate. Finalement, les graphiques ont été générés à l'aide de logiciel « Grace » (Figure 88).

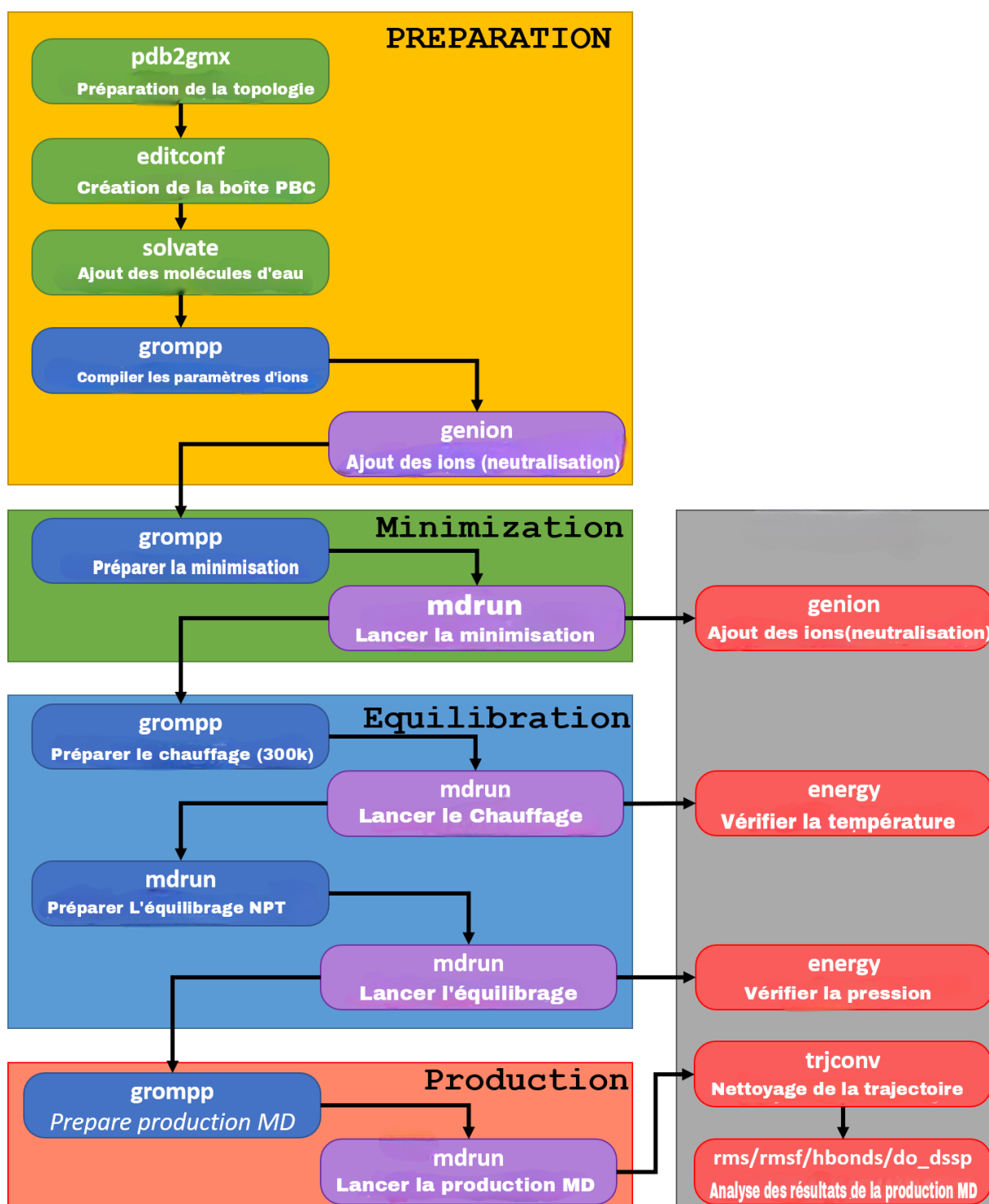


Figure 88. Etapes suivies pour le calcul de la dynamique moléculaire.

IV-3-5-Règle de Lipinski

Dans notre étude, nous avons utilisé le serveur en ligne « Swiss ADME », ADME est un signal désignant quatre processus : Absorption, Distribution, Métabolisme et Excrétion. Ce

serveur permet de calculer les descripteurs physicochimiques ainsi que de prédire les paramètres ADME, les propriétés pharmacocinétiques, la nature druglike.

Nous l'avons utilisé pour déterminer la solubilité et l'absorption des ligands afin de déterminer l'activité des molécules étudiées, en utilisant la loi de Lipinski, cette règle, assure une bonne absorption d'un composé actif, afin d'arriver facilement à son site d'action s'il remplit au moins trois de ces cinq critères :

- La masse moléculaire doit être inférieure à 500 Da.
- Le nombre de donneurs de liaisons hydrogène (somme des groupements OH et NH) doit être inférieur ou égal à 5.
- Le nombre d'accepteurs de liaisons hydrogène (somme des atomes O et N) doit être inférieur ou égal à 10.
- Le nombre de liaisons rotatables doit être inférieur ou égal à 15.
- Le logarithme décimal du coefficient de partage eau / octanol, noté LogP, doit être compris entre -2 et 5. Cette valeur nous permet d'identifier le caractère hydrophile ou hydrophobe (lipophile) d'une molécule. S'il est positif et très élevé, cela signifie que le fait que la molécule considérée est bien plus soluble dans l'octanol que dans l'eau, ce qui reflète son caractère lipophile, et inversement (Chikhi., 2007).

IV-3-6- Test ADME

ADME fait référence à un ensemble de quatre processus fondamentaux : l'Absorption, la Distribution, le Métabolisme et l'Excrétion. Ce logiciel permet de calculer les descripteurs physicochimiques, ainsi que de prédire les paramètres ADME, les propriétés pharmacocinétiques et la nature 'drug-like'.

Dans cette étude, nous avons utilisé le serveur en ligne « SwissADME » pour déterminer la solubilité et l'absorption des ligands.

V- Résultats et discussion

Récemment, une étude a révélé que le spirotétramat constitue un inhibiteur efficace de l'enzyme Acétyl-CoA carboxylase (ACC) (Gutbrod et al., 2018). Le spirotétramat (SPT) appartient à la classe des cétoénols cycliques et est utilisé comme insecticide chimique pour la protection des cultures. Dans la plante, le SPT subit une hydrolyse,

formant le SPT-énol, qui correspond à la forme active supposée du composé. Le SPT-énol est ensuite transporté par le phloème et se distribue ainsi dans l'ensemble de la plante. Chez les insectes et les acariens, le SPT-énol inhibe la biosynthèse des acides gras en bloquant l'activité de l'acétyl-CoA carboxylase. Plus précisément, le SPT-énol inhibe la réaction du carboxyl-transfert, avec un mode d'inhibition compétitif vis-à-vis de l'acétyl-CoA et non compétitif vis-à-vis de l'ATP (Nauen et al., 2008).

Dans le but de développer de nouveaux ligands efficaces de l'ACC, nous avons testé d'autres ligands issus des huiles essentielles des plantes aromatiques. Pour cela, ce travail consiste à étudier les interactions entre ces ligands et l'acétyl CoA carboxylase par les méthodes de la modélisation moléculaire, afin de contrôler la population du *Tylenchulus semipenetrans* sans causer des effets indésirables sur l'écosystème.

V-1-Simulation du Docking Moléculaire

Les ligands (inhibiteurs) ont été préparés comme des structures flexibles, tandis que la protéine cible (récepteur) a été considérée comme un corps rigide. Après la formation du complexe ligand-récepteur, celui-ci adopte la conformation la plus stable, correspondant à l'état énergétique minimal. Une fois le complexe établi, une analyse approfondie des résultats obtenus est réalisée afin d'évaluer les interactions et la stabilité du système.

Afin de comparer la stabilité des ligands étudiés au sein du site actif de 1BDO, nous avons réalisé un docking moléculaire entre notre enzyme 1BDO et le spirotetramat, la biotine ainsi que les ligands d'origine végétale sélectionnés pour cette étude (**Tableau 09**).

Les molécules présentant les énergies de liaison et les scores de Docking les plus bas ont été considérées comme les inhibiteurs les plus efficaces du récepteur cible, une énergie de liaison plus faible indiquant une affinité de liaison plus élevée (Simon., 2017).

Plantes	Ligands	Score (affinité kcal/mol)
<i>Ammoides verticillata</i>	Thymol (45.77%)	-5.3
<i>Foeniculum vulgare</i>	Estragole (84.8%)	-4.3
<i>Daucus carota</i>	α -pinene (21.3 %)	-4.4
<i>Daucus maritimus</i>	Sabinene (51.6%)	-5.1
<i>Daucus gummifera</i>	Geranyl acetate	-4.4
<i>Caucalis maritima (Orlaya grandiflora)</i>	Sabinene,	-5.1
<i>Thapsia garganica</i>	Myristicin	-5.2
<i>Ferula communis</i>	Myrcène	-4.4

<i>Daucus crinitus</i>	Isochavicol isobutyrate	-6.1
<i>Phlomis herba-venti</i>	Hexadecanoic acid	-5.1
	Spirotetramat	-6.6
	Biotin	-5.4
<i>Thymus algeriensis</i>	Linalool	-3.8
<i>Thymus ciliatus</i>	Thymol 44,2 %	-5.3
<i>Mentha x piperita</i>	Menthol 35 à 70%	-5.3
<i>Lavendula dentata</i>	1,8-cineole 38.4%	-4.5
<i>Lavendula multifida</i>	Carvacrol 57. 9%	-5.0
<i>Salvia officinalis</i>	1,8-cineole 41.7 %	-4.5
<i>Inula viscosa</i>	Acétate de bornyle (39,81%)	-6.3
<i>Thymus capitatus</i>	Carvacrol 69,9%	-5.0

<i>Rosmarinus officinalis</i>	Camphre	15-25%	-4.7
<i>Salvia verbenaca</i>	β -phellandrène	30.3%	-4.6

Tous les composés phytochimiques issus des plantes médicinales ont été dockés dans le site actif de la cible 1BDO à l'aide du logiciel AutoDock Vina, afin de prédire les poses de liaison optimales entre les ligands et la protéine, en recherchant des scores plus élevés pour une meilleure analyse. Les énergies libres de liaison des sept composés sélectionnés ayant obtenu les meilleurs scores de Docking sont résumées dans le **Tableau 10** :

Tableau 10. Les composés ayant obtenus les meilleurs scores du Docking.

Docking Score (Binding Energy) (Kcal/mol)		Acetyl CoA Carboxylase (PDB ID: 1BDO)								
		Nom	Couleur	Distance	Catégorie	Types	From	From chemistry	To	To chemistry
Spirotetramat	-6.6	LIG1:N - A:ASP130:OD2		5,25935	Electrostatic	Attractive Charge	LIG1:N	Positive	A:ASP130:OD2	Negative
		LIG1:O - A:ARG84:O		3,26023	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	LIG1:O	H-Donor	A:ARG84:O	H-Acceptor
		A:VAL83:CA - :LIG1:O		3,42268	Hydrogen Bond	Carbon Hydrogen Bond	A:VAL83:CA	H-Donor	LIG1:O	H-Acceptor
		A:ARG84 - :LIG1		5,13231	Hydrophobic	Alkyl	A:ARG84	Alkyl	LIG1	Alkyl
		LIG1:C - A:PRO86		5,0599	Hydrophobic	Alkyl	LIG1:C	Alkyl	A:PRO86	Alkyl
		A:PHE148 - :LIG1:C		4,96939	Hydrophobic	Pi-Alkyl	A:PHE148	Pi-Orbitals	:LIG1:C	Alkyl
Acétate de bornyle	-6.3	LIG1:N - A:ASP130:OD2		5,01575	Electrostatic	Attractive Charge	LIG1:N	Positive	A:ASP130:OD2	Negative
		LIG1:O - A:ARG84:O		3,11073	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	LIG1:O	H-Donor	A:ARG84:O	H-Acceptor
		A:PRO86 - :UNL1		4,03579	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	UNL1	Alkyl

		UNL1 - A:ILE127		4,09015	Hydrophobic	Alkyl	UNL1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl
Isochavicol isobutyrate	-6.1	A:ARG84:HN - :UNL1:O		3,65187	Electrostatic	Attractive Charge	UNL1:O	Positive	A:ASP130:OD2	Negative
		A:PRO86 - :UNL1		2,09208	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:ARG84:HN	H-Donor	UNL1:O	H-Acceptor
		UNL1 - A:ILE127		4,01569	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	UNL1	Alkyl
		A:ARG84:HN - :UNL1:O		4,07085	Hydrophobic	Alkyl	UNL1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl
Biotin	-5.4	UNL1:O - A:ASP130:OD2		3,65187	Electrostatic	Attractive Charge	UNL1:O	Positive	A:ASP130:OD2	Negative
		A:ARG84:HN - :UNL1:O		2,09208	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:ARG84:HN	H-Donor	UNL1:O	H-Acceptor
		A:PRO86 - :UNL1		4,01569	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	UNL1	Alkyl
		:UNL1 - A:ILE127		4,07085	Hydrophobic	Alkyl	UNL1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl
Thymol		LIG1:O - A:GLU128:O		2,07932	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:GLU128:HN	H-Donor	LIG1:O	H-Acceptor

	-5.3	A:PRO86 - :LIG1		3,06649	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	LIG1:O	H-Donor	A:GLU128:O	H-Acceptor
		A:ILE127 - :LIG1		4,47371	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		LIG1:O - A:GLU128:O		4,2334	Hydrophobic	Alkyl	A:ILE127	Alkyl	LIG1	Alkyl
Menthol	-5.3	A:GLU128:HN - :LIG1:O		2,07941	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	A:GLU128:HN	H-Donor	LIG1:O	H-Acceptor
		LIG1:O - A:GLU128:O		3,0656	Hydrogen Bond	Conventional Hydrogen Bond	:LIG1:O	H-Donor	A:GLU128:O	H-Acceptor
		A:PRO86 - :LIG1		4,47414	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		A:PRO86 - :LIG1		4,89681	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO86	Alkyl	LIG1	Alkyl
		A:ILE127 - :LIG1		4,2327	Hydrophobic	Alkyl	A:ILE127	Alkyl	LIG1	Alkyl
		LIG1 - A:ILE127		4,19354	Hydrophobic	Alkyl	LIG1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl
Myristici		LIG1:O - A:ASP130:OD2		3,4642	Electrostatic	Attractive Charge	LIG1:O	Positive	A:ASP130:OD2	Negative

-5.2	LIG1:O - A:ASP13 0:OD1		4,9077	Electrostatic	Attractive Charge	LIG1:O	Positive	A:ASP130: OD1	Negative
	LIG1:C - A:GLU1 28:O		3,5131	Hydrogen Bond	Carbon Hydrogen Bond	LIG1:C	H-Donor	A:GLU128: O	H-Acceptor
	A:PRO8 6 - :LIG1		4,05714	Hydrophobic	Alkyl	A:PRO 86	Alkyl	LIG1	Alkyl
	LIG1 - A:ILE12 7		4,02647	Hydrophobic	Alkyl	LIG1	Alkyl	A:ILE127	Alkyl

Les ligands sont classés en ordre croissant, dont le score le plus faible présente un meilleur inhibiteur :

Spirotetramat < Acétate de bornyle < Isochavicol isobutyra< Biotine< Thymol< Menthol< Myristicin

Le **Tableau 10** permet de conclure que le meilleur score du Docking a été obtenu avec le spirotetramat, affichant une valeur de -6,6 kcal/mol, suivi de l'Acétate de bornyle avec un score de -6,3 kcal/mol, puis de l'Isochavicol isobutyrate avec -6,1 kcal/mol. Cependant, les scores des autres ligands indiquent que les affinités du Thymol et du Menthol (-5,3 kcal/mol) ainsi que du Myristicine (-5,2 kcal/mol) sont comparables à celle du ligand de référence, la Biotine (-5,4 kcal/mol).

Ces résultats confirment les conclusions de l'étude récente, selon laquelle le spirotetramat constitue le meilleur inhibiteur de l'ACC en raison de son score du docking. Toutefois, l'Acétate de bornyle peut également être considéré comme un inhibiteur prometteur de l'ACC.

