

i. Fongitoxicité vis-à-vis des pathogènes malgaches (*Fusarium spp.*)

- *Fusarium spp.* de la banane (C146)

Une diminution de la germination conidienne du *Fusarium spp.* isolée à partir de bananes malgaches est observée entre les traitements à huile essentielle et les témoins non traités aux huiles essentielles. Cette diminution est définie en terme d'inhibition sur la figure 13 illustrant les effets de ces traitements sur la germination conidienne de ce pathogène.

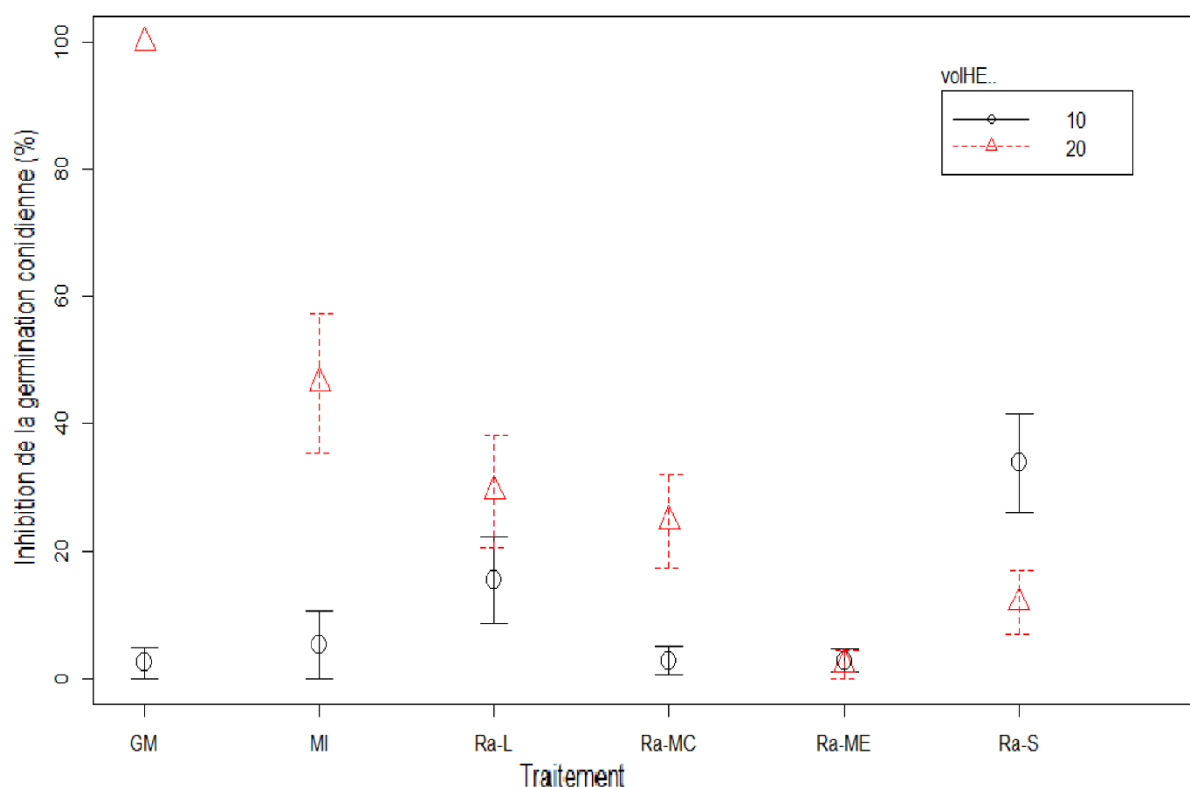


Figure 13: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la germination conidienne de *Fusarium spp.* isolée sur les bananes malgaches ($\alpha = 0.05$, $p\text{-value} < 2e-16$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 μL .

D'après cette figure, le taux d'inhibition de la germination conidienne du *Fusarium spp.* isolée à partir de bananes malgaches varie significativement d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, $p\text{-value} < 2e-16$). Les analyses ont montré qu'il varie en fonction du type d'HE utilisée ($\alpha = 0.05$, $p\text{-value} < 2.2e-16$). Le traitement à base d'HE de girofle malgache est le plus inhibiteur, suivie de l'HE de menthe industrielle, qui engendre une inhibition similaire à

celles induites par l'HE de ravensare type méthyl chavicol, type limonène et type sabinène. L'HE de ravensare de type méthyl eugénol est la moins inhibitrice. Le volume d'HE influence aussi cette inhibition ($\alpha = 0.05$, p-value = $1.728e-07$), et les différences entre les taux d'inhibition observés sont la résultante de l'interaction entre ces deux facteurs ($\alpha = 0.05$, p-value = $2.498e-13$).

Les effets des six huiles essentielles restantes sur la croissance mycélienne de C146 (*Fusarium spp.* isolée sur les bananes malades) sont similaires à leurs effets sur la germination conidienne de cette dernière. D'après la figure 14 qui illustre ce résultat, ces huiles essentielles inhibent cette croissance mycélienne.

