

VÉGÉPHYL – 14^{ème} CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
2, 3 et 4 DÉCEMBRE 2025 – Angers

COMPARAISON *IN VITRO* DES PROPRIÉTÉS ANTI-OOMYCÈTES D’HUILES ESSENTIELLES
ET DE SUBSTANCES FONGICIDES SUR 3 GÉNOTYPES DE *PHYTOPHTHORA INFESTANS*

F. MARTINI¹⁻²⁻³, C. BURGEON³⁻⁴, M. H. JIJAKLI⁴, M.-L. FAUCONNIER³, E. GONTIER² & J. MUCHEMBLE¹

¹ Laboratoire de Pathologie des Plantes et Biocontrôle, UMRT BioEcoAgro INRAE 1158, JUNIA ISA, 2 rue Norbert Ségard, 59000 Lille, France

² Laboratoire de Biologie des Plantes et Innovation, BIOPI-UPJV, UMRT BioEcoAgro INRAE 1158, UFR des Sciences de l’université de Picardie Jules Verne, 22 rue Saint Leu, 80000 Amiens, France

³ Laboratoire de Chimie des Molécules Naturelles, UMRT BioEcoAgro INRAE 1158, Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège, 2 Passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique

⁴ Laboratoire de Phytopathologie Urbaine et Intégrée, UMRT BioEcoAgro INRAE 1158, Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège, 2 Passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique

RÉSUMÉ

Le mildiou de la pomme de terre, causé par l’oomycète *Phytophthora infestans*, provoque des dégâts colossaux sur cette culture de haute importance pour la sécurité alimentaire mondiale. Afin de proposer de nouvelles alternatives face à des telles maladies, alors que les listes de substances homologuées s’amenuisent au fil des années, les métabolites de plantes sont de plus en plus envisagés. Ce travail compare *in vitro* les activités anti-oomycètes de cinq huiles essentielles (bergamote, romarin, girofle, origan, cannelle de Ceylan), de deux substances actives de synthèse (mandipropamide, fluazinam) et d’une substance active d’origine minérale (sulfate de cuivre), contre trois génotypes européens de *Phytophthora infestans*. Les résultats montrent que les huiles à base de phénylpropanoïdes – à savoir girofle, origan et cannelle - se sont révélées bien plus actives que celles dont la composition est dominée par des terpènes, avec des concentrations minimales inhibitrices (CMI) entre 250 et 500 mg/L. Les concentrations inhibitrices médianes (Cl₅₀) calculée pour la germination des spores descendent aux alentours de 100 mg/L pour la cannelle, valeur proche de celle du sulfate de cuivre. Néanmoins, les molécules de synthèse ont présenté une activité bien supérieure avec notamment des Cl₅₀ inférieures à 0,35 mg/L pour le mandipropamide. L’isolat EU-37 a cependant montré une sensibilité réduite au sulfate de cuivre, tandis que les trois génotypes présentaient une sensibilité relativement homogène entre eux à presque toutes les huiles essentielles. Ces résultats sont désormais à corroborer, entre autres, avec des essais *in planta* avant de pouvoir considérer ces mélanges complexes de molécules naturelles comme de réelles alternatives aux substances conventionnellement utilisées.

Mots-clés : *Phytophthora infestans*, Huile essentielles, Substances fongicides, Activités anti-oomycètes, *in vitro*

ABSTRACT

Potato late blight, caused by the oomycete *Phytophthora infestans*, is causing colossal damages to this crop of major importance for global food security. To propose new alternatives to conventional plant protection products whose registration lists are dwindling over the years, plant metabolites are being considered. This study compares the *in vitro* anti-oomycete activities of five essential oils (bergamot, rosemary, clove, oregano, Ceylon cinnamon), two synthetic active substances (mandipropamid, fluazinam), and one mineral active substance (copper sulfate) against three European genotypes of *Phytophthora infestans*. Phenylpropanoid-based oils (clove, oregano, cinnamon) proved themselves more active than those whose composition is dominated by terpenes, with minimum inhibitory concentrations (MICs) between 250 and 500 mg/L. Median inhibitory concentrations (Cl₅₀) calculated for spore’s germination went down to 100 mg/L for cinnamon which happened to be close to copper sulfate. Nevertheless, synthetic molecules showed much higher activity with Cl₅₀ smaller than 0.35 mg/L with mandipropamide. Isolate EU 37 showed a reduced sensitivity to copper sulfate, while all three genotypes were relatively sensitive to almost all essential oils. These results now need to be corroborated with *in planta* trials before being able to consider such complex mixtures of volatile molecule as alternatives to what is conventionally used to protect crops.

Key words: *Phytophthora infestans*, essential oils, fungicide substances, anti-oomycota activities, *in vitro*

Introduction

L'agriculture moderne repose en grande partie sur l'utilisation intensive des produits phytosanitaires. Depuis la révolution verte, ils assurent le rendement d'un très grand nombre de cultures en les protégeant des dégâts causés notamment par les maladies fongiques (Schama *et al.* 2019; Tilman *et al.*, 2022).

