

**Mémoire stage de fin d'étude**

Diplôme préparé : Ingénieur agronome-master II

Spécialisation : Inter- Agro protection des plantes et de l'environnement

**Étude en plein champ du potentiel attractif ou répulsif  
de différents composés organiques volatiles sur le  
scolyte des baies du café, *Hypothenemus hampei*  
(Ferrari) au Costa Rica**



étudiante : ETIENNE Laetitia

école de rattachement: Montpellier Supagro

Encadrants du stage :

Bernard Dufour, Frédéric Marion-Poll, Jacques Avelino

Lieu du stage:

CATIE (Centro agronomico tropical de investigacion y de enseñanza)  
PO Box 7170 Del centro de Turrialba 4 kms carretera a Siquirres Turrialba,  
30501 Cartago, Turrialba Costa Rica

**Soutenu le 27 septembre 2011 à Montpellier**

Président du jury:

Frédéric Marion-Poll

Membres du jury:

Serge Kreiter, Thibaud Martin, Manuel Plantegenest



CIRAD-DIST  
Unité bibliothèque  
Lavalette



## Résumé:

Le principal insecticide (endosulfane) utilisé contre le scolyte des baies du café, *Hypothenemus hampei* Ferrari, sera interdit en 2012. Il devient donc nécessaire de développer des méthodes de lutte alternatives efficaces. Le piégeage de masse par attraction est une technique permettant une diminution de 70% des taux d'infestations. Cependant, il semble qu'on puisse encore augmenter son efficacité. C'est l'objectif global de cette étude de terrain réalisée au Costa Rica. La première voie d'amélioration est de renforcer le mélange attractif actuellement employé pour capturer le scolyte (mélange d'éthanol-méthanol). Il existe des composés émis par les baies de café dont l'étude en laboratoire a révélé une capacité à attirer le scolyte du café. Le premier objectif de cette étude est de tester certains de ces composés (éthylbenzène, méthylcyclohexane, octen-3-ol, nonane, benzaldéhyde et hexenal) au champs. Ils sont testés en association au mélange d'éthanol méthanol ou seuls. Les diffuseurs de composés sont préalablement calibrés en vue d'obtenir un taux de diffusion spécifique à chaque composé. Dans les conditions expérimentales de l'étude, aucun des composés n'a été ni attractif seul ni n'a amélioré l'attractivité du mélange d'éthanol-méthanol.

Une autre voie d'amélioration des performances du système de piégeage actuel serait d'orienter les mouvements des scolytes. Or, il existe des composés qui semblent pouvoir repousser le scolyte (l'hexanol, l'hexenol, le camphène et l' $\alpha$ - pinène). Le second objectif de cette étude est de les tester en plein champs. Deux des composés testés ont montré un effet répulsif très significatif : l'hexenol et l'hexanol.

Un troisième objectif de l'étude est de mettre en évidence l'importance du taux de diffusion des composés sur leur capacité à attirer ou repousser le scolyte. Pour cela deux composés (l' $\alpha$ - pinène et le limonène) ont été associés à l'éthanol méthanol chacun d'eux à deux taux de diffusion différents. L' $\alpha$ - pinène a permis d'augmenter significativement les captures du mélange d'éthanol-méthanol à un taux de diffusion faible alors qu'il n'a pas d'effet à plus forte diffusion. En revanche, le limonène a présenté le même effet aux deux taux de diffusion testés.

Enfin, une nouvelle configuration de piégeage associant répulsif et attractif a été testée. L'objectif étant de voir si leur association permet d'orienter les mouvements du scolyte. On a comparé les taux de captures de deux pièges attractifs (avec EM) en présence et en absence d'un répulsif (hexanol) au centre des deux pièges. Aucun effet significatif de la présence du répulsif n'a été montré.

**Mots clés:** scolyte du café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), composés organiques volatiles, piégeage, attractifs, répulsifs.

## Abstract:

The main insecticide used to control the coffee berry borer (CBB), *Hypothenemus hampei* Ferrari, will be forbidden in 2012. It becomes necessary to develop effective alternative methods of control. The massive trapping by attraction (with ethanol-methanol mixture) is a technique allowing a 70 % decrease of the infestation's rates. However, it seems that we can increase its efficiency. It is the global objective of this study realized in Costa Rica. The first way of improvement is to look for an attractive mixture more powerful than ethanol-methanol. There are volatiles organics compounds emitted by the coffee berries which showed a capacity to attract the CBB during laboratories experiments. The first objective of this study is to test some of these compounds (ethylbenzene, methylcyclohexane, octen-3-ol, nonane, benzaldehyde and hexenal) in field. They are tested in association with the mixture of ethanol methanol or the only ones. The diffusers of compounds are calibrated to obtain a specific emission's rate for each compound. In the experimental conditions of the study, none of the compounds was attractive alone or improved the attractiveness of the mixture of ethanol-methanol.

Another way of improvement of the performances of the trapping system could be to direct the movements of CBB. There are compounds which seem to be able to repel the CBB (the hexanol, the hexenol, the camphene and  $\alpha$ - pinene). The second objective of this study is to test them in field. Two of them showed a very significant repulsive effect: the hexenol and the hexanol.

The third objective of the study is to show the importance of the emission rate of compounds on their capacity to attract or to repel the CBB. Two compounds (pinène and limonene) were associated to the ethanol-methanol. Each compound is used at two different emission rate. We showed a different effect for the both treatment with  $\alpha$ - pinene but not for the both treatment with limonene.

Finally, a new configuration of repulsive and attractive associating trapping was tested. The objective was to see if their association allows to direct the CBB movements. We compared the captures rates of two attractive traps (with EM) in presence and in absence of a repellent (hexanol) in the center of both traps. No significant effect of the repellent was showed.

**Keys word:** Coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), volatiles organics compounds, traps, trapping, attractant, repellent.

## **Remerciements:**

En premier lieu, je remercie Jacques Avelino qui m'a accompagné dans toutes les étapes de mon séjour au Costa Rica. Il m'a consacré beaucoup de temps et a continuellement veillé à ce que je ne manque de rien. Il m'a accordé la confiance nécessaire pour cela. Son intérêt pour mon travail, son analyse et sa curiosité m'ont beaucoup appris sur le métier de chercheur. Je le remercie de ses conseils avisés et de son soutien (même dans mes erreurs) ainsi que de sa bonne humeur constante. Merci à Bernard Dufour pour sa disponibilité tout au long de mon stage et la confiance qu'il m'a accordé en m'accordant ce stage malgré mon manque de pratique en espagnol. Je le remercie du temps qu'il a consacré pour s'assurer des bonnes conditions dans lesquelles j'allais réaliser mon stage. Sa passion manifeste pour ses recherches a constitué pour moi une réelle source de motivation.

Cet encadrement de qualité a considérablement contribué à faire de mon stage une expérience humaine et intellectuelle de qualité.

### **A ceux qui m'ont aidé dans mon travail de terrain et de laboratoire:**

Merci à Marco Antonio Quiros et Gerardo de la propriété d'Aquiara et à Luis Guillermo Ramirez Mora de la propriété de Maquina Vieja dont la confiance et la disponibilité ont été précieuses pour mener à bien cette étude.

Merci à **Fabrice Declerk** de m'avoir laissé utiliser son laboratoire en toute indépendance.

Merci à tous ceux qui m'ont accompagné dans mon travail de terrain:

A **Mauricio et Cypriano**, qui ont eu la dure labeur de réaliser avec moi ma première expérience de terrain. A **Romain Fievez**, dont la méthodologie et la parfaite maîtrise de l'espagnol et du français me permirent de beaucoup progresser tant en pratiques expérimentales qu'en espagnol. A Sacha Caloussis, à Amilkar Moncada Rodriguez et à Diego Sando pour leur sympathie et leur collaboration. A Paola Santivane, pour sa délicatesse au travail en laboratoire et sa patience.

### **A ceux qui m'ont aidé dans mon travail d'analyse et de rédaction:**

Merci à l'attention particulière de B.Dufour à la rédaction de mon rapport et de son aide utile.

Merci à mon tuteur école **Frédéric Marion-Poll** qui m'a encouragé dans mon travail et m'a transmis des contacts utiles.

Merci à Yannick OUTREMAN et Fabienne RIBEYRE qui m'ont fourni des indications pour la réalisation des analyses statistiques de cette étude.

Merci à Mr. TIXIER qui a pris le temps de m'aider à organiser mes données et m'a guidée dans leurs analyses.

### **A ceux qui ont rendu mon séjour agréable:**

Merci à toute l'**équipe CIRAD** qui se trouve au CATIE grâce à qui je ne me suis jamais sentie seule. Chercheurs, étudiants stagiaires, thésards ou volontaires, je vous remercie de votre accueil chaleureux et de l'ambiance de travail agréable que vous offrez au sein de votre équipe.

Merci également à tous les **chercheurs et enseignants du CATIE** qui ont toujours été disponibles pour moi et à l'écoute de mes besoins.

Ces deux équipes offrent un centre de recherche et d'enseignement riche en compétences et dont la diversité culturelle et la coopération entre les agents en font un lieu de rencontre exceptionnel et privilégié.

### **A ceux qui ont rendu mes études possibles:**

Merci à mes parents: Peyravernay Dominique et Bernard et Etienne Alain pour leur présence et leur soutien.

Merci à mes amis, qui indubitablement, ont joué un rôle essentiel dans la concrétisation de mes souhaits.

### **Liste des abréviations :**

COV: composé(s) organique(s) volatil(s)

EM: éthanol-méthanol

FAO: Food and Agriculture Organization

ICO: International Coffee Organization

## Liste des tables, figures et illustrations

### Liste des illustrations photographiques:

Illustration 1: Photo de caféier (Costa Rica, Maquina Vieja, 2011).....	12
Illustration 2: Photo de fleurs de caféier ( <i>Coffea arabica</i> ) ( <a href="http://www.1000-arbres.fr">www.1000-arbres.fr</a> ).....	12
Illustration 3: Photo de fruits(baies) de caféier ( <i>Coffea arabica</i> ) ( <a href="http://www.1000-arbres.fr">www.1000-arbres.fr</a> ).....	12
Illustration 4: Photo d'un scolyte du caféier ( <i>Hypothenemus hampei</i> Ferrari)( <a href="http://www.insect.org">www.insect.org</a> ).....	13
Illustration 5: Exemple de comptage des capture d'un piège sur tissu filtrant.....	15
Illustration 6: Photo de fruits de caféier intacts (à gauche) et fruits attaqués par le scolyte (à droite) de l'extérieur et de l'intérieur.....	26

### Liste des dessins:

Dessin 1: Structure du fruit et de la graine du caféier ( <a href="http://www.toutlecafe.com">http://www.toutlecafe.com</a> ).....	12
Dessin 2 : Dessin de scolyte du caféier vue dorsale et de profil ( <a href="http://nzdl.sadl.uleth.ca">http://nzdl.sadl.uleth.ca</a> ).....	13
Dessin 3 : Dessin de la progression de <i>Hypothenemus hampei</i> Ferr. dans une baie de caféier (Bustillo et al., 1998).....	15
Dessin 4: Dessin d'un piège à scolyte type brocap.....	23

### Liste des tableaux:

Tableau 1: Principaux composés potentiellement attractifs ou répulsifs pour le scolyte (description des composés et de leur étude).....	18
Tableau 2: Tableau des résultats des taux de diffusion des COV en fonction du diamètre du diffuseur.....	19
Tableau 3: Composés testé dans chaque expérience, avec le diamètre du diffuseur et le taux de diffusion du composé attendu.....	25
Tableau 4: Résumé des caractéristiques des dispositifs de chaque expérience (nombre de traitements, de répétitions, disposition des pièges et dates de relevé des captures d'insectes).....	25
Tableau 5: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur l' attractivité des COV avec le mélange d' EM.....	27
Tableau 6: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la recherche d'un répulsif.....	29
Tableau 7: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la comparaison des deux traitements à base d' $\alpha$ - pinène.....	31
Tableau 8: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la comparaison des deux traitements à base de limonène.....	31
Tableau 9: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la comparaison des deux traitements à base d' $\alpha$ - pinène et de limonène au mélange d'éthanol méthanol seul.....	31
Tableau 10: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur l'association « répulsif attractif ».....	32
Tableau 11: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur l'association « répulsif attractif » sur deux parcelles.....	34
Tableau 12: Effet de association de l' $\alpha$ - pinène à EM par rapport à EM seul en fonction de la taille de l'orifice du diffuseur.....	35

### Liste des graphiques:

Graph.1 : Taux de diffusion mesurés et théoriques des composés pur tester l'attractivité.....	28
Graph.2 : Taux de diffusion mesurés et théoriques des composés répulsifs.....	30
Graph.3 : Taux de diffusions mesurés et théoriques des diffuseurs d' $\alpha$ - pinène et de limonène.....	33
Graph.4 : Évolution du taux de capture des pièges à EM à Maquina Vieja.....	36

### Liste des cartes:

Carte 1 : Carte de la répartition mondiale des deux espèces de caféier Robusta et Arabica.....	13
--	----

### Liste des schémas:

Schéma 1: Schéma des deux types d'unité de piégeage de l'expérience 5 sans répulsif (a) et avec répulsif (b).....	24
Schéma 2: Zone de répulsif entourée de pièges avec attractifs.....	37

# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Contexte de l'étude.....</b>	<b>11</b>
<b>2. 1 La plante hôte : le caféier.....</b>	<b>11</b>
2. 1.1 Importance économique .....	11
2. 1.2 Aspects phénologiques.....	11
2. 1.3 Aspects morphologiques.....	11
2. 1.4 Distribution géographique.....	13
<b>2. 2 Le ravageur: le scolyte des baies du café.....</b>	<b>13</b>
2. 2.1 Morphologie et répartition géographique .....	13
2. 2.1.1 Anatomie.....	13
2. 2.1.2 Origine.....	13
2. 2.1.3 Distribution.....	14
2. 2.1.4 Dispersion.....	14
2. 2.2 Biologie et dégâts.....	14
2. 2.2.1 Cycle biologique .....	14
2. 2.2.2 Dynamique des populations .....	14
2. 2.2.3 Dégâts provoqués par le scolyte.....	15
<b>2. 3 La lutte contre le scolyte en caféière.....</b>	<b>16</b>
2. 3.1 La lutte chimique : coûts et risques .....	16
2. 3.2 La protection intégrée.....	16
<b>3. PREMIERE PARTIE:</b>	
<b>Étude préliminaire de la diffusion d'une sélection de composés organiques</b>	
<b>volatiles.....</b>	<b>17</b>
<b>3. 1. Objectif.....</b>	<b>17</b>
<b>3. 2 Matériel et méthode.....</b>	<b>17</b>
3. 2.1 Conditions expérimentales.....	17
3. 2.2 Choix des COV à tester .....	17
3. 2.3 Les diffuseurs .....	17
3. 2.4 Mesure des taux de diffusion des COV .....	17
<b>3. 3 Résultats.....</b>	<b>19</b>
<b>3. 4 Discussion et conclusion.....</b>	<b>20</b>