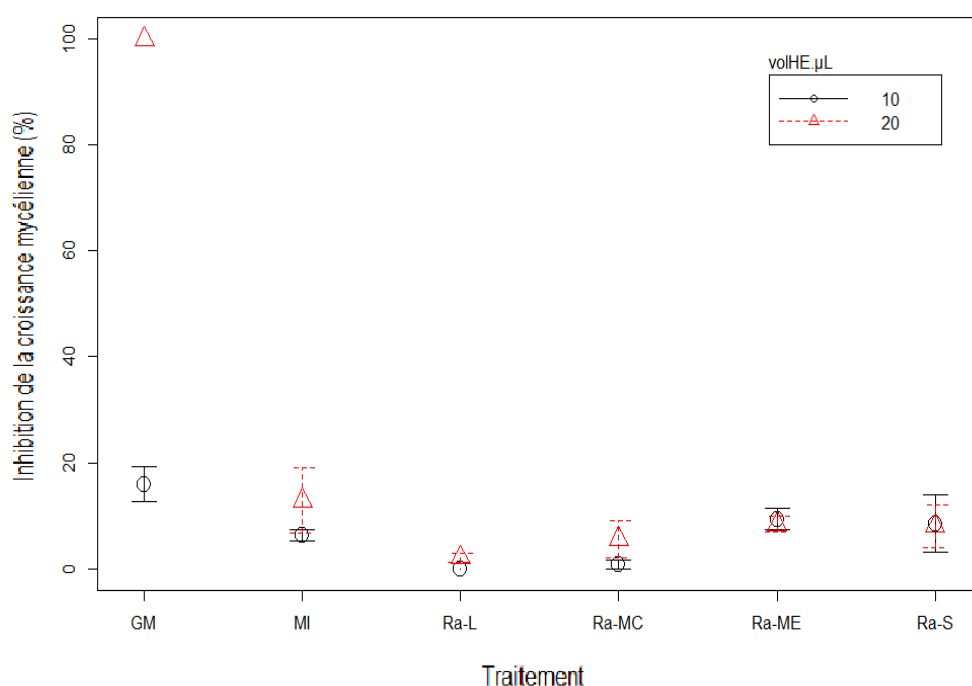


Figure 14: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium spp.* isolée sur les bananes malgaches ($\alpha = 0.05$, p-value $<2e-16$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 μ L.

Les analyses de la variance effectuées ont montré que cette inhibition varie d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, p-value $<2e-16$). Elle varie aussi en fonction de l'HE utilisée ($\alpha = 0.05$, p $<2*2e-16$) ainsi que du volume de cette dernière ($\alpha = 0.05$, p = $1.728e-07$). Par conséquent, les variations de l'inhibition observée sont tributaires de l'interaction entre ces deux facteurs ($\alpha = 0.05$, p-value = $2.498e-13$). Le traitement à 20 μ L d'HE de girofles malgaches demeure le plus inhibiteur, le reste des traitements est faiblement inhibiteur (inhibition $< 20\%$). Il s'agit des

traitements à huile essentielle de menthe industrielle, à huile essentielle de ravensare type méthyl chavicol, type méthyl eugénol et type sabinène. Celui à HE de ravensare de type limonène n'a pas d'effet inhibiteur.

- *Fusarium spp.* de la papaye (C147)

In vitro, la souche C147 de *Fusarium spp.* isolée sur les papayes malades est peu sensible aux traitements à huiles essentielles choisies. La figure 15 illustre les effets des traitements à base d'huiles essentielles sur la germination conidienne de ce pathogène.

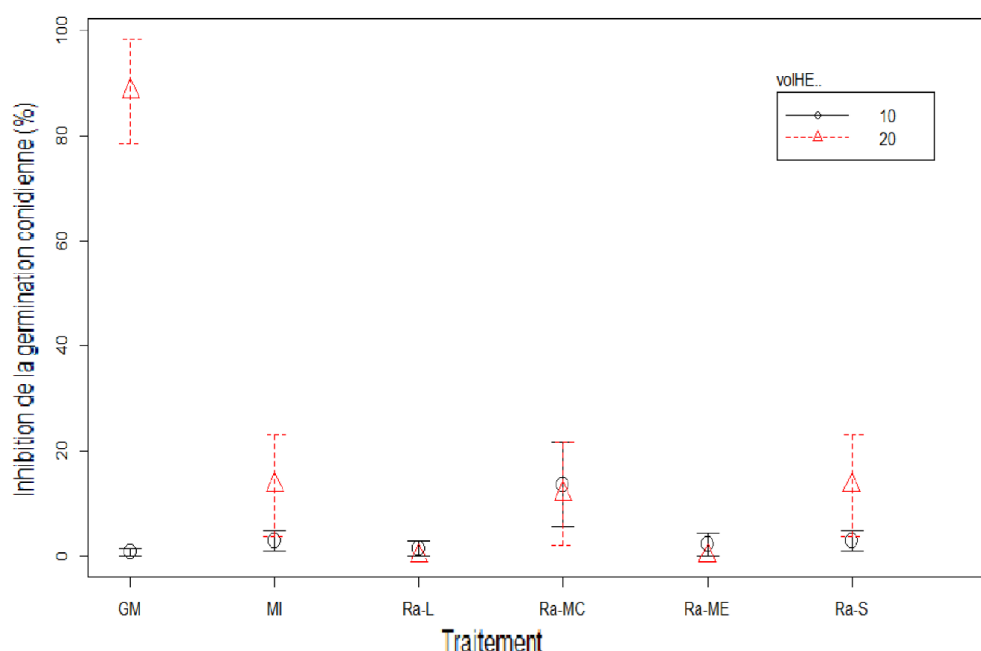


Figure 15: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la germination conidienne de *Fusarium spp.* isolée sur les papayes malgaches ($\alpha = 0.05$, p-value = $<2e-16$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 μL .

Les inhibitions observées sont faibles ou statistiquement non significatives avec la plupart des traitements. Seul le traitement à 20 μL d'HE de girofles malgaches inhibe significativement et totalement cette germination. Par conséquent, il existe des variations significatives entre les effets inhibiteurs des différents traitements ($\alpha = 0.05$, p-value $<2e-16$). Elles sont fonction de l'HE utilisée ($\alpha = 0.05$, p-value = $7.405e-10$), du volume de cette dernière ($\alpha = 0.05$, p-value = $3.686e-05$), et découlent de l'interaction entre ces deux facteurs ($\alpha = 0.05$, p-value = $9.958e-12$).

Ces traitements à huiles essentielles agissent de façon comparable sur la croissance mycélienne de la souche C147 de *Fusarium spp.* isolée à partir de papayes malades. D'après la figure 16, la croissance mycélienne de ce pathogène diminue entre les témoins non traités à l'huile essentielle et les traitements à huiles essentielles.