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L. 1753) est une des cultures les plus importantes à l'échelle mondiale en termes d'alimentation humaine, en troisième position derrière le riz et le blé. Elle est cultivée sur une surface totale d'environ 20 millions d'hectares pour des rendements globaux récents supérieur à 350 Mt (Devaux *et al.*, 2020). En Europe du Nord, la pomme de terre représente également une culture d'intérêt agronomique et économique majeure, puisque la Belgique, la France, les Pays-Bas et l'Allemagne représentent à eux seuls 60% de la production européenne totale (Goffart *et al.*, 2022). Comme toutes plantes cultivées, la pomme de terre est sujette à de nombreux bioagresseurs. Parmi eux, le mildiou est sans aucun doute le plus redoutable (Cooke *et al.*, 2000) puisqu'il cause des dommages estimés à travers le globe d'environ 6 milliards de dollars (Fry *et al.*, 2015). Cette maladie est causée par l'oomycète *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary 1876. Le clade des oomycètes regroupe des microorganismes qualifiés de « pseudo-champignons » pour la plupart parasites de plantes (Ristaino, 2002). Bien qu'ayant une morphologie proche de certains Fungi, ils présentent pourtant des caractéristiques cytologiques bien distinguées : paroi cellulosique et non chitineuse, absence d'ergostérol dans leur membrane plasmique mais aussi une multiplication asexuée assurée par des spores biflagellées : les zoospores, vecteur des épidémies en conditions humides (Grünwald *et al.*, 2005 ; Fry *et al.*, 2015).

Le mildiou de la pomme de terre a provoqué au XIX^{ème} siècle la grande famine irlandaise, causant la mort ou l'exil de millions de personnes (Schuman et d'Arcy, 2017). Depuis lors, les populations de *P. infestans* évoluent et progressent au travers des agroécosystèmes européens. Leur suivi est effectué par le consortium EuroBlight qui répertorie leurs différents génotypes et suit leur progression au travers des saisons. Tandis que certaines populations persistent au fil des années (Cooke *et al.*, 2012), d'autres surgissent et causent de sévères dégâts (Fry, 2016). En outre, d'autres génotypes ont été identifiés comme tolérants ou résistants à certaines substances fongicides, contournant ainsi les fongicides conventionnellement employés et rendant donc la lutte contre cette maladie encore plus délicate (Shattock *et al.*, 2002 ; Gisi *et al.*, 1996). Face à ces nouvelles populations résistantes (Miller *et al.*, 2022) et aux conséquences des pesticides de synthèse sur l'environnement (eaux, sols, atmosphère), de nouvelles méthodes de lutte doivent être rapidement proposées. Dans ce contexte, le biocontrôle est prometteur. Il consiste en un ensemble de moyens biologiques ou d'origine biologique permettant la lutte contre les bioagresseurs (Eilenberg *et al.*, 2001 ; Raymaekers *et al.*, 2020 ; Lahlali *et al.*, 2022). Parmi eux, les substances naturelles d'origine végétale, telles que les huiles essentielles, sont envisagées comme nouveaux moyens de protection des plantes.

Les huiles essentielles sont des mélanges hydrophobes complexes de métabolites secondaires extraits de certaines plantes aromatiques (Fometu *et al.*, 2019). Elles sont exclusivement obtenues par des méthodes d'extractions telles que l'hydrodistillation, l'entraînement à la vapeur ou encore la pression à froid (Masango *et al.*, 2005 ; Gavahian *et al.*, 2019). Ces mélanges complexes sont devenus, au cours des dernières décennies, largement utilisés dans les domaines pharmaceutiques et agro-alimentaires et deviennent désormais sérieusement envisagés en agronomie (De Clerck *et al.*, 2021). La composition chimique des huiles essentielles se résume principalement – mais pas exclusivement – à une grande variété de terpènes et de phénylpropanoïdes (Moghaddam et Mehdizadeh, 2017) qui expriment leurs activités biologiques par une large série de mécanismes cellulaires et moléculaires. Le caractère hautement apolaire ainsi que le faible poids de ces molécules leur permettent de facilement se solubiliser dans la membrane plasmique ou elles perturbent entre autres les équilibres osmotiques, provoquent des stress oxydatifs et mettent en péril l'intégrité membranaire et donc, la viabilité de la cellule (Álvarez-Martínez, 2022 ; Slavković et Bendahmane, 2023). D'autres mécanismes intracellulaires

ont également été mis en évidence et semblent impacter la structure ainsi que le fonctionnement des vacuoles, des mitochondries ou encore de plusieurs enzymes cytoplasmiques (Martini *et al.*, 2023).

Ce travail a pour but d'évaluer *in vitro* sur trois génotypes de *P. infestans*, les propriétés anti-oomycètes de cinq huiles essentielles et de les comparer avec deux substances fongicides synthétiques (le mandipropamide – inhibiteur de la cellulose-synthase et le fluazinam – découpleur de la phosphorylation oxydative) et une d'origine minérale (le sulfate de cuivre, encore autorisée sur pomme de terre en agriculture biologique). Le but étant de sélectionner dans un premier temps les huiles les plus actives afin de tester ensuite *in planta* leur efficacité contre la maladie.

Matériel et Méthodes

Sélection et culture des génotypes de *P. infestans*

Trois génotypes européens de *P. infestans* ont été isolés en Belgique depuis des déchets de pommes de terre et fournis par le CRA-w (Libramont, Belgique). Les informations relatives à ces isolats sont fournies dans le Tableau I. Ils ont ensuite été repiqués sous champs stérile toutes les trois semaines sur milieu de culture V8 (1/8 v/v) préparé avec 15 g/L d'agar, 2 g/L de CaCO₃ et de 50 mg/L dans de l'eau distillé.