V-1-1-Interactions ACC-Ligand

Après la formation des complexes Enzyme-Ligand au niveau de la cavité enzymatique, le logiciel Discovery Studio Visualizer a été utilisé pour analyser les interactions régissant la liaison entre le ligand et sa cible. Les liaisons d'hydrogène et les interactions hydrophobes (π -alkyle/alkyle) sont les interactions prédominantes entre les molécules :

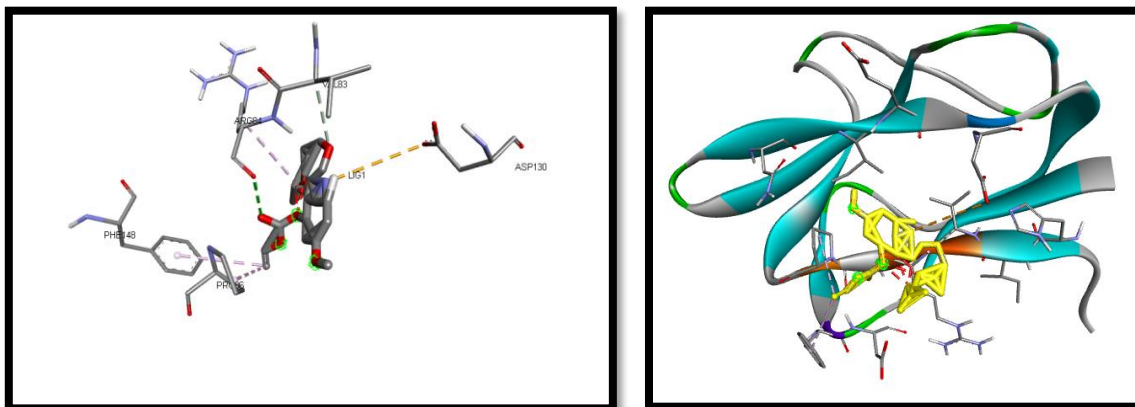


Figure 89. Complexe 1BDO-Spirotetramat

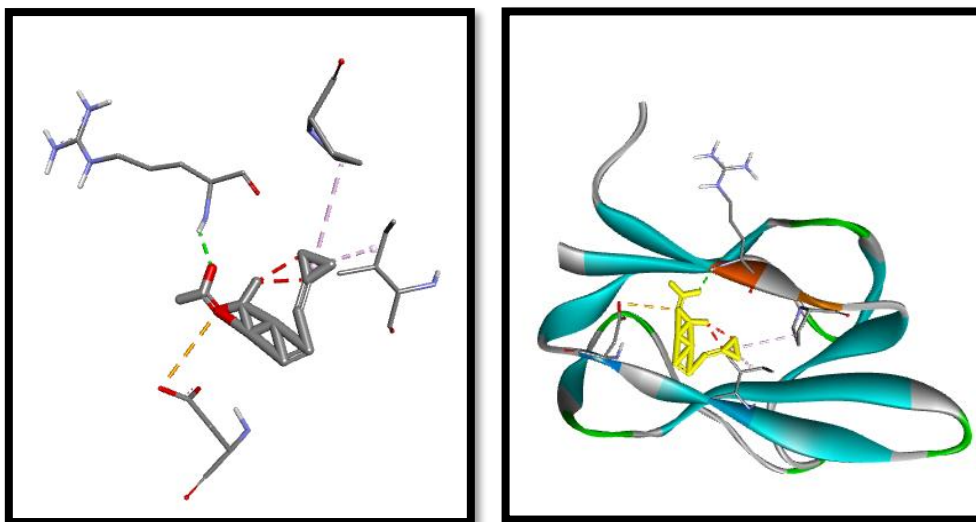


Figure 90. Complexe 1BDO- Acetate de Bornyl

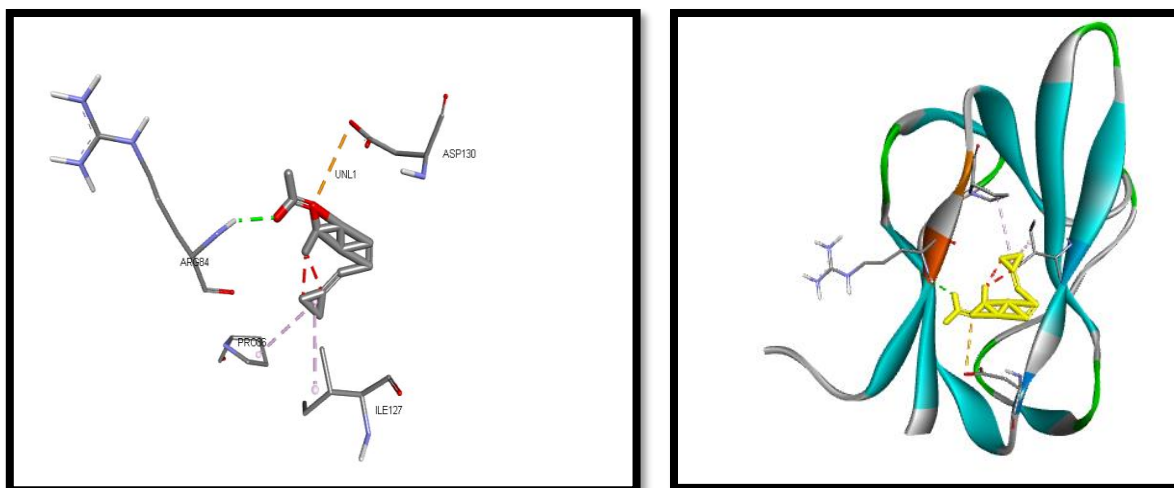


Figure 91. Complexe 1BDO- Isochavicol isobutyrate

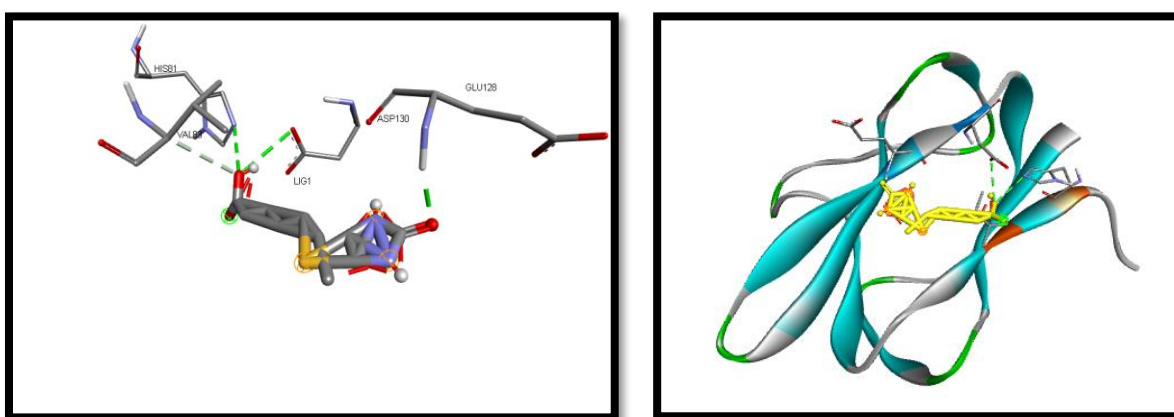


Figure 92. Complexe 1BDO- Biotine

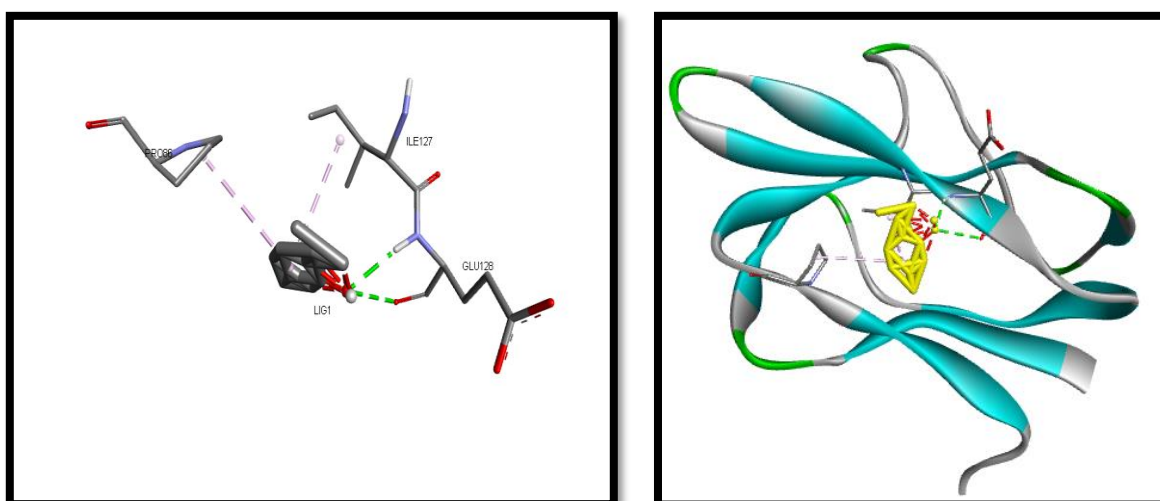


Figure 93. Complexe 1BDO- Thymol

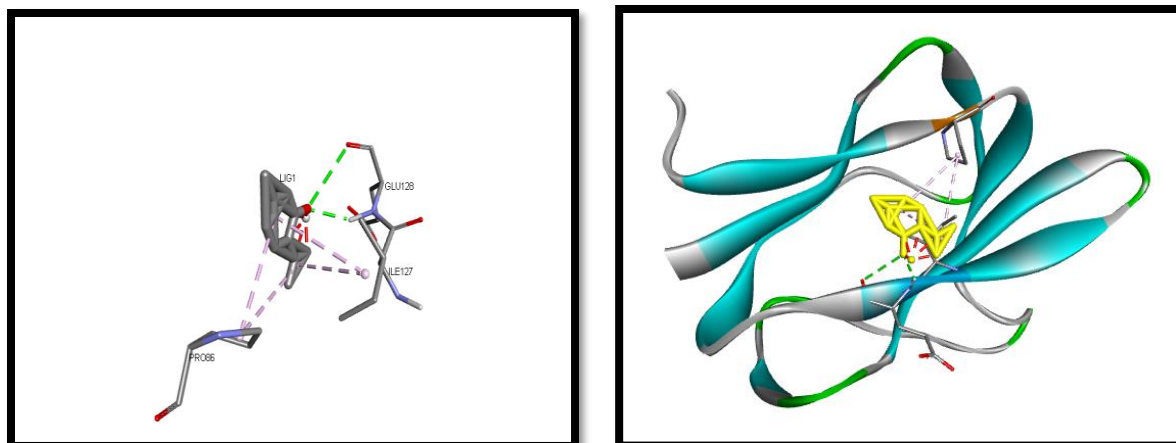


Figure 94. Complexe 1BDO- Menthol.

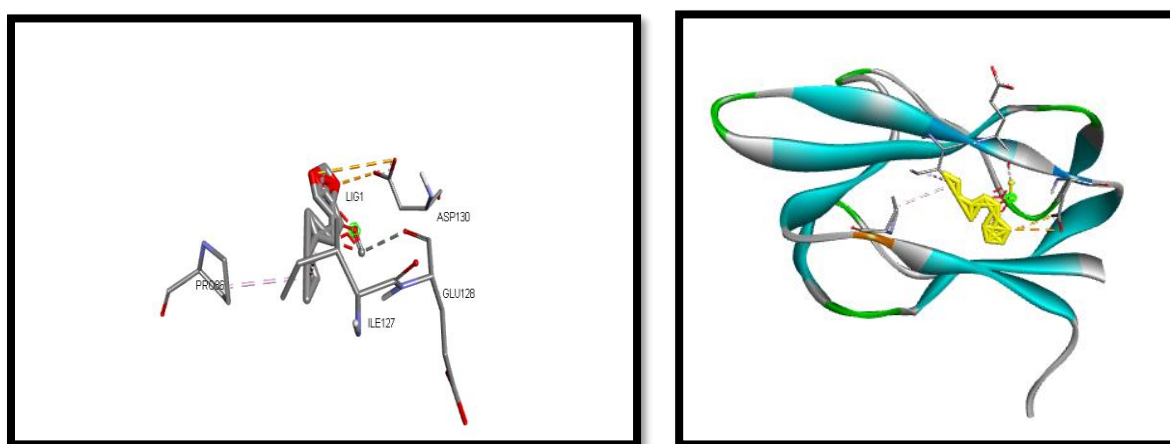


Figure 95. Complexe 1BDO- Myristicin.

En comparant tous les scores de liaison, nous avons constaté que le complexe formé par 1BDO-spirotetramat présente la valeur énergétique la plus basse, offrant ainsi le meilleur score du Docking par rapport à la biotine. En revanche, l'acétate de bornyle a donné des scores quasiment équivalents. Ainsi, nous pouvons considérer les complexes 1BDO-acétate de bornyle et 1BDO-spirotetramat comme stables, avec une forte affinité de liaison. Sur la base de ces résultats du Docking, nous classons l'acétate de bornyle comme inhibiteur naturel prometteur de l'enzyme, en comparaison avec le pesticide chimique spirotetramat et tous les autres ligands étudiés.

V-1-2-Propriétés des Inhibiteurs

L'activité inhibitrice des ligands est nécessaire pour compléter notre étude par l'application de la règle de cinq de Lipinski sur les sept ligands étudiés. Les conditions empiriques pour appliquer la règle de Lipinski manifeste une bonne biodisponibilité orale impliquant un équilibre entre la solubilité aqueuse d'un composé et sa capacité à diffuser passivement à travers les différentes barrières biologiques.

ADME nous ramène à estimer le taux de solubilité et d'absorption des ligands, en utilisant le site web SwissADME. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 11. Caractéristiques des ligands étudiés

Ligands	PM(g/mol)	DH	AH	LogP	Nombre de violations	Lipinski	Solubilité dans l'eau	Absorption
Spirotetramat	373.44	1	5	3.75	0	oui	Soluble	Forte
Acetat de bornyle	196.29	2	2	2.52	0	oui	Soluble	Forte
Isochavicol isobutyrate	204.26	0	2	2.99	0	oui	Soluble	Forte
Biotine	244.31	3	3	1.17	0	oui	Très soluble	Forte
Thymol	150.22	1	1	2.32	0	oui	Soluble	Forte
Menthol	156.27	1	1	2.63	0	oui	Soluble	Forte
Myristicin	192.21	0	3	2.67	0	oui	soluble	Forte

Avec : **PM** = Poids Moléculaire (≤ 500 g/mol).

LogP = Lipophilie ($-2 \leq \log P \leq 5$).

AH = Accepteur d'Hydrogène (≤ 10).

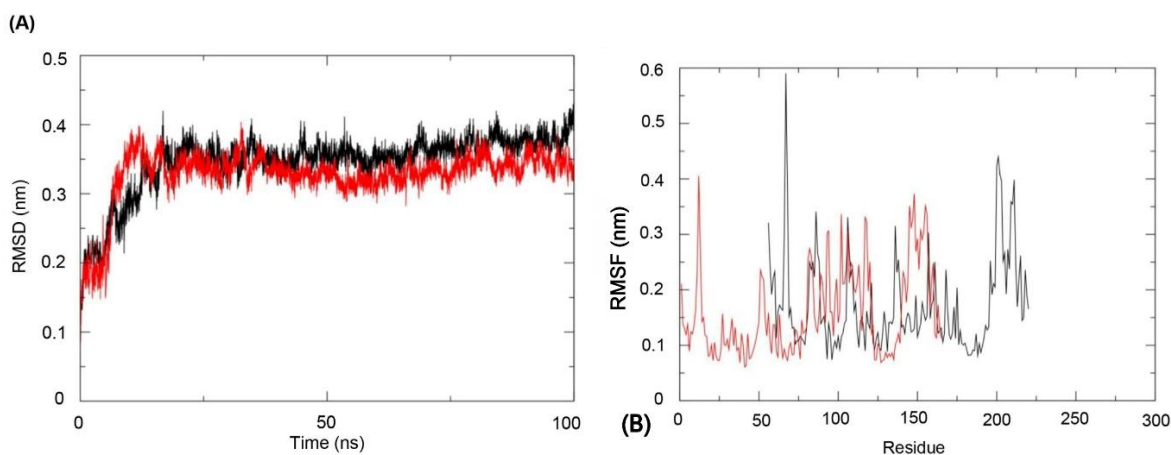
DH = Donneur d'Hydrogène (≤ 5).

Le **Tableau 11** indique que les ligands analysés respectent pleinement la règle de Lipinski. Il en découle que ces composés possèdent un potentiel d'inhibition de l'ACC chez le *Tylenchulus semipenetrans*, tout en ne soulevant pas de contraintes majeures en termes d'absorption par voie orale.

L'analyse ADME permet d'estimer les paramètres de solubilité et d'absorption des ligands, une évaluation réalisée à l'aide de la plateforme Swiss ADME. Les résultats obtenus à partir de cette analyse ont confirmé la solubilité ainsi que l'absorption des inhibiteurs étudiés.

V-2-Simulations de la dynamique moléculaire

Afin de valider les résultats précédents, une simulation de la dynamique moléculaire de 100 ns a été réalisée pour les complexes 1BDO-Biotine (ligand de référence) et 1BDO-Acétate de bornyle à l'aide du logiciel GROMACS version 5.1.2. La stabilité des molécules a été évaluée à travers les valeurs de RMSD, RMSF et Rg. Le RMSD a été utilisé pour évaluer la stabilité des complexes en mesurant les variations moyennes de la structure de la protéine au cours de la simulation. Le RMSF a permis d'analyser la flexibilité structurale en calculant les déviations des atomes de chaque résidu au fil du temps par rapport à la structure de référence.