#### **4. DEUXIEME PARTIE:**

Mise en évidence des effets attractifs et répulsifs d'une sélection de composés organiques volatiles sur le terrain et première évaluation d'un système de piégeage associant répulsif et attractif ..... 21

<b>4. 1 Objectifs</b> .....	<b>21</b>
4. 1.1 Objectifs généraux .....	21
4. 1.2 Objectifs spécifiques.....	21
<b>4. 2 Matériel et méthode</b> .....	<b>21</b>
4. 2.1 Conditions expérimentales.....	21
4. 2.1.1 La situation géographique.....	21
4. 2.1.2 Sites d'expérimentation.....	21
4. 2.1.3 La situation agronomique.....	22
4. 2.2 Matériel expérimental.....	22
4. 2.2.1 Les pièges Brocap.....	22
4. 2.2.2 Les diffuseurs de composés organiques volatiles .....	23
4. 2.3 Méthodes.....	23
4. 2.3.1 Comparaison des traitements.....	23
4. 2.3.2 Dispositif expérimentaux.....	24
4. 2.3.3 Captures et comptage des scolytes.....	26
4. 2.3.4 Mesure des taux de diffusion au champ.....	26
4. 2.4 Analyses statistiques des données.....	26
<b>4. 3 Résultats</b> .....	<b>27</b>
4. 3.1 Évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV.....	27
4. 3.1.1 Attractivité des COV seuls.....	27
4. 3.1.2 Attractivité de l'association COV+ EM.....	27
4. 3.1.3 Étude du taux de diffusion réel des COV.....	29
4. 3.2 Recherche d'un répulsif.....	29
4. 3.2.1 Étude des captures.....	29
4. 3.2.2 Étude du taux de diffusion réel des COV.....	29
4. 3.3 Importance du taux de diffusion.....	29
4. 3.3.1 Étude des captures des traitements avec l' $\alpha$ -pinène et éthanol-méthanol.....	29
4. 3.3.2 Études des captures des traitements avec limonène et éthanol-méthanol.....	31
4. 3.3.3 Études des captures de tout les traitements à l'éthanol-méthanol seul.....	31
4. 3.3.4 Étude du taux de diffusion réel des COV.....	32
4. 3.4 Résultats de l'expérience sur l'association « attractif- répulsif ».....	32

<b>4. 4</b>	<b>Interprétation des résultats.....</b>	<b>34</b>
4. 4.1	Évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV .....	34
4. 4.2	Recherche d'un répulsif.....	35
4. 4.3	Importance du taux de diffusion.....	35
4. 4.4	Association « répulsif-attractif ».....	36
<b>4. 5</b>	<b>Conclusions et perspectives sur l'ensemble de l'étude.....</b>	<b>36</b>
4. 5.1	Le piégeage « à blanc ».....	36
4. 5.2	Le calibrage des diffuseurs.....	37
4. 5.3	La mesure du taux de diffusion des COV au champ.....	37
4. 5.4	L'association « répulsif-attractif ».....	37
4. 5.5	Le site de l'étude.....	37
<b>4. 6</b>	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>37</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>39</b>
	<b>Annexe I.....</b>	<b>43</b>

## 1.Introduction

C'est au cours du XV<sup>e</sup> siècle, sous le nom de «qahwa, que le café gagne La Mecque, puis toute la Méditerranée orientale et la Perse. Il est ensuite introduit en Europe. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, sa consommation devient courante. (Daviron et al., 1990). De nos jours, le café constitue l'un des marchés économiques les plus importants au monde et plusieurs dizaines de millions de ruraux d'Amérique Latine, d'Afrique et d'Asie vivent, entièrement ou partiellement, de la culture de cet arbuste. En raison de son importance économique, de nombreuses études se sont développées sur la prévention et la lutte contre les phytophages du café. Ces études ont permis de dénombrer plus de 850 espèces d'insectes d'origines très diverses qui effectuent tout ou partie de leur cycle aux dépens des caféiers (Le Pelley, 1973).

Le scolyte des grains de café, *Hypothenemus hampei* Ferrari est unanimement reconnu comme étant le ravageur le plus important des caféières au niveau mondial (Waterhouse, 1998; Dufour et al., 1999, Damon, 2000; Jaramillo et al., 2006). Cet insecte se caractérise par une grande capacité d'adaptation et de dispersion en conséquence de quoi son éradication semble impossible. La seule stratégie de lutte envisageable semble de rabaisser les taux d'infestation des caféières jusqu'à un niveau économiquement acceptable (Decazy, 1989)

La nécessité de chercher des alternatives à la lutte chimique apparaît aujourd'hui comme une évidence en raison des dangers qu'elle engendre. De plus, le principal insecticide utilisé contre cet insecte, l'endosulfan, a récemment été inscrit sur la liste noire de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP) afin de supprimer progressivement sa présence et de parvenir à son interdiction complète d'ici à 2012. C'est pourquoi de nombreux espoirs se cristallisent autour de la protection intégrée des caféières et en particulier sur l'une de ces composantes: le piégeage de masse avec attractifs dont l'efficacité semble pouvoir se développer d'avantage.

Le piégeage s'appuie sur le fait que le scolyte, insecte monophage, reconnaît son hôte privilégié (le café), entre autre, par les effluves des baies de café. Actuellement, l'attractif utilisé pour le piégeage du scolyte du café est un mélange d'éthanol et de méthanol (EM). Ces deux composés organiques volatiles (COV) sont fortement présents dans les effluves des baies de café (Mathieu et al. 1997 ; Dufour et al 2000 ; Ortiz et al. 2004) ce qui peut expliquer leur effet attractif sur le scolyte (Ortiz, 2004; Mendoza, 1991; Brun and Mathieu, 1996 ; Mathieu et al., 1999 ; Borbón-Martinez et al., 2000; Dufour et al., 2008). Bien que des niveaux de capture élevés ont été obtenus, ce système présente deux inconvénients. D'une part la quantité capturée représente un faible pourcentage de la population totale dans la parcelle (Vega, 2009). D' autre part, ce système peut attirer dans la parcelle des scolytes provenant de parcelles voisines et provoquer un effet inverse à celui attendu. Augmenter le pouvoir attractif des composés émis par les diffuseurs et optimiser le système de piégeage sont deux voies possibles d'amélioration de la méthode actuelle de piégeage.

De nombreuses études de laboratoire ont révélé l'existence d'autres COV présents dans les effluves des baies de café capables d'attirer le scolyte lorsqu'ils sont associés au mélange d'éthanol-méthanol (EM). (Velasco et al. 1997; Mendesil, 2009; Mathieu et al. 1997; Dufour et al., 2000; Gomez de lima, 2004). D'autres substances ont été identifiées comme étant répulsives pour le scolyte du café (Borbón-Martinez, 2000) ou pour d'autres scolytes (Polland et al., 2004). Cependant, aucun de ces composés n'a été testé en plein champ.

Plusieurs questions se posent sur l'intérêt d'utiliser de nouveaux composés volatils pour le piégeage : Les COV identifiés comme attractifs par certains auteurs sont-ils réellement attractifs sur le terrain ? Sont-ils efficaces seuls ou en association avec le mélange éthanol-méthanol ? Quelle est l'importance du taux de diffusion d'un COV pour que ce dernier manifeste une attraction optimale ? Existe-il des substances réellement répulsives pour le scolyte ? Peut-on envisager d'associer l'effet des répulsifs et des attractifs pour améliorer les performances de capture ? L'objectif de cette étude est de répondre à l'ensemble de ces questions afin d'acquérir des connaissances sur les COV et leurs effets sur le comportement du scolyte du café dans le but d'améliorer le système de piégeage de cet insecte.

## **2. Contexte de l'étude**

### **2. 1 La plante hôte : le caféier**

#### **2. 1.1 Importance économique**

Le café (variétés Arabica et Robusta essentiellement) est une des valeurs marchandes les plus importantes au monde après le pétrole, représentant environ 17 G\$ an-1<sup>1</sup>. La production mondiale fut de 120 millions de sacs de 60 kg de café vert en 2009<sup>2</sup>. Environ 500 millions de personnes dépendent de cette filière. En Amérique centrale, le café est le premier produit d'exportation de ces 100 dernières années (Da Matta et al., 2007). Au Costa Rica, la production de café est la sixième production la plus importante du secteur agricole du pays après celle de l'ananas, la banane, le lait de vache, la viande bovine et du poulet<sup>1</sup>. Environ 90 % du café produit au Costa Rica est exporté<sup>3</sup>. Il représente 15% des exportations totales du secteur agricoles et 4% du PIB en 2008. Dans ce pays, la filière permet de financer plus de 300.000 personnes<sup>2</sup>.

Le café du Costa Rica se vend bien à l'international car il est reconnu comme étant un produit de qualité<sup>3</sup>. Les prix du café sont fluctuants. Les objectifs de la production de café au Costa Rica sont de maintenir des rendements assez élevés tout en limitant l'application d'intrants afin de conserver une image de qualité et d'assurer un revenu stable aux agriculteurs.

#### **2. 1.2. Aspects phénologiques**

Les caféiers spontanés vivent dans les formations forestières peu ou pas perturbées de la zone humide intertropicale africaine (entre 35° de latitude nord et 35° de latitude sud). L'arbuste craint le gel comme la sécheresse. Les températures optimales se situent, en règle générale, entre 15 et 28°C (Daviron, 1990).

La phénologie du caféier est un phénomène complexe et extrêmement variable. On peut la représenter de façon schématique par la production de cerises sous forme de vagues successives d'importance variable au cours de l'année. Théoriquement, le caféier est apte à fleurir dès qu'une pluie supérieure à 5mm succède à une période de sécheresse (Bustillo, 2006). Mais en présence de pluies pratiquement continues le caféier a également tendance à fleurir de façon anarchique tout au long de l'année (Mathieu, 1995). La nouaison (durée de maturation du fruit) dure entre 6 à 10 mois après la floraison (Brun et al., 1996).

#### **2. 1.3 Aspects morphologiques**

Le caféier, plante pérenne tropicale, est un arbuste de 5 à 7 m de haut appartenant à la famille des Rubiacées (tribu des Ixorées) originaire des plateaux éthiopiens (Illustration 1). Le genre *Coffea* compte plus d'une cinquantaine d'espèces. Les fleurs sont blanches et odorantes. Elles sont groupées en glomérule et prennent naissance à l'aisselle des feuilles persistantes qui sont disposées par deux et opposées (Illustration 2).

---

<sup>1</sup> <http://www.fao.org>

<sup>2</sup> <http://www.ico.org>

<sup>3</sup> <http://www.icafe.go.cr>

4 m

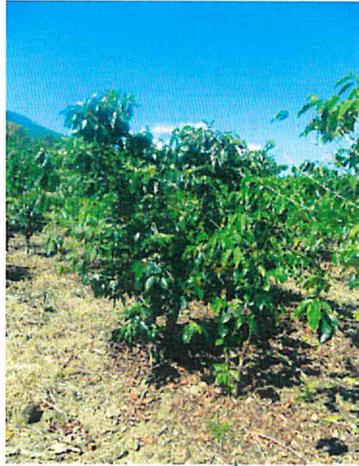


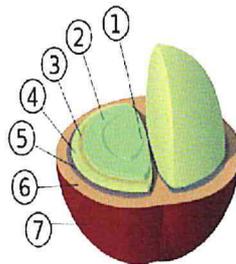
Illustration 1: Photo de caféier (Costa Rica, Maquina Vieja, 2011)



Illustration 2: Photo de fleurs de caféier (*Coffea arabica*) (www.1000-arbres.fr)



Illustration 3: Photo de fruits (baies) de caféier (*Coffea arabica*) (www.1000-arbre.fr)



- 1: sillon central 2: grain de café (endosperme),
- 3: peau du grain (tégument ou spermodermie)
- 4: parchemin (endocarpe) , 5: couche de pectine ,
- 6: pulpe (mésocarpe) , 7: peau du fruit (exocarpe)

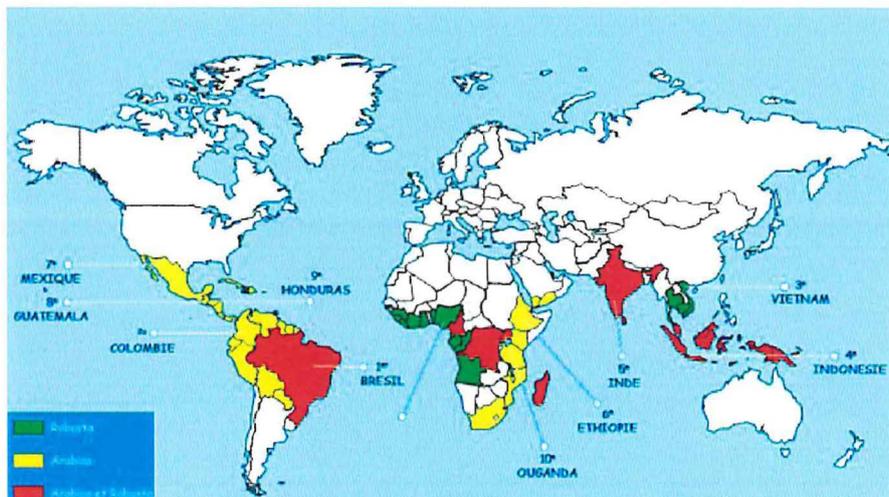
Dessin 1: Structure du fruit et de la graine du caféier (<http://www.toutlecafe.com>)

## 2. 1.4 Distribution géographique

Deux espèces se partagent aujourd'hui la quasi totalité des superficies cultivées:

–L'arabica (*Coffea arabica* L.) plus adapté aux habitats d'altitude (600 à 2100 m suivant la latitude) principalement produit en Amérique latine et dans quelques pays d'Afrique (Kenya et Cameroun essentiellement) (carte 1).

–Le robusta (*Coffea canephora* Pierre var. *robusta* Linden), qui nécessite des températures plus élevées et une pluviométrie plus abondante, est essentiellement une culture africaine et indonésienne (carte 1).



Carte 1: Carte de la répartition mondiale des deux espèces de caféier Robusta et Arabica.