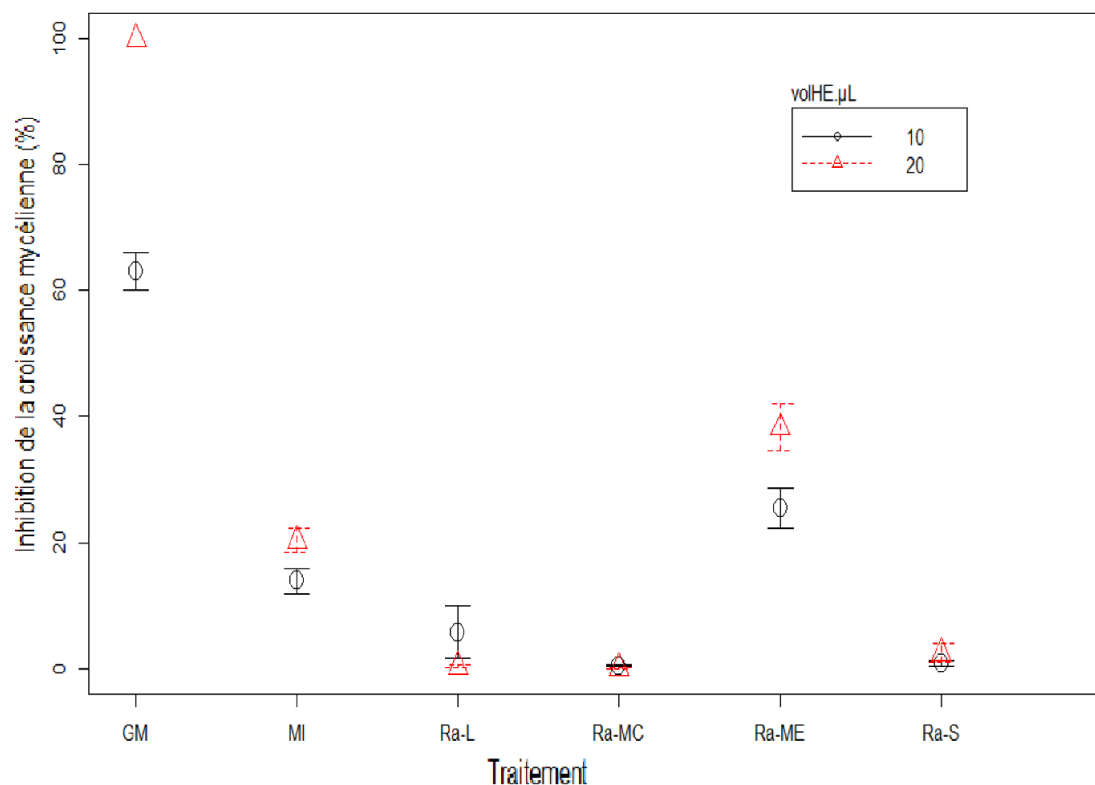


Figure 16: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium spp.* isolée sur les papayes malgaches ($\alpha = 0.05$, p-value = $<2e-16$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

Exprimée en terme d'inhibition, cette diminution varie significativement d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, p-value = $<2e-16$), en fonction de l'HE utilisée, de son volume et dépend de l'interaction entre ces deux facteurs. Seule 20µL de l'HE de girofle malgaches inhibe totalement la croissance mycélienne de cette espèce (*Fusarium spp.* isolée sur les papayes malgaches). Les HE de menthe industrielle ainsi que l'HE de ravensare type méthyl eugénol l'inhibent entre 20-50% et l'HE de ravensare de type méthyl chavicol, sabinène, et limonène ne l'inhibent pas.

- *Fusarium spp.* des mangues (C16)

La figure 17 illustre la capacité des six huiles essentielles à inhiber la germination conidienne de la souche C16 de *Fusarium spp.* isolée sur des mangues malades.

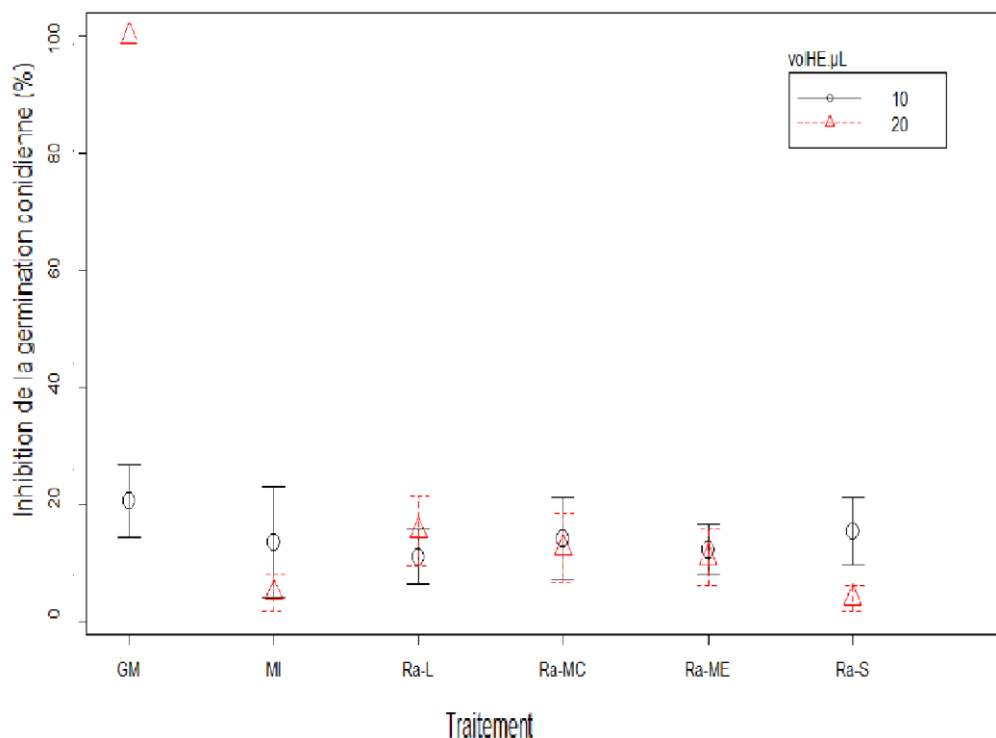


Figure 17: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la germination conidienne de *Fusarium spp.* isolée sur des mangues malgaches. ($\alpha = 0.05$, $F = 7.91e-14$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

Bien que tous les traitements formulés à partir de ces huiles essentielles semblent inhiber cette dernière, le test de Tuckey montre que seul le traitement avec 20µL de girofles malgaches entraîne une inhibition significative voisine de 100% ($\alpha = 0.05$, p-value = 7.91e-14). L'analyse de la variance a confirmé que le type d'huile essentielle a un effet significatif sur ce taux d'inhibition et ce indépendamment du volume d'huile essentielle utilisé pour le traitement ($\alpha = 0.05$, p-value = 1.439e-11). Par contre, le volume d'huile essentielle n'a d'effet significatif sur le taux d'inhibition de la germination conidienne de ce pathogène ($\alpha = 0.05$, p-value = 0.05817) qu'en interagissant avec le type d'huile essentielle ($\alpha = 0.05$, p-value = 5.128e-07).