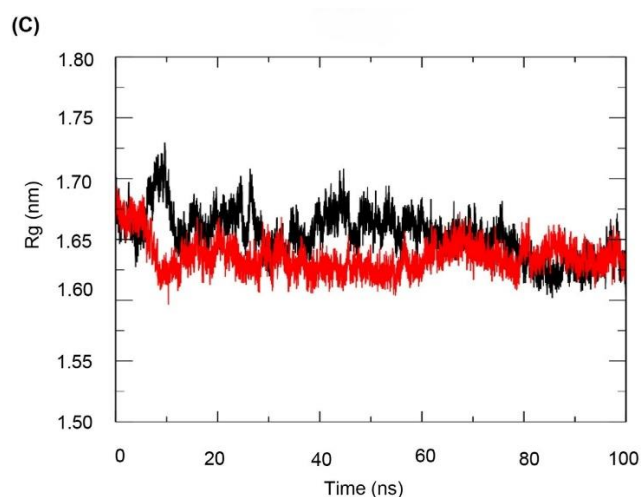


Figure 96. Résultats de la simulation de dynamique moléculaire.

(A) RMSD du complexe 1BDO-ligand de référence « Biotine » (noir) et du complexe 1BDO-Acétate de bornyle (rouge) sur l'ensemble des 100 ns.

(B) Fluctuation RMS du backbone de 1BDO-Biotine (noir) et de 1BDO-Acétate de bornyle (rouge), illustrant deux régions flexibles.

(C) Rayon de gyration (Rg) de 1BDO-Biotine (noir) et de 1BDO-Acétate de bornyle (rouge).

Dans la **Figure 96 (A)**, la trajectoire du RMSD pour la protéine modèle (1BDO-Biotine) et la structure prédite « 1BDO-Acétate de bornyle » montre une augmentation nette au cours des premiers nanosecondes de la simulation. Le système atteint finalement un état stable, les trajectoires des structures modèle et cible convergeant, avec des variations allant de 0,15 nm à 0,38 nm (jusqu'à 0,4 nm). Les données RMSF **(B)** révèlent que les fluctuations des acides aminés varient de 0,06 nm à 0,45 nm, montrant une divergence significative allant jusqu'à 0,4 nm au début. Les données Rg **(C)** illustrent la compacité de la structure prédite (représentée par une ligne noire) par rapport à la structure modèle (représentée par une ligne rouge).

ETUDE EXPÉRIMENTALE

I- Introduction

À la suite des analyses *in silico* menées dans cette étude, l'acetate de bornyle, un composé majeur des huiles essentielles d'*Inula viscosa*, a été identifié comme un inhibiteur potentiel de l'enzyme Acétyl-CoA Carboxylase (ACC), une cible clé dans le métabolisme lipidique des nématodes tels que le *Tylenchulus semipenetrans*. Les résultats de la modélisation moléculaire, notamment les études du Docking et de la dynamique moléculaire, ont révélé une forte affinité de l'acétate de bornyle pour le site actif de l'ACC, suggérant ainsi une possible action nématocide.

Sur la base de ces résultats prometteurs, une évaluation expérimentale *in vivo* de l'efficacité d'*Inula viscosa* contre les nématodes des agrumes s'impose, notamment ceux responsables de dégâts économiques importants dans l'agrumiculture. Cette partie du travail vise donc à tester l'effet nématocide de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* riche en acétate de bornyle sur le nématode des citrus le *Tylenchulus semipenetrans* au niveau du laboratoire du département d'Ecologie et environnement. L'objectif est donc de valider les prédictions *in silico* et de déterminer le potentiel d'*Inula viscosa* comme alternative naturelle aux nématocides chimiques conventionnels.

II- Matériel et méthodes d'analyse nématologique

Selon (GRECO et al.,1994), la détermination de la densité des populations des nématodes semi-endoparasites est basée sur le comptage et le dénombrement des différents stades dans le sol. Les résultats obtenus sont exprimés en nombre de nématodes par centimètre cube de sol.

Ainsi, la détermination de la densité des populations du *Tylenchulus semipenetrans* du sol donne une meilleure évaluation des dégâts causés par cette espèce.

Les analyses nématologiques comprennent un certain nombre d'opérations réparties en 3 phases successives :

- Echantillonnage.
- Extraction.
- Dénombrement.

II-1-Prélèvement et échantillonnage

L'objectif de cette partie consiste à déceler l'espèce phytoparasite étudiée « *Tylenchulus semipenetrans* » Cobb 1913 dans la ferme pilote Belaidouni Mohammed, commune d'El fehoul. Le verger de Washington navel, parcelle A2 sur une superficie de 9 ha, a été choisi.

Les prises d'échantillons ont été faites au niveau du système racinaire, c'est à dire une quantité de sol avec des fragments de racines entre 0-30 cm de profondeur avec la sonde agrologique (**Figure 97**).



Figure 97. Sonde agrologique (Photo originale)

Le choix des arbres étant aléatoire est basé sur la vigueur, la couleur des feuilles et le calibre des fruits (MAJEED et al., 1985), mais toujours dans le sens de la diagonale afin d'obtenir un

échantillonnage représentatif (**Figure 98**). Pour ce faire, trois points de la parcelle ont été choisis, chaque point comprenant un groupe de trois arbres d'agrumes voisins.

L'échantillonnage a été réalisé en prélevant des échantillons du sol dans les quatre points cardinaux autour de chaque arbre (Nord, Sud, Ouest, et Est) pour avoir des échantillons homogènes.

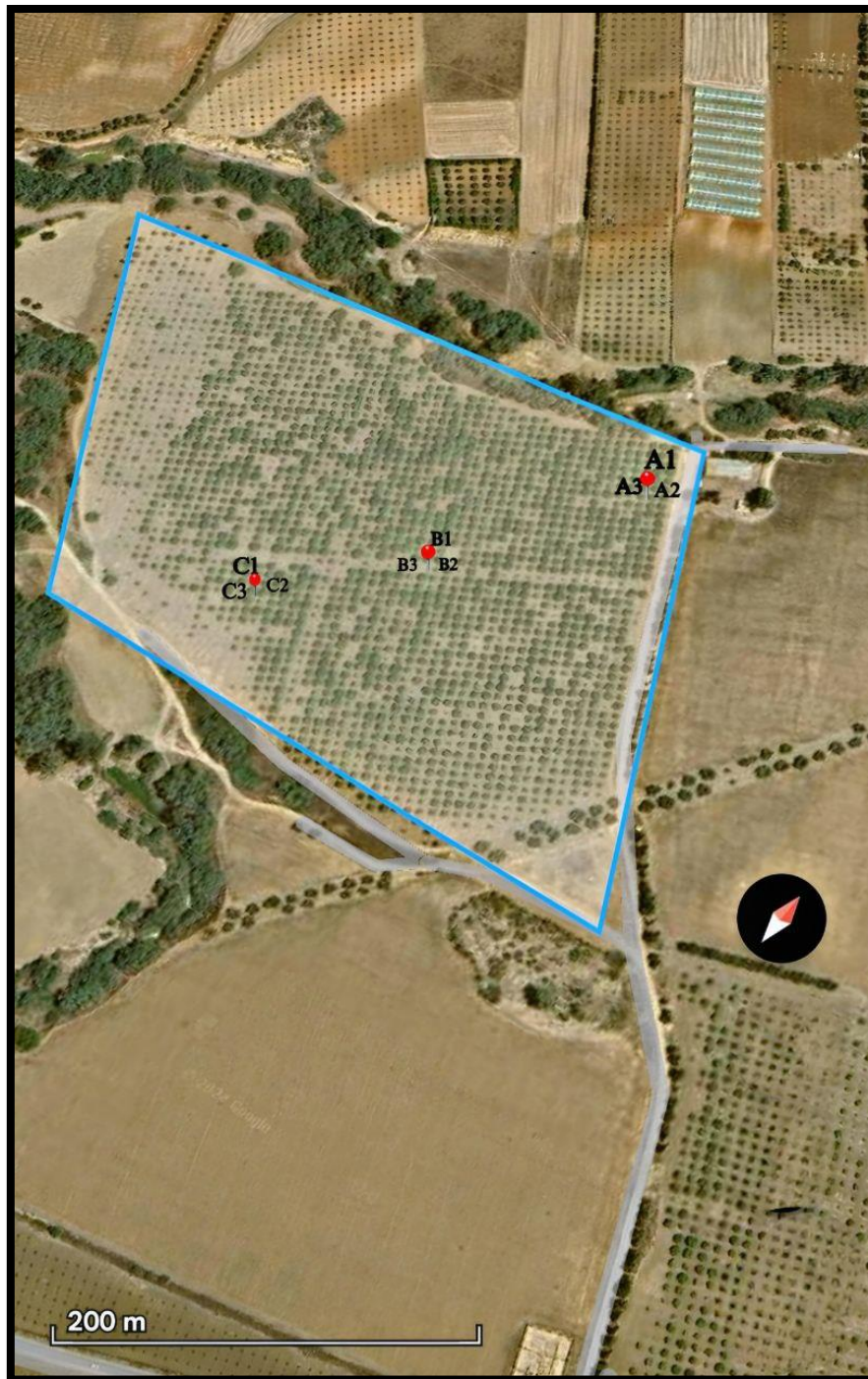


Figure 98. Echantillonnage en diagonale

- Chaque échantillon du verger a été placé dans un sachet en plastique, accompagné d'une étiquette portant les détails de l'échantillon (**Figure 99**).



Figure 99. Les neufs échantillons prélevés du verger (**Photo originale**)

II-2-Extraction des nématodes

L'extraction des nématodes endoparasites et semi-endoparasites présents dans le sol et les tissus racinaires constitue une étape essentielle et courante dans de nombreux laboratoires de nématologie. La diversité des méthodes disponibles pour cette procédure rend souvent complexe le choix de celle qui soit à la fois précise et adaptée aux besoins spécifiques du laboratoire et de l'espèce de nématode étudiée.

Ayoub décrit en détails les techniques les plus anciennes d'examen des nématodes à partir des tissus végétaux, telles que la dissection ou la coloration des racines (**AYOUB ., 1980**). Ces méthodes sont utiles pour obtenir des informations qualitatives sur les espèces présentes.

Pour obtenir des données quantitatives, il est plus efficace de procéder à une méthode d'extraction des nématodes à partir du sol ou des tissus racinaires, la plus simple étant l'utilisation de l'entonnoir de Baermann (**AYOUB SM., 1980**).

Tarjan a par la suite introduit la technique d'incubation des racines dans des bocaux, tout en étudiant l'impact du temps et de la température d'incubation, ainsi que l'effet de l'ajout de différentes concentrations de peroxyde d'hydrogène. Cela lui a permis de définir des conditions optimales pour l'extraction du *Tylenchulus semipenetrans* Cobb 1913, à partir des racines d'agrumes (**Tarjan., 1960**). Cette méthode a ensuite été perfectionnée par Gowen et Edmunds (**Gowen et Je edmunds., 1978**) afin d'améliorer encore plus la récupération des nématodes (**McSorley et al., 1984**).

- **A partir du sol (Méthode de Baermann)**

1. Matériel

Pour cette phase nous avons utilisé :

- Une balance.
- Une passoire de 2 mm d'entre-maillles.
- Des seaux en plastique de 10 litres.
- Deux tamis (250 μm et 45 μm).
- Un agitateur.
- Des béciers.
- Des entonnoirs de BAERMANN.
- Une pissette.

2. Méthode d'extraction

Afin de déterminer la présence du nématode des *Citrus*, *Tylenchulus semipenetrans*, dans le verger étudié, la méthode de BAERMANN a été utilisée.

Il s'agit d'un entonnoir en verre à col long avec un court tuyau de caoutchouc fermé par une pince de MOHR ou une pince ordinaire, à l'extrémité de son col placé en vertical sur un support.

- **Mode opératoire**

Après homogénéisation de l'échantillon du sol, 250 g de terre ont été pesés et placés dans la passoire, le tout étant ensuite mis sur un seau en plastique (**Figure 100**). Avec un jet d'eau fort, la terre est entraînée en laissant les éléments grossiers (cailloux, débris des végétaux ...) sur la passoire.



Figure 100. Lavage et élimination des éléments grossiers par la passoire

(Photo originale)

La passoire est enlevée et le mélange est agité avec un bâton afin de séparer les nématodes des particules du sol et les mettre en suspension dans l'eau. Le tout est laissé décanter pendant 10 minutes ou plus (selon le type de sol) (**Figure 101**).



Figure 101. Décantation des échantillons (**Photo originale**)

La suspension surnageante est ensuite versée sur deux tamis superposés, à savoir le tamis de 250 μm placé sur le tamis de 45 μm . Les nématodes retenus par ces deux tamis (250 μm et 45 μm) seront récupérés dans un b cher sous un jet de pissette (**Figure 102**).



Figure 102. Tamisage et concentration des nématodes (**Photo originale**)

Le contenu du b cher est vers  dans l'entonnoir de BAERMANN contenant un petit tamis à mailles fines.

Après une durée de 24 heures de repos, on récupère 5 ml du filtrat contenant les nématodes actifs qui ont travers  le petit tamis en se dirigeant vers le fond (**Figure 103**).

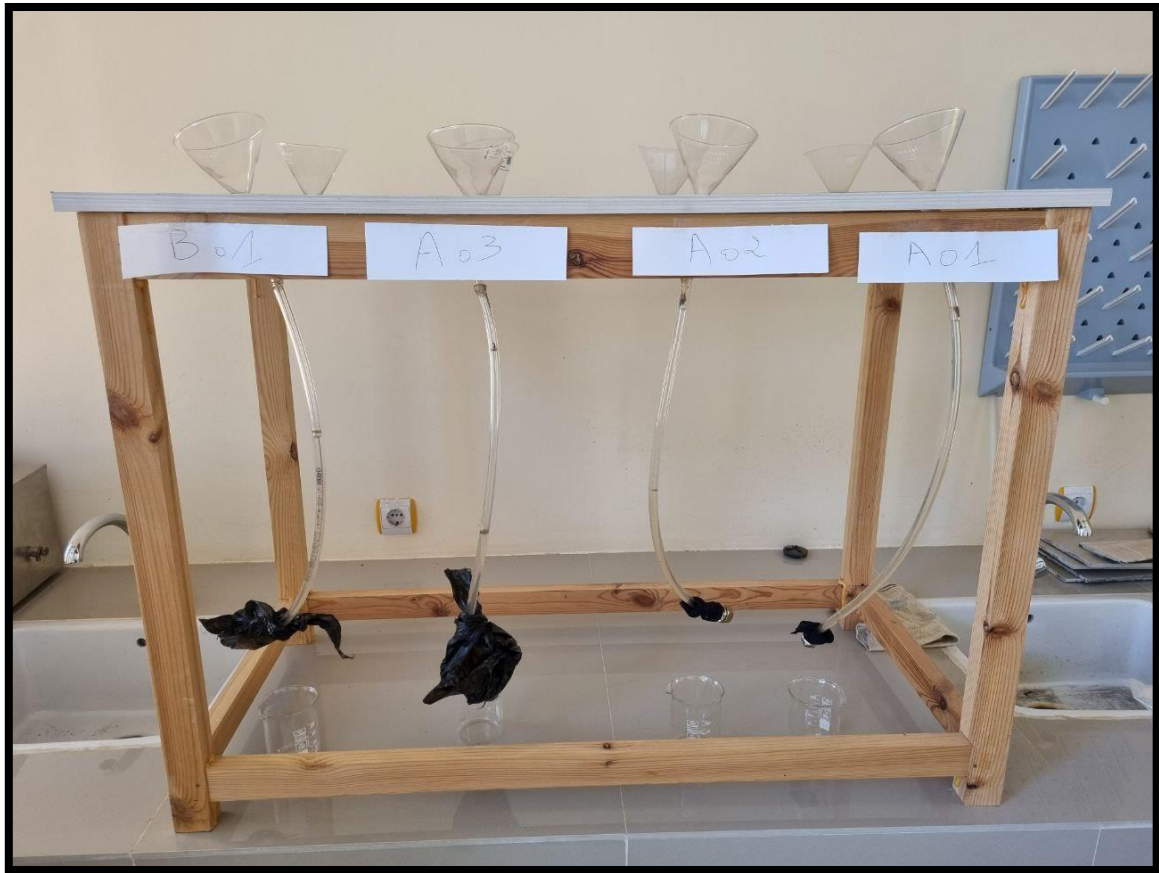


Figure 103. Récupération des nématodes à partir de l'entonnoir de BAERMANN

(Photo originale)

- **A partir des racines (Méthode de Tarjan)**

- 1. Matériel**

- Racines suspectées d'être infestées par *Tylenchulus semipenetrans*.
 - Eau oxygénée (solution de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 à 10-15 %).
 - Bocal en plastique.
 - Eau distillée.
 - Tamis (45 μ m).
 - Microscope optique pour l'observation.

2. Méthode d'extraction

❖ Préparation des racines

- **Récolte** : Des racines fines, jeunes et actives ont d'abord été prélevées autour des zones suspectées d'être infestées par le *Tylenchulus semipenetrans*. (**Figure 104**).



Figure 104. Arbre présentant les symptômes du dépérissement lent

(Photo originale)

- Nettoyage des racines en les rinçant sous l'eau courante pour éliminer le sol et les débris.
- ### ❖ Traitement à l'eau oxygénée
- Préparation du bain d'incubation en mélangeant une solution d'eau oxygénée (Péroxyde d'hydrogène H_2O_2 concentrée à 10-15 %) avec une quantité d'eau équivalente dans un récipient.