## 2. 2 Le ravageur : le scolyte des baies du café

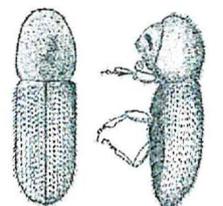
### 2. 2.1 Morphologie et répartition géographique

#### 2. 2.1.1 Anatomie

*H. hampei* est un petit coléoptère de couleur sombre au stade adulte. Au moment de leur émergence, les adultes ont une coloration brun-noire qui évolue rapidement vers le noir. Le dimorphisme sexuel est marqué : de 1,4 à 1,7 mm de long pour les femelles et de 1,2 à 1,25 mm pour les mâles. (Sladden, 1934)



Illustration 4: Photo d'un scolyte du caféier  
(*Hypothenemus hampei* Ferrari)  
([www.insect.org](http://www.insect.org))



Dessin 2: Dessin de scolyte du caféier vue dorsale et de profil (<http://nzdil.sadl.uleth.ca>)

#### 2. 2.1.2 Origine

*H. hampei* F. serait originaire d'Afrique centrale. Son origine est encore discutée. Il a été identifié pour la première fois dans un lot commercial de café en direction de la France mais d'origine inconnue en 1867 (Waterhouse et al., 1989). Le premier rapport faisant lieu de la présence du ravageur en Afrique date de 1901 au Gabon (Le Pelley, 1968) puis il fut identifié au Zaïre en 1903 (Murphy et al., 1990).

On sait que *H.hampei* ne se rencontre pas à des altitudes supérieures à 1500 m. Or les variétés robusta, originaires d'Afrique de l'ouest et d'Afrique centrale, sont mieux adaptées aux faibles altitudes que les variétés arabica (Baker, 1984). C'est pourquoi le café Robusta (*Canephora*) est suspecté d'être l'hôte originaire de *H.hampei* et l'on suppose que la zone de l'Afrique de l'ouest et centrale est son foyer originaire (Damon, 2000).

### 2. 2.1.3 Distribution

On le trouve à présent dans toutes les régions productrices de café à l'exception du Népal et de Papouasie.

En Amérique centrale, il fut introduit accidentellement au Brésil en 1920. Il apparaît ensuite au Guatemala en 1971 puis au Mexique en 1978 (Baker 1984). Il est détecté pour la première fois au Costa-Rica en décembre 2000 dans la région centrale du pays. (Borbòn, 2001)

### 2. 2.1.4 Dispersion

De manière générale, trois modalités permettent la dispersion de l'espèce: le vol à longue ou courte distance, le transport passif (animaux, véhicule, humains, vent...) et les échanges commerciaux (Damon, 2000).

Dans les plantations de café, ce sont les femelles qui assurent la dispersion de l'insecte. En effet, les ailes des mâles sont atrophiées. Ils ne quittent pas la baie de café où ils sont nés (Ticheler, 1961).

## 2. 2.2 Biologie et dégâts

### 2. 2.2.1 Cycle biologique

Le cycle biologique complet du scolyte du café dure entre 26 et 34 jours (Damon, 2000). Il comprend 4 stades de développement: le stade œuf, larvaire, nymphal et adulte.

Le développement embryonnaire dure environ 6 jours. Il s'en suit le stade larvaire qui dure en moyenne 14 jours puis le stade nymphal en général de 5 jours. Enfin, les adultes apparaissent.

Les femelles sont sexuellement matures 3 à 4 jours après leur transformation en adulte. Les reproductions ont lieu entre frères et sœurs. Les mâles fécondent la quasi totalité des femelles bien qu'ils soient à peu près 10 fois moins abondants que les femelles (Barrera, 2006). Chaque scolyte mâle peut féconder plusieurs femelles (12 à 15 en expérience). La ponte d'une seule femelle peut s'étendre sur 2,5 à 3 mois à un rythme de 2 à 3 œufs par jours (Bergamin, 1943). C'est pourquoi tout les stades sont susceptibles de se rencontrer à un même moment dans une même baie. (Damon, 2000; Bergamin 1943; Ferrari, 1867). Les mâles vivent en moyenne 20 à 87 jours alors que les femelles vivent en moyenne 157 jours (Barrera, 1994).

### 2. 2.2.2 Dynamique des populations

On peut distinguer 4 phases qui s'articulent autour de la phénologie de sa plante hôte:

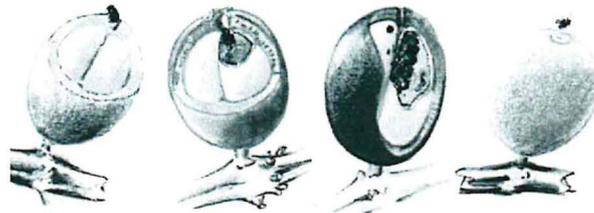
**(1) La phase de survie** a lieu lors de l'inter saison c'est à dire après la récolte et avant les nouvelles floraisons. Les scolytes se développent à l'intérieur des baies résiduelles sur les branches ou celles tombées au sol. La plupart des baies restantes à ce stade sont sèches. Les reproductions continuent jusqu'à ce que les ressources soient totalement épuisées. A ce stade, on peut trouver jusqu'à 150 adultes dans une seule baie (Brocarta, 1993; Brun et al., 1996; Barrera et al., 2006; Corbett, 1933).

**(2) La phase de migration** est généralement liée à la chute des pluies sévissant entre janvier et mars (Baker, 1994; De Kraker, 1988; Brun et al. 1996). Les femelles émergent et volent à la recherche de cerises aux réserves nutritives plus adaptées à leur alimentation et à leur reproduction (Baker, 1999) c'est à dire présentant au moins 20 % de poids sec (Barrera, 1994). Les femelles sont attirées par les métabolites secondaires résultants de la formation du fruit, par sa couleur et sa forme.

Elles sont capables de percevoir les fruits infestés à travers les odeurs des déjections fécales des individus présents par exemple (Giordanengo et al., 1993) et colonisent préférentiellement les fruits sains

(3) **La phase d'installation** survient directement après la phase de migration. Les probabilités de succès de l'installation des femelles « colonisatrices » dépendent de la proportion de jeunes fruits et de leur proximité aux cerises sèches colonisées durant la phase de survie. En général, à cette période, les fruits appétants sont rares. Une partie de la population va donc mourir ou se réfugier sur les fruits secs présents sur les branches. La durée de survie de ces femelles « colonisatrices » en plein champs demeure inconnue.

(4) **La phase de multiplication** débute lorsque le fruit atteint la consistance permettant au scolyte de déposer ses œufs (stade semi-consistant) et lorsque le développement larvaire devient possible. Le cycle biologique de l'insecte peut alors s'initier. Le scolyte s'alimente et se reproduit dans l'endosperme du fruit. Pour atteindre ce dernier, il doit creuser l'exocarpe, le mésocarpe et l'endocarpe ce qui peut prendre jusqu'à 8 heures en conditions optimales (Sponagel, 1994) (Dessin 3).



Dessin 3 : Dessin de la progression de *Hypothenemus hampei* Ferr. dans une baie de caféier (Bustillo et al., 1998)

### 2. 2.2.3 Dégâts provoqués par le scolyte

Les dégâts provoqués par le scolyte des baies du café affecte la récolte en diminuant le rendement et en réduisant la qualité des grains. Le rendement est affecté :

- par la chute des jeunes fruits perforés (De Kraker, 1988; Ortiz et al., 1991)
- par la perte de poids des fruits attaqués (Damon, 2000).
- par la pourriture des fruits due à la perforation des grains par le scolyte (porte d'entrée pour les micro-organismes saprophytes) (Waterhouse, 1989; Leefmans, 1923).

Il a été démontré que les pertes de rendements sont proportionnelles aux pourcentages d'attaques. Ainsi pour un taux d'infestation de 100%, les pertes de rendements sont de l'ordre de 35-40% sur le continent américain (Toledo, 1947; Milan, 1989).



Illustration 5 : Photo de fruits de caféier intacts (à gauche) et fruits attaqués par le scolyte (à droite) de l'extérieur et de l'intérieur (www.greenstone.org).

## 2.3 La lutte contre le scolyte en caféière

### 2.3.1 La lutte chimique : coûts et risques

La lutte chimique contre le scolyte est à la fois difficile, coûteuse et dangereuse. Elle est difficile car le scolyte réalise la majeure partie de son cycle de développement caché dans le fruit. Le principal pesticide utilisé, l'endosulfan, n'affecte que les scolytes en vol ou n'ayant pas totalement perforé le grain de café. Il n'atteint pas les populations en phase de multiplication. Son impact est donc limité et temporaire. Par ailleurs, son application augmente considérablement le coût de la production. Elle expose les applicateurs à un haut risque d'intoxication et est néfaste pour l'environnement.

L'endosulfane a été ajouté à la liste noire de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP) afin de supprimer progressivement sa présence et de parvenir à son interdiction complète d'ici à 2012.

Enfin, la lutte chimique n'apparaît pas comme une solution durable dans la mesure où des cas de résistance chez le scolyte ont été observés. Pour toutes ces raisons d'ordre économique, écologique et sanitaire, il devient indispensable de se tourner vers la protection intégrée.

### 2.3.2 La protection intégrée

Actuellement, la protection intégrée comprend plusieurs tactiques: la lutte biologique, la lutte culturale et le piégeage.

La lutte biologique consiste à effectuer des lâchers de parasitoïdes: *Cephalonomia stephanoderis* Betrem, *Prorops nasuta* Waterston y *Phymastichus coffea* La Salle, ou à pulvériser des spores de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuillemin. Elle a connu un grand essor dans de nombreux pays producteurs de café. Elle n'a toutefois pas donné entière satisfaction quant à son efficacité et à sa rentabilité (Baker, 1999, ).

La lutte culturale s'articule autour de trois principales composantes:

- la **taille des caféiers** et des **arbres d'ombrage**, elle se fait immédiatement après la récolte. Elle permet de maintenir une bonne ventilation et d'augmenter la pénétration des rayons solaires et ainsi d'accélérer le dessèchement des fruits tombés au sol.
- la **récolte sanitaire** qui consiste à éliminer les fruits résiduels après la récolte
- le **nettoyage de la caféière** qui consiste à éliminer les mauvaises herbes et à dégager les lignes de caféiers afin de faciliter les opérations de taille, de récolte sanitaire et de piégeage.

Le piégeage est une technique qui permet de capturer les scolytes lors de leur migration après les premières pluies lorsqu'il y a peu de fruits appétants. La mise en place des pièges se fait après la récolte (février-mars) pour une durée de 4 mois. Les pièges diffusent un mélange d'éthanol et de méthanol (EM) qui est perçu et qui attire le scolyte lors de son émergence. D'un point de vue pratique, cette technique présente l'avantage d'être complètement passive c'est à dire ne nécessitant aucune autre intervention humaine que l'installation des pièges dans la parcelle. Par ailleurs c'est une méthode de lutte efficace avec des résultats pouvant dépasser 80 % terme de diminution d'infestation (Dufour et al., 2004), et compatible avec la lutte biologique. En effet, du fait de sa spécificité de l'ordre de 97% d'action il n'affecte pas les équilibres biologiques au sein des caféières (Dufour, 2002).

La combinaison de la lutte culturale et du piégeage a permis de réduire de 90% le taux d'infestation de scolytes par rapport au témoin (avec des variétés de port haut). La lutte culturale participe à 20 % de cette réduction alors que le piégeage y participe à 70% (Dufour et al., 2005). Cependant le système de piégeage semble encore pouvoir être amélioré. L'efficacité du mélange attractif pourrait être augmenté par des composés présents dans les effluves des baies de café. L'optimisation du système de piégeage en canalisant les captures grâce à l'emploi combiné de substances répulsives et attractives est une autre voie d'amélioration de la méthode de piégeage.

### **3. PREMIERE PARTIE:**

#### Étude préliminaire de la diffusion d'une sélection de composés organiques volatiles

##### **3.1 Objectif**

L'objectif de cette étude est d'évaluer les taux de diffusion des COV en fonction des diamètres des diffuseurs dont on dispose. Les résultats permettront de sélectionner les diffuseurs qui répondront aux taux de diffusion souhaités lors de l'expérimentation sur le terrain.

##### **3.2 Matériel et méthode**

###### **3.2.1 Conditions expérimentales**

Cette étude préliminaire a été conduite au laboratoire de l'unité de recherche 106 du CIRAD à Montpellier (France). Les essais de diffusion ont été effectués en serre dans des conditions de température variable 18 - 25°C et humidité d'environ 60%.

###### **3.2.2 Choix des COV à tester**

Les COV à tester ont été sélectionnés parmi les composés dont les propriétés attractives ou répulsives pour le *H. hampei* ont été démontrées par plusieurs auteurs (Tableau 1).

Le méthylcyclohexane, l'éthylbenzène, le nonane et le 1-octen-3-ol ont été sélectionnés parmi les composés générant une activité électrophysiologique, cités par Mendesil (2009). Le 3-ethyl-4-methylpentanol, plus difficile à obtenir n'a pas été retenu. Le benzaldehyde, le 2-hexenal et le 2 fenilethanol sont les trois composés retenus parmi les huit composés testés en olfactométrie par Gomez de Lima (2004).

L'hexanol et le cis-3-hexenol sont deux composés organiques volatils de feuille, testés par Poland et al. (2000), répulsifs pour *Tomicus piniperda* (scolyte du pins). Ils ont été choisis comme répulsifs possibles pour *H. hampei*.

Le camphène et l' $\alpha$ -pinène sont des répulsifs potentiels pour *H. hampei* dans le cadre d'une forte diffusion. En revanche l' $\alpha$ -pinène et le limonène présentent des propriétés attractives lorsque leur diffusion est faible ou modérée (Dufour, 2003).

Tous les composés testés dans cette étude ont été fournis par Sigma-Aldrich, Eschenstrasse 5, 82024 Taufkirchen Germany.

###### **3.2.3 Les diffuseurs**

Les diffuseurs sont des tubes en verre de capacité 4 ml munis d'un bouchon a vis permettant de les fermer hermétiquement. Les bouchons sont percés à l'aide d'une mini perceuse de précision afin d'obtenir des orifices de diffusion parfaitement calibrés aux diamètres 1 mm, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm et 0,2 mm.

###### **3.2.4 Mesure des taux de diffusion des COV**

Sur les 13 composés testés sur le terrain, on ne dispose ici que des 10 composés suivants: le camphène, l' $\alpha$  - pinène, le limonène, le méthylcyclohexane, l'éthylbenzène, le nonane, le 1-octen-3-ol, le phenylethanol, le trans-2-hexenal et le benzaldéhyde. Le mélange d'éthanol et de méthanol n'est pas étudié dans cet essai car de nombreuses références bibliographiques indiquent le taux optimal de diffusion de ce mélange (0,15 à 0,2 g/j). L'hexanol et le cis-3-hexenol n'étaient pas disponibles au moment de l'essai.