Tableau I : Informations concernant les trois génotypes de *P. infestans* étudiés

Table I: Information regarding the three P. infestans genotypes studied

Génotype	EU-13	EU-36	EU-37
Type sexuel	A2	A2	A2
Lieu d'échantillonnage	Cortil, Belgique	Warnant, Belgique	Leuzée, Belgique
Date d'échantillonnage	Juillet 2021	Aout 2021	Juin 2020

Détermination de la composition chimique des huiles essentielles

Les huiles essentielles de bergamote, romarin, clou de girofle, origan et cannelle de Ceylan certifiées BIO ont été acquises chez AROMAZONE. Les informations relatives à ces huiles et à la biomasse de laquelle elles ont été extraites sont répertoriées dans le Tableau II.

Table II : Origine des huiles essentielles

Table II: Origin of essential oils

Huile essentielle	Espèce végétale	Organe	Méthode d'extraction
Bergamote	<i>Citrus bergamia</i>	Exocarpe du fruit	Pression à froid
Romarin	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Feuilles et fleurs	Distillation par entraînement à la vapeur
Girofle	<i>Syzygium aromaticum</i>	Boutons floraux	
Origan	<i>Origanum vulgare</i>	Feuilles et fleurs	
Cannelle de Ceylan	<i>Cinnamomum zeylicanum</i>	Ecorce	

Leur composition chimique a été analysée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) selon un protocole légèrement adapté (Taguimjeu *et al.*, 2025). Brièvement, 10 µl de chaque huile ont été dilués dans 10 ml d'hexane et 2µL ont été injectés sur colonne chromatographique HP-5MS (5% phényl-méthyl – phase inverse) de 30m de long, 250 µm de diamètre et avec une épaisseur de revêtement de 0,25 µm. L'injection s'est faite en *splitless mode* à pression constante de 13,9 psi à 320°C avec l'hélium comme gaz porteur à un flux de 1,2 ml/min. Le programme d'une durée totale de 56 min a débuté à 50°C se fait par rampes de température passant par 130-200-240-300°C pour se terminer à 320°C. Le spectromètre de masse utilisé est un

Agilent5977B. L'impact électronique a été choisi comme source d'ionisation avec une énergie fixée à 70eV. L'intervalle de m/z balayé par le spectromètre va de 50 à 500. Finalement, les spectres de masse ont été analysés grâce au software *MassHunter Unknown analysis* et l'identification des molécules a été réalisée sur base des indices de rétention (IR) calculés et comparés avec la bibliothèque de spectre NIST 17. Seules les molécules dont l'abondance relative était supérieure à 1% ont été considérées.

Evaluation du pouvoir inhibiteur sur la croissance du mycélium en milieu solide

Les propriétés inhibitrices de chaque substance contre la croissance du mycélium ont été évaluées sur milieu solide en boîtes de Pétri. Pour se faire, une émulsion mère à 10% v/v d'huiles essentielles avec 2% v/v de Tween20 comme tensio-actif ont été préparées dans de l'eau osmosée. Les solutions mères de fluazinam et de mandipropamide ont été quant à elles préparées dans du DMSO (0,25% v/v final) et celle de sulfate de cuivre directement dans de l'eau osmosée. Elles sont ensuite toutes été diluées et 300 µL sont intégrés à un volume total de 15 ml de milieu V8-agar maintenu en surfusion à 60°C afin d'atteindre les concentrations présentées à la table III. Les témoins Tween20 et DMSO ainsi que non-traités ont également été préparés. Un inoculum de 0,5 cm de diamètre a été prélevé depuis le périmètre de colonies âgé de 12 jours et déposé au centre de chacun des milieux gélosés traités. Chaque boîte de Pétri a finalement été parafilmée et mise en incubation à l'abri de la lumière à 18 °C. Trois répliques techniques ont été réalisés pour chaque modalités. Pour chacun des génotypes et des traitements, les concentrations (massiques) minimales totalement inhibitrices (CMI) ont été déterminées après 7 jours et exprimées comme les moyennes ± écart-types de trois manipulations réalisées de manière indépendante. Pour chacun des traitements, une ANOVA à 1 facteur a été effectuée afin de conclure sur la différence de sensibilité entre les 3 génotypes. Lorsqu'elle était significative, un t-test a été effectué pour comparer chacun des trois génotypes deux à deux.

Tableau III : Concentrations des substances utilisées pour la détermination de la CMI en milieu solide

Table III: Concentrations of substances used for determining MIC in solid media

Substances	Concentrations						Unité
Huiles essentielles	0	0,02	0,1	0,5	1	2,5	ml/L
Mandipropamide	0	0,025	0,075	0,1	0,2	0,3	mg/L
Fluazinam	0	0,5	2,5	5	20	40	
Sulfate de cuivre	0	2	10	50	100	250	

Evaluation du pouvoir inhibiteur sur la germination des spores en milieu liquide

Les propriétés inhibitrices de chaque substance sur la germination des spores ont été évaluées en milieu liquide sur microplaques. Les mêmes émulsions mères ont été préparées à 10% v/v d'huiles essentielles avec comme tensio-actif 2% v/v de Tween20 dans de l'eau osmosée. Les solutions mères de fluazinam et de mandipropamide ont été préparées dans du DMSO et celle de sulfate de cuivre dans de l'eau osmosée. Elles ont ensuite toutes été diluées dans une solution de culture (glucose 11,35 g/L, peptone 6,80 g/L dans de l'eau osmosée) afin d'atteindre dans un volume final de 200 µL par puit les concentrations indiquées dans le Tableau IV.