Les effets des six huiles essentielles sur la croissance mycélienne de C16 (*Fusarium spp.* isolée sur des mangues malgaches) se manifestent aussi par une diminution de cette croissance par rapport aux témoins non traités aux huiles essentielles. Cette diminution, définie « inhibition de la croissance mycélienne », provoquée par les traitements à huiles essentielles est illustrée par la figure 18.

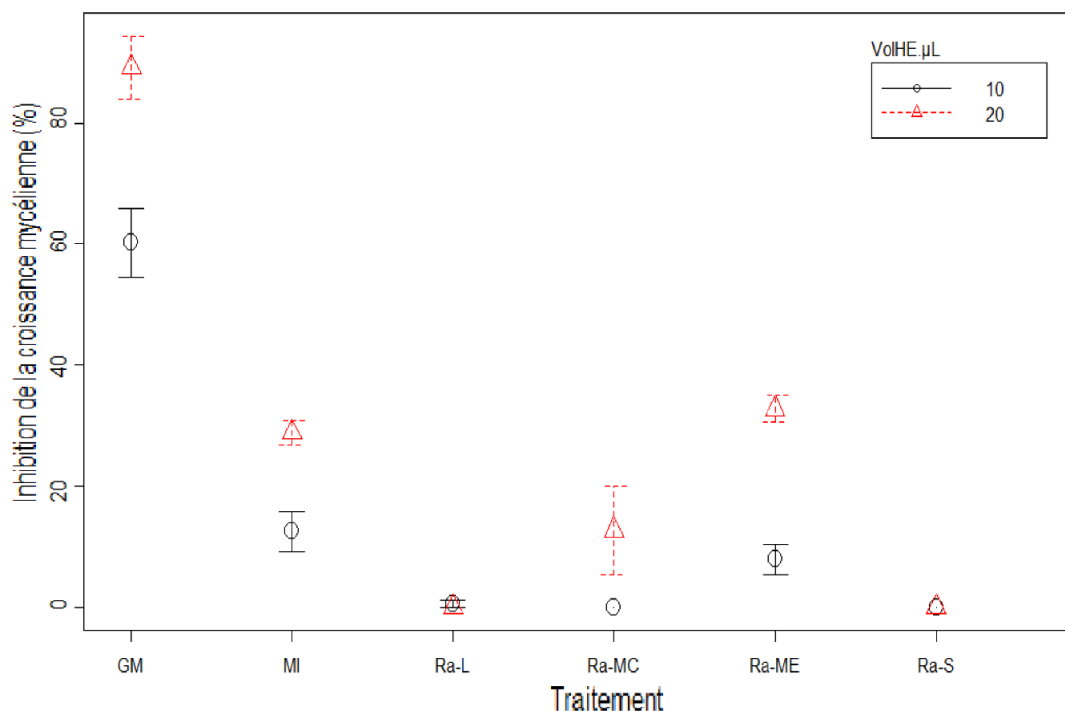


Figure 18: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la croissance mycélienne de *Fusarium spp.* isolée sur des mangues malgaches ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

Les analyses de variance ont montré que le taux d'inhibition observé diffère significativement d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16). Il varie en fonction du type d'huile essentielle (p-value < 2.2e-16). Il varie aussi en fonction du volume d'HE utilisé ($\alpha = 0.05$, p-value = 6.134e-15). Les traitements à huile essentielle de girofles malgaches sont les plus inhibiteurs (inhibition allant de 50 à 100%). Ils sont suivis par les traitements à huile essentielle de ravensare de type aromatique (type méthyl eugénol et type méthyl chavicol), les traitements à huile essentielle de menthe industrielle sont les moins inhibiteurs. Quelle que soit le volume d'huile utilisé, l'huile essentielle de ravensare de type limonène et celle de type sabinène n'ont aucun effet significatif sur la croissance mycélienne de C16. D'après les analyses de variance, les différences entre les effets de chaque traitement proviennent de

l'interaction entre le type et le volume d'huile essentielle utilisé ($\alpha = 0.05$, p-value= 3.367e-06).

ii. La fongitoxicité vis-à-vis de *Colletotrichum asianum*

La figure 19 illustre les effets des traitements à huiles essentielles sur la germination conidienne de *C. asianum*.