Composé	Famille chimique	Type de test	Effet décrit et source littéraire	Origine chimique	Quantité ou concentration testée	Insecte testé	Autres sources littéraires	
Méthylcyclohexane	Cyclo-alcane	Electroantennographie	Actif (e)	N,M	254 ng/μl	<i>H. hampei</i>	-	
		Olfactométrie	Attractif (e)	S	100 ng		-	
Ethylbenzène	Dérivé benzénique	Electroantennographie	Actif (e)	N,M	0,71 ng/μl		b c	
		Olfactométrie	Attractif (e)	S	100 ng		b	
Nonane	Alcane	Electroantennographie	Actif (e)	N,M	0,20 ng/μl			
		Olfactométrie	Attractif (e)	S	100 ng			
Octen-3-ol	Alcool	Electroantennographie	Actif (e)	N,M	0,22 ng/μl			
		Olfactométrie	Attractif (e)	S	100 ng		e	
(R)-3-ethyl-4-methyl pentanol	Alcool	Electroantennographie	Actif (e)	N,M	2595 ng/μl			
		Olfactométrie	Attractif (e)	S	100 ng			
Phenylethanol	Alcool	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%		<i>H. hampei</i>	
2-hexenal	Aldéhyde	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
Benzaldéhyde	Aldéhyde	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
Salicylate de méthyle	Ester	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
Salicylate d'éthyle	Ester	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
Alcool benzylique	Alcool	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
Géranol	Terpène	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
2-heptanone	Kéto	Olfactométrie	Attractif (d)	S	1%			
Cis-3-hexenol	Alcool	Piégeage	Répulsif (h)	S	0,0038 g/j	<i>T. pini-perda</i>	g	
1-hexanol	Alcool	Piégeage	Répulsif (h)	S	0,0038 g/j		b	
α pinène	Terpène	Piégeage	Répulsif (f) Attractif (f)	S	> 0,021 g/j < 0,021 g/j	<i>H. hampei</i>	a c	
Camphène	Terpène	Piégeage	Répulsif (f)	S	0,026 g/j	<i>H. hampei</i>	a c	
Limonène	terpène	Piégeage	Attractif (f)	S	0,011 g/j	<i>H. hampei</i>	a c e	

Tableau 1 : Principaux composés potentiellement attractifs ou répulsifs pour le scolyte (description des composés et de leur étude)

NM = Naturel (Fruits mûrs de *Coffea arabica*) S = Synthétique

(a) = Brun et al., 1996 ; (b) = Ortiz et al. 2004, (c) = Mathieu et al., 1998 ;

(d) = Gomes de Lima et al. 2004 ; (e) = Mendesil et al., 2009 ; (f) = Dufour, 2003 ;

(g) = Borbón-Martinez et al., 2004 ; (h) = Polland et al., 2000

Pour chaque composé, on effectue 20 prélèvements identiques (3 ml) versés dans 20 diffuseurs. Les 20 diffuseurs sont divisés en 5 lots qui se différencient par le diamètre de leurs orifices : 1 mm, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,4 mm et 0,2 mm. On a donc au total 4 répétitions de 5 types de diffusion par composé. Pour le trans-2-hexanal, une seule répétition est réalisée en raison de la très faible quantité de produit disponible. Les diffuseurs sont disposés sur un porte tube de polystyrène expansés en ordre parfait, par composé, diamètre d'orifice et répétition, soit 20 diffuseurs par composé. Pour le trans-2-hexanal, le nombre de diffuseurs est de 5.

Les diffuseurs sont pesés à deux reprises avant la diffusion sans leur bouchon. Les 3 porte-tubes sont placés dans la serre. Au bout de 37 jours, tous les tubes sont de nouveaux pesés sans le bouchon du diffuseur. Par différence des deux séries de pesées, on peut calculer la moyenne du taux de diffusion pour chaque composé.

### 3. 3 Résultats

Les taux moyens de diffusion sont présentés dans le tableau suivant :

Diamètre des orifices de diffusion (mm)	Taux de diffusion moyen (g/j)				
	Camphène	$\alpha$ -pinène	Limonène	Méthylcyclohexane	Ethylbenzène
1	0,0057	0,0057	0,0010	0,0533	0,0194
0,8	0,0052	0,0031	0,0009	0,0460	0,0166
0,6	0,0042	0,0027	0,0006	0,0371	0,0175
0,4	0,0038	0,0025	0,0006	0,0329	0,0138
0,2	0,0034	0,0011	0,0009	0,0261	0,0131
	Nonane	1-octen-3-ol	Phénylethanol	Trans-2-hexanal	Benzaldéhyde
1	0,0098	0,0007	-0,0006	-0,0048	-0,0033
0,8	0,0081	0,0008	-0,0005	-0,0047	-0,0033
0,6	0,0068	0,0007	-0,0006	-0,0065	-0,0035
0,4	0,0064	0,0006	-0,0002	-0,0067	-0,0044
0,2	0,0057	0,0006	-0,0002	-0,0053	-0,0022

Tableau 2 : Tableau des résultats des taux de diffusion moyens des COV en fonction du diamètre du diffuseur

D'une manière générale, on observe une variation relativement faible du taux de diffusion de chaque produit en fonction du diamètre de leur orifice de diffusion. En revanche, les taux de diffusion entre composés sont différents pour des diamètres d'orifices égaux.

On observe un gain de poids pour le phénylethanol, le benzaldéhyde et le trans-2-hexanal et une diffusion anormale du limonène. Ces composés peuvent s'oxyder lorsqu'ils sont exposés à la lumière et par conséquent subir une augmentation de leur masse molaire. Les données de diffusion obtenues ne sont donc pas exploitables.

Les taux de diffusion de l'éthylbenzène et du nonane sont globalement du même ordre. En revanche, ceux du méthylcyclohexane sont bien supérieurs (de 2 à 5 fois supérieurs) et ceux de l'octen-3-ol sont bien inférieurs (100 fois inférieurs). Le méthylcyclohexane est donc le composé le plus volatil de l'essai. L'octen-3-ol, le moins volatil. L'éthylbenzène et le nonane ont des niveaux de volatilité moyens et comparable.

### 3. 4 Discussion et conclusion

L'éthanol et le méthanol sont les composés volatiles les plus abondants dans les effluves émis par les baies de café (Mathieu et al., 1995). Le taux de diffusion moyen optimum du mélange éthanol-méthanol obtenu dans la plupart des essais de terrain réalisés par Dufour (2003) s'élève à 0,20 g/jour en moyenne, avec un orifice d'1,5 mm diamètre. Ce mélange constitue donc notre taux de référence.

Pour les autres composés supposés attractifs, il est difficile d'extrapoler les valeurs quantitatives obtenues par Mendasil et al. (2009) et celles de Gomez de Lima (2004) mais en revanche il est possible de leur attribuer des taux de diffusion inférieurs de celui du mélange éthanol-méthanol et jouer sur leurs proportions respectives en tenant compte des valeurs de diffusion obtenues dans notre étude préliminaire (cf. Tableau 2).

Ainsi, on a attribué un diamètre de diffusion de 1 mm au méthylcyclohexane qui est le composé le plus volatil et qui diffuse à un taux de 0,05 g/jour, de 1,5 mm à l'éthylbenzène et au nonane dont la volatilité est moindre, et de 2 mm au 1-octen-3-ol dont la volatilité est très faible. Par ailleurs, pour le phényléthanol, le benzaldéhyde et le trans-2-hexenal, on a attribué arbitrairement un diamètre de diffusion de 1 mm car aucune information valide n'a été obtenue sur leur diffusion.

Pour ce qui est des terpènes considérés comme attractifs à faible concentration, le taux de diffusion de 0,001 g/jour de l' $\alpha$ - pinène a été obtenu avec un orifice de diffusion de 0,2 mm de diamètre. Sachant que l' $\alpha$ - pinène est deux fois plus volatile que le limonène, il faut donc prévoir un diamètre de 0,3 mm (0,4 mm par défaut) pour obtenir un taux de diffusion du limonène équivalent. On utilise un diamètre de 1,5 mm avec l' $\alpha$ - pinène et de 2 mm avec le limonène, pour obtenir un taux approximativement dix fois plus élevé (0,01 g/jour).

Concernant les composés répulsifs, on a choisi des taux de diffusion élevés afin de s'assurer que leur effet soit effectif. Le cis-3-hexenol et l'hexanol connus pour perturber l'attractivité des pièges de *T. piniperda* (Polland and al., 2004) ont été testés par ces auteurs à 0,004 g/jour. Leur point d'ébullition étant proche de celui du nonane (156 – 158 °C), on s'est référé aux données de ce composé pour choisir le diamètre adéquat. Avec un diamètre d'1 mm, on s'attend à produire un taux de diffusion de 0,008 g/jour. Enfin, pour l' $\alpha$ - pinène et le camphène, on a choisi des diamètres de 3 mm, supérieurs à ceux testés et correspondant à des taux de diffusion de 0,02 g/jour.

## 4. DEUXIEME PARTIE:

Mise en évidence des effets attractifs et répulsifs d'une sélection de composés organiques volatiles sur le terrain et première évaluation d'un système de piégeage associant répulsif et attractif

### 4. 1 Objectifs

#### 4. 1.1 Objectifs généraux

L'objectif de cette étude est de tester au champ les dix composés sélectionnés dans la première partie de ce rapport ainsi que deux composés complémentaires, sachant que certains d'entre eux n'ont été évalués qu'en conditions de laboratoire.

#### 4. 1.2 Objectifs spécifiques

Cette étude comporte quatre objectifs spécifiques:

- Evaluer l'attractivité d'une sélection de COV dont l'attraction a été mise en évidence par Mendasil et al. (2009) et Gomes de Lima (2004) et en utilisant des taux de diffusion préalablement sélectionnés. On les étudie seuls (expérience 1) ou en association avec le mélange d' EM. (expérience 2)
- Evaluer l'effet répulsif de quatre COV dont l'action répulsive a été mise en évidence pour *H. hampei* (Borbón-Martinez 2004; Dufour, 2003) et pour *Tomicus piniperda* (Polland et al. 2004) (expérience 3).
- Mettre en évidence l'importance du taux de diffusion des COV sachant que le scolyte ne répond pas toujours de la même manière aux émissions d'un même composé (Dufour, 2003) (expérience 4).
- Évaluer l'effet de la juxtaposition dans l'espace de zones de répulsion et d'attraction permettant d'orienter les déplacements des scolytes vers les sites de piégeage (expérience 5).

### 4. 2 Matériel et méthode

#### 4. 2.1 Conditions expérimentales

##### 4. 2.1.1 La situation géographique

Cette étude a été réalisée dans le canton de Turrialba lequel fait partie de la province de Cartago du Costa Rica. Ce canton se situe dans la vallée centrale du Costa Rica aux coordonnées géographiques: 10° 1' de latitude nord et 83° 45' de longitude ouest.

Il s'agit d'une zone équatoriale pluvieuse. L'altitude varie entre 600 et 1400m. Les précipitations moyennes annuelles atteignent 2 600 mm. Elles sont assez constantes au cours de l'année. La température moyenne est de 21,5 °C; l'humidité relative de 85 %.

Le travail de terrain a été réalisé dans un rayon de 10km autour du centre de la ville de Turrialba.

##### 4. 2.1.2 Sites d'expérimentation

Les expériences ont été mises en place sur deux propriétés différentes :

- Aquiares :

La propriété d'Aquiares se situe à 7 km du centre de Turrialba à l'ouest. C' est l'une des plus grandes du Costa Rica (6,6 km). Elle est certifiée « Rainforest alliance ». La zone dans lesquelles se trouve les parcelles de l'étude se situe entre les longitudes ouest 83°44'39" et 83°43'35" et les latitudes nord 9°56'8" et 9°56'35". Les parcelles se trouvent en moyenne a une altitude de 1000 m. Elles sont homogènement occupées par une seule variété de café *Coffea arabica* L., var Caturra. La densité initiale de café planté était de 6,3 plant.ha<sup>-1</sup>.

Des arbres d'ombrage poussent librement (tel que *Erythrina*) entre les rangées de café. La densité d'arbre d'ombrage est de 12,8 arbre. ha<sup>-1</sup>

- Maquina Vieja :

La propriété de Maquina Vieja se trouve à 8 km du centre de Turrialba en direction du sud ouest près du village d' Atirro. Elle est localisée aux coordonnées géographiques suivants: latitude 9° 49' au nord et 83° 39' à l'ouest. Les parcelles expérimentales situées sur cette propriété sont à une altitude de 650 m en moyenne. Les rangées de café alternent avec des rangées de bananier nouvellement plantées. La variété de café est *Coffea arabica* L., var Caturra.

Ces propriétés sont le siège d'un nombre différents d'expériences résumés ci-dessous:

<b>Expérience</b>	<b>Propriété</b>
Expérience 1 et 2	Aquiaries
Expérience 3, 4 et 5	Maquina Vieja

Le travail de laboratoire, d'analyse et de rédaction se réalise au centre de recherche et d'enseignement en agronomie de Turrialba: le CATIE (Centro de Agronomía tropical de investigación y de enseñanza) situé à proximité du centre de la ville.

#### 4. 2.1.3 La situation agronomique

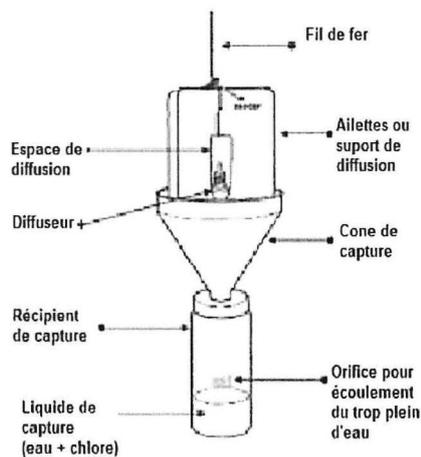
Les variétés de café cultivées au Costa Rica, et en particuliers à Turrialba (région de l'étude), sont le Catura et le Cataui rouge. Ce sont des variétés à port bas et de grande productivité<sup>3</sup>. Le café est cultivé en association avec des arbres d'ombrage qui peuvent être des légumineuses (Erythrine) ou des essences destinées à la production de bois (Le Laurel). A mesure que l'altitude décroît la café est associé à des cultures de banane et de cacao. Dans cette région, les altitudes des caféières oscillent entre 600 et 1300m. Les pluies régulières y favorisent l'étalement des floraisons du caféier. La récolte a lieu entre juin et février. Les expériences ont été mise en place entre les mois de janvier et de mai, durant l'inter saison.

### 4. 2.2 Matériel expérimental

#### 4. 2.2.1 Les pièges Brocap

Les pièges utilisés sont les pièges de type Brocap (dessin 4) dont les différentes parties sont les suivantes:

- Le **réceptif de capture** qui contient de l'eau additionnée de chlore dans laquelle baigneront les captures. Le chlore permet de ralentir la décomposition des insectes et l'apparition d'algues dans le réceptif. Ils sont troués latéralement afin d'éviter les débordements lors d'épisodes pluvieux répétés et/ou importants. Les trous ont un diamètre inférieur à la taille des insectes.
- L'**entonnoir** c'est la partie du piège destinée à la réception de l'insecte en vol et à sa descente dans dans le réceptif de capture. Son rôle est de faire le lien entre l'attraction et la capture de l'insecte. Il débouche dans le réceptif de capture.
- Le **support du diffuseur** est constitué de quatre ailettes emboîtées entre elles et fixées sur l'entonnoir. Au centre de ces ailettes, un espace est adapté aux dimensions du diffuseur d'EM.
- Un **fil de fer** passe dans des trous de la partie supérieure des ailettes et permet de suspendre le piège à une branche de café.
- Un chapeau de matière plastique au sommet du piège permet de protéger le réceptif de capture contre l'eau de pluie et les déchets organiques.