Tableau IV : Gammes de concentration de chaque substance utilisée pour la détermination de la CI₅₀ en milieu liquide

Table IV: Concentration range of each substance used for determining the IC₅₀ in liquid medium

Substances	Concentrations						Unité
Huiles essentielles	0,008	0,04	0,2	1	5	25	ml/L
Mandipropamide	0,005	0,025	0,075	0,1	0,2	0,3	mg/L
Fluazinam	0,1	0,5	2,5	5	20	40	
Sulfate de cuivre	0,5	2	10	50	100	250	

Une suspension de spores a été réalisée à partir de colonies s'étant développées 2 semaines sur milieux V8-agar à 18°C puis ayant passé 1 semaine à 4°C. La surface du mycélium de ces colonies a été grattée avec 2 ml d'eau stérile puis filtrée sur coton d'ouate. La concentration a ensuite été déterminée à l'aide d'une cellule de Malassez et ajustée à $\approx 5 \cdot 10^4$ sporocystes/ml. Les puits ont été inoculés avec 60 μ L de suspension selon le plan de plaque présenté à la figure 1. Les microplaques ont finalement scellées et incubées à 20°C à l'abri de la lumière, sous une agitation de 120 rpm. La densité optique (DO) de chaque puits a été mesurée grâce à un lecteur spectrophotométrique à 630 nm après 7 jours. Les concentrations inhibitrices médianes (CI_{50}) ont ensuite été déterminée grâce au modèle non-linéaire tel que déjà décrit dans la littérature pour des expériences similaires (Muchembled *et al.* 2018).

Figure 1 : Plan de plaque 96 puits pour la détermination des CI_{50}

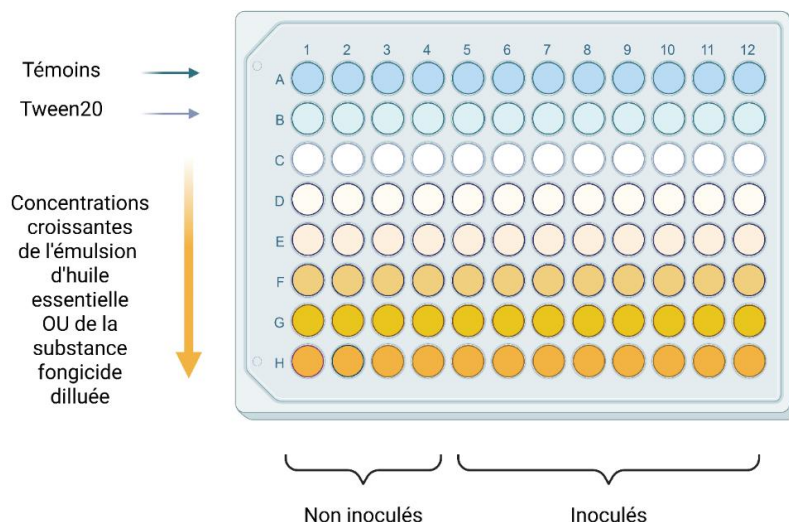


Figure 1: 96-well plate layout for determining IC_{50} values

Résultats

Détermination de la composition chimique des huiles essentielles

L'analyse du profil chimique des cinq huiles essentielles a été effectuée en GC-MS. Le tout est présentée dans le Tableau V et les composés majoritaires y ont été reportés en gras.

Tableau V : Détermination du profil chimique des huiles essentielles après analyse en GC-MS

Table V: Determination of the chemical profile of essential oils after GC-MS analysis

Nom de la molécule	CAS #	IR calculé	IR littérature	Proportion relative (%)
Huile essentielle de bergamote				
α -pinène	13466-78-9	932	940	1,95
Sabinène	3387-41-5	977	961	8,50
D-Limonène	5989-27-5	1034	1030	28,49
γ -Terpinène	99-85-4	1061	1064	9,49
Linalol	78-70-6	1106	1104	17,37
Acétate de linalyle	115-95-7	1263	1257	29,30
Trans-cinnamaldéhyde	14371-10-9	1282	1280	1,38
Total				96,48
Huile essentielle de romarin				
α -Pinène	80-56-8	936	939	16,60