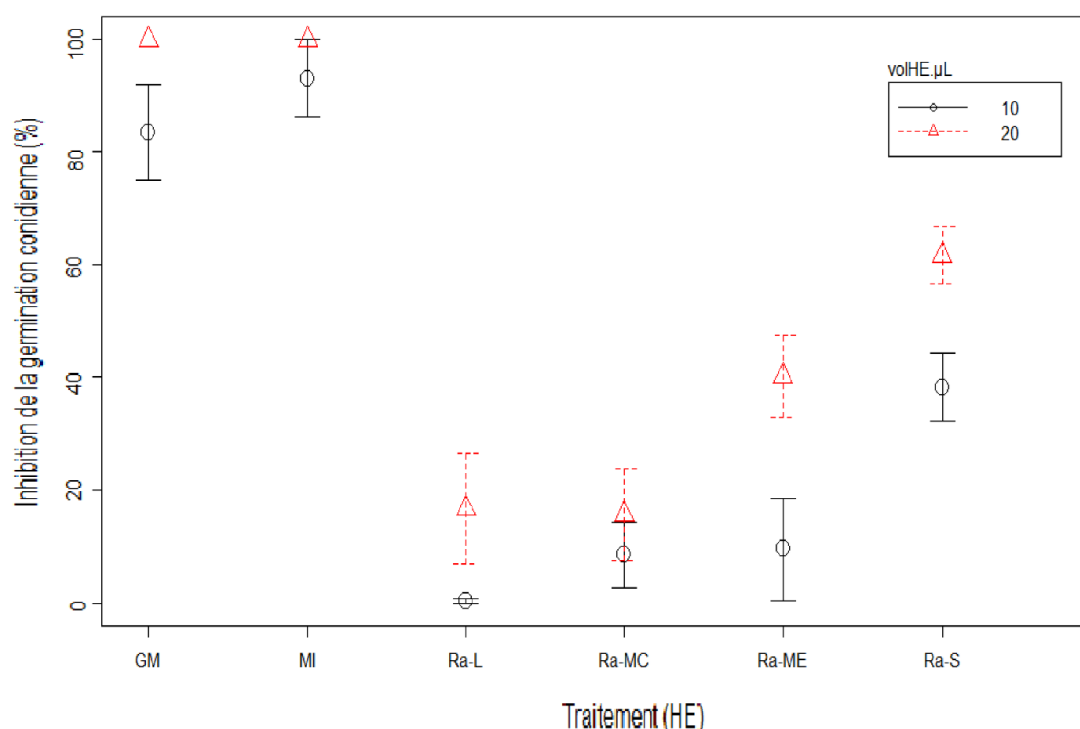


Figure 19: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de la germination conidienne de *Colletotrichum asianum* ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

Douze traitements avec six huiles essentielles ont aussi été choisis. Leurs effets sur le taux de germination conidienne, se manifestent aussi par une inhibition plus ou moins grande, par rapport aux témoins non traités aux huiles essentielles. Les analyses de variance effectuées ont montré que cette inhibition varie significativement d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16). Elle varie en fonction de l'huile essentielle utilisée ($\alpha = 0.05$, p-value <2*2e-16), du volume de cette dernière ($\alpha = 0.05$, p-value =4.848e-06), avec une faible interaction entre ces deux facteurs ($\alpha = 0.05$, p-value =0.01856). Les traitements à huile essentielle de girofles malgaches et menthe industrielle sont les plus inhibiteurs (100% d'inhibition environ).

D'après la figure 20, la croissance mycélienne de *C. asianum* est également inhibée par ces six huiles essentielles.

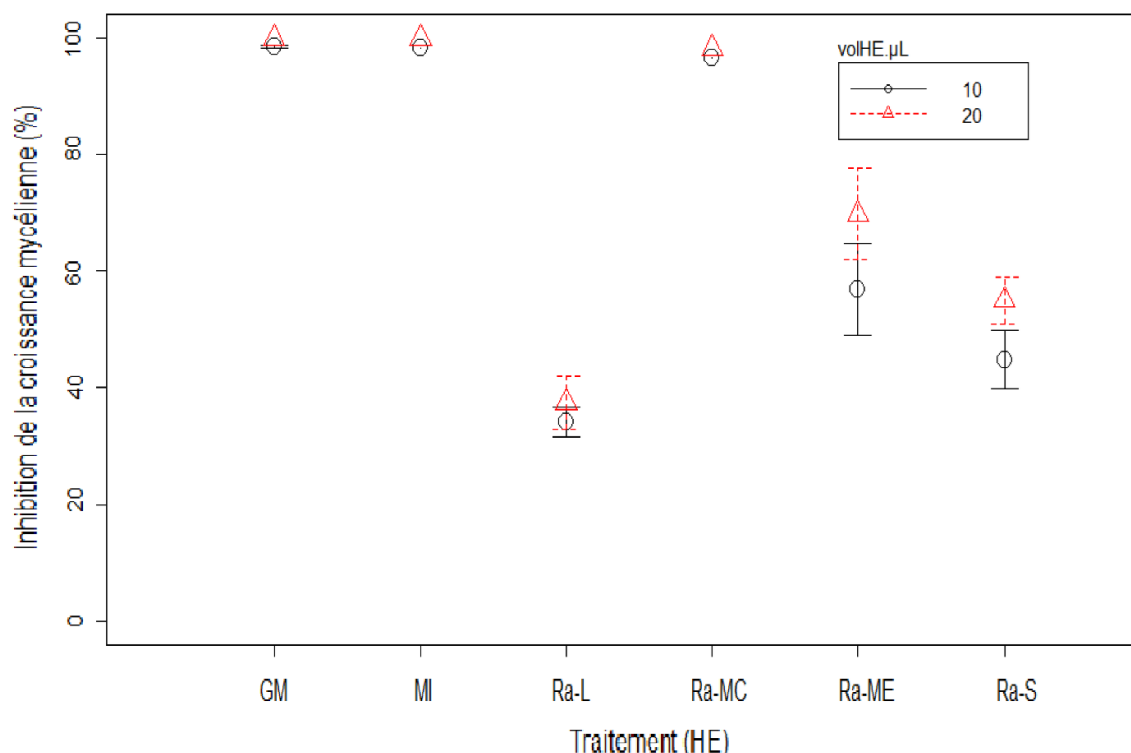


Figure 20: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux de croissance mycélienne de *Colletotrichum asianum* ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

Les analyses de la variance de ces inhibitions effectuées ont montré que cette inhibition varie significativement d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16) en fonction de l'huile essentielle utilisée ($\alpha = 0.05$, p-value <2e-16) uniquement. Le volume d'huile essentielle utilisé n'a aucun effet significatif sur cette inhibition ($\alpha = 0.05$, p-value =0.1420). Ainsi, les traitements à huile essentielle de girofles malgaches, à huile essentielle de menthe industrielle et à huile essentielle de ravensare de type méthyl chavicol inhibent de façon homogène cette germination conidienne avec un taux de 100%. Les traitements à huiles essentielles de ravensare type méthyl eugénol et type sabinène sont moyennement inhibiteurs. Ceux à huiles essentielles de ravensare type limonène sont les moins inhibiteurs.