Dessin 4: Dessin d'un piège à scolyte type brocap.

Dans le cadre de nos expériences, lorsque l'on étudie un COV associé au mélange d'EM, le diffuseur de verre contenant le COV à tester est fixé sur le diffuseur du mélange d'EM. Lorsqu'ils sont utilisés seuls, ils accrochés au piège à l'aide d'un fil de fer. Afin d'éviter l'oxydation des composés à tester, les diffuseurs sont entourés d'un film autocollant noir les protégeant de la lumière

#### 4. 2.2.2 Les diffuseurs de composés organiques volatiles

La taille des orifices des diffuseurs de chaque composés organiques volatiles de chaque expérience ont été choisi d'après les résultats présentés dans la première partie. Ils sont résumés dans le tableau 3. Excepté les COV de l'expérience 1 et l'hexanol de l'expérience 5, les COV sont toujours associés au mélange d'EM dans les espaces de diffusion des pièges Brocap.

### 4. 2.3 Méthodes

#### 4. 2.3.1 Comparaison des traitements

Afin de voir si les COV sélectionnés seuls ont un effet attractif sur les scolytes, on introduit un témoin comportant de l'eau (expérience 1). Dans le cas des COV associés au mélange d'EM, le témoin est un mélange EM (expérience 2). Ainsi, toute augmentation de capture par rapport au témoin indique un effet synergique du COV avec le mélange EM.

Dans le cas des répulsifs, on associe la diffusion de chaque composé à celle de EM. Le témoin est constitué de EM seul. Ainsi, toute diminution des captures par rapport au témoin (si elle existe) indique un effet répulsif du COV considéré (expérience 3).

Dans le cas de la mise en évidence l'importance du taux de diffusion sur l'effet des COV, on associe chaque COV testés au mélange d'EM afin de s'assurer d'un bon taux de capture et donc de révéler plus facilement les différences. On compare ensuite les taux de capture des pièges avec un même COV mais à des taux de diffusion variable. On compare ensuite les taux de capture de tous les traitements (COV+ EM) à ceux du témoin (EM seul). Ainsi, on voit si l'effet des COV testés et de leur taux de diffusion sur l'attractivité du mélange d'EM (expérience 4).

Dans l'expérience sur l'association répulsif-attractif, il y a deux types d'unité de piégeage (schéma 1). Chaque unité de piégeage comprend deux pièges attractifs en périphérie. Au centre de ces deux pièges, il y a ou non un répulsif. On compare les taux de capture moyen des 2 pièges avec attractif (A) de chaque type d'unité de piégeage. Ainsi, on voit si la présence d'un répulsif (R) provoque une migration des scolyte et permet (ou non) d'augmenter les taux de capture des pièges attractifs voisins.



Schéma 1: Schéma des deux types d'unité de piégeage de l'expérience 5 sans répulsif (a) et avec répulsif (b)

#### 4. 2.3.2 Dispositifs expérimentaux

Pour l'ensemble des expériences, le nombre de traitements, le nombre de répétitions par traitement, la distance entre chaque piège, leur mode de répartition dans la parcelle et les dates de la durée de piégeage sont récapitulés dans le tableau 4.

La distance entre 2 pièges avec des attractifs a été fixée à 20 m. Sachant qu'un piège capture efficacement sur un rayon de plus de 10 m (Dufour, 2004), on suppose que les pièges isolés d'un rayon de 20 m n'interagissent pas avec leurs voisins.

Pour les pièges avec des répulsifs, la distance les séparant est de 30 m. L'effet répulsif est mal connu. On choisi une grande distance d'espacement par précaution. Dans tout les cas, la distance à la bordure de la parcelle est de 15 m.

Lorsqu'il y a plusieurs parcelles expérimentales pour une même expérience, ce sont des parcelles d'une même propriété, aux caractéristiques agronomiques très semblables et proches géographiquement (moins de 100 m d'écart).

Expérience	Composés organiques volatiles	Diamètre de l'orifice de diffusion (mm)	Taux de diffusion attendu (g/j)
Expérience 1 et 2 : évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV	Méthylcyclohexane	1	0,0533
	Ethylbenzène	1,5	0,02
	Nonane	1,5	0,01
	1-Octen-3-ol	2	0,001
	Phényléthanol	1	0,0006
	Trans-2-hexenal	1	0,004
	Benzaldéhyde	1	0,003
Expérience 3 : recherche d'un répulsif	cis-3-hexenol	1	0,009
	hexanol	1	0,009
	$\alpha$ -pinène	3	0,02
	camphène	3	0,02
Expérience 4 : Mise en évidence de l'importance du taux de diffusion	Limonène	0,4	0,001
	Limonène	2	0,01
	$\alpha$ -pinène	0,2	0,001
	$\alpha$ -pinène	1,5	0,01
Expérience 5 : Évaluation de l'association des effets attractifs et répulsifs	hexanol	1	0,009

Tableau 3: Composés testés dans chaque expérience, avec le diamètre du diffuseur et le taux de diffusion du composé attendu.

Expérience	Nombre de traitement (témoin inclus)	Nombre de répétition par traitement	Nombre de parcelle expérimentale	Distance entre les pièges	Mode de répartition des traitements	Dates du piégeage
Expérience 1: évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV seuls	8	12	2	20 m	randomisation	Du 05/02/11 au 11/03/11
Expérience 2: évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV associé au mélange d' EM	8	10	2	20 m	randomisation	Du 05/02/11 au 11/03/11
Expérience 3: recherche d'un répulsif	5	10	1	30 m	randomisation	Du 18/03/11 au 15/04/11
Expérience 4: Mise en évidence de l'importance du taux de diffusion	7	11	1	20 m	randomisation	Du 29/01/11 au 20/02/11
Expérience 5 : Évaluation de l'association des effets attractifs et répulsifs	2	10	3	40 m	alternativement	Du 08/04/11 au 24/05/11

Tableau 4: Résumé des caractéristiques des dispositifs de chaque expérience (nombre de traitement, de répétitions, disposition des pièges et dates de relevés des captures d'insectes)

#### 4. 2.3.3 Captures et comptage des scolytes

Généralement, il existe une importante hétérogénéité de la distribution du scolyte dans les parcelles qui génère une grande variabilité dans les captures. Afin de réduire cette variabilité dans les résultats de piégeage, un « piégeage à blanc » est effectué avant chaque expérimentation à l'aide d'une diffusion du mélange EM durant 5 à 7 jours. Cette période de piégeage permet de connaître la répartition de la quantité initiale de scolyte.

Au cours des expériences, les captures de chaque piège sont collectées plusieurs fois en raison des problèmes de conservation des insectes.

Les récipients de captures sont ensuite renversés sur un tissu filtrant et les scolytes sont séparés des autres insectes et déchets organiques puis comptés manuellement (cf. Illustration 6).

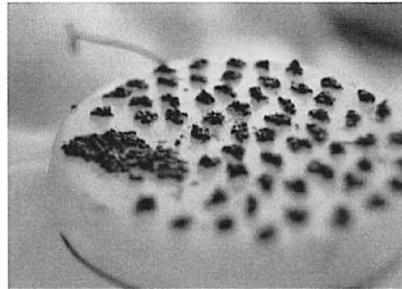


Illustration 6: Exemple de comptage des captures d'un piège sur tissu filtrant

#### 4. 2.3.3 Mesure des taux de diffusion au champ

Pour chaque essai, les diffuseurs sont pesés avant chaque expérience sans leur bouchon. A la fin de chaque expérience, ils sont bouchés, emmenés au laboratoire puis de nouveau pesés sans leur bouchon. Les résultats obtenus par différence de ces deux mesures permettent d'estimer les taux de diffusion réels. Les diffuseurs contaminés par l'eau de pluie ou dont le contenu a été renversé, ont été écartés des mesures.

#### 4. 2.4 Analyses statistiques des données

Les analyses statistiques des données sont réalisées avec le logiciel R.

La variable à expliquer (taux de capture journalier:  $T_c$ ) est une variable de comptage. En raison de la variabilité naturelle existant, on considère que cette variable peut être décrite par une distribution de quasi-poisson. Les données ne sont pas directement transformées, l'analyse se fait par une approche glm (modèle linéaire généralisé). Le modèle d'étude inclue l'effet du traitement (T), de la quantité initiale de scolyte présente au lieu du piège (déterminée par le « piégeage à blanc ») ( $Co1$ ), de la date de récolte des captures (D) et de la durée de la période de capture (t) (lorsque ce paramètre ne se superpose pas à la date). Le modèle s'écrit :  $T_c \sim T + Co1 + D + t$

L'analyse statistique réalisée consiste à étudier la déviance résiduelle lorsque l'on retire les facteurs significatifs du modèle complet un à un. On regarde si cette déviance résiduelle est significativement différente de celle du modèle complet. Ainsi, on voit si le paramètre exclu du modèle complet permet d'influer significativement sur la déviance du modèle.

## 4.3 Résultats

### 4.3.1 Évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV

#### 4.3.1.1 Attractivité des COV seuls

Au cours de cet expérience où les COV sont seuls à diffusés, le taux de capture moyen de chaque traitement n'est pas significativement différent de celui du témoin (eau). Les COV en diffusion seuls ne sont donc pas plus attractifs que de l'eau pour le scolyte.

#### 4.3.1.2 Attractivité de l'association COV+ EM

Lors de l'analyse statistique la variable à expliquer est le taux de capture journalier ( $T_c$ ) des pièges de chaque traitement.

On rappelle que lors de cette expérience, toutes les répétitions des traitements n'étaient pas situés pas sur la même parcelle. De plus, les collectes des captures n'ont pas put être réalisées exactement aux mêmes dates et les durées de captures sont également variables (à 1 ou 2 jours près). C'est pourquoi, le modèle d'analyse complet inclue les facteurs parcelle : P (1 ou 2) et date : D (1 ou 2) et la covariable « temps de capture » : t (en nombre de jour) .

Il comprend également la covariable « quantité de scolytes présents initialement » (Co1) laquelle est représentée par le taux de capture quotidien des pièges à éthanol-méthanol. Enfin, l'effet du traitement (T) est également étudié. Ce dernier facteur peut prendre 7 modalités correspondant aux différents traitements. L'analyse les compare systématiquement au traitement témoin. Les traitements ne sont donc pas comparés entre eux. Les résultats des tests de significativité de la part explicative de chaque paramètre du modèle dans la variabilité observée sont présentés dans le tableau 5.

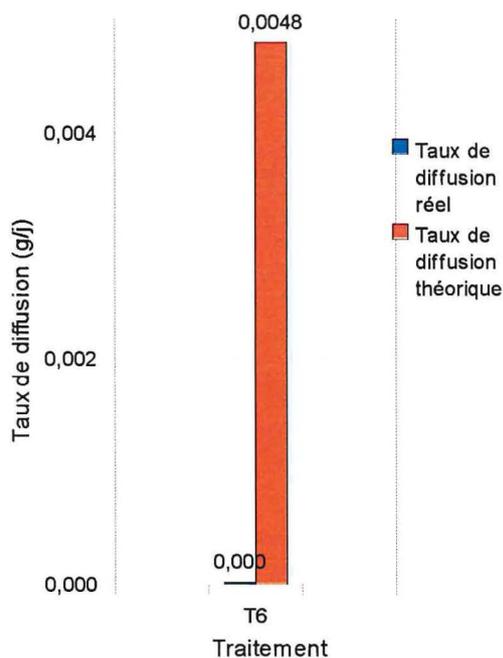
Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual dev	Residual d.f.	P-value
t	T+Co1+P+D+t	3,175	1	190,75	148	0,14427
D	T+Co1+P+D+t	0,9045	1	191,65	149	0,4357
P	T+Co1+P+D+t	9,2354	1	199,9	149	0,01275
Co1	T+Co1+P+D+t	36,021	1	226,77	149	<0,001
T	T+Co1+P+D+t	48,973	7	239,72	155	<0,001

Tableau 5: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur l' attractivité des COV avec le mélange d' EM.

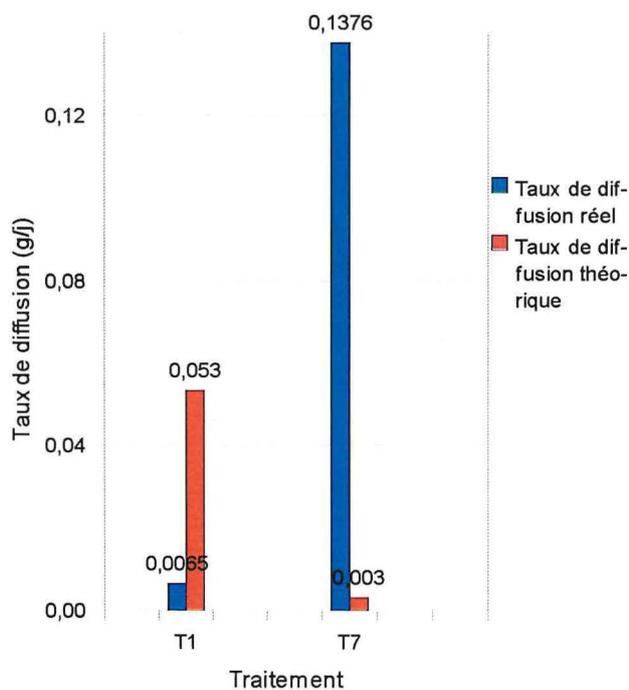
Les résultats révèlent un effet significatif de la parcelle, de la quantité de scolyte initialement présent et du traitement. Les taux de capture des différents pièges sont dépendants de la parcelle, de la quantité de scolyte initialement présent au lieu du piège et du traitement. Les taux de captures n'ont pas beaucoup varier en fonction du temps.

Tous les coefficients associés à l'effet des différents traitements sont négatifs (annexe I). Les taux de capture des pièges avec des COV sont donc tous moins grands que ceux du témoin (avec le mélange d' EM seul). Le coefficient associé à la quantité de scolyte initialement présent est positif. Là où population initiale de scolyte était la plus élevée, les taux de capture sont les plus importants.