Etude expérimentale

- Immersion des racines préparées et découpées dans cette solution et on laisse agir pendant 10 minutes.
- L'eau oxygénée réagit avec les racines, libérant des bulles d'oxygène qui aident à déloger les nématodes (y compris les femelles attachées) (**Figure 105**).



Figure 105. Immersion des racines dans la solution de peroxyde d'hydrogène.

(Photo originale)

❖ Récupération des nématodes

- **Rinçage :** Les racines ont été retirées, puis rincées à l'eau propre afin de récupérer les nématodes détachés.
- L'eau de rinçage ainsi que la solution d'eau oxygénée ont ensuite été versées à travers le tamis (mailles de 45 μm). (**Figure 106**).



Figure 106. Tamis de 45 μ m

(Photo originale)

- ❖ Les résidus retenus sur le tamis ont été récupérés à l'aide d'un jet d'eau de pissette, contenant le concentré de nématodes, dans un récipient propre.

❖ **Décantation**

- Afin de permettre aux nématodes de se déposer au fond du récipient sous l'effet de la gravité, la suspension a été laissée au repos pendant une heure dans un bécher.

- L'excédent d'eau a ensuite été retiré délicatement à l'aide d'une pipette, sans perturber les nématodes déposés dans le culot.

- Homogénéisation de la suspension de nématodes en mélangeant soigneusement la suspension concentrée pour éviter que les nématodes ne se regroupent au fond.

Cette méthode permet de concentrer les nématodes dans un petit volume d'eau pour pouvoir effectuer l'expérience, tout en minimisant la perte d'échantillon.

II-3-Observation sous microscope optique et dénombrement

La solution concentrée des nématodes de chaque échantillon a été mise dans des boîtes pétri. Une fois l'extraction des nématodes du sol et des racines réalisées, on commence le comptage sous une loupe binoculaire.

II-4- Application de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* sur les nématodes

II-4-1-Extraction de l'huile essentielle d'*Inula viscosa*

Une quantité de 15 kg de la partie aérienne d'*Inula viscosa* a été récoltée en vue de l'extraction de son huile essentielle par hydrodistillation, au niveau du Parc National de Lalla Setti à Tlemcen.

Les parties aériennes d'*Inula viscosa* collectées sont placées dans des cuves en inox. Ces cuves sont ensuite traversées par un courant de vapeur d'eau. La chaleur générée par cette vapeur permet de libérer les huiles essentielles contenues dans les tissus de la plante. Ces huiles essentielles, qui sont volatiles s'évaporent et remontent le long de la colonne vers un condenseur, où elles se refroidissent et se condensent.

En raison de leur moindre densité et de leur insolubilité dans l'eau, les huiles essentielles se séparent naturellement de l'eau, formant deux phases distinctes dans le système. Cette séparation est facilitée dans un décanteur (aussi appelé essencier), un réservoir de séparation où l'huile essentielle, flottant au-dessus de l'eau, est récupérée. Ce procédé permet ainsi de récolter l'huile essentielle pure d'*Inula viscosa*, tandis que l'eau distillée, appelée hydrolat, peut servir comme solution aromatique.



Figure 107. Dispositif d'hydrodistillation (Photo originale)



Figure 108. Décanteur contenant l'huile essentielle extraite

(Photo originale)

Étant donné le faible rendement obtenu lors de l'extraction de l'huile essentielle d'*Inula viscosa*, nous avons opté pour l'utilisation d'huiles essentielles commerciales afin de réaliser nos expérimentations. Cette approche nous a permis de contourner les limitations liées à l'extraction directe de cette plante, tout en assurant la disponibilité des composés requis pour notre étude.

II-4-2-Tester l'efficacité de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* sur le *Tylenchulus semipenetrans*

a. Matériel

- La suspension du *Tylenchulus semipenetrans* extraite à partir des racines d'agrumes infestées.
- Boîtes de Petri.
- Pipettes.
- Microscope optique.
- Eau distillée.

- Bleu de Méthylène.
- Différentes concentrations d'huile essentielle d'*Inula viscosa* (0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%).

L'huile essentielle pure et concentrée d'*Inula viscosa* a été diluée conformément à la méthodologie adoptée à 100% en utilisant l'huile de tournesol comme solvant afin d'obtenir des concentrations bien définies (0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%) permettant ainsi d'obtenir une relation dose-réponse fiable, d'améliorer la reproductibilité de l'expérience par d'autres chercheurs, de faciliter l'analyse statistique permettant de déterminer des valeurs clés comme la DL50 et de minimiser le risque de biais expérimentaux en améliorant la dispersion de l'huile dans l'eau.

b. Traitement des nématodes par l'huile essentielle d'*Inula viscosa*

- **Quantification des nématodes** : Les nématodes ont été comptés au microscope optique afin d'obtenir une densité uniforme (50 nématodes/ml) dans chaque boîte de Petri.
- Les traitements à base d'*Inula viscosa* ont ensuite été mis en place en mettant dans chaque boîte de Petri 5ml de suspension de nématodes (50 nématodes/ml soit une moyenne de 250 nématodes/boîte de Petri) et on a ajouté 2ml d'huile essentielle à différentes concentrations (0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%) (**Figure 109**).
- Comme contrôle négatif, 5 ml de suspension de nématodes ont été utilisés avec 2 ml d'huile de tournesol pure dans une boîte de Petri.



Figure 109. Traitement des échantillons de nématodes par l'huile essentielle d'*Inula viscosa* (Photo originale)

c. Incubation

- Les boîtes de Petri ont été placées à température ambiante (25 à 30°C), puis ont été laissées à incuber pendant 48 heures.

d. Observation des résultats

Après 48 heures d'incubation, L'observation des résultats a été commencée sous microscope optique et le comptage des nématodes morts et vivants afin d'évaluer l'efficacité de nos traitements à base d'huile essentielle d'*Inula viscosa* et de déterminer la concentration minimale efficace.

III- Résultats et discussion

III-1- Résultats de l'extraction des nématodes

Le but de notre étude consistait à identifier le nématode des agrumes « *Tylenchulus semipenetrans* » Cobb 1913 au sein de la ferme pilote Belaidouni Mohammed, commune d'El fehoul, et à tester l'efficacité de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* comme bionématicide contre ce dernier.

Un échantillonnage aléatoire a été réalisé dans ce verger en calculant le nombre de nématodes trouvés dans chaque échantillon des points choisis A, B et C sous une loupe binoculaire.

Cette expérience a été réalisé au niveau du laboratoire du département d'Ecologie et environnement Université de Tlemcen. Les résultats obtenus de ce dénombrement sont présentés dans le **Tableau 12**.

Tableau 12. Résultats après l'observation sous la loupe binoculaire

Echantillons	Nombre de Nématode	Moyenne
A1	09	11
A2	13	
A3	11	
B1	18	19.33
B2	20	
B3	17	
C1	23	22
C2	18	
C3	25	

Ce tableau présente une variation du nombre de nématodes observés sous une loupe binoculaire dans des échantillons prélevés sur trois points (A, B et C), chacun contenant trois arbres d'agrumes. En tenant compte de la proximité du point A avec l'Oued Isser et un tuyau d'irrigation, ainsi que des conditions de faible humidité et de salinité élevée aux points B et C, nous pouvons interpréter ces résultats de manière plus détaillée.

La salinité qui est un facteur important pour l'évolution des nématodes comme le souligne (**Duncan et al.,1992**), joue un rôle important dans la distribution de la densité des nématodes au sein du verger.

- Echantillon du point A (Moyenne : 11 nématodes), situé près d'une source d'eau (oued et tuyau d'irrigation) donc humidité plus élevée et salinité plus faible, moins de stress pour les plantes, ce qui pourrait limiter le développement des nématodes.
- Echantillon du point B (Moyenne : 19,33 nématodes) et Point C (Moyenne : 20 nématodes) Faible humidité et salinité plus élevée.

La salinité favorise le développement des nématodes, expliquant leur plus grande présence.

Le stress hydrique des arbres peut également les rendre plus vulnérables aux attaques de nématodes.

L'humidité joue un rôle clé dans la distribution des nématodes. Le point A, bénéficiant d'une meilleure irrigation, a une infestation plus faible. En revanche, les conditions plus arides et salines aux points B et C semblent favoriser la prolifération des nématodes.

III-2- Résultats de l'application de l'huile essentielle d'*Inula viscosa*

III-2-1-Différenciation des nématodes vivants et morts

Sous microscope optique, il est possible de différencier les nématodes morts de ceux vivants en observant plusieurs caractéristiques, telles que leur mouvement, l'aspect de leur corps, et leur coloration par le Bleu de Méthylène.

- **Mouvement**

- Nématodes vivants :

Les nématodes vivants sont mobiles et montrent un mouvement actif, généralement ondulant ou sinueux. Ils peuvent se déplacer de manière linéaire ou faire des mouvements de va-et-vient.



Figure 110. Nématode male sous microscope optique (**Photo originale**)

➤ Nématodes morts :

Les nématodes morts sont immobiles. Ils ne réagissent pas aux changements d'environnement, comme la pression appliquée ou la lumière.

Leur corps peut paraître rigide et ne montre aucun mouvement observable.



Figure 111. Nématode femelle sous microscope optique (originale)

- **Couleur et transparence**

- Nématodes vivants :

Les nématodes vivants ont une apparence translucide ou légèrement colorée. Les détails internes comme le tube digestif ou des organes internes peuvent être visible en fonction du grossissement (**Figure 112**).



Figure 112. Organes internes visible chez un male sous microscope optique (grossissement * 40) **(Photo originale)**.

➤ Nématodes morts :

Les nématodes morts peuvent devenir opaques ou blanchâtres. Leur corps peut sembler "flasque" ou déformé. En raison de la perte du turgor (la pression interne), le corps des nématodes morts peut sembler plus flasque ou replié.

Les structures internes, comme les organes digestifs, peuvent être moins visibles ou apparaître déformées.

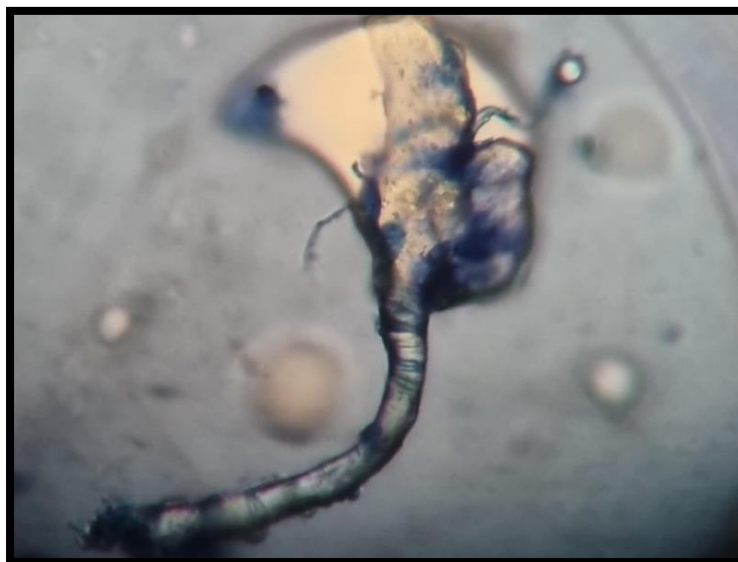


Figure 113. Nématode femelle morte après traitement par l'huile essentielle d'*Inula viscosa* **(Photo originale)**

- **Morphologie du corps**

- Nématodes vivants

Les nématodes vivants ont une forme droite et cylindrique. Leur corps est généralement tendu et bien défini, avec des bords clairs et lisses.

- Nématodes morts :

Les nématodes morts peuvent avoir un corps qui semble replié, écrasé ou déformé.

Parfois, les nématodes morts peuvent présenter une courbure ou une perte de leur forme normale, ce qui est un signe de dégradation.



Figure 114. Nématode male mort après traitement par l'huile essentielle d'*Inula viscosa* sous microscope optique (**Photo originale**)

- **Coloration par le Bleu de Méthylène**

Les colorants vivants (comme le bleu de méthylène ou le rouge de Congo) marquent les tissus vivants, mais ne colorent pas les nématodes morts. Cela nous a aidé à visualiser clairement les nématodes vivants et à les différencier des nématodes morts.



Figure 115. Nématode mort non coloré après coloration par le Bleu de Méthylène
(Photo originale)

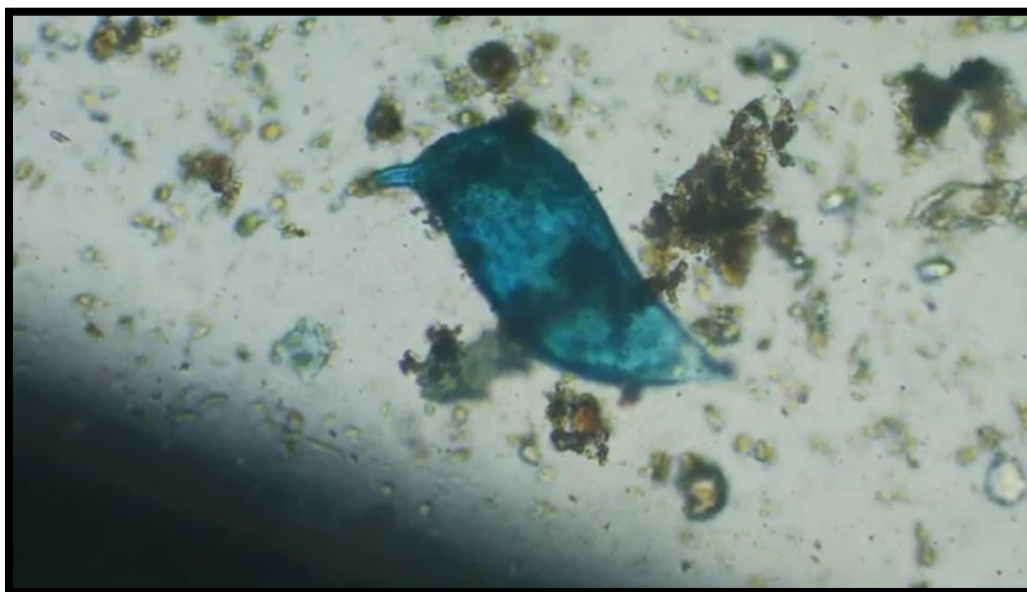


Figure 116. Nématode femelle vivante colorée après coloration par le Bleu de Méthylène
(Photo originale)

III-2-2-Calcul du pourcentage de mortalité dans chaque boîte de Petri

Pourcentage de mortalité (%) = (nombre de nématode morts/nombre total de nématode dans la boîte de Pétri) * 100.

La mortalité corrigée permet d'évaluer plus précisément l'efficacité d'un produit en prenant en compte la mortalité naturelle dans les groupes témoins. En effet, les mortalités observées dans les populations traitées ne correspondent pas entièrement à la mortalité induite par le produit testé, car il existe toujours une mortalité naturelle dans les groupes témoins, indépendante du traitement (**Benazzeddine., 2010**). Pour corriger cette mortalité naturelle, on utilise la formule d'**Abbott (1925)**, qui permet d'ajuster les pourcentages de mortalité dans les populations traitées.

La formule d'Abbott est la suivante :

$$MC\% = (M - Mt * 100) / (100 - Mt)$$

Où :

- **MC** : représente la mortalité corrigée.
- **M** : est le pourcentage de morts observées dans la population traitée.
- **Mt** : est le pourcentage de morts dans la population témoin.

III-2-3-Analyse des résultats

Afin de vérifier si l'effet de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* sur la mortalité des nématodes est significatif et dose-dépendant, un test ANOVA a été réalisé. Les résultats obtenus pour chaque concentration d'huile essentielle d'*Inula viscosa* sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 13. Résultats obtenus pour chaque concentration d'huile essentielle.

Concentration d' <i>Inula viscosa</i> (%)	Témoin	0.1%	0.5%	1%	2%	5%	10%
Nombre de nématodes morts	3	63	93	128	163	218	245
Nombre de nématodes vivants	247	187	157	122	87	32	5
Nombre total de nématodes dans la boîte de Petri	250	250	250	250	250	250	250
Taux de mortalité (%)	1%	25%	37%	51%	65%	87%	98%
Mortalité corrigée (%)	1%	24%	36%	50%	65%	87%	98%

L'analyse statistique des données a été réalisée par l'utilisation du Logiciel Excel et a révélé que l'huile essentielle d'*Inula viscosa* a un effet marqué sur la mortalité du nématode *Tylenchulus semipenetrans*, elle se montre particulièrement létale pour les nématodes, réduisant leur population de manière significative avec ($F=74.9$) et ($p=0.0001$).

Le test ANOVA a permis ainsi de confirmer l'hypothèse initiale, établissant une relation significative entre la concentration d'huile essentielle et le taux de mortalité des nématodes. L'effet dose-dépendant observé suggère que l'huile essentielle d'*Inula viscosa* pourrait constituer une alternative efficace et naturelle aux nématicides chimiques traditionnels.

III-2-4-Détermination de la dose létale 50 (DL50)

La dose létale DL50 représente la dose de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* causant la mortalité de 50% de la population d'étude. Elle a été calculée à l'aide de la méthode des Probits en utilisant le logiciel MINITAB (version 19). Cette méthode repose sur une régression linéaire entre les logarithmes des doses d'huile essentielle d'*Inula viscosa* et les probits de mortalité corrigée, permettant ainsi d'estimer la concentration à laquelle 50% des individus exposés sont tués par l'huile (**Figure 117**).