2. Fongitoxicité in vivo des huiles essentielles

Rappelons que cette partie des résultats concerne les effets des doses toxiques pour la germination et la croissance des souches fongiques in vitro, sur l'apparition de maladies au niveau des fruits après la récolte. Il est à noter que dans le cas des fruits malgaches, la contamination des fruits est naturelle et non induite comme les mangues réunionnaises. Ainsi, les effets des traitements sur les fruits malgaches sont évalués à partir de l'incidence de maladies sur les fruits (lésions et pourritures) tandis que les effets des traitements sur les mangues réunionnaises sont évalués à partir de la sévérité de l'anthracnose (surface moyenne des lésions obtenues par inoculation des fruits). Ces effets sont exprimés en une notion théorique appelée inhibition, définie par le rapport entre le nombre de lésions observées sur les fruits traités aux HE et celui sur les fruits non traités.

a. Les bananes

L'inhibition des maladies post-récoltes observées sur les bananes malgaches en fonction des traitements à huile essentielle effectuée est présentée dans la figure 21.

D'après cette figure, l'inhibition de l'incidence de lésions et pourritures sur les bananes malgaches est variable d'un traitement à l'autre. Toutefois, l'analyse de la variance a révélé que ces inhibitions ne sont pas statistiquement différentes d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, $p\text{-value} = 0.37$). En effet, l'incidence de lésions sur chaque mangue non traitée est très variée ($34 \pm 19\%$ d'inhibition), et l'écart-type pour chaque traitement si élevé ($51 \pm 18\%$ d'inhibition pour le traitement à HE de girofles malgaches), que leurs effets sont interprétés comme une tendance inhibitrice, toutefois non significatives, des maladies post-récoltes sur les bananes en conservation.

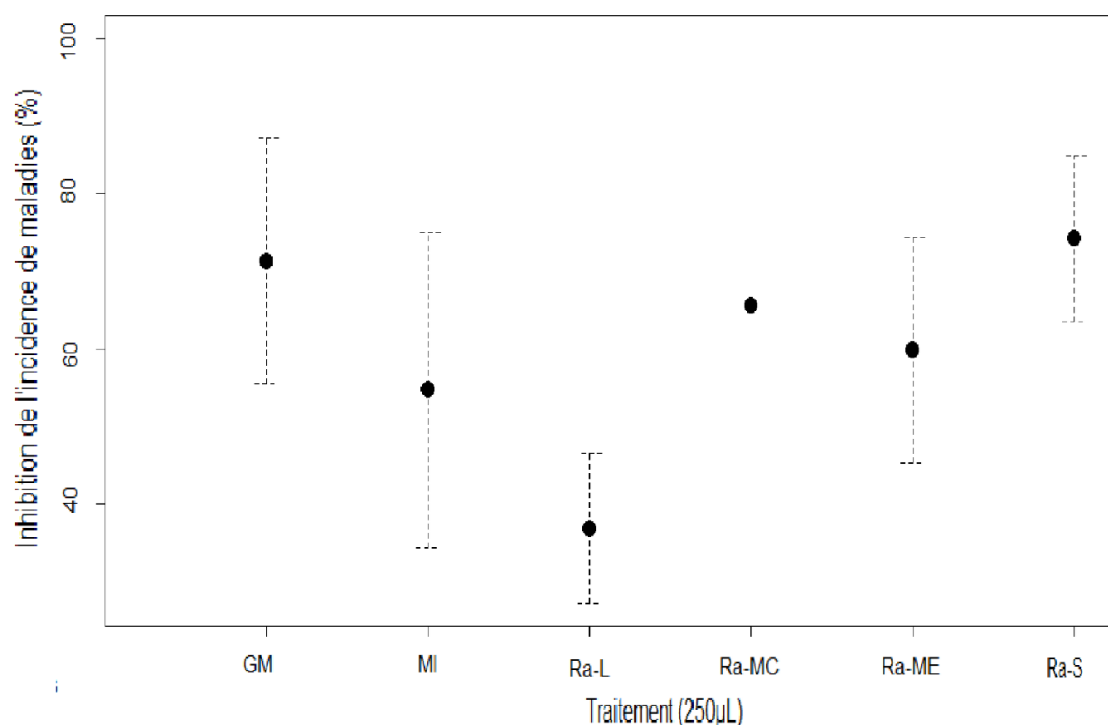


Figure 21: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de l'incidence de maladies post-récolte sur les bananes ($\alpha = 0.05$, p-value =0.37).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

b. Les papayes

Il en est de même pour les papayes malgaches (Figure 22). L'observation de la moyenne suggère une forte inhibition de l'incidence de lésions et pourritures par les traitements à huile essentielle. L'inhibition observée varie aussi énormément d'un traitement à huile essentielle à l'autre. Toutefois, l'analyse de variance a conclu que cette variation n'est pas statistiquement différente d'un traitement à l'autre ($\alpha = 0.05$, p-value =0.239).

Par ailleurs, l'incidence des lésions au niveau des papayes témoins, non traités à l'huile essentielle, présente aussi un écart-type très élevé ($27 \pm 27\%$ d'inhibition), très comparable aux écart-types observés au niveau des inhibitions induites par les traitements à huiles essentielles sur l'incidence de lésions post-récoltes sur les fruits ($44 \pm 9\%$ d'inhibition pour le traitement à HE de girofles malgaches).

Les effets inhibiteurs de l'incidence des lésions sur les papayes sont donc aussi une tendance statistique non significative et non imputable aux traitements à huile essentielle effectués.