Camphène	79-92-5	949	954	8,98
β -pinène	18172-67-3	976	978	3,94
β -Myrcène	123-35-3	993	981	4,16
Eucalyptol	470-82-6	1035	1038	23,37
Camphre	464-49-3	1151	1144	22,68
Bornéol	464-45-9	1169	1166	4,41
α -Terpinéol	98-55-5	1195	1190	2,29
Verbénone	1196-01-6	1213	1204	1,61
Acétate de bornyle	5655-61-8	1288	1285	2,40
Caryophyllène	87-44-5	1436	1444	3,50
Total				93,94
Huile essentielle de girofle				
Eugénol	97-53-0	1374	1373	66,86
Caryophyllène	87-44-5	1442	1444	6,99
Acétate d'eugényle	93-29-8	1584	1620	23,51
Total				97,36
Huile essentielle d'origan				
α -Pinène	80-56-8	932	940	2,06
β -Myrcène	123-35-3	992	981	2,50
Δ -3-Carène	29050-33-7	1021	1022	1,44
p-Cymène	99-87-6	1031	1021	9,70
γ -Terpinène	99-85-4	1070	1064	7,58
Linalol	78-70-6	1103	1104	1,80
Terpinène-4-ol	562-74-3	1185	1180	0,98
Thymol	89-83-8	1299	1297	4,26
Carvacrol	499-75-2	1318	1317	60,12
Caryophyllène	87-44-5	1440	1444	5,97
Total				96,41
Huile essentielle de cannelle				
α -Pinène	80-56-8	931	939	2,41
Eucalyptol	470-82-6	1031	1038	2,17
p-Cymène	99-87-6	1033	1026	4,88
Linalol	78-70-6	1117	1104	2,42
Trans-Cinnamaldéhyde	14371-10-9	1279	1280	69,80
Eugénol	97-53-0	1375	1373	3,42
Caryophyllène	87-44-5	1435	1444	11,35
Total				96,45

Evaluation du pouvoir inhibiteur sur la croissance du mycélium en milieu solide

Les concentrations minimales permettant une inhibition totale (CMI ou MIC) de la croissance du mycélium des 3 génotypes de *P. infestans* sont présentées à la Figure 2 pour les huiles essentielles et à la Figure 3 pour les substances fongicides actives.

Les MIC obtenues sur les 3 génotypes de *P. infestans* des huiles essentielles de bergamote et de romarin se situent toutes autour de 2000 mg/L tandis que celles obtenues avec les huiles essentielles de girofle, d'origan et de cannelle se situent entre 200 et 500 mg/L. Contrairement aux huiles essentielles pour lesquelles la sensibilité des 3 génotypes n'est globalement pas significativement différentes, les génotypes démontrent une sensibilité distincte face aux traitements conventionnels testés. C'est avec le sulfate de cuivre que le pouvoir inhibiteur est le plus marquée entre les génotypes. En effet, les CMI varient de 10 pour EU-13 à presque 300 pour EU-37 en passant par 150 mg/L pour EU-36. Le fluazinam

a permis d'obtenir des MIC entre 30 et 50 mg/L tandis que le mandipropamide permet une inhibition totale à des concentrations bien plus basses, en moyenne entre 0,08 et 0,2 mg/L.

Figure 2 : CMI moyennes de l'huile essentielles de bergamote et de romarin sur 3 génotypes de *P. infestans* EU-13-A2 (rouge) ; EU-36-A2 (vert) ; EU-37-A2 (bleu)

Figure 2: Average MIC values of bergamot and rosemary essential oils against 3 genotypes of *P. infestans*: EU-13-A2 (red); EU-36-A2 (green); EU-37-A2 (blue)

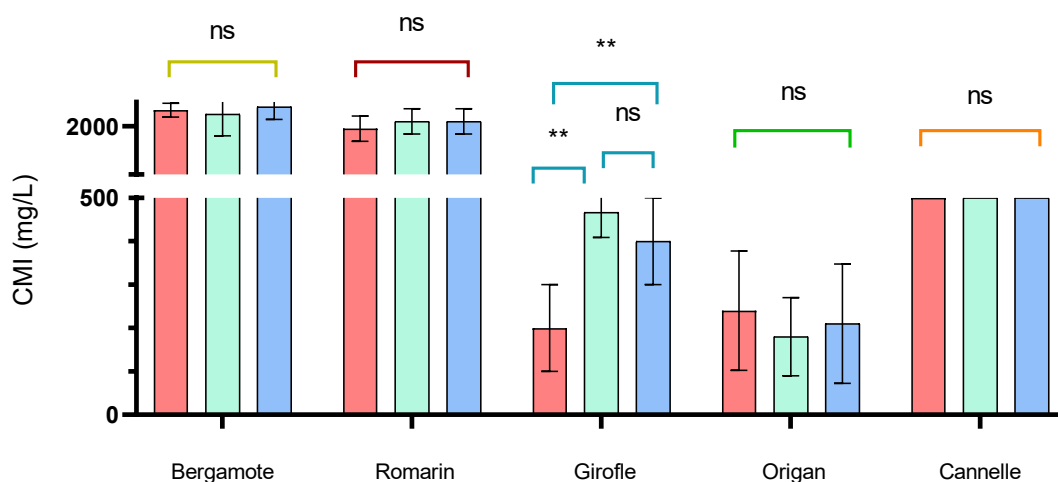
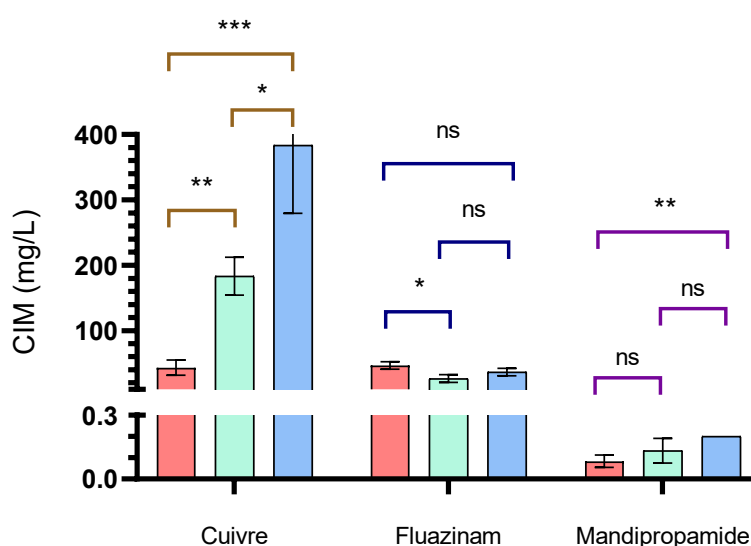