En appliquant cette méthode à nos données, nous avons obtenu une DL50 d'environ **1%** en concentration d'*Inula viscosa*. Ce résultat indique qu'à une concentration de 1%, l'huile essentielle induit une mortalité de 50% chez les nématodes. Ce seuil de 1% représente la dose à partir de laquelle l'effet létal de l'huile essentielle devient significatif dans le cadre de notre expérience ce qui justifie son potentiel en tant qu'agent de contrôle biologique.

La DL50 à 1% démontre l'efficacité de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* à des concentrations relativement faibles, suggérant son utilisation potentielle dans la gestion du nématode des *Citrus* le *Tylenchulus semipenetrans*.

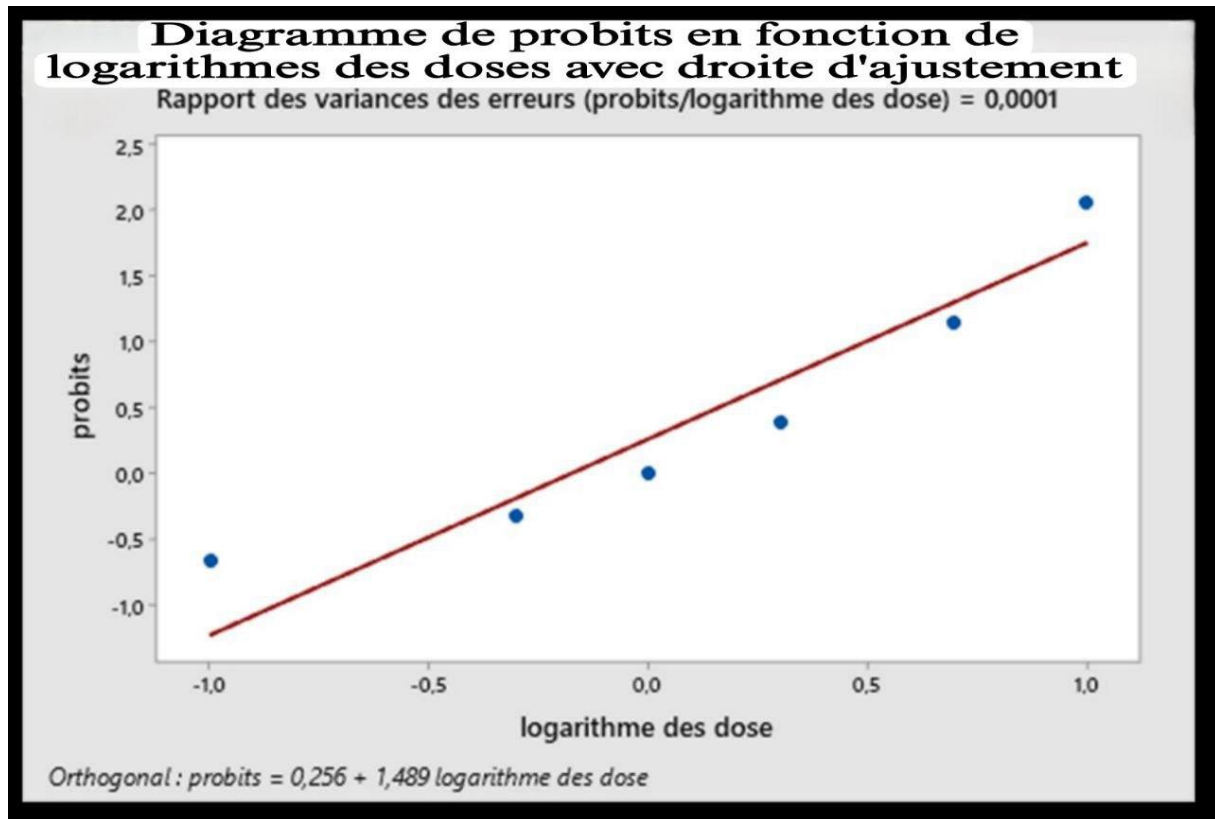


Figure 117. Régression linéaire entre le logarithme des doses d'*Inula viscosa* et les probits de mortalité en utilisant le logiciel MINITAB.

IV- Discussion

(Gutbrod., 2018) a réalisé une étude sur l'inhibition de l'Acetyl CoA Carboxylase chez les nématodes par le pesticide chimique "le Spirotetramat".

L'étude du Docking moléculaire a révélé que le spirotetramat présente un score d'interaction de -6.6 kcal/mol avec l'acétyl-CoA carboxylase, tandis que l'acétate de bornyle affiche un score très proche de -6.3 kcal/mol. Bien que le spirotetramat possède un poids moléculaire nettement plus élevé (373.44 g/mol) que celui de l'acétate de bornyle (196.29 g/mol), la différence d'affinité de liaison estimée reste relativement faible.

Par conséquent, ces résultats permettent de suggérer que, malgré son poids moléculaire plus faible, l'acétate de bornyle pourrait exercer un pouvoir inhibiteur comparable à celui du spirotetramat contre l'Acétyl-CoA Carboxylase. Cette observation ouvre la voie à des investigations plus approfondies sur le potentiel biologique de l'acétate de bornyle en tant qu'inhibiteur alternatif, présentant une structure plus légère.

Dans la partie *in silico*, une comparaison a été effectuée entre le pouvoir inhibiteur du pesticide chimique spirotetramat et celui du bio-nématicide acétate de bornyle, extrait d'*Inula viscosa*. Nos résultats montrent que l'acétate de bornyle présente un score de Docking comparable à celui du spirotetramat, ce qui suggère une efficacité potentielle similaire contre les nématodes des *Citrus*. De plus, nos essais *in vivo* ont confirmé son efficacité satisfaisante, renforçant son potentiel en tant qu'alternative biologique.

Le spirotetramat est un pesticide chimique largement utilisé en agriculture pour son action systémique contre divers ravageurs. Cependant, son utilisation est associée à des effets indésirables sur l'environnement et la santé humaine. En effet, il peut entraîner une bioaccumulation et affecter les organismes non cibles, notamment les pollinisateurs et la faune aquatique. De plus, des études suggèrent un risque de toxicité chronique et des perturbations endocriniennes chez l'homme en cas d'exposition prolongée.

En revanche, l'acétate de bornyle est un composé d'origine naturelle, extrait de la plante *Inula viscosa*, représente une alternative plus respectueuse de l'environnement. Nos résultats *in vivo* ont démontré son efficacité dans le control de la population de *Tylenchulus semipenetrans*, tout en limitant les risques toxiques pour les écosystèmes et la santé humaine. Sa

Etude expérimentale

biodégradabilité et son mode d'action naturel en font un candidat prometteur pour une agriculture durable.

En conclusion, l'acétate de bornyle se positionne comme une alternative viable au spirotetramat, offrant une efficacité prouvée tout en réduisant les risques environnementaux et sanitaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les maladies causées par les nématodes phytoparasites représentent une menace majeure pour l'agriculture mondiale, compromettant le rendement et la productivité des cultures, en particulier celles des agrumes. Parmi ces parasites, le *Tylenchulus semipenetrans* est l'un des plus redoutables, entraînant des pertes économiques significatives sur le plan agricole.

Face aux limites et aux effets délétères des nématicides chimiques sur l'environnement et la santé humaine, la recherche de solutions alternatives, naturelles et durables, devient une nécessité impérieuse. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude, visant à évaluer le potentiel nématicide de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* dont l'acétate de bornyle constitue le principal principe actif, et à explorer ses perspectives d'application en lutte biologique. Cette étude s'inscrit donc dans une dynamique de valorisation des ressources végétales locales pour le développement de stratégies alternatives en protection des cultures.

Grâce aux avancées des outils informatiques, la modélisation moléculaire a rapidement pénétré le domaine de la recherche biologique, permettant des expériences plus rapides et moins coûteuses, tout en réduisant le gaspillage du matériel expérimental. Les résultats du Docking moléculaire réalisés avec le logiciel « Autodock » montrent que le complexe 1BDO-Acétate de bornyle, principe actif d'*Inula viscosa*, présente le score le plus faible, comparable à celui du Spirotetramat, avec une légère différence. Cependant, ce dernier étant un insecticide chimique ciblant l'Acétyl-CoA Carboxylase, nous estimons qu'*Inula viscosa* constitue un bio-nématicide efficace et écologique contre le *Tylenchulus semipenetrans*.

L'application des résultats obtenus par l'étude *in silico* a été réalisée à la ferme pilote de Belaidouni Mohammed, située dans la région d'el Fehoul. Un échantillonnage aléatoire a été effectué, et les nématodes ont été extraits à l'aide de la méthode de Baermann et de la méthode de Tarjan, au sein des laboratoires du département d'Ecologie et environnement.

Les résultats de cette expérience ont montré une efficacité significative de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* contre le *Tylenchulus semipenetrans*. L'augmentation de la concentration appliquée s'est traduite par une hausse significative du taux de mortalité des nématodes, confirmant ainsi l'activité bio-nématicide de cette huile. Ces observations soulignent l'intérêt des composés bioactifs présents dans l'huile essentielle d'*Inula viscosa*,

qui pourraient constituer des agents de biocontrôle prometteurs.

Toutefois, bien que ces résultats soient encourageants, plusieurs questions demeurent ouvertes et méritent d'être approfondies. Il serait essentiel d'étudier la stabilité et la persistance de cette huile essentielle dans le sol pour garantir une efficacité prolongée sans perturber l'écosystème édaphique. De plus, l'évaluation de son impact sur les organismes non ciblés, y compris la microflore bénéfique du sol et les auxiliaires de culture, constituera une étape clé avant toute application à grande échelle.

D'un point de vue appliqué, ces travaux ouvrent la voie à des perspectives innovantes en biocontrôle. La mise au point de formulations optimisées, intégrant des agents stabilisants ou des supports d'encapsulation, pourrait permettre d'améliorer la biodisponibilité et l'efficacité de l'huile essentielle dans des conditions réelles de culture. De même, des essais en conditions de terrain seront nécessaires pour valider ces résultats et adapter les protocoles d'application aux contraintes agronomiques et environnementales.

Cette recherche met en évidence le potentiel de l'huile essentielle d'*Inula viscosa* comme alternative naturelle aux nématicides chimiques sans causer d'effets néfastes sur l'écosystème et contribue à enrichir les connaissances sur les stratégies de lutte biologique contre le *Tylenchulus semipenetrans*. Elle ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour une agriculture plus durable, respectueuse de l'environnement et compatible avec les exigences de l'agriculture biologique.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abraham, M.J., Murtola, T., Schulz, R., Pall, S., Smith, J.C., Hess, B., Lindahl, E. (2015) GROMACS: High performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers', *SoftwareX*, 1, pp. 19–25.

Abdelli, I., Hassani, F., Bekkel Brikci, S., & Ghalem, S. (2020). *In silico* study the inhibition of Angiotensin converting enzyme 2 receptor of COVID-19 by *Ammoides verticillata* components harvested from western Algeria. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 1–17. doi:10.1080/07391102.2020.1763199

Agriculture du Maghreb (2017).

Akkache, M. (2018) - 'L'agriculture et les cultures fruitières dans le Nord-Ouest de l'Algérie', *Revue des Sciences et Technologies*.

Al Hazmi, S., Al Yahia, F. & El Sardy, M. (1988) - 'Effect of four fungi isolated from treated sewage water on population development of *Tylenchulus semipenetrans*', *Journal of Nematropica*, 18(2), Saudi Arabia, pp. 93-97.

Albert, Y. & Foste, F. (1996) - *Encyclopedia of Common Natural Ingredients Used in Foods, Drugs, and Cosmetics*, 2ème édition, Wiley-Interscience Publication, 445 p.

Alcaraz, F. (1991) - *Flore de l'Algérie*, Institut National des Sciences et Technologies de la Mer (INSTM).

Amamra, S. & Hedhoud, A. (2022) - 'Les méthodes biotechnologiques de la régénération et la conservation des plantes: le cas d'une plante aromatique *Salvia officinalis* L.', Thèse, Université Larbi Tebessi, Tebessa. Available at: <http://dspace.univtebessa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/5050p>.

Amor, I.L.-B., Boubaker, J., Sgaier, M.B., Skandrani, I., Bhourri, W., Neffati, A. & Chekir-Ghedira, L. (2009) - 'Phytochemistry and biological activities of *Phlomis* species', *Journal of Ethnopharmacology*, 125(2), pp. 183–202. doi: 10.1016/j.jep.2009.06.022.

Angot, A. (1916) - *Traité élémentaire de météorologie*, Edit. Gauthier-Villars et Cie, Paris.

Appendino, G., Mercalli, E., Fuzzati, N., Arnoldi, L., Stavri, M., Gibbons, S., Ballero, M. & Maxia, A. (2004) - 'Antimycobacterial coumarins from the Sardinian giant fennel (*Ferula communis*)', *Journal of Natural Products*, 67(2), pp. 108-110.

Arvy, M.-P. & Gallouin, F. (2015) - *Légumes d'hier et d'aujourd'hui*, Humensis, p. 103.

Atik Bekkara, et al. (2007) - 'Composition chimique de l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* L. poussant à l'état spontané et cultivé de la région de Tlemcen', *Biologie & Santé*, 7, pp. 6-11.

Attou, A., Davenne, D., Benmansour, A. & Lazouni, H.A. (2017) - 'Chemical composition and biological activities of *Ammoides verticillata* essential oil from west Algeria', *Phytothérapie*, doi: 10.1007/s10298-017-1108-1.

Aubert, B. & Vullin, G. (1997) - *Pépinières et plantations d'agrumes*. Ed. Cirad – Flhor, Montpellier, pp. 11-168.

Audouze, C. (2003) - 'Vers une parallélisation par bandes en chimie quantique', Laboratoire de Mathématiques, UMR CNRS 8628, Université Paris-Sud, pp. 1-8.

Ayoub, S.M. (1980) - *Plant Nematology: An Agricultural Training Aid*, NemaAid Publications, Sacramento, California.

B.I.H.A. (2009) - *Fiche variétale d'agrumes*, Maroc, n° 14377, 25p.

Babilotte, K. (2024) - 'Étude d'endommagement sous choc en dynamique moléculaire par développement d'un algorithme d'analyse in-situ massivement parallèle', *Science des matériaux*, Université Paris-Saclay.

Bachélier, G. (1978) - *La faune du sol, son écologie et son action*, ORSTOM, Service des Publications, Bondy, pp. 97-125.

Bagnouls, F. & Gaussen, H. (1953) - 'Saison sèche et indice xérothermique', Doc. Carte prote. veg. art.8, Toulouse.

Bagnouls, F. & Gaussen, H. (1954) - *Géographie des plantes*, 2nd ed., Paris.

Bahar, A., Al-Howiriny, T., Al-Rehaily, A.J. & Mossa, J.S. (2004) - 'Verbenacine and salvinine: two new diterpenes from *Salvia verbenaca*', *Journal of Biosciences*, 59L21, pp. 9–14.

Baines, R. (1950) - 'Nematodes on Citrus: Soil fumigation and resistant Citrus varieties promising as control', *California Agriculture*, pp. 4-8.

Baines, R.C. & Clarke, O.T. (1952) - 'Citrus-root nematode. Effects on young lemon and orange trees studied in inoculation tests under controlled conditions', *California Agriculture*, 6, pp. 9-13.

Baines, R.C. (1973) - 'The effect of soil type on movement and infection rate of larvae of *Tylenchulus semipenetrans*', *Department of Nematology, University of California*, J:07, pp. 60-61.

Baines, R.C., Van Gundy, S.D. & Sher, S.A. (1959) - 'Citrus and avocado nematodes', *California Agriculture*, 13, pp. 16-18.

Bary-Lenger, A., Evrard, R. & Bathy, P. (1979) - *La forêt*, Vaillant Carmine S. Imprimeur, Liège.

Bassereau, M., Chaintreau, A., Duperrex, S., Joulain, D., Leijts, H., Loesing, G., Owen, N., Sherlock, A., Schippa, C. & Thorel, P.-J. (2007) - 'GC-MS Quantification of suspected volatile allergens in fragrances. 2. Data treatment strategies and method performances', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(1), pp. 25-31.

Baydar, H. & Fehmi, G. (1998) - 'Antalya Dogal Florasında Bal Arısı (*Apis mellifera*)'nın Polen Toplama Aktivitesi, Polen Tercihi ve Farklı Polen Tiplerinin Morfolojik ve Kalite Özellikleri', *Tr. J. of Agriculture and Forestry*, 475-482.

Bayer, E., Buttler, K., Finkenzeller, X. & Grau, J. (2005) - *Guide de la flore méditerranéenne*, Delachaux et Niestlé, France.

Belabdelli, F., Piras, A., Bekhti, N. et al. (2020) - 'Chemical Composition and Antifungal Activity of *Foeniculum vulgare* Mill.', *Chemistry Africa*, 3, pp. 323–328. <https://doi.org/10.1007/s42250-020-00130-x>.