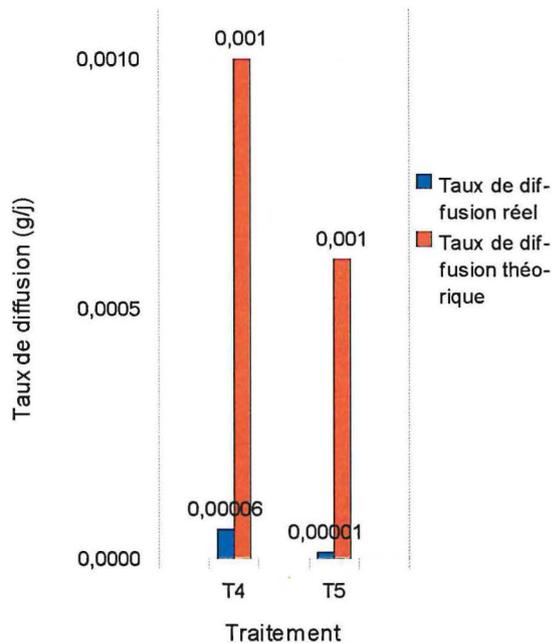
Taux de diffusion mesuré et théorique des diffuseurs d'hexenal (T6)



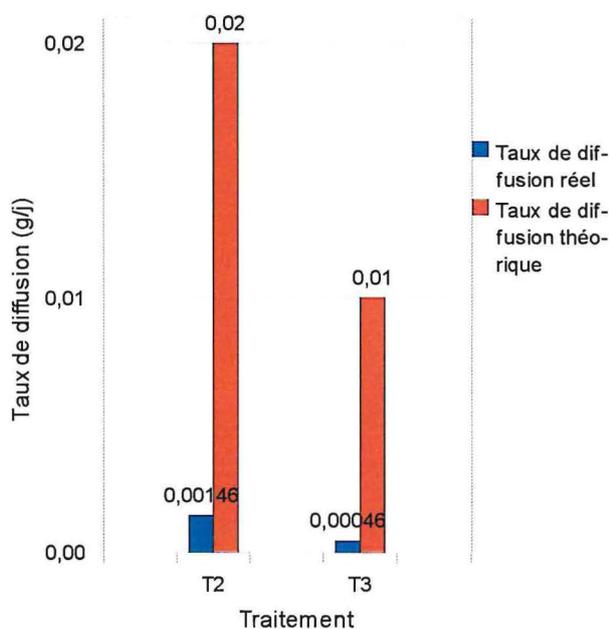
Taux de diffusion mesurés et théoriques des diffuseurs de méthylcyclohexane (T1) et benzaldéhyde (T7)



Taux de diffusion mesurés et théoriques des diffuseurs d'octen-3-ol (T4) et de phényléthanol (T5)



Taux de diffusion mesurés et théoriques des diffuseurs d'éthylbenzène (T2) et de nonane (T3)



Graph.1 : Taux de diffusion mesurés et théoriques des composés pur tester l'attractivité  
T1: Méthylcyclohexane, T2: Ethylbenzène, T3: Nonane, T4: 1-octen-3-ol, T5: Phényléthanol, T6: hexenal, T7: Benzaldéhyde

#### 4. 3.1.3 Étude du taux de diffusion réel des COV

Dans la majorité des cas, les taux de diffusion mesurés sont très inférieurs aux taux de diffusion théoriques. Cette supériorité est de l'ordre de 10 pour le méthylcyclohexane, l'ethylbenzène et le phénylethanol. Elle est d'un facteur 100 pour le nonane, le 1-octen-3-ol et l' hexenal.

En revanche pour le traitement 7, les diffuseurs de benzaldéhyde ont diffusé une quantité quotidienne bien supérieure à celle attendue (d'un facteur 100) (Graph.1).

### 4. 3.2 Recherche d'un répulsif

#### 4. 3.2.1 Étude des captures

Lors de l'analyse statistique la variable à expliquer est le taux de capture journalier ( $T_c$ ) des pièges de chaque traitement. Le modèle complet de cette analyse comprend les paramètres suivants: la date (D) de collecte des captures comme facteur (1 ou 2), la quantité de scolytes initialement présents (Co1) comme covariable et les traitements (T) qui se répartissent en 4 modalités lesquelles sont comparées une à une aux traitement témoin.

Les résultats des tests d'analyse statistique sont présentés dans le tableau 6.

Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual <i>dev</i>	Residual d.f.	P-value
D	T+Co1+P+D+t	30.95	1	701.58	93	0.04827 *
Co1	T+Co1+P+D+t	272.88	1	943.51	93	< 0,001
T	T+Co1+P+D+t	348.33	4	1018.96	96	< 0,001

Tableau 6: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la recherche d'un répulsif.

L'analyse montre que le traitement, la date de collecte ainsi que la quantité de scolytes initialement présents expliquent de façon significative la variabilité observée du taux de capture des pièges.

On voit que les coefficients associés à chacun des traitements sont négatifs mais seuls les coefficients des deux premiers sont significatifs. Cela les traitements 1 (hexenol) et 2 (hexanol) diminuent significativement l'attractivité du mélange d' EM. Le coefficient associé à la seconde date de capture est également négatif. Les captures ont donc été moins importantes lors du deuxième relevé.

#### 4. 3.2.2 Étude du taux de diffusion réel des COV

On voit que pour l'hexenol, l'hexanol et l' $\alpha$ - pinène, les taux de diffusions réels sont très inférieurs au taux de diffusion théoriques. Les différences observées sont de l'ordre d'un facteur 100 pour les deux premiers et d'un facteur 10 pour le troisième. Pour le camphène, les quantités libérées par le diffuseur au champ sont proches de celles attendues (Graph.2).

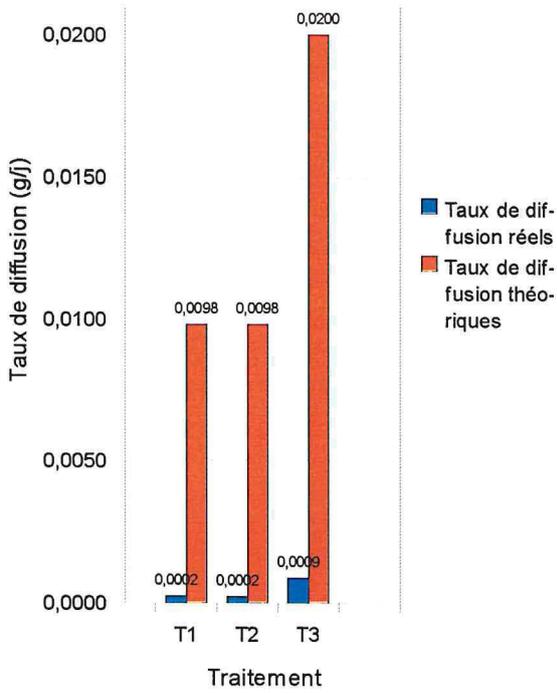
### 4. 3.3 Importance du taux de diffusion

#### 4. 3.3.1 Étude des captures des traitements avec l' $\alpha$ - pinène et éthanol-méthanol

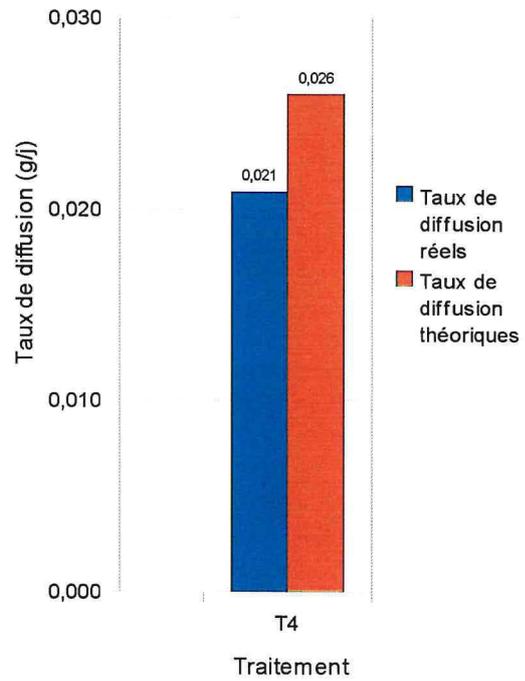
Lors de l'analyse statistique, la variable à expliquer est le taux de capture journalier ( $T_c$ ) des pièges de chaque traitement. Le modèle complet de cette analyse comprend les paramètres suivants: la date (D) de collecte des captures (1 ou 2) et les traitements (T) comme facteurs, la quantité de scolytes initialement présents (Co1) comme covariable.

Dans un premier temps, on compare les deux traitements à base d' $\alpha$ - pinène. Les deux traitements se composent de l'association d'un diffuseur d'éthanol-méthanol et d'un diffuseur d' $\alpha$ - pinène. Les deux traitements se distinguent par le taux d'émission de l' $\alpha$ - pinène fixé à 0,001g/j pour l'un et à 0,01g/j pour l'autre. Dans cette analyse l' $\alpha$ - pinène à une diffusion de 0,001g/j est le témoin.

Taux de diffusion mesurés et théoriques des diffuseurs de l'hexenol (T1), l'hexanol (T2) et l' $\alpha$ -pinène (T3)



Taux de diffusion mesuré et théorique des diffuseurs du camphène (T4)



Graph. 2: Taux de diffusion mesurés et théoriques des composés répulsifs  
T1: hexenol, T2: hexanol, T3:  $\alpha$ -pinène, T4: camphène

Les résultats des tests de l'analyse statistique sont présentés dans le tableau 7.

Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual <i>dev</i>	Residual d.f.	P-value
D	T+Co1+D	9.202	1	214.58	41	0.2212
Co1	T+Co1+D	374.17	1	579.55	41	6.16e-15 ***
T	T+Co1+D	54.709	1	260.09	41	0.002857 **

Tableau 7: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la comparaison des deux traitements à base d'  $\alpha$ -pinène.

Cette analyse montre qu'il y a un effet significatif de la quantité initiale de scolytes et du traitement ( $\alpha$ - pinène à une diffusion de 0,01g / j) sur le taux de capture observé.

L'étude des coefficients du modèle (annexe I) montre que le coefficient associé au taux de capture du traitement est négatif. Les pièges avec l'  $\alpha$ - pinène à forte diffusion capturent moins que ceux avec les diffuseurs d'  $\alpha$ - pinène à faible diffusion.

#### 4 3.3.2 Études des captures des traitements avec limonène et éthanol-méthanol

Dans un second temps, on compare les deux traitements à base de limonène. Les deux traitements se composent de l'association d'un diffuseur d'éthanol-méthanol et d'un diffuseur de limonène. Les deux traitements se distinguent par le taux d'émission du limonène fixé à 0,001g/j pour l'un et à 0,01g/j pour l'autre. Dans cette analyse, le traitement à base de limonène à une diffusion de 0,01g/j est le témoin.

Les résultats des tests de l'analyse statistiques sont présentés dans le tableau 8:

Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual <i>dev</i>	Residual d.f.	P-value
D	T+Co1+D	8.5689	1	155.44	41	0.1348
Co1	T+Co1+D	189.92	1	336.79	41	1.925e-12 ***
T	T+Co1+D	2.6781	1	149.54	41	0.4032

Tableau 8: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la comparaison des deux traitements à base de limonène.

On voit que seule la quantité de scolytes initiale explique significativement la variabilité observée. On ne révèle pas d'effet du traitement (à base de limonène à une diffusion de 0,01g/j). Le limonène agit identiquement aux deux taux de diffusion testés.

#### 4. 3.3.3 Études des captures de tout les traitements à l'éthanol-méthanol seul

Chacun des traitements à base de limonène et d'  $\alpha$ -pinène étudiés précédemment est comparé au mélange d' EM seul (témoin).

Les résultats des tests de l'analyse statistique sont présentés dans le tableau 9:

Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual <i>dev</i>	Residual d.f.	P-value
D	T+Co1+D	45.99	1	779.47	145	< 0,001
Co1	T+Co1+D	984.66	1	1764.13 -1	146	< 0,001
T	T+Co1+D	82.348	6	861.81	151	0.03501 *

Tableau 9: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur la comparaison des deux traitements à base d'  $\alpha$ -pinène et de limonène au mélange d'éthanol méthanol seul.

Les résultats des analyses montrent un effet significatif de la date de collecte de captures, de la quantité de scolyte initialement présent ainsi que du traitement sur les taux de capture des pièges.

Le seul coefficient négatif du modèle est celui associé à la seconde date de collecte des captures. Les taux de captures des pièges diminuent donc uniquement en fonction du temps. Le coefficient du traitement avec de l'  $\alpha$ - pinène à faible diffusion associé au mélange d' EM est significatif et positif.

L'  $\alpha$ - pinène à faible taux de diffusion (0,001g/j) augmente significativement les taux de capture du mélange d'EM seul.

#### 4. 3.3.4 Étude du taux de diffusion réel des COV

Pour les traitements à base d'  $\alpha$ - pinène, les taux de diffusion réels sont supérieurs aux taux de diffusion théoriques. Pour le traitement T3 ( $\alpha$ - pinène à faible taux de diffusion) le taux de diffusion réel est environ 8,6 fois supérieur à celui espéré. Pour le traitement T5 ( $\alpha$ -pinène à fort taux de diffusion), le taux de diffusion réel est environ 3 fois supérieur au taux de diffusion théorique (Graph.3). Pour les traitements à base de limonène, les taux de diffusion réels sont supérieurs aux taux de diffusion théoriques. Pour le traitement T2 ( limonène faible taux de diffusion), le taux de diffusion réel est supérieur au taux théorique d'un facteur 10. Pour le traitement T4 ( limonène fort taux de diffusion), le taux de diffusion réel est très peu supérieur au taux théorique (cf. Graph.3).

#### 4. 3.4 Résultats de l'expérience sur l'association « attractif- répulsif »

Lors de l'analyse statistique la variable à expliquer est le taux de capture journalier moyen ( $T_c$ ) des 2 pièges avec attractif de chaque unité de piégeage. Les unités de piégeage sont placées sur trois parcelles différentes (très proches), on considère donc le facteur parcelle (P) qui prend les valeurs 1,2 ou 3. On étudie également l'effet du facteur « date de la période de capture » (1 ou 2), de la quantité initiale de scolytes dans la parcelle (Co1) et du traitement (T) c'est à dire du type d'unité de piégeage.

Les résultats des tests de l'analyse statistique sont présentés dans le tableau 10 .