Figure 3 : CMI moyennes des huiles essentielles de girofle, origan et cannelle ainsi que du sulfate de cuivre sur 3 génotypes de *P. infestans* EU-13-A2 (rouge) ; EU-36-A2 (vert) ; EU-37-A2 (bleu)

Figure 3: Average MIC values of clove, oregano, and cinnamon essential oils, as well as copper sulfate, against 3 genotypes of *P. infestans*: EU-13-A2 (red); EU-36-A2 (green); EU-37-A2 (blue)



Evaluation du pouvoir inhibiteur sur la germination des spores en milieux liquides

Les CI_{50} des huiles essentielles de bergamote et de romarin varient de 2160 à 9100 mg/L selon les génotypes de *P. infestans*, exprimant un très faible pouvoir inhibiteur de ces deux huiles. L'huile essentielle de cannelle, en revanche, est celle permettant la meilleure inhibition avec des CI_{50} entre 80

et 130 mg/L. Toutefois, les molécules de synthèse permettent une inhibition à des concentrations encore plus faibles : entre 0,25 à 0,35 mg/L pour le fluazinam et de 0,01 et 0,015 mg/L pour le mandipropamide. Enfin, la CI_{50} obtenue avec le sulfate de cuivre est plus élevée que celle des 2 molécules de synthèse, mais seulement légèrement plus basse que celles des huiles essentielles les plus actives, à hauteur de 6, 25 et 80 mg/L pour EU-13, EU-36 et EU-37 respectivement.

Les concentrations inhibitrices médianes (CI_{50}) ($\pm$ intervalle de confiance) sur la germination des spores des 3 génotypes de *P. infestans* sont répertoriées dans le Tableau V.

Tableau VI : CI_{50} obtenue sur les 3 génotypes de *P. infestans* pour chacune des substances

Table VI: CI_{50} values obtained for the 3 genotypes of *P. infestans* for each of the substances

Génotypes de <i>P. infestans</i>	EU-13-A2	EU-36-A2	EU-37-A2
CI_{50} des huiles essentielles (mg/L)			
Bergamote	9100 [7500 ; 13000]	9900 [7500 ; 13000]	4400 [3500 ; 5580]
Romarin	9810 [7920 ; 12060]	2160 [1080 ; 3330]	5940 [4770 ; 7560]
Girofle	500 [400 ; 600]	100 [60 ; 140]	400 [300 ; 600]
Origan	1620 [990 ; 1890]	270 [180 ; 360]	350 [180 ; 540]
Cannelle	130 [90 ; 200]	120 [50 ; 280]	80 [50 ; 130]
CI_{50} des substances actives fongicides (mg/L)			
Mandipropamide	0,010 [0,003 ; 0,021]	0,012 [0,002 ; 0,032]	0,015 [0,006 ; 0,02]
Fluazinam	0,35 [0,1 ; 1,3]	0,25 [0,05 ; 3,2]	0,29 [0,01 ; 3,2]
Sulfate de cuivre	6 [1 ; 23]	14 [2 ; 27]	80 [30 ; 220]

Discussion

L'analyse du profil chimique des huiles essentielles indiquent une grande variété de composés terpéniques, telle que le D-limonène, l' α -pinène, l'eucalyptol ou encore le camphre en abondance relative modérées (entre 5 et 25%) pour les huiles essentielles de bergamote et de romarin. A l'inverse, les huiles essentielles de girofle, d'origan et de cannelle montrent chacune un composé majoritaire (plus de 60%) appartenant à la classe des phénylpropanoïdes, des métabolites dérivés de la phénylalanine, un acide aminé aromatique. On y retrouve en effet respectivement l'eugénol, le carvacrol et le cinnamaldéhyde, tel qu'attendus pour des extraits de telles origines botaniques (Deweert *et al.*, 2023 ; Soylu *et al.*, 2006 ; Najdabbasi *et al.*, 2020). Les très hautes valeurs de CMI (> 2000 mg/L) et de CI_{50} des deux huiles essentielles composées principalement de ces terpénoïdes - à savoir celle de indiquent de très faibles activités inhibitrices contre chacun des trois génotypes de *P. infestans* à la fois sur le mycélium ainsi que sur les spores. A l'inverse, l'huile essentielle d'origan permet l'inhibition de la croissance du mycélium à la plus faible concentration suivi de près par le clou de girofle et par la cannelle. Des résultats similaires ont été obtenus avec, par exemple l'huile de thym, dont la composition est proche de celle d'origan (Najdabbasi *et al.*, 2022). Toutefois, cette tendance s'inverse lorsque la germination des spores est considérée. En effet, la valeur de CI_{50} significativement la plus faible est atteinte avec l'huile de cannelle, et cela pour les 3 génotypes. Les huiles de girofle et d'origan montrent néanmoins un effet contre la germination des spores dans des ordres de grandeurs proches.