Bellakhdar, J., Berrada, M., Denier, C., Holeman, M. & El Idrisi, A. (1986) - *Plantes médicinales et toxiques du Maroc*, Éditions Ibn Al Baytar, Rabat, Maroc.

Beloued, A. (1998) - *Plantes médicinales d'Algérie*, Office des Publications Universitaires, p. 92.

Benayad, N. (2008) - 'Les huiles essentielles extraites des plantes médicinales marocaines : Moyen efficace de lutte contre les ravageurs des denrées alimentaires stockées', Research Project, University of Sciences, Rabat, Morocco.

Benazzadine, S. (2010) - 'Activité insecticide de cinq huiles essentielles vis-à-vis de *Sitophilus oryzae* et *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae)', *Dép. de Zoologie Agricole et Forestière, Ecole Nationale Supérieure Agronomique*, El Harrach, Alger.

Bendiabdellah, A. (2014) - 'Etudes chimique et biologique des extraits de trois *Daucus* (*D. crinitus*, *D. muricatus* et *D. carota* ssp. *hispanicus*) de la région de Tlemcen', Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid.

Benedeste, A. & Baches, M. (2002) - *Les agrumes*. Ugen Ulmer, Paris.

Bénédicté, A. & Bachès, M. (2011) - *Agrumes : Comment les choisir et les cultiver facilement*, Ed. Ugen Ulmer, Paris, 6 p.

BENOUALI, D. (2016) - 'Extraction et identification des huiles essentielles', Université d'Oran, p. 8-9.

Benson, N.C. & Daggett, V. (2012) - 'A comparison of multiscale methods for the analysis of molecular dynamics simulations', *The Journal of Physical Chemistry B*, 116(29), pp. 8722–8731. <https://doi.org/10.1021/jp302103t>.

Berg, J.M., Tymoczko, J.L., Stryer, L. & Clarke, N.D. (2002) - 'Acetyl coenzyme A carboxylase plays a key role in controlling fatty acid metabolism', *Biochemistry*, Section 22.5, 5th ed., 4th print., W. H. Freeman, New York, NY.

Bergman, C. (2014) - *Aromatherapy: A Complete Guide to the Healing Art*.

Biche, M. (2012) - *Les principaux insectes ravageurs des agrumes en Algérie et leurs ennemis naturels*, Institut national de la protection des végétaux, Ministère de l'agriculture et du développement durable et FAO, 36 p.

Biocyclopedia. (2019)- *Phylum Nematoda: Roundworms | Pseudocoelomate Animals | The Diversity of Animal Life*, Biocyclopedia.

Bocca, C., Gabriel, L., Bozzo, F. & Miglietta, A. (2002) - 'Microtubule-interacting activity and cytotoxicity of the prenylated coumarin ferulenol', *Planta Medica*, 68, pp. 1135-1137.

Bongers, T. (1990)- 'The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition', *Oecologia*, 83, pp. 14-19.

Bonnier, G. (1990) - *La grande flore en couleurs*, Paris: Belin. 4 volumes, 1401p.

Bouazghi, A. (2024) - 'Production d'agrumes en Algérie', *Ministère de l'agriculture, du développement rural et de la pêche, Journal El Moudjahed*.

Boucherit, H. (2012) - 'Etude théorique des interactions intervenant dans l'inhibition de la méthionine aminopeptidase de *Mycobacterium tuberculosis* par diverses molécules', Thèse de Magister en biochimie, Université Mentouri Constantine, Algérie, 71 p.

Boullard, N. (2010) - 'L'effet antibactérien de *Nigella sativa*', *Université Kasdi Merbah Ouargla*.

BOUMAZA, D. (2011) - 'Séparation et caractérisation chimique de quelques biomolécules actives de deux plantes médicinales : *Inula viscosa*, *Rosmarinus officinalis* de la région d'Oran', Magister, Université d'Oran1 - Ahmed Ben Bella.

Bousmaha, L., Atik Bekkara, F., Tomi, F. & Casanova, J. (2007) - 'Chemical composition and antibacterial activity of the essential oil of *Thymus ciliatus* (Desf.) Benth. ssp. eu-ciliatus Maire from Algeria', *J. Essent. Oil Res.*, 19(5), pp. 490–493.

Boutin, V., Geray, L., Krauss, Y. & Vilbert, C. (2015) - *Atlas de biologie*, Dunod, p. 79.

Boyd, D.B., Lipkowitz, B. & Kenny, B. (1982) - 'Molecular mechanics: The method and its underlying philosophy', *Journal of Chemical Education*, vol. 59, no. 4, pp. 269.

Brebion, G., Carcoue, T. & Marc Rauphie, J.C. (1999) - *L'histoire des agrumes*, Ed. S.E.V.E, Service des Espaces Verts et de l'Environnement.

Brickelle, C. & Mioulane, P. (2002) - *Encyclopédie Universelle de 15000 plantes et fleurs de jardins*, Paris: Bordas F.N.A.C.

Broegger Christensen, S., Kjoeller Larsen, I., Rasmussen, U. & Christophersen, C. (1982) - 'Thapsigargin and thapsigarginin, two histamine liberating sesquiterpene lactones from *Thapsia garganica*. X-ray analysis of the 7, 11-epoxide of thapsigargin', *The Journal of Organic Chemistry*, 47(4), pp. 649-652.

Brown, G., Callow, R.K., Vert, C.D., Jones, F.G.W., Rayner, J.H., Shepherd, A.M. & Williams, T.D. (1971) - 'La structure, la composition et l'origine de la couche sous-cristalline chez certaines espèces du genre *Heterodera*', *Nematologica*, 17, pp. 591–599.

Brück, E., Elbert, A., Fischer, R., Krueger, S., Kühnhold, J. & Klueken, A.M. (2009) - 'Movento (r), un insecticide ambimobile innovant pour le contrôle des insectes nuisibles en agriculture: Profil biologique et performance sur le terrain', *Protection des Cultures*, 10, pp. 838–844.

CABI (2019) - '*Tylenchulus semipenetrans* (Citrus Nematode)', disponible à : <https://www.cabi.org> .

Castroviejo, S. et al. (2003) - *Flora Iberica. Daucus*, A.J. Pujadas Salva, Vol. X, pp. 97-125, Real Jardín Botánico, C.S.I.C., éditeurs, Madrid.

Catier, O. & Roux, D. (2007) - *Botanique, pharmacognosie, phytothérapie*, 3ème édition, Ed Wolters Kluwer, France.

Cayrol, J.-C., Djian-Caporalino, C. & Panchaud-Mattei, E. (1992) - *La lutte biologique contre les Nématodes phytoparasites*.

Chaquin, P. (2000) - *Manuel de chimie théorique, application à la structure et la réactivité en chimie moléculaire*, 190 p.

Chemical Institute of Canada (2017) - *The life-saving potential of the deadly carrot, PHARMACEUTICALS*, July 2017.

Chevallier, A. (2001) - *Encyclopédie des Plantes Médicinales*, 2nd edn. Paris: Larousse. Available at: <http://archive.org/details/encyclopedia-des-plantes-medicinales-2001-larousse> [Accessed 19 January 2023].

Chibani, S., Berhail-Boudouda, H., Kabouche, A., Aburjai, T., Kabouche, Z. (2011) - 'Analysis of the essential oil of *Ferula communis* L. from Constantine, Algeria', *International Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 3, pp. 130–134.

Chikhi, A. (2007) - 'Calculs et modélisations des interactions peptide deformylase substances antibactériennes à l'aide de techniques de "docking" (arrimage) moléculaire', Thèse de doctorat d'université : microbiologie, Université Frères Mentouri, Constantine, Algérie, 126 p.

Choudhary, A., Kumar, S., Jaswal, A., Sankhla, J.S., & Kant, R. (2023) - 'Infestation of *Tylenchulus semipenetrans* on citrus plantations and their management', *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, Volume 10, Issue 6, 2023, pp. 67-73.

Ciccarelli, D., Garbari, F. & Pagni, A. (2007) - 'Glandular hairs of the ovary: a helpful character for Asteroideae (Asteraceae) taxonomy', *Bot. Fennici*, 44, pp. 1-7.

Cobb, N.A. (1913) - 'New nematode genera found inhabiting fresh water and non-brackish soils', *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 3, pp. 432-444.

Conseil interprofessionnel de la filière d'agrumes (CNIF agrumes) (2024).

Coyne, D.L., Fourie, H.H. & Moens, M. (2010)- 'Current and Future Management Strategies in Resource-poor Farming', dans R.N. Perry, M. Moens & J.L. Starr (Eds), *Root-Knot Nematodes*, CAB International, Wallingford, U.K., pp. 444-475.

Curk, F., Luro, F., Minuto, G. & Nieddu, G. (2022) - *Les agrumes du Nord de la Méditerranée*, Éditions Alain Piazzola.

Davis, K.G. & Curtis, R.H.C. (2011) - 'Couche de surface des cuticules de nématodes parasites pour les plantes', *Revue annuelle de phytopathologie*, 49, pp. 135–156.

Debord, J. (2004) - *Introduction à la modélisation moléculaire*, pp. 37-41.

Debrach, J. (1959) - 'Notes sur les climats du Maroc occidental, Maroc méridional', 32,342, pp. 1122-1134.

Degrave, F. (2024) - 'Agrumes superstars magazine avantages'.

Delipavlov, D. (2011) - *Guide of Plants in Bulgaria*, Plovdiv, Acad. Publ. House of Agr. Univ., p. 591.

Direction du Secteur Agricole DSA (2025) - *Statistiques de la production d'agrumes à Tlemcen*.

Djebaïli, S. (1978) - 'Recherche phytoécologiques et phytosociologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques de l'atlas saharien Algérien', Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

Djebaïli, S. (1984) - *Steppe algérienne, phytosociologie et écologie*, O.P.U. Alger.

Djellouli, Y. (1981) - 'Etude climatique et bioclimatique des hautes plateaux au sud Oranaise (Wilaya de Saïda) "Comportement des espèces vis-à-vis des éléments du climat"', Thèse de doctorat en Sciences Biologiques, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.

Dobignard, A. & Chatelain, C. (2012) - *Index synonymique de la flore d'Afrique du Nord*, Volume 4: Dicotyledoneae: Fabaceae – Nymphaeaceae. Conservatoire et jardin botaniques, Genève, ISBN 978-2-8277-0126-1, 431 pp.

Dropkin, V. (1969) - 'The necrotic reaction of tomatoes and other host resistant to Meloidogyne: Reversal by temperature', *Phytopathology*.

Duhoux, A. (2011) - 'Caractérisation de la résistance non liée à la cible aux herbicides inhibiteurs de l'ACCCase et de l'ALS chez le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*)', Mémoire de stage, Master FAGE Biologie et Écologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement, Université de Nancy, 5 p.

Duncan, L.W. & El-Morshedy, M.M. (1996) - 'Population changes of *Tylenchulus semipenetrans* under localized versus uniform drought in the citrus root zone', *Journal of Nematology*, 28(3), pp. 360-368.

Duncan, L.W. (2005) - 'Nematode parasites of citrus', dans *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture* (M. Luc, R.A. Sikora & J. Bridge, éd.), CAB International, Wallingford, UK, pp. 437-466.

Duncan, L.W. (2005) - 'Nématode parasites of citrus', in: *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture* (M. Luc, R.A. Sikora, J. Bridge, eds.), 2nd ed., CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 593–607.

Duncan, L.W., Graham, J.H. & TIMER, L.W. (1993) - 'Seasonal patterns associated with *Tylenchulus semipenetrans* and *Phytophthora parasitica* in the citrus rhizosphere', *Phytopathology*, 83(5), pp. 573–581.

Duncan, L.W., Inserra, R.N., O'Bannon, J.H. & El-Morshedy, M.M. (1994) - 'Reproduction of a Florida population of *Tylenchulus semipenetrans* on resistant citrus rootstocks', *Plant Disease*, 78, pp. 1067-1071.

Duncan, L.W., Mashela, P., Graham, J.H. & McSorley, R. (1992) - 'Population densities of *Tylenchulus semipenetrans* related to soil factors in the citrus rhizosphere', *Phytopathology*, 82(3), pp. 345-350.

Edrissi, A. (1982) - 'Etude des huiles essentielles de quelques espèces *Salvia*, *Lavandula* et *Mentha* du Maroc', Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Rabat, Morocco.

El Otmani, M. (2005) - 'Les Agrumes, le maraîchage, et le froid hivernal', *Agadir*, Maroc, n° 127, 4 pp.

El-Badry, M.A. et al. (2020) - 'Essential oils as natural nematocides: A sustainable alternative for nematode control', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 301, 107071.

El-Borai, F.E., Duncan, L.W. & Graham, J.H. (2002) - 'Infection of citrus roots by *Tylenchulus semipenetrans* reduces root infection by *Phytophthora nicotianae*', *J. Nematol.*, 34, pp. 384–389.

ElSharkawy, H.E.A., Saad, S.H. & Halim, A.F. (1995) - *Pharm. Acta Helvetica*, 70, p. 79.

Emberger, L. (1930) - 'Sur la formule climatique applicable en géographie botanique', *C.R.A. cad. Sc.*, 1991: 389-390.

Escartin, I. (2011) - *Guide des agrumes*, Fondation d'entreprise pour la protection et la valorisation du patrimoine végétal, L'Institut Klorane.

Fayet, G. (2010) - 'Développement de modèles QSPR pour la prédiction des propriétés d'explosibilité des composés nitroaromatiques', Thèse de doctorat, Chimie ParisTech.

Felidj, M., Bouazza, M. & Ferouani, T. (2010) - 'Note sur le cortège floristique et l'intérêt de la plante médicinale *Ammoides pussila* (verticillata) dans le Parc national des Monts de Tlemcen (Algérie occidentale)', *Geo-Eco-Trop.*, 34, pp. 147–154.

Fernández-Ocana, A.M., Ortuno-Moya, I., Martos-Gilabert, A.I. & Fernández-López, C. (1993) - 'Saber y utilización de plantas en la provincia de Jaén', *Campana de*, 199-318.

Ferris, H. (2022) - '*Tylenchulus semipenetrans*', *Nemaplex*, University of California, Davis, 19 juillet.

Ferris, H. (2024) - *Nematode identification and management*, University of California, Riverside.

Ferris, H., Bongers, T. & De Goede, R.G.M. (2001) - 'A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept', *Applied Soil Ecology*, 18, pp. 13-29.

Foley, C., Nice, J. & Webb, M.A. (2003) - *Le grand guide des herbes*, éditions First.

Food Agriculture Organization (FAO) (2022).

Food and Agriculture Organization (FAO) (2017) - *N/A*.

Forli, S., Huey, R., Pique, M.E., Sanner, M.F., Goodsell, D.S., Olson, A.J. (2016) - 'Computational protein-ligand docking and virtual drug screening with the AutoDock suite', *Nat. Protoc.*, 11(5), pp. 905–919.

Frinkel, D. & Smit, B. (2002) - *Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications*, 2nd ed., Academic Press, London.

Garcia, N. (2017) - Analyse exploratoire des variables structurant la capacité des communautés de nématodes phytoparasites à limiter l'implantation du nématode de quarantaine *Meloidogyne chitwoodi*.

Gélis Imbert, P. (2018) - *Le Petit Manuel des Huiles Essentielles*, Santé Nature Innovation Editions – Mon programme Huiles essentielles, ISBN: 978-3-907156-05-6.

Gonzalez-Trujano, M.E. et al. (2007) - 'Evaluation of antinociceptive effect of *Rosmarinus officinalis* L. using three different experimental models in rodents', *Journal of Theopharmacology*, 111, pp. 476-482.

Gowen, S.R. & Edmunds, J.E. (1978) - 'An evaluation of some simple extraction techniques and the use of hydrogen peroxide for estimating nematode populations in banana roots', *Plant Disease Reporter*, 57, pp. 678-681.

Grasse, P. (1965) - *Traité de zoologie (anatomie, systématique, biologie)*, tome IV, Némathelminthes, Maisson et Cie, Paris, pp. 146-187.

Greco, J. (1966) - *L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie*, Pub. Université Agr. Révolution Agraire, Algérie.

Greco, N., Basile, M., D'Addabbo, T., Brandonisio, A. (1994) - 'Influence of Aldicarb and Fenamiphos on *Tylenchulus semipenetrans* Population Densities and Orange Yield', *Journal of Nematology*, 25, pp. 768–772.

Grubben, G. J. H. (2004) - *Légumes*, PROTA, p. 315.

Gundy, V. (1958) - 'The life history of the Citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans* Cobb 1913', *Nematologica*, 3, pp. 283-294.

Gutbrod, F., Gutbrod, K., Nauen, R., Elashry, A., Siddique, S., Benting, J., Dörmann, P., Florian, M.W. & Grundler, F.M.W. (2018) - 'Inhibition of Acetyl-CoA carboxylase by spirotetramat causes lipid depletion and surface coat deficiency in nematodes', *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2018.

Hachem, K., MéBarki, M., Hartani, A., Benabdesslem, Y. & Kaid-Harche, M. (2017) - 'Essential Oil Composition of the Root Bark of *Thapsia garganica* (L.) Growing in Northwestern Algeria', *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20(3), pp. 860–863. DOI: 10.1080/0972060X.2017.1332494.