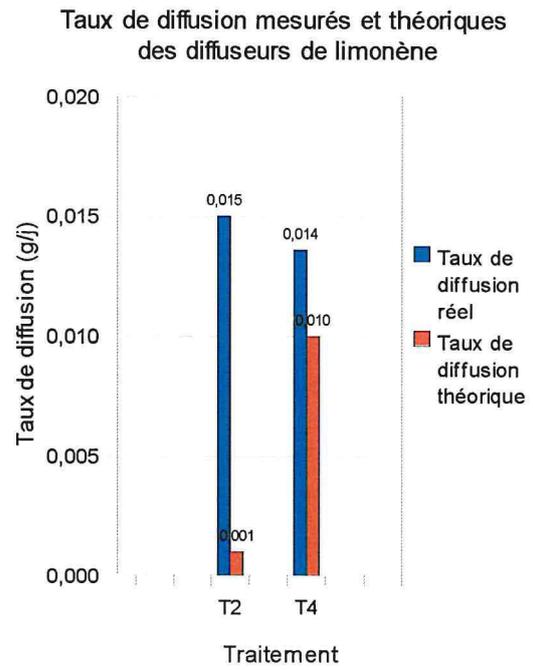
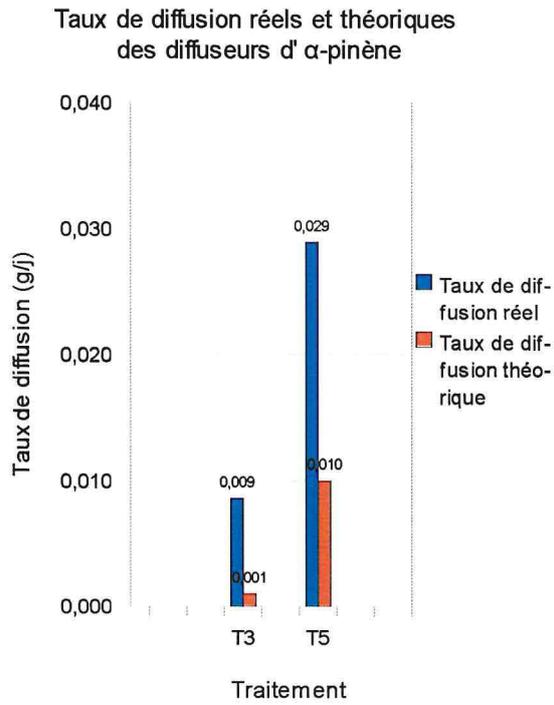
Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual <i>dev</i>	Residual d.f.	P-value
D	T+Co1+P+D	17.390	1	201.74	114	0.002015 **
P	T+Co1+P+D	9.2979	2	193.65	115	0.07813
Co1	T+Co1+P+D	21.437	1	205.79	114	< 0.001
T	T+Co1+P+D	0.60809	1	184.96	114	0.5636

Tableau 10: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur l'association « répulsif attractif »

Les analyses révèlent un effet significatif de chaque paramètre du modèle ( à 10%) excepté du traitement. Les taux de capture sont donc dépendant de la date, de la parcelle et de la quantité initiale de scolyte.

Les analyses ci-dessus suggèrent un effet (à 10 %) de la parcelle sur le taux de capture. Lors du « piégeage à blanc », qui représente la quantité de scolyte présents sur les parcelles avant le début de l'expérience, les taux de capture par parcelle obtenus sont les suivants:

Parcelle	1	2	3
Taux de capture moyen journalier des pièges à éthanol-méthanol (nombre d'insecte/piège/jour)	11	11	6



Graph.3 : Taux de diffusions mesurés et théoriques des diffuseurs d'  $\alpha$ -pinène et de limonène  
 T1: Limonène ( $T_d = 0,01 \text{ g/j}$ ), T2:  $\alpha$ -pinène (taux de diffusion =  $0,001 \text{ g/j}$ ), T3: Limonène ( $T_d = 0,001 \text{ g/j}$ ),  
 T4:  $\alpha$ -pinène (taux de diffusion =  $0,01 \text{ g/j}$ )

On voit que la quantité de scolyte sur la troisième parcelle est inférieure à celle sur les autres parcelles. Or c'est la parcelle comprenant le plus de répétitions. Ce résultats est conservé au cour du temps. La faible quantité de scolytes présents sur la parcelle 3 pourrait réduire les différences entre les unités de piégeage.

Les résultats de la même analyse statistique sur les deux premières parcelles sont présentés dans le tableau 11.

Effect	Terms included in reference model	$\Delta dev$	d.f.	Residual <i>dev</i>	Residual d.f.	P-value
TypU	TypU+Co1+D	6.109	1	89.729	51	0.05419 .
Co1	TypU+Co1+D	20.644	1	104.27	51	0.0004013
D	TypU+Co1+D	13.36	1	96.98	51	0.004411 **

Tableau 11: Résultats des analyses statistiques de l'expérience sur l'association « répulsif attractif » sur deux parcelles

On voit que si l'on ne considère pas la troisième parcelle, l'effet traitement est significatif à 10%. Le coefficient associé à l'unité de piégeage sans répulsif est négatif. Sur ces deux parcelles, les taux de capture sont donc plus faibles pour les unités de piégeage sans répulsif.

#### 4. 4 Interprétation des résultats

##### 4. 4.1 Évaluation de l'attractivité d'une sélection de COV

Les résultats concernant les composés organiques volatiles employés seuls dans les conditions de l'expérience montrent que ces 7 composés ne sont pas attractifs pour le scolyte. Par ailleurs, en présence du mélange éthanol-méthanol aucun des COV testés ne permet d'augmenter le pouvoir attractif de ce dernier. La tendance est à le diminuer significativement.

Ces résultats peuvent paraître contradictoires avec ceux des auteurs qui ont révélé une activité électroantennographique chez les scolytes suite à la perception de ces composés (Gomes de Lima, 2004; Mendesil et al., 2009). Cependant, une activité électroantennographique ne signifie pas nécessairement que ces composés aient un effet attractif. On ne connaît pas la nature du signal perçu.

Pourtant, Mendesil et al. (2009) ont également montré qu'en olfactomètre les scolytes étaient attirés vers ces composés. Par ailleurs, Velasco Pascual et al. (1997) ont montré que des broyas de cerises permettent d'augmenter l'attractivité du mélange d'éthanol-méthanol. Cela indique bien la présence d'un ou de plusieurs composés susceptibles d'augmenter l'attractivité du mélange d' EM. De plus, la production d'éthanol est un phénomène classique dans le mûrissement du fruit. La production d'éthanol n'est pas un phénomène spécifique au café. Ces éléments conduisent également à penser que d'autres composés sont responsables de l'attraction du scolyte spécifiquement vers le café. Plusieurs explication aux résultats obtenus peuvent être proposées:

- Les COV ont été émis en quantités inadaptées. En effet, les taux de diffusion mesurés étaient très différents de ceux attendus. Or, on sait que de nombreux composés présents dans les effluves des stades appétant (mûrs et secs) sont également présents au stade non appétant pour l'insecte (vert) mais en abondance différente (Vega et al., 2004). Cela laisse supposer que l'information détectée par le scolyte se compose non seulement de la nature du composé mais également de la quantité dans laquelle il est émit. Un taux de diffusion inadapté pourrait donc expliquer un effet indésirable.

– Par ailleurs, de nombreux composés présents dans les effluves du café sont des composés ubiquistes (Mendesil, 2009) c'est à dire non spécifiques du café. A titre d'exemple: le méthylcyclohexane a été détecté dans les effluves d'huile essentielle de *Laportea aestuans* (Olunfunke et al., 2008). L'éthylbenzène se trouve dans les effluve de *Limonium bicolor* (Wei et al., 2006), d'écorce de peuplier (Zhao et al., 2002), d'olive (Scarpati et al., 1993), le nonane est également présent dans les odeurs de nombreuses plantes sauvages (Mendesil, 2009). De plus, Mendesil et al. (2009) ont montré que le mélange de 3-ethyl-4-methylpentanol, methylcyclohexane, nonane, éthylbenzène, limonène et octen-3-ol est plus attractif que chacun des composés utilisé individuellement. L'ensemble de ces éléments laisse à penser que le scolyte ne reconnaît pas son hôte grâce à un seul composé mais grâce à un ensemble de composés émis en quantité spécifiques. De façon générale, ce phénomène, selon lequel la reconnaissance entre un insecte et son hôte s'effectue plus probablement par les ratios entre des composés ubiquistes diffusés par l'hôte que par la détection d'un composé spécifique, a déjà été souligné (Visser, 1986; Bruce et al., 2005).

Aucunes des deux expériences précédentes ne révèlent un effet attractif, sans ou en complément du mélange d'éthanol, des COV testés. On peut éventuellement mettre en cause la nature des composés (composés synthétiques). Mais cela n'explique pas la contradiction observée avec les résultats d'olfactométrie obtenus pas les auteurs, qui ont eux aussi utilisé des composés synthétiques. Lors des expériences de Dufour (2003) en plein champ sur l'association du mélange d'éthanol-méthanol à des terpènes et des alcools, des résultats similaires à ceux de l'étude ont été trouvés. L'impact des conditions liées à l'expérimentation en plein champ et, en particulier son impact sur les caractéristiques de la diffusion des COV semble donc une bonne piste de facteurs explicatifs.

#### 4. 4.2 Recherche d'un répulsif

Les résultats obtenus avec les répulsif révèlent que tous les composés testés permettent de diminuer l'attractivité du mélange d' EM malgré des taux de diffusion apparents inférieurs à ceux attendus. Ils présentent donc tous une propriété répulsive. Les composés les plus efficaces en terme de répulsion sont ceux qui sont actifs sur d'autres espèces de scolyte (Polland et al. 2004). Le plus efficace est également le plus commun: l'hexanol.

#### 4. 4.3 Importance du taux de diffusion

Au cours de l'étude (expériences 3 et 4), l'  $\alpha$ - pinène a été testé à trois taux de diffusion et a eu des effets différents.

Lors de l'expérience 4, il a augmenté l'attractivité du mélange d'EM à faible diffusion (théoriquement de 0,001 g/j). A un taux de diffusion dix fois plus élevé, l'  $\alpha$ - pinène ne permet pas d'augmenter significativement les captures du mélange d' EM.

Dans l'expérience 3, on a vu que l'  $\alpha$ - pinène, diffusé à plus forte diffusion (0,02g/j en théorie), diminuait significativement l'attractivité du mélange d' EM. Ces résultats confirment ceux de Dufour (2003).

Les effets de l'association de l' $\alpha$ - pinène à EM par rapport à EM seul en fonction de la taille de l'orifice du diffuseur sont résumés dans le tableau 5.

Diamètre de l'orifice du diffuseur	Petit (0,4 mm)	Moyen (2 mm)	Grand (3mm)
Effet de l' $\alpha$ -pinène+EM en comparaison au mélange EM seul	Renforce l'attraction	Ne change rien	Diminue l'attraction

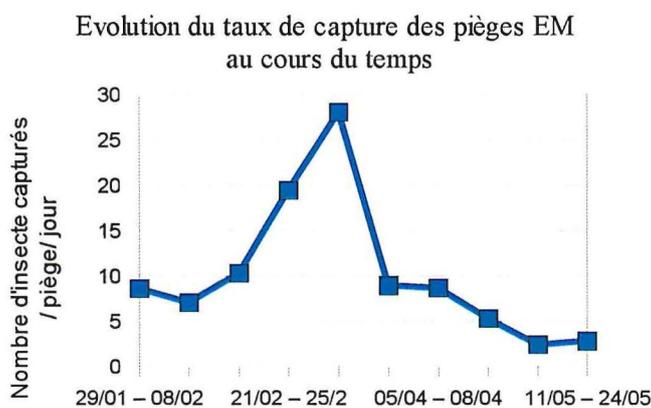
Tableau 12: Effet de association de l'  $\alpha$ -pinène à EM par rapport à EM seul en fonction de la taille de l'orifice du diffuseur

L'étude de l'effet de ce composé selon son taux de diffusion montre bien l'importance de ce dernier sur la réaction du scolyte.

Cependant avec une même différence de taux de diffusion mais avec le limonène associé au mélange d' EM, on ne voit aucune différence. Ce résultat laisse penser que les composés ont des fenêtres de diffusion propres à chacun au sein desquelles ils ont un même effet vis à vis du scolyte.

#### 4. 4.4 Étude de l'association « répulsif-attractif »

L'inefficacité du système « push-pull » n'a pas été significativement démontrée. Il paraît donc hâtif de conclure que cette technique n'ait pas d'effet. En effet, plusieurs séquences ou éléments de l'expérimentation ont pu jouer un rôle défavorable. Les vols des scolytes étaient très faibles . Cela est visible à partir de l'observation des taux de capture du piégeage « à blanc » de chaque expérience; les quantités de scolytes capturés ont beaucoup diminué au cors du temps (Graph.4).



Graph. 4: Évolution du taux de capture des pièges à EM à Maquina Vieja

Par ailleurs, la quantité de scolyte était inégalement répartie entre les parcelles. La parcelle où la plus grande quantité d'unité de piégeage a été mise en place est celle où le nombre de scolyte est le plus faible. D'ailleurs, les unités de piégeage où il y a des répulsifs capturent plus de scolytes à un seuil de significativité de 10%. Ce résultat incite à la prudence quant à la conclusion sur les résultats de cette expérience qui doit être répétée en conditions optimales (distances entre les pièges, période de vols...).

#### 4. 5 Conclusions et perspectives sur l'ensemble de l'étude

L'étude réalisée constitue un premier pas dans l'étude des COV pour l'attraction et/ou la répulsion du scolyte en plein champ. Les résultats présentés sont à confirmer. Les enseignements à tirer de cette étude sont essentiellement d'ordre méthodologique.

##### 4. 5.1 Le piégeage « à blanc »

Tout d'abord, il est apparu que la réalisation d'un système de piégeage « à blanc » avant la réalisation de chaque expérience a permis de diminuer la variabilité des taux de captures. Cette mesure apparaît donc comme efficace et nécessaire pour une bonne analyse des données.

##### 4. 5.2 Le calibrage des diffuseurs

Le rôle du taux de diffusion des COV dans l'effet obtenu sur le scolyte sa été prouvé. Or, le calibrage des diffuseurs a été réalisé sous serre. La variabilité environnementale et temporelle qui existe dans le contexte réelle de la diffusion n'a pas été prise en compte. Il serait utile de mesurer de nouveau les taux de diffusion des COV en fonction des diamètres des orifices de diffusion sur le terrain. Il faudrait étudier les impacts environnementaux (conditions d'ombrage, d'ensoleillement et de ventilation) sur les taux de diffusion des COV.

#### 4. 5.3 La mesure du taux de diffusion des COV au champ

Le système de bouchage et de conservation ont été modifié et amélioré au cours de l'étude. L'utilisation de bouchon adaptés aux diffuseurs et non percés semble la meilleure technique de bouchage employée. Les diffuseurs doivent être pesés très peu de temps avant la mise en place de l'expérience et peu de temps après sa fin. En effet, les risques de volatilisation lors du stockage ne sont pas nuls. Il serait utile d'étudier la propagation au champ des émissions des COV. En effet, la quantité d'odeurs perçues doit varier en fonction de la distance au piège. Ainsi, on pourrait estimer la distance d'effet des COV testés. Cette étude doit être complétée par l'étude des mouvements du scolyte.

#### 4. 5.4 L'association « répulsif-attractif ».

On peut faire deux reproches à la configuration testée. D'une part, la diffusion d'un seul répulsif en caféière est sans doute négligeable par rapport aux émissions naturelles des caféiers. Ainsi son effet est sans doute limité. D'autre part, le dispositif expérimental testé n'était pas optimal pour détecter les mouvements du scolyte. Ceux qui ont migré transversalement à la ligne de piégeage avaient peu de chances d'être capturés. Cela diminue d'autant plus les possibilités de voir l'effet du répulsif. Par ailleurs, l'utilisation d'un unique diffuseur. On peut penser qu'il serait plus efficace de créer une plus grande zone de diffusion du répulsif (plus augmenter son effet) et de l'encercler de pièges attractifs (pour augmenter les chances de voir un effet) (schéma 1).