Des extraits proches ou leurs composés majoritaires associés ont également permis de démontrer des tendances similaires (De Clerck *et al.*, 2020 ; Deweer *et al.*, 2023). En outre, l'analyse statistique effectuée entre les 3 géotypes de *P. infestans* n'a que rarement permis de discriminer leur sensibilité face aux cinq huiles essentielles étudiées. En effet, seule la CMI de l'huile essentielle de girofle sur EU-13 est significativement différente de celles obtenues sur EU-36 ou EU-37. Néanmoins, les sensibilités des 3 géotypes aux 2 molécules sont significativement différentes tandis que celle au sulfate de cuivre l'est de façon hautement significative. L'isolat EU-37 a été répertorié à l'origine pour sa sensibilité amoindrie au fluazinam (Schepers *et al.*, 2018). Les résultats obtenus *in vitro* ne confirment toutefois pas cela puisque les deux indicateurs de cette molécule ne sont pas significativement plus élevés que ceux pour les deux autres isolats. Cependant, EU-37 se distingue bien de EU-13 et EU-36 par sa plus haute tolérance au sulfate de cuivre, pour la croissance de son mycélium tout comme la germination de spores puisque ces deux indicateurs sont quant à eux significativement plus hauts que ceux des deux autres isolats. Au-delà de leurs activités anti-oomycètes manifestement bien plus faibles que les phénylpropanoïdes, les terpènes sont des molécules globalement plus volatiles. Bien qu'émulsionnées de la même manière, leur persistance dans les milieux de culture, qu'ils soient solides ou liquides est donc plus faible, pouvant ainsi expliquer partiellement les résultats obtenus.

Conclusion & Perspectives

Les premiers tests menés *in vitro* ont permis de comparer les activités anti-oomycètes de cinq huiles essentielles, de deux molécules de synthèses et d'un composé minéral à la fois contre la croissance du mycélium mais aussi contre la germination des spores de 3 géotypes de *P. infestans*. Il ressort que les huiles essentielles contenant des phénylpropanoïdes comme composant majoritaire telle que l'origan, le girofle ou encore la cannelle ont un pouvoir inhibiteur à la fois sur le mycélium ainsi que sur les spores bien plus important que celles composées majoritairement de terpénoïdes comme la bergamote & le romarin. En outre, la sensibilité des 3 souches semble globalement la même face à toutes les huiles qui restent les plus actives.

Enfin, l'homologation de nouvelles substances actives pour la santé des plantes est un processus long. De plus, la législation européenne restreint chaque année la liste des fongicides autorisés, tandis que les doses de sulfate de cuivre ont été elles aussi revues à la baisse en agriculture biologique. Plusieurs huiles essentielles semblent prometteuses pour lutter contre certains microorganismes responsables de pathologies végétales. Leurs potentiels restent toutefois à confirmer *in planta* tant sur leur capacité à prévenir ou guérir la maladie, mais aussi quant aux effets d'induction des défenses de la plante, de phytotoxicité ou encore d'écotoxicité.

Bibliographie

- Álvarez-Martínez, F. J., Barrajón-Catalán, E., Herranz-López, M. & Micol, V., 2021 - Antibacterial plant compounds, extracts and essential oils: An updated review on their effects and putative mechanisms of action. *Phytomedicine* 90, 153626.
- Cooke, D. E. L., Drenth, A., Duncan, J. M., Wagels, G. & Brasier, C. M., 2000 - A Molecular Phylogeny of *Phytophthora* and Related Oomycetes. *Fungal Genetics and Biology* 30, 17–32.
- De Clerck, C.; Maso, S. D.; Parisi, O.; Dresen, F.; Zhiri, A.; Jijakli, M. H., 2020 - Screening of Antifungal and Antibacterial Activity of 90 Commercial Essential Oils against 10 Pathogens of Agronomical Importance. *Foods*, 9 (10), 1418.
- De Clerck, C., Genva, M., Jijakli, M. H. & Fauconnier, M.-L., 2021 - Use of Essential Oils and Volatile Compounds as Biological Control Agents. *Foods* 10, 1062.
- Devaux, A.; Goffart, J.-P.; Petsakos, A.; Kromann, P.; Gatto, M.; Okello, J.; Suarez, V.; Hareau, G., 2020 - Global Food Security, Contributions from Sustainable Potato Agri-Food Systems. In *The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*; Campos, H., Ortiz, O., Eds.; Springer International Publishing: Cham, pp 3–35.
- Deweer, C., Sahmer, K. & Muchembled, J., 2020 - Anti-oomycete activities from essential oils and their major compounds on *Phytophthora infestans*. *Environmental Science and Pollution Research* 30.

Eilenberg, J., Hajek, A. & Lomer, C. Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl* 46, 387–400 (2001).

Fometu, S., Shittu, S., Herman, R. & Ayepa, E., 2020 - Essential Oils and their applications-A mini review. 4, 1–13

Fry, W. E.; Birch, P. R. J.; Judelson, H. S.; Grünwald, N. J.; Danies, G.; Everts, K. L.; Gevens, A. J.; Gugino, B. K.; Johnson, D. A.; Johnson, S. B.; McGrath, M. T.; Myers, K. L.; Ristaino, J. B.; Roberts, P. D.; Secor, G.; Smart, C. D., 2015 - Five Reasons to Consider *Phytophthora Infestans* a Reemerging Pathogen. *Phytopathology*, 105 (7), 966–981.