Hassani, A. (1996) - 'Influence de quelques paramètres édaphiques (texture, humidité, salinité, et pH) sur l'évolution du Nématode des citrus: *Tylenchulus semipenetrans* Cobb 1913 (Tylenchulidae) dans la région de Tlemcen (Ferme pilote <<BELAIDOUNI>> d'El Fehoul)'.

HERBAROM (2023) - *Guide complet sur les huiles essentielles*.

Hermann, D. (1996) - *Principes de base en modélisation moléculaire. Aspects théoriques et pratiques*, 4ème édition, Librairie de l'Université de Montréal.

Herzi, N. (2013) - 'Extraction et purification de substance naturelle : comparaison de l'extraction au CO₂ supercritique et des techniques conventionnelles', Thèse de doctorat en Génie Chimique-Procédés, Université de Toulouse.

Inserra, R.N., Duncan, L.W., O'Bannon, H. & Fuller, S.A. (1994) - 'Citrus nematode biotypes and resistance of citrus rootstocks in Florida', *Florida Department of Agriculture & Consumer Services Div. Plant Industry*, Nematology Circular, 205, 4 p.

Inserra, R.N., Vovlas, N., O'Bannon, J.H. & Esser, R.P. (1988) - 'Tylenchulus graminis n. sp. and T. palustris n. sp. (Tylenchulidae), from native flora of Florida, with note on T. semipenetrans and T. furcus', *Journal of Nematology*, 20, pp. 266-287.

Institut Technique de l'Arboriculture Fruitière et de la Vigne (ITAFV) (2021) - *La culture des agrumes*, Tessala El Merdja - Birtouta, Alger.

Institut Technique des Arbres Fruitiers et de la Vigne (ITAFV) (2024) - 'Patrimoine Agrumicole'

IPNI (2020) - *International Plant Names Index*, publié sur Internet <http://www.ipni.org>, The Royal Botanic Gardens, Kew, Harvard University Herbaria & Libraries et Australian National Botanic Gardens, consulté le 21 décembre 2020.

IPNI (2021) - *International Plant Names Index*, Published on the Internet. Available at: <http://www.ipni.org> [Accessed 24 February 2021].

Iqbal, M.A., Mukhtar, T. & Ahmad, R. (2007) - 'Effect of soil types on the movement and infection of citrus nematode, *Tylenchulus semipenetrans*', *Pakistan Journal of Nematology*, 25(1), pp. 69-72.

Jabrane, H., Ben Jannet, F., Harzallah-Skhiri, M., Mastouri, J., Casanova, J. & Mighri, Z. (2009) - 'Flower and root oils of the Tunisian *Daucus carota* L. ssp. maritimus (Apiaceae): Integrated analyses by GC, GC/MS, and 13C-NMR spectroscopy, and in vitro antibacterial activity', *Chem. Biodiv.*, 6, pp. 881–889.

Jacquemond, C., Agostini, D. & Cur, K. (2009) - 'Des agrumes pour l'Algérie', *Bureau d'ingénierie en horticulture et agro-industrie*, 4 pp.

Jacquemond, C., Curk, F. & Heuzet, M. (2013) - *Les clémentiniers et autres petits agrumes*. Quae, Versailles: Quae. Phytogénétiques, Rome, Italie.

Jafari Footami, I., Akbarlo, M., Mazandarani, M. & Foroozeh, M.R. (2017) - 'Evaluation of ecological requirements, essential oil composition, total phenol and flavonoid content and antioxidant activity of *Phlomis herba-venti* in HezarJerib area of Behshahr', *Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants*, 4(4), pp. 24-36.

Jensen, F. (2007) - *Introduction to Computational Chemistry*, Department of Chemistry, University of Southern Denmark, Odense, Denmark.

Jones, L., Giorgi, C. & Urwin, P. (2011) - 'C. elegans as a Resource for Studies on Plant Parasitic Nematodes', dans J. Jones, G. Gheysen & C. Fenoll (Eds), *Genomics and Molecular Genetics of Plant-Nematode Interactions*, Springer Netherlands, pp. 175-220.

Kallel, S., Louhichi, A., B'Chir, M.M. & Van Oostveldt, P. (2005) - 'Structure du site trophique induit par *Tylenchulus semipenetrans* sur bigaradier observé en microscopie photonique, confocale et électronique à transmission', *Laboratoire de Nématologie - Institut National Agronomique de Tunisie*, 43, Avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis-Mahrajène, Tunisie, Laboratorium voor Biochemie en moleculaire Cytologie-Un.

Kara, M. (2018) - *Les agrumes*.

Karboa, M. (2001) - 'L'agrumiculture en Algérie', *Option Méditerranéenne*, n° 43, Ed. CIHEAM, pp. 21-26.

Kheffi, H.S. (2015) - 'Études physiologiques et génétiques de caractères morpho-physicochimiques des fruits d'agrumes au cours de la maturation jusqu'à l'abscission', Montpellier, France, pp. 18-31.

Kholkhal, F. (2014) - 'Étude phytochimique et activité antioxydante des extraits des composés phénoliques de *Thymus ciliatus* ssp. *coloratus* et ssp. *euciliatus*', Thèse, Université de Tlemcen.

Knobloch, K.A., Pauli, B., Iberl, H., Weigand, N., & Weis, N. (1989) - 'Antibacterial and antifungal properties of essential oil components', *Journal of Essential Oil Research*, 1, pp. 119-123.

Köhler, F.E. (2007) - *Köhler's Medizinal-Pflanzen*.

Krezdorn, A. (1970) - 'Citrus cultivars for the tropics', *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, pp. 336-341.

Kutzner, C., Páll, S., Fechner, M., Esztermann, A., de Groot, B.L. & Grubmüller, H. (2019) - 'More bang for your buck: Improved use of GPU nodes for GROMACS 2018', *J. Comput. Chem.*, 40, pp. 2418–2431.

Labadie, C. (2015) - *Analyse fine et stabilisation des hydrolats de rose et de fleur d'oranger*, Thèse de doctorat, Université de Montpellier, École doctorale « SP-SA » ED 306, UMR 408 - INRA « Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale ».

Lacroix, M. (2006) - 'Nématode doré de la pomme de terre détecté au Canada', *Bulletin d'information*, 3, pp. 1-3.

Laghchimi, M., Znini, L., Majidi, F., Renucci, A., El Harrak, J. & Costa, J. (2014) - 'Chemical composition and effect of liquid and vapor phase of *Lavandula multifida* essential oil on mycelial growth of fungi responsible for the rot of apple', *J. Essent. Oil Res.*, 28, pp. 2508.

Lahlou, M. (2004) - 'Methods to study the phytochemistry and bioactivity of essential oils', *Phytotherapy Research*, 18(6), pp. 435-448.

Lahouel, M., Zini, R., Zellagui, A., Rhouati, S., Carrupt, P.A. & Morin, D. (2007) - 'Ferulenol specifically inhibits succinate ubiquinone reductase at the level of the ubiquinone cycle', *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 355, pp. 252-257.

Lanfranchi, D.-A., Laouer, H., El Kolli, M., Prado, S., Maulay-Bailly, C. & Baldovini, N. (2010) - 'Bioactive Phenylpropanoids from *Daucus crinitus* Desf. from Algeria', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(4), pp. 2174–2179. doi: 10.1021/jf903760b.

Lawrence, B.M. (1995) - *The isolation of aromatic materials from natural plant products*.

Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Arta, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., Ulbrich, U. & Xoplaki, E. (2006) - 'The Mediterranean Climate: An Overview of the Main Characteristics and Issues', in *Mediterranean Climate Variability and Predictability*, Elsevier, pp. 1-26.

Liotta, D. (1988) - *Advances in Molecular Modeling*, Jai Pr, Greenwich.

Loussert, R. (1989) - *Les agrumes : Arboriculture*, Vol. 1, Ed. Lavoisier, Paris, France, 113 pp.

Luc, M. & Vilardebo, A. (1961) - 'Les nématodes associés aux bananiers cultivés dans l'Ouest africain. I. Espèces parasites. Dommages causés', *Fruits*, 16(5), pp. 205-219.

Luc, M., Hunt, D.J. & Mochon, J.E. (1990) - 'Morphology, Anatomy and Biology of Plant Parasitic Nematodes', dans M. Luc, R.A. Sikora & J. Bridge (Eds), *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture*, CAB International Institute of Parasitology, pp. 1-45.

Luc, M., Sikora, R.A. & Bridge, J. (1990) - *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture*. Wallingford, UK: CAB International Institute of Parasitology, 629 pp.

Lucchesi, M.-E. (2005) - *Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes : Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles*, Thèse de Doctorat, Université de la Réunion.

Lucchesi, M.E., Chemat, F. & Smadja, J. (2004) - 'Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: comparison with conventional hydro-distillation', *Journal of Chromatography A*, 1043(2), pp. 323-327.

Luro, F. (2015) - *L'origine des agrumes : Leur évolution et la naissance des espèces cultivées*, pp. 35-36.

Mala, J.G.S. & Tekenchi, S. (2008) - 'Understanding structural features of microbial lipases — an overview', *Analytical Chemistry/Insights*, 9-19.

Mamoci, E., Cavoški, I., Andres, M.F., Diaz, C.E. & Gonzalez-Coloma, A. (2012) - 'Chemical characterization of the aphid anti-feedant extracts from *Dittrichia viscosa* and *Ferula communis*', *Biochemical Systematics and Ecology*, 43, pp. 101-107.

Mamoci, E., Cavoški, I., Simeone, V., Mondelli, D., Al-Bitar, I. & Caboni, P. (2011) - 'Chemical composition and in vitro activity of plant extracts from *Ferula communis* and *Dittrichia viscosa* against postharvest fungi', *Molecules*, 16, pp. 2609-2625.

Manner, I.I., Buker, R.S., Easton, S.V. & Elevitch, C.R. (2005) - 'Citrus species (*Citrus*)', Version 1.1, dans C.R. Elevitch (éd.), *Species profiles for pacific island agroforestry*, Permanent Agriculture Resources (PAR), Hawaii, pp. 34.

Marchi, A., Appendio, G., Pirisi, I., Ballero, M. & Loi, M.C. (2003) - 'Genetic differentiation of two distinct chemotypes of *Ferula communis* (Apiaceae) in Sardinia (Italy)', *Biochemical Systematics and Ecology*, 31, pp. 1397-1408.

Mashela, P., Duncan, L.W., Graham, J.H. & McSorley, R. (1992) - 'Leaching soluble salts increases population densities of *Tylenchulus semipenetrans*', *Journal of Nematology*, 24(1), pp. 103-108.

Mateille, T. (1994) - 'Comparative host tissue reactions of *Musa acuminata* (AAA group) cvs Poyo and Gros Michel roots to three banana-parasitic nematodes', *Annals of Applied Biology*, 124, pp. 65-73.

McSorley, R., Parrado, J.L. & Dankers, W.H. (1984) - 'A quantitative comparison of some methods for the extraction of nematodes from roots', *Nematropica*, 14(1), pp. 1-6.

Meddour, R. (2012) - *Journal Le Midi*, N° 1526, ISSN: 1112-7449, www.lemidi-dz.com.

Mekelleche, S. (2001) - *Cours de post-graduation : Chimie théorique*.

MNHN & OFB (2003-présent) - *Inventaire national du patrimoine naturel (INPN)*, Site web : <https://inpn.mnhn.fr>, consulté le 27 février 2021.

Mohammedi, H., Mecherara-Idjeri, S., Foudil-Cherif, Y. & Hassani, A. (2015) - 'Chemical Composition and Antioxidant Activity of Essential Oils from Algerian *Daucus carota* L. subsp. *carota* Aerial Parts', *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 18(4), pp. 873–883. DOI: 10.1080/0972060X.2015.1010596.

Monti, M., Pinotti, M., Appendino, G., Dallochio, F., Bellini, T., Antognoni, F., Poli, F., & Bernardi, F. (2007) - 'Characterization of anti-coagulant properties of prenylated coumarin ferulenol', *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1770, pp. 1437-1440.

Murray, R.K.G., Mayes, P.A. & Rodell, V.W. (2000) - *Harper's Biochemistry*.

Nagy, S. & Attaway, J.A. (1980) - *Citrus culture and fruit production*, University of California Press.

Nauen, R., Reckmann, U., Thomzik, J. & Thielert, W. (2008) - 'Profil biologique du spirotétramat (Movento): Nouvel insecticide systémique à deux voies (ambimobile) contre les espèces de ravageurs suceurs', *Journal Bayer CropScience*, 61, pp. 245–278.

Neher, D.A.S.L., Peck, J.O. & Campbell, C.L.R. (1995)- 'Measures of nematode community structure and source of variability among and within fields', *Plant and Soil*, 170, pp. 167-181.

Noulet, J.-B. (1837) - Flore du bassin sous-pyrénéen : ou Description des plantes qui croissent naturellement dans cette circonscription géologique, avec l'indication spéciale des espèces qui se trouvent aux environs de Toulouse, J.-B. Paya, p. 284.

Ollitrault, P. & Navarro, L. (2012) - 'Citrus', dans *Fruit Breeding*, Springer, pp. 623-662.

Paltz, J.G. (1997) - *Le fascinant pouvoir des huiles essentielles*, Fascicule du laboratoire "Jacque Paltz".

Pavela, R. (2011) - 'Screening of Eurasian plants for insecticidal and growth inhibition activity against *Spodoptera littoralis* larvae', *Afr. J. Agric. Res.*, 6(12), pp. 2895-2907.

Pena, L., Cervera, M., Fagoaga, C., Romero, J., Juárez, J., Pina, J. & Navarro, L. (2007) - 'Citrus', dans E.C. Pua & M.R. Davey (éds), *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, Springer, Berlin, Heidelberg.

PIERRON, C. (2014) - Les huiles essentielles et leurs expérimentations dans les services hospitaliers de France : exemples d'applications en gériatrie, gérontologie et soins palliatifs, Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, p. 16.

Pinilla, M.G., Pérez-Alonso, M.J. & Velasco-Negueruela, A. (1995) - 'Volatile constituents from fruits of *Daucus carota* L. gummiifer Hook. Fil.', *J. Essent. Oil Res.*, 7, pp. 433–435.

Praloran, C. (1971) - *Les agrumes*. Ed. Editeur 8348, Paris, n° 5, pp. 4-5.

PRALORAN, G.C. (1971) - *Les agrumes, techniques agricoles et productions tropicales*, T. XXI et T. XXII, Ed. Maisonneuve et Larose, Paris, 665 p.

Prot, J.-C. (1985) - *Introduction aux nématodes phytoparasites : Les nématodes parasites des cultures maraichères*, Laboratoire de Nématologie, ORSTOM, B.P. 1386, Dakar, Sénégal, pp. 11-13.

Quezel, P. & Medail, F. (2003) - *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*, Elsevier, COLL ENV, Paris, pp. 573-592.

Quezel, P. & Santa, S. (1963) - *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*, Tome II, Edition du centre national de la recherche scientifique, Paris, France, p. 603.

Rashidifard, M., Shokoohi, E., Hoseinipour, A. & Jamali, S. (2015) - 'Tylenchulus semipenetrans (Nematoda: Tylenchulidae) on pomegranate', Iran.

Rasmussen, U. (1978) - 'Thapsigargine and thapsigargicine, two new histamine liberators from *Thapsia garganica* L.'

Raymond, L. (1987) - *Les agrumes : Arboriculture- Production*, Ed. Scientifique Universitaire, Vol. 1 et 2, Beyrouth, Liban, 270 pp.

Rebour, H. (1948) - 'La culture des agrumes en Algérie', *Documents Algériens, Série économique*, Agrumiculture, n° 49, pp. 4.

Reddy, P. (1983) - *Plant nematology*, Agric. Publishing Academy, India, 287 pp.

Reynolds, H.W. & O'Bannon, J.H. (1963) - 'Decline of grapefruit trees in relation to Citrus nematode populations and tree recovery after chemical treatment', *Phytopathology*, 53(9), pp. 1011-1015.

Rocha, Pena, M., Richard, F., Niblett, S.L. & Francisco, M. (1995) - 'Citrus Tristeza Virus and Its Aphid Vector *Toxoptera citimicida*', *University of Florida, Citrus Research and Education Center*, 79(5), pp. 437-444.

Ros, J.P. (1997) - 'A general view of recent advances of attractants and traps against *Ceratitis capitata* (Wied) (Dipt.: Teph.)', *Proceedings of the IOBC. WPRS Bull.*, Vol. 20(8), pp. 137–144.

Sauvage, Ch. & Daget, P. (1963) - 'Le quotient pluviothermique d'Emberger : Son utilisation et la représentation de ses variations au Maroc', *Ann. Serv. Phys. Gl. Météorol.*, 20, pp. 11-23.

Scotto la Massese, C. (1966) - 'Sensibilité de quelques porte-greffes de Citrus à l'égard de *Tylenchulus semipenetrans* Cobb 1913', *J. Phytologie phytopharmacie*, Citrus medit., Marseille, pp. 59-60.

Scotto la Massese, C. (1986) - 'Influence des caractéristiques bioécologiques des milieux sur la distribution des nématodes telluriques', *Bulletin de Recherche Agronomique*, Gembloux, 21(2), pp. 255-272.