Schéma 2: Zone de répulsif entourée de pièges avec attractifs

La meilleure connaissance des caractéristiques de la diffusion du répulsif et des mouvements du scolyte apporterait des éléments cruciaux dans les choix de la disposition des répulsifs et attractifs.

#### 4. 5.5 Le site de l'étude

Le lieu de l'étude (Costa Rica, région centrale) pourrait être plus adapté aux besoins de l'étude. En effet, dans cette région, il y a beaucoup de floraisons anarchiques (c'est à dire tout au long de l'année). Il n'y a donc pas vraiment de période où les conditions optimales pour le piégeage sont réunies (absence de fruits appétants). Ainsi, les composés diffusés sont en concurrence avec les fruits présents ce qui limite leur impact. Si les expériences étaient reconduites dans une zone où les floraisons anarchiques sont limitées, les chances de voir l'effet des COV seraient meilleures.

#### 4. 6 Conclusion générale

En conclusion, dans les conditions expérimentales de l'étude :

- Certains composés semblent pouvoir améliorer l'attractivité du mélange d'EM ( $\alpha$ -pinène à faible taux de diffusion) mais la plupart des composés testés dans ce but ont été inefficaces au champ. Au regard des mécanismes de reconnaissance d'un insecte et de son hôte, leur emploi combiné pourrait être une piste d'amélioration de leur utilisation.
- L'importance du taux de diffusion sur l'effet des COV vis à vis du scolyte a été démontré. Il convient donc d'attribuer un effet au couple « COV et taux de diffusion » et non seulement aux COV. Ce paramètre doit être bien connu pour manipuler les COV au champ.
- Tous les composés testés pour la répulsivité ont manifesté un effet efficace mais dont la portée reste à préciser.

– L'association des effets répulsifs et attractifs des COV est à étudier de nouveau à la lumière de connaissances nouvelles sur le déplacement du scolyte et la diffusion des COV. Le dispositif expérimental peut être amélioré en augmentant la zone de diffusion du répulsif et en optimisant les possibilités de capture des scolytes migrants.

Globalement, il ressort de cette étude qu'une bonne connaissance des déplacements du scolyte au champ et des caractéristiques de la diffusion des COV sont essentielles pour une bonne utilisation de ces derniers dans le système de piégeage. Les résultats révèlent des composés répulsifs pour le scolyte. Ils suggèrent une utilisation plus massive pour augmenter leur impact et une optimisation des captures des scolytes repoussés.

## BIBLIOGRAPHIE

- Brocarta, 1993, No. 3, 17, 18. Cenicafé. Chinchiná, Colombia.
- Bergamin J, 1943, Contribuição para o conhecimento da biologia da broca-do-café *Hypothenemus hampei* Ferrari. Arq Inst Biol São Paulo 14: 31-72.
- Baker, P.S., A. Rivas, R. Balbuena, C. Ley & J.F. Barrera. 1994. Abiotic mortality factors of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). Entomol. Exp. Appl., 71: 201- 209.
- Baker, P.S , 1999The coffee berry borer in Colombia; final report of the DFID-Cenicafé-CABI Bioscience IPM for coffee project (CNTR 93/153A).154 pp. Chinchiná (Colombia), DFID-CENICAFE
- Barrera, J.F., 1994. Dynamique des populations du scolyte des fruits du caféier, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae), et lutte biologique avec le parasitoïde *Cephalonomia stephanoderis* (Hymenoptera: Bethyilidae), au Chiapas, Mexique. Tesis. Université Paul Sabatier, Toulouse, Francia, 301 pp.
- Barrera J F, Herrera J, Villacorta A, García H et Cruz L ,2006. Trampas de metanol-etanol para detección, monitoreo y control de la broca del café *Hypothenemus hampei*. In Barrera J F, Montoya P (eds) Simposio sobre trampas y atrayentes en detección, monitoreo y control de plagas de importancia económica. Sociedad Mexicana de Entomología y El Colegio de la Frontera Sur. Manzanillo, Colima, México, p.71-83.
- Bois D., 1937. Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges. Histoire, utilisation, culture. Le chevalier (ed.), Paris, 561 p.
- Bruce J.A., Wadhams L.J. And Woodcock C.M., 2005. Insect host location: a volatile situation. Trends Plants Science.10:269-274.
- Brun L-O., Mathieu F., Gaudichon V., Marcillaud C., 1996. Lutte intégrée contre le scolyte du café en Nouvelle-Calédonie, *Hypothenemus hampei*; (Coleoptera : Scolytidae).(ORSTOM).Science de la vie appliquée n°9.
- Borbón-Martinez O., 2004. Eficacia de las trampas de vasos para el monitoreo y control de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: curculionidae) en Costa Rica y Nicaragua. Workshop Internacional sobre o Manejo da Broca do café. 28 nov. – 02 dic. 2004, Londrina, P.R. Brasil.
- Bustillo P. A.E., Cárdenas R. M., Villalba G.D.A. , Benavides P. M., Orozco J. H. et Posada F.J. , 1998. Manejo integrado de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) en Colombia. Dessin par Gonzalo Hoyos, CENICAFE, Chinchiná, Colombia. 134 p.
- Bustillo, A.E. 2006. Una revisión sobre la broca, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), en Colombia. Rev. Colomb. Entomol.32 ( 2 ) , 101 - 116 .
- Corbett, G.H., 1933,Some preliminary observations on the coffee berry beetle borer *Stephanoderes* (*Cryphalus*) *hampei* Ferr. Malay Agriculture Journal 21, 8–22.
- Damon, A. 2000. A review of the biology and control of the berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). Bull. Entomol. Res., 90:453- 465.

- Da Matta F. M., Ronchi C. P., Maestri M. et Barros R. S., 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 19, 485-510.
- Daviron B. et Lerin F., 1990. Le Café. Les grands marchés mondiaux, Coll. Cyclope, Economica (éd.), Paris, 1990, 108 p.
- Decazy, 1989. Le scolyte des fruits du caféier *Hypothenemus hampei* Ferr. : considération sur la lutte intégrée contre ce ravageur. In : annales XII Colloque international sur le café, Paipa, colombia, Ed. ASIC,655-665.
- De Kraker J., 1988. The coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferr.): factors affecting emergence and early infestation. Report of field experiments. Centro de Investigaciones Ecologicas del Sureste, Tapachula. 48 pp.
- Dufour B., Gonzalez M. O. et Frérot. B., 1999. Piégeage de masse duscolyte du café *Hypothenemus hampei* Fer.(Col. Scolytidae)en conditions réelles:premiers résultats XVIII Coloque scientifique international du café helsinki, Finlande,Paris,France,Asie,p.480-491
- Dufour B.P., 2002. Importance du piégeage pour la lutte intégrée contre le scolyte du café *Hypothenemus hampei* Ferr. In: Recherche et Caféiculture. Montpellier: CIRAD-CP, p 108-116
- Dufour B., 2003. Nouvelle alternative pour la lutte intégrée contre le scolyte des baies du caféier: le piégeage. Première phase: recherches et mises au point. Rapport interne, CIRAD, 85 p.
- Dufour, B.P., Gonzalez, M.O., Mauricio, J.J., Chavez, B.A. & Ramirez, R., 2005, Validation of coffee berry borer trapping with Brocap1 trap. pp. 1243–1247 in Proceedings, XX-eme Colloque Scientifique International sur le Café ,Bangalore, 11–15 October 2004. Bangalore, India.
- Dufour, B.P., Frérot, B., 2008. Optimisation of coffee berry borer *Hypothenemus hampei* Ferr. (Col. Scolytidae) mass trapping with an attractant mixture. *J. of appl. Entomol*, 132, 7, 591-600.
- Flavia Clochet da Silva , Mauricio Ursi Ventura, Lauro Morales, 2006. The role of semiochemical traps in the management of coffee berry borer *Hypothenemus hampei*, semina: Ciencias Agrarias, Londrina, v.27, n.3, p.399-406
- Giordanengo P., Brun L. O. et Frerot B. , 1993. Evidence for allelochemical attraction of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*. *J. Chem. Ecol.*19, 763-769.)
- Gomes de Lima, J. O., De Campos-Pereira R. , Muniz P. C., De Lacerda M., Matoso Viana-Bailez A. M. et Villacorta-Mosqueira. A., 2004. Identificação e atratividade de novos voláteis do café cereja e desenvolvimento de armadilha para a coleta massal da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferr.) En: Workshop Internacional sobre o Manejo da Broca-do-Café, Londrina, Paraná, Brasil.
- Gutiérrez-Martinez A.; Rivas S.H. et Sanchez A.V., 1993. Atracción química de la broca del fruto de café *Hypothenemus hampei* Ferrai (*Coleoptera: Scolytidae*) por las diferentes variedades de café en el Sononusco, Chiapas, México. In: simposio Latinoamericano de cafeicultura, 16.,Managua, 1993. Proceedings. Managua: IICA,p.1-8.)
- Hugo C. Arredondo Bernal and Luis A. Rodriguez-del-Bosque (eds.), 2008, Casos de control biologico en Mexico,Mundi Prensa Mexico, Mexico City, Mexico, 423 pp.

- Jaramillo J., Borgemeister C. et Baker. P., 2006. Coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae): searching for sustainable control strategies. Bull. Entomol. Res., 96, 1- 12.
- Le Pelley R.H., 1973. Coffee Insects. Ann. Rev. Entomol., 18: 12 1-142.
- Le Brun J., 1941. Recherches morphologiques et systématiques sur les caféiers du Congo. Mém. Inst. Royal Colonial Belge, 184 p
- Leefmans S., 1923. The coffee berry borer, *S. hampei*. I. Life history and ecology. Meded. Inst. Plantenzieken 57, 61–67.
- Mathieu F., , 1995: Mécanismes de la colonisation de l'hôte chez le scolyte du café *Hypothenemus hampei* (Ferr.) (Coleoptera: Scolytidae). PhD Thesis, Université de Paris VII, France, pp. 134.
- Mathieu F. , Malosse C. et B.Frérôt, 1998. Identification of volatile components released by fresh coffee berries at different stages of ripeness, Journal of agriculture and food chemistry, Vol.45, No3, p.1106-1110
- Mathieu F. , Brun L. O., Frérôt B. , M. Suckling D. et Frampton C.,1999. Progression of field infestation is linked with trapping of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Col., Scolytidae) . Journal of Applied Entomology 123 : 535 - 540 .
- Mendesil, E., Bruce, T. J. A., Woodcock, C. M., Caulfield, J. C., Seyoum, E. et Pickett, J. A., 2009. Semiochemicals used in Host Location by the Coffee berry Borer, *Hypothenemus hampei*. J. Chem. Ecol. 35(8): 944-950.
- Mendoza Mora, J.R., 1991, Resposta da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* a estímulos visuais e semioquímicos. Viçosa:UFV,44p.(Thesis- M.S.)
- Miller D.R., Staffan B. et Lindgren J., 2000. Comparison of  $\alpha$ -pinene end myrcene on attraction of mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* (Coleoptera: Scolytidae) to pheromones in stands of western white pine, entomol.Soc.Brit.Columbia 97
- Murphy, S.T. et Moore, D., 1990. Biological control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*, (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae): previous programmes and possibilities for the future. Biocontrol News and Information 11, 107–117.
- Milián Ochoa, H.; Campos Almengor, O.; Vidal S, B.; Decazy, B. Título: Determinación de pérdidas en la cosecha por broca del fruto del caféto *Hypothenemus hampei* Ferr., en función de diferentes porcentajes de infestación. Serie :Revista Cafetalera (Guatemala). 1989. (no.303) p. 23, 25, 27.
- Olunfunke M.D., Adebayo OI. , Ajani OI. et Ose O., 2008. Comparison of the chemical composition of the essential oils from the aerial parts, fruits and roots of nigerian *Laportea aestuans* (L.) Chew (urticaceae). Nat. Prod. Comm. 3: 1921-1924.
- Ortiz-Persichino C. ,1991. Pérdidas por la broca del café en el Soconusco, Chiapas. Informe técnico. Unidad de Estudios Economicos y Sociales, Centro de Investigaciones Ecológicas del Sureste, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, Mexico. 126 pp.

Ortiz A., Vega F. E. et Posada F., 2004 .Volatile composition of coffee berries at different stages of ripeness and their possible attraction to the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) . Journal of Agricultural and Food Chemistry 52 : 5914 - 5918

Poland Therese M., De Groot, Peter Burke, Stephen Wakarchuk, David Haack, Robert A. et Nott Reginald. 2004. Semiochemicals disruption of the pine beetle, *Tomicus piniperda* (Coleoptera: Scolytidae). Environmental Entomology 33(2):221-226

Scarpati ML, Loscalzo R et VitaG. 1993. Olea europaea volatiles attractive and repellent to the olive oil fruit-fly (*Dacus oleae*, Gmeli.). J.Chem.Ecol.19:881-891

Sladden G.E., 1934. *Stephanoderes hampei* Ferr-r. Bull. agric. Congo belge, 25: 26-77.

Sponagel, K.W.,1994. La broca del café *Hypothenemus hampei* en plantaciones de café robusta en la Amazonía Ecuatoriana. 191 pp. Giessen, Germany, Wissenschaftlicher, Fachverlag.

Toledo A. A. DE, 1947. Importância econômica da broca do café *Hypothenemus hampei* (Ferr.) no Estado de São Paulo. Arq. Inst. Biol., 18 : 213-238.

Tlicheler J. 1961. Etude analytique de l'épidémiologie du scolyte des graines de café, *Stephanoderes hampei* Ferr. en Côte d'Ivoire. Meded Landbouwhogeschool, Wageningen 61(11), 1-49

Vega, F. E., Infante F., Castillo A., et Jaramillo J. . 2009. The coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae): a short review, with recent findings and future research directions. *Terrestrial Arthropod Reviews* 2. 129-147.

Velasco Pascual , H. , J. M. Llavén Gómez , and A. F. Velásquez, 1997 . Respuesta a extractos de cerezas de café utilizados como atrayente para hembras intercosecha de la broca del fruto *Hypothenemus hampei* Ferr . pp. 349

Visser J.H., 1986. Host odor perception in phytophagous insects. Annu.Rev.Entomol.31:121-144.

Waterhouse, D.F. 1998. Biological control of insect pests: Southeast Asian prospects. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra, Australia. ACIAR Monograph No. 51, 548 p.

Waterhouse, D.F. et Norris, K.R., 1989. Biological control: Pacific prospects. Supplement 1. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. pp. 56–75.

Wei Y-X. et Wang J-X. 2006. Studies of the chemicals constituents of hypogean part from *Limonium bicolor*. *Zhon Yao Cai* 29:1182-4.

Zhao X, Yan S, Chi D et Wen Z., 2002. Analysis of essential oil from the bark of healthy *Populus pseudo-simonii* x *P.nigra* trees by