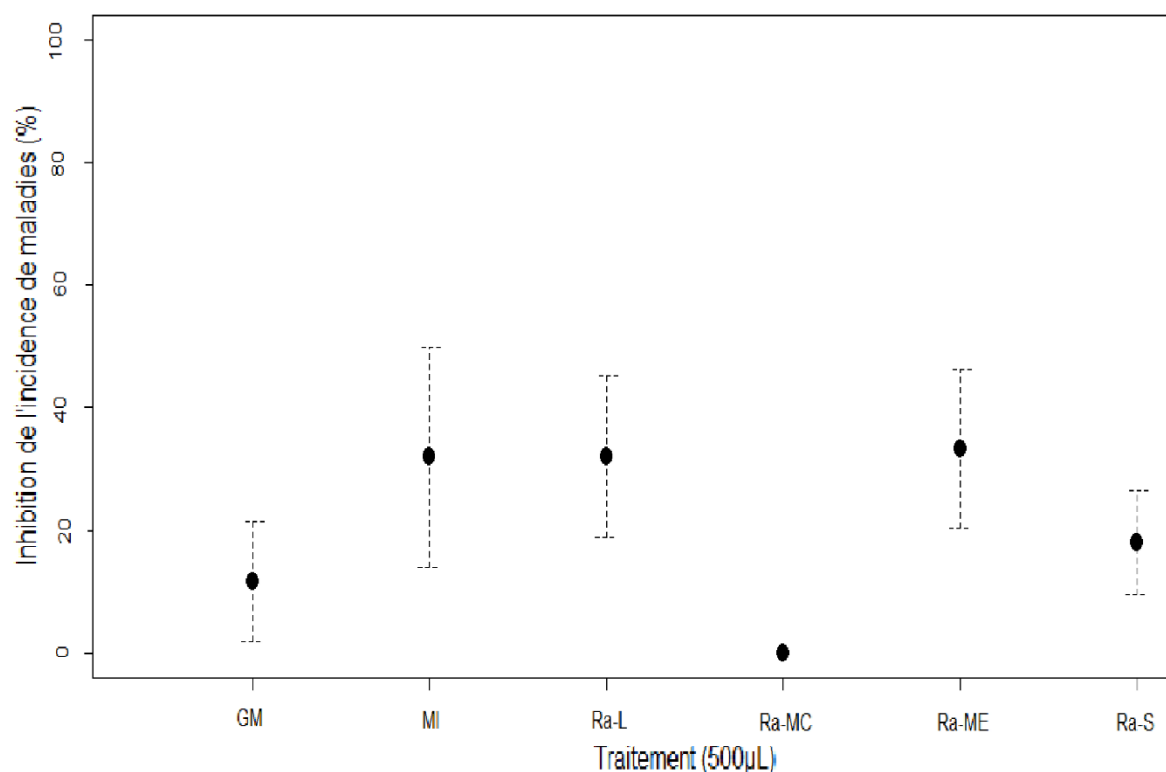


Figure 22: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de l'incidence de maladies post-récolte sur les papayes ($\alpha = 0.05$, $p\text{-value} = 0.239$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

c. Les mangues

i. Le cas malgache

La réaction des mangues malgaches aux traitements est identique à celles des papayes et des bananes (Figure 23). Quand on considère les moyennes pour chaque traitement, l'incidence de lésions et pourritures semble être inhibée par les traitements à huiles essentielles. Cette inhibition est variable d'un traitement à l'autre, et va de 10 à 60%. Toutefois, l'écart-type de l'incidence de lésions est très élevé pour tous les traitements effectués ($34 \pm 17\%$ d'inhibition pour le traitement à HE de girofles malgaches), notamment les mangues témoins non traités à l'huile essentielle ($28 \pm 22\%$ d'inhibition). L'analyse de variance (Anova) a révélé que toutes les inhibitions observées sont statistiquement identiques ($\alpha = 0.05$, $p\text{-value} = 0.753$). Ainsi, les inhibitions de l'incidence des maladies post-récoltes

obtenues sont, elles-aussi, interprétées comme une tendance statistique non significative non imputable aux traitements effectués sur les fruits.

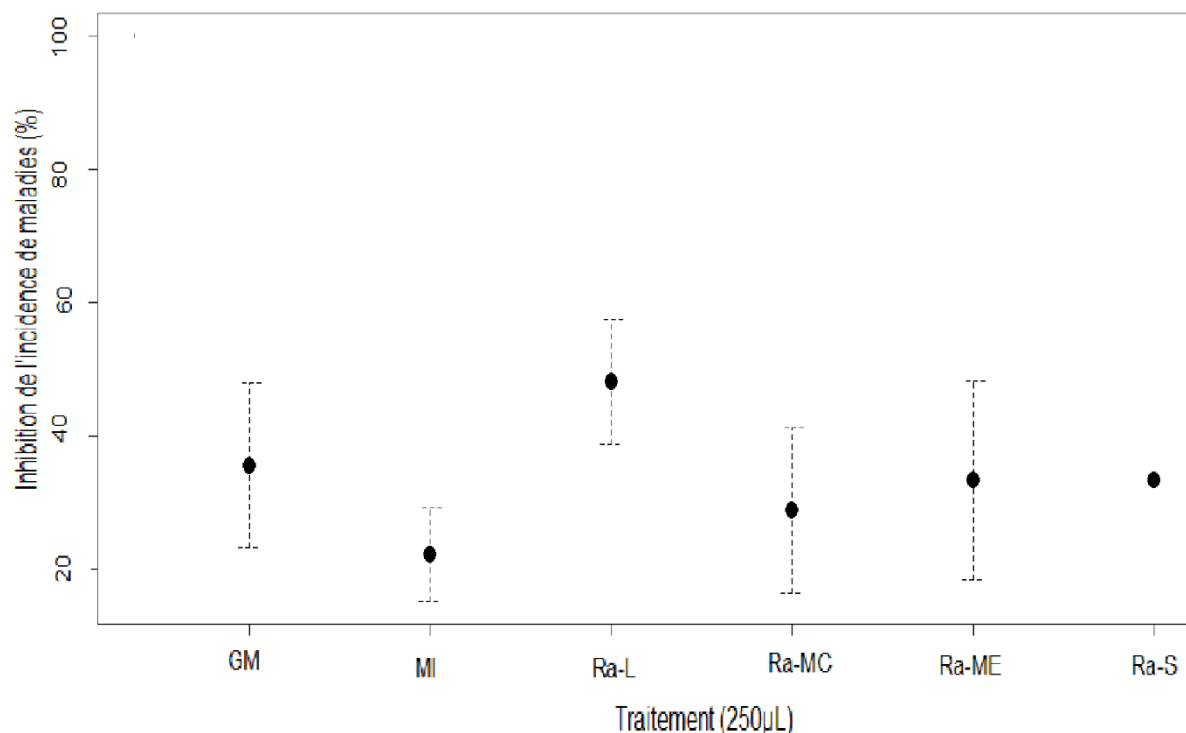


Figure 23: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur le taux d'inhibition de l'incidence de maladies post-récolte sur les mangues ($\alpha = 0.05$, p-value = 0.753).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, MI : l'huile essentielle de menthe industrielle, Ra-L : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type limonène, Ra-S : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type sabinène, Ra-ME : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl eugénol, Ra-MC : l'huile essentielle de *Ravensara aromatica* de type méthyl chavicol. Volume d'huile essentielle utilisé : 10 et 20 µL.

ii. Le cas réunionnais

D'après la figure 24 qui illustre les effets de l'huile essentielle de girofles malgaches sur la sévérité de l'anthracnose sur les mangues réunionnaises, la surface moyenne des lésions diffère significativement des témoins non traités ($\alpha = 0.05$, p-value < 2e-16).

Cette différence se manifeste 5 jours après l'inoculation (et donc 4 jours après le traitement) et perdure jusqu'à 11 jours après l'inoculation. Les analyses faites ont révélé une corrélation positive entre le nombre de jours après inoculation et la surface moyenne des lésions ($r=0.8081$) et une régression linéaire de ces deux variables ($\alpha = 0.05$, p-value < 2e-16, $r^2=0.6484$). Ainsi, la sévérité de l'anthracnose sur les mangues réunionnaises varie significativement entre le traitement à l'huile essentielle de girofle et les témoins non traités ($\alpha = 0.05$, p-value = 1.121e-05), en fonction du nombre de jours après le traitement ($\alpha = 0.05$, p-value < 2*2e-16) et les différences observées sont la résultante d'une interaction entre ces deux variables ($\alpha = 0.05$, p-value = 0.0038).

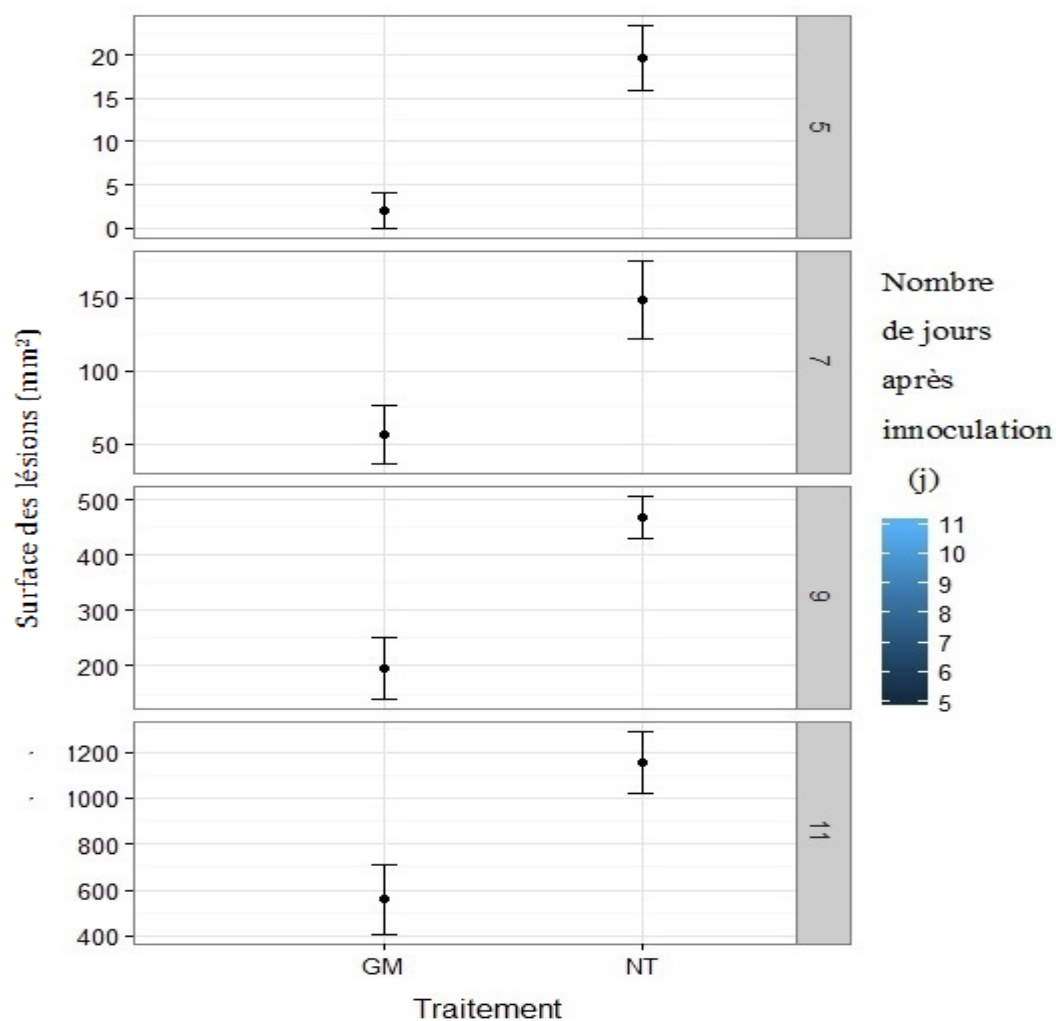


Figure 24: Effet de l'application en aérosol de six huiles essentielles sur la sévérité de l'antracnose sur les mangues réunionnaises ($\alpha = 0.05$, p-value $< 2e-16$).

GM : l'huile essentielle de girofles malgaches, NT : non traité à l'huile essentielle. Volume d'huile essentielle utilisé : 0, 500 μ L.