Sekora, N.S. & Crow, W. (2018) - 'EENY-529, series of the Entomology and Nematology Department, UF/IFAS Extension', Original publication date July 2012. Reviewed November 2018.

Shukla, R., Chetri, P., Sonkar, A., Pakharukova, M., Mordvinov, V., Tripathi, T. (2017) - 'Identification of novel natural inhibitors of *Opisthorchis felinus* cytochrome P450 using structure-based screening and molecular dynamic simulation', *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 36(13), pp. 3541–3556.

Simon, L., Imane, A., Srinivasan, K., Pathak, K.L. & Daoud, I. (2017) - 'In silico drug-designing studies on flavanoids as anticancer agents: Pharmacophore mapping, molecular docking, and Monte Carlo method-based QSAR Modeling', *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, 9(3), pp. 445–458.

Sinhal, S.K., Vijendra, R.A.O. & Deepak, M.S. (2012) - 'Influence of climate on the total vessel lumen area in annual rings of teak (*Tectona*)'.

Sohayb, B. B., Imane, A., & Faïçal, H. (2025). Importance of essential oils for the biocontrol of *Tylenchulus semipenetrans* nematode populations through molecular modeling methods. *Bangladesh Journal of Botany*, 54(1), 145–152. <https://doi.org/10.3329/bjb.v54i1.80591>

Soltner, D. (1987) - *Les bases de la production végétale : Le climat*, 4ème éd. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 2: 1-243.

Sorribas, F.J., Verdejo-Lucas, S., Pastor, J., Ornat, C., Pons, J. & Valero, J. (2008) - 'Population Densities of *Tylenchulus semipenetrans* Related to Physicochemical Properties of Soil and Yield of Clementine Mandarin in Spain', *Plant Dis.*, 92, pp. 445–450.

Soto-Mendivil, E.A., Moreno-Rodriguez, J.F., Estarron-Espinosa, M., Garcia Fajardo, J.A. & Obledo-Vazquez, E.N. (2006) - 'Chemical composition and fungicidal activity of the essential oil of *Thymus vulgaris* against *Alternaria citri*', *Gnosis*, 4(16).

Soualeh, M., Dupont, P. & Lemoine, D. (2016) - 'Les propriétés pharmacologiques des huiles essentielles : Une revue des recherches récentes', *Journal of Phytotherapy Research*, 30(4), pp. 512-523.

Springer International Publishing SIP (2018) - *Salvia Biotechnology*, 427 pp. ISBN 9783319739007.

Stewart, P. (1969) - 'Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique', *Bulletin of the Société d'Histoire Naturelle d'Afrique du Nord*, 59, pp. 23-36.

- Sumenkova, N.I. (1988)**- *Nematodes of plants and soils: Neotylenchoidea*. Brill, 280 pp.
- Sweelam, M.E. & Abo El Ghar, M.R. (1986)** - 'Effect of soil moisture level on population of *Tylenchulus semipenetrans* infecting sour orange (*Citrus aurantium*)', *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 58, pp. 657-658.
- Sweelam, M.E. & Abo Taka (1989)** - 'Biology and reproduction of *Citrus* nematode (*Tylenchulus semipenetrans*)', *Indian Journal of African Sciences*, 59(6), pp. 374-376.
- Swingle, W.T. & Reece, P.C. (1967)** - 'The botany of citrus and its wild relatives', dans W. Reuther, H.J. Webber & L.D. Bachelor (éds), *The citrus industry*, University of California, Riverside, 1, pp. 190-430.
- Tabti, L., Dib, M.A., Djabou, N., Gaouar Benyelles, N., Paolini, J., Costa, J. & Muselli, A. (2014)** - 'Control of Fungal Pathogens of *Citrus Sinensis* L. By Essential Oil And Hydrosol Of *Thymus capitatus* L.', *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 87, pp. 279–285.
- Tahar Dob, D., Dahmane Dahmane, B., Berramdane Tayeb, C. & Chaabane Chelghoum, D. (2005)** - 'Chemical composition of the essential oil of *Lavandula dentata* L. from Algeria', *International Journal of Aromatherapy*, 15(2), pp. 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijat.2005.03.010>.
- Taleb, T.K. (2015)** - 'Extraction et caractérisation des huiles essentielles de dix plantes aromatiques provenant de la région de Kabylie (Nord Algérien). Evaluation de leurs effets sur le bruche du niébé *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae)', Thèse de doctorat.
- Tarjan, A.C. (1960)** - 'A comparison of polyethylene plastic bags and glass jars as incubation chambers for obtaining nematodes from roots', *Plant Disease Reporter*, 44, pp. 574-577.
- Tarjan, A.C. (1960)** - 'Observations on extracting citrus nematodes, *Tylenchulus semipenetrans*, from citrus roots', *Plant Disease Reporter*, 56, pp. 186-188.
- Taylor, A. (1968)** - *Introduction à l'étude des nématodes phytoparasites*, manuel FAO, Rome, 135 pp.
- Tehami, W. (2017)** - 'Caractérisation phytochimique et évaluation du potentiel antioxydant, antimicrobien et anti-inflammatoire de *Salvia argentea*', Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbès.
- Thaman, R.R. & Whistler, W.A. (1996)** - 'A Review of uses and status of trees and forests in land use systems in Samoa, Kiribati and Tuvalu with recommendations for future action', *South Pacific Forestry Development Programme*, Suva, Fiji.
- The Plant List (2013)** - Version 1.1. Published on the Internet. Available at: <http://www.theplantlist.org> [Accessed 30 June 2015].
- Thinthoin, R. (1948)** - *Les aspects physiques du Tell oranais, essai de morphologie de pays semi-arides*. Ouvrage publié avec le concours du C.N.R.S. Ed. L. Fouqué.
- Timmer, L.W., Garnsey, S.M. & Broadbent, P. (2003)** - 'Diseases of citrus', dans *Diseases of Tropical Fruit Crops*, CAB International, Wallingford, UK, pp. 163-196.
- USDA (2023)** - United States Department of Agriculture.

van Gundy, S.D. & Kirkpatrick, J.D. (1964) - 'Nature of resistance in certain citrus rootstocks to citrus nematode', *Phytopathology*, 54, pp. 419-427.

van Gundy, S.D. & Kirkpatrick, J.D. (1967) - 'The effects of chemical treatment of *Tylenchulus semipenetrans* and citrus tree response during 8 years', *Nematologica*, 13, pp. 131-136.

van Gundy, S.D., Martin, J.P. & Tsao, P.H. (1964) - 'Some soil factors influencing reproduction of the citrus nematode and growth reduction of sweet orange seedlings', *Phytopathology*, 54, pp. 294-299.

Verdejo-Lucas, S. (1992) - 'On the occurrence of the “Mediterranean biotype” of *Tylenchulus semipenetrans* in Spain', *Fundamental and Applied Nematology*, 15, pp. 475-477.

Verdejo-Lucas, S., Sorribas, F.J., Forner, J.B. & Alcaide, A. (2000) - 'Resistance of hybrid citrus rootstocks to a Mediterranean biotype of *Tylenchulus semipenetrans* Cobb', *HortScience*, 35, pp. 269-273.

Viladerbo, A. & Luc, M. (1961) - 'Le slow decline des citrus dû au nématode TS Cobb 1913', *Nematologica*, 3, pp. 283-294.

Virbel-Alonso, C. (2011) - *Citron et autres agrumes*, Groupe Eyrolles, 15 p.

Warlop, F. (2005) - *Petit précis d'écologie oleicole*, Le Dossier du Grab, Arbo Bio, N95.

Widelski, J., Graikou, K., Ganos, C., Skalicka-Wozniak, K., Chinou, I. (2021) - 'Volatiles from Selected Apiaceae Species Cultivated in Poland—Antimicrobial Activities', *Processes*, 9(695).

Wilaya de Tlemcen - commune d'El Fehoul (2023) - *Données agricoles régionales*.

Wu, G.A., Prochnik, S., Jenkins, J., Salse, J., Hellsten, U., Murat, F., Perrier, X., Ruiz, M., Scalabrin, S., Terol, J., Takita, M.A., Labadie, K., Poulain, J., Couloux, A., Jabbari, K., Cattonaro, F., Del Fabbro, C., Pinosio, S., Zuccolo, A., Chapman, J., Grimwood, J., Tadeo, F.R., Estornell, L.H., Muñoz-Sanz, J.V., Ibanez, V., Herrero-Ortega, A., Aleza, P., Pérez-Pérez, J., Ramón, D., Brunel, D., Luro, F., Chen, C., Farmerie, W.G., Desany, B., Kodira, C., Mohiuddin, M., Harkins, T., Fredrikson, K., Burns, P., Lomsadze, A., Borodovsky, M., Reforgiato, G., Freitas-Astúa, J., Quetier, F., Navarro, L., Roose, M., Wincker, P., Schmutz, J., Morgante, M., Machado, M.A., Talon, M., Jaillon, O., Ollitrault, P., Gmitter, F. & Rokhsar, D. (2014) - 'Sequencing of diverse mandarin, pummelo and orange genomes reveals complex history of admixture during citrus domestication', *Nature Biotechnology*, 32 (7), pp. 656-662. doi: 10.1038/nbt.2906.

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, pp. 315-331.

Zaouiet, J. (2010) - *Formation nationale sur la culture d'agrumes*.

Zeguerrou, R., Guesmia, H. & Lahmadi, S. (2013) - *Recueil des plantes médicinales dans la région des Ziban*, Dar El Houda, Algérie. ISBN: 978-993.

Zhenghao, X. & Le, C. (2017) - *Identification and control of common weeds*, Springer, p. 17.

SITES WEB

- **Web1:** www.algerie-eco.com
- **Web2:** <http://radioalgerie.dz/news/fr/article/20190122/160465.html> »
- **Web 3**<https://www.promessedefleurs.com/fruitiers/agrumes/oranger-citrus-sinensis-washington-navel.html>
- **Web04:** <https://news.radioalgerie.dz/>
- **Web 05:** www.yara.fr
- **Web06:** www.dreamstime.com
- **Web07:** https://fr.wikipedia.org/wiki/Mandarine_satsuma
- **Web 08:**<https://olea-paris.fr/votre-clementinier>
- **Web 09:** <https://monjardinextraordinaire.com/>
- **Web 10:** <https://citruscentre.co.uk/>
- **Web 11:** <https://www.garden-select.com/>
- **Web 12:** <https://www.gerbeaud.com/> /lime-citron-vert-citrus-aurantiifolia-
- **Web 13:** <https://www.agrumes-passion.com/>
- **Web 14:** <https://www.tridge.com/>
- **Web 15:** <https://agrumes-vessieres.fr/>
- **Web 16:** <https://madisoncitrusnursery.com/>
- **Web 17:** <https://www.leparisien.fr/>
- **Web 18:** <https://www.jardin-ecologique.fr/>
- **Web 19:** <https://www.walmart.ca/fr/>
- **Web 20:** <https://www.dieti-natura.com/>
- **Web 21:** <https://www.gammvert.fr/>
- **Web 22:** <https://biovalle.es/producto/salustiana>
- **Web 23:** <https://www.mon-orangerie.fr/orangers/291-oranger-thomson-navel-bio.html>
- **Web 24:** <https://www.sarahraven.com/products/daucus-carota>
- **Web25:** <https://www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-21685-synthese>
- **Web26:** <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-3498-caucalis-grandes-fleurs.html>.
- **Web 27:** http://www.biopix.eu/ferula-communis-ssp-communis_photo-56086.aspx

- **Web 28:** <https://www.gerard-weiner.fr/phlomis-serba-venti/>
- **Web 29:** <https://arcenfleurs.fr/boutique/thymus-ciliatus-thym-cilie/>
- **Web30:** <https://www.natureaz.com/plantes-et-actifs/menthe-poivree/>
- **Web31:** <https://elbaraka-pepinieres.com/produit/lavandula-dantata/>
- **Web 32:** Docking representation 2 - Docking (molecular) – Wikipedia

ملخص

في الجزائر، تحتل الحمضيات المرتبة الثانية من حيث المساحة المزروعة بعد شجرة الزيتون، إلا أن أهميتها الاقتصادية تجعلها في طليعة الإنتاج الفلاحي الوطني. تواجه الزراعة العديد من التهديدات، من بينها الديدان الثعبانية النباتية (النيماتودا)، والتي تؤدي إلى خسائر كبيرة في المحصول. ومن بين هذه الطفيليات، يُعتبر *Tylenchulus semipenetrans*، موضوع هذه الدراسة، من أخطر الأنواع، حيث يهاجم جذور الحمضيات من خلال التثبيت عليها واختراقها جزئياً، مما يتسبب في تدهور تدريجي للأشجار. تُستخدم المبيدات النيماتودية الكيميائية على نطاق واسع لمكافحة هذه الطفيليات، لكنها تُشكل مخاطر بيئية خطيرة بسبب آثارها السامة على الأنظمة البيئية. لذلك، برز الاهتمام بتطوير مبيدات نيماتودية بيولوجية توفر بديلاً مستداماً وصديقاً للبيئة. تعتمد هذه الدراسة على الزيوت الأساسية المستخلصة من النباتات المنتشرة على نطاق واسع في غرب الجزائر. وقد أظهرت بعض المركبات الفعالة المشتقة من هذه الزيوت قدرة تثبيطية على إنزيم Acetyl-CoA Carboxylase، وهو إنزيم أساسي في عملية التخليق الحيوي للأحماض الدهنية لدى *Tylenchulus semipenetrans*. بفضل تقنيات النمذجة الجزيئية، تم تحديد أن أسيتات البورنيل المستخلصة من نبات *Inula viscosa* كأقوى مثبط، كما يتضح من نتائج الالتحام الجزيئي (docking). وقد تم تأكيد هذه النتائج من خلال التجارب الحيوية (in vivo)، حيث أظهرت فعالية واعدة في الحد من أعداد *Tylenchulus semipenetrans* دون التسبب في آثار ضارة على النظام البيئي.

الكلمات المفتاحية: *Tylenchulus semipenetrans*، المبيدات النيماتودية البيولوجية، الزيت العطري، Acetyl-CoA Carboxylase، النمذجة الجزيئية، *Inula viscosa*.

Résumé

En Algérie, les agrumes occupent le deuxième rang en termes de superficie arboricole après l'olivier. Toutefois, leur importance économique les place au premier plan des productions fruitières nationales. L'agriculture est confrontée à de nombreuses menaces, notamment les nématodes phytophages, qui entraînent des pertes significatives de rendement. Parmi eux, *Tylenchulus semipenetrans*, le nématode étudié dans ce travail, s'attaque aux racines des agrumes en s'y fixant et en y pénétrant partiellement, provoquant ainsi un dépérissement lent des arbres. Les nématicides chimiques, couramment utilisés pour lutter contre ces parasites, présentent des effets écotoxicologiques préoccupants. Dans cette optique, l'intérêt s'est porté sur le développement de bio-nématicides, qui offrent une alternative durable et respectueuse de l'environnement. La présente étude s'appuie sur les huiles essentielles extraites de plantes largement répandues dans l'ouest de l'Algérie. Certains ligands issus de ces huiles essentielles ont démontré une capacité inhibitrice sur l'Acetyl-CoA Carboxylase, une enzyme clé de la biosynthèse des acides gras chez *Tylenchulus semipenetrans*. Grâce à la modélisation moléculaire, il a été mis en évidence que l'acétate de bornyle, issu de *Inula viscosa*, constitue le meilleur inhibiteur, comme l'indique son score de docking. Les résultats obtenus par cette étude *in silico* ont ensuite été validés *in vivo*, montrant une efficacité satisfaisante pour le contrôle des populations de *Tylenchulus semipenetrans* sans impact négatif sur l'écosystème.

Mots clés : *Tylenchulus semipenetrans*, Bio-nématicides, Huile essentielle, Acetyl CoA Carboxylase, Modélisation moléculaire. *Inula viscosa*

Abstract

In Algeria, citrus fruits occupy the second rank in terms of orchard area, following the olive tree. However, their economic importance places them at the forefront of national fruit production. Agriculture faces numerous threats, including phytophagous nematodes, which cause significant yield losses. Among them, *Tylenchulus semipenetrans*, the nematode studied in this work, targets the roots of citrus plants by attaching to them and partially penetrating them, thus causing a slow decline of the trees. Chemical nematicides, commonly used to combat these pests, pose concerning ecotoxicological effects. Therefore, there has been growing interest in developing bio-nematicides, which offer a sustainable and environmentally friendly alternative. This study focuses on essential oils extracted from plants widely distributed in western Algeria. Some ligands derived from these essential oils have shown inhibitory activity on Acetyl-CoA Carboxylase, a key enzyme in the biosynthesis of fatty acids in *Tylenchulus semipenetrans*. Using molecular modeling, it was found that bornyl acetate, derived from *Inula viscosa*, is the most effective inhibitor, as indicated by its docking score. The results obtained from this *in silico* study were then validated *in vivo*, demonstrating satisfactory effectiveness in controlling *Tylenchulus semipenetrans* populations without causing negative impacts on the ecosystem.

Keywords: *Tylenchulus semipenetrans*, Bio-nematicides, Essential oil, Acetyl-CoA Carboxylase, Molecular modeling, *Inula viscosa*.