Fry, W. E., 2016 - *Phytophthora infestans*: New Tools (and Old Ones) Lead to New Understanding and Precision Management. *Annu Rev Phytopathol* 54, 529–547.

Gavahian, M., Chu, Y.-H. & Mousavi Khaneghah, A., 2019 - Recent advances in orange oil extraction: an opportunity for the valorisation of orange peel waste a review. *International Journal of Food Science & Technology* 54, 925–932.

Gisi, U., Walder, F., Resheat-Eini, Z., Edel, D. & Sierotzki, H., 2011 - Changes of Genotype, Sensitivity and Aggressiveness in *Phytophthora infestans* Isolates Collected in European Countries in 1997, 2006 and 2007. *Journal of Phytopathology* 159, 223–232.

Goffart, J.-P.; Haverkort, A.; Storey, M.; Haase, N.; Martin, M.; Lebrun, P.; Ryckmans, D.; Florins, D.; Demeulemeester, K., 2022 - Potato Production in Northwestern Europe (Germany, France, the Netherlands, United Kingdom, Belgium): Characteristics, Issues, Challenges and Opportunities. *Potato Res.*, 65 (3), 503–547.

Grünwald, N. J. & Flier, W. G., 2005 - The biology of *Phytophthora infestans* at its center of origin. *Annual review of phytopathology* 43, 171–190.

Lahlali, R.; Ezrari, S.; Radouane, N.; Kenfaoui, J.; Esmaeel, Q.; El Hamss, H.; Belabess, Z.; Barka, E. A., 2022 - Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective. *Microorganisms*, 10 (3), 596.

Martini, F.; Jijakli, M. H.; Gontier, E.; Muchembled, J.; Fauconnier, M.-L. Harnessing Plant's Arsenal: Essential Oils as Promising Tools for Sustainable Management of Potato Late Blight Disease Caused by *Phytophthora Infestans*—A Comprehensive Review. *Molecules* **2023**, 28 (21), 7302.

Masango, P. Cleaner production of essential oils by steam distillation. *Journal of Cleaner Production* 13, 833–839 (2005).

Miller, S. A., Ferreira, J. P. & LeJeune, J. T. Antimicrobial Use and Resistance in Plant Agriculture: A One Health Perspective. *Agriculture* 12, 289 (2022).

Moghaddam, M. & Mehdizadeh, L. Chapter 13 - Chemistry of Essential Oils and Factors Influencing Their Constituents. in *Soft Chemistry and Food Fermentation*, 379–419 (Academic Press, 2017).

Muchembled, J., Deweer, C., Sahmer, K. & Halama, P., 2018 - Antifungal activity of essential oils on two *Venturia inaequalis* strains with different sensitivities to tebuconazole. *Environ Sci Pollut Res* 25, 29921–29928.

Najdabbasi, N.; Mirmajlessi, S. M.; Dewitte, K.; Landschoot, S.; Mänd, M.; Audenaert, K.; Ameye, M.; Haesaert, G. Biocidal Activity of Plant-Derived Compounds against *Phytophthora Infestans*: An Alternative Approach to Late Blight Management. *Crop Protection* **2020**, 138, 105315.

Raymaekers, K., Ponet, L., Holtappels, D., Berckmans, B. & Cammue, B. P. A., 2020 - Screening for novel biocontrol agents applicable in plant disease management – A review. *Biological Control* 144, 104240.

Ristaino, J. B., 2002 - Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*. *Microbes and Infection* 4, 1369–1377.

Shattock, R. C., 2002 - *Phytophthora infestans*: populations, pathogenicity and phenylamides. *Pest Management Science* 58, 944–950.

Slavković, F. & Bendahmane, A., 2023 - Floral Phytochemistry: Impact of Volatile Organic Compounds and Nectar Secondary Metabolites on Pollinator Behavior and Health. *Chemistry & Biodiversity* 20, e202201139.

Schepers, H. T. A. M.; Kessel, G. J. T.; Lucca, F.; Förch, M. G.; van den Bosch, G. B. M.; Topper, C. G.; Evenhuis, A., 2018 - Reduced Efficacy of Fluazinam against *Phytophthora Infestans* in the Netherlands. *Eur J Plant Pathol*, 151 (4), 947–960.

Schumann, G. L. & D'Arcy, C. J., 2017 - CHAPTER 1: The Irish Potato Famine: The Birth of Plant Pathology. in *Hungry Planet: Stories of Plant Diseases* 1–19

Soylu, E. M., Soylu, S. & Kurt, S., 2006 - Antimicrobial Activities of the Essential Oils of Various Plants against Tomato Late Blight Disease Agent *Phytophthora infestans*. *Mycopathologia* **161**, 119–128.

Taguimjeu, P. L. K. T.; Fongang, Y. S. F.; Genva, M.; Shinyuy, L. M.; Held, J.; Frederich, M.; Ngouela, S. A.; Fauconnier, M.-L., 2025 - Antiplasmodial Activity of a New Chemotype of *Croton Sylvaticus* Hochst. Ex C. Krauss Essential Oil. *Int J Mol Sci*, **26** (2), 858.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S., 2002 - Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* **418**, 671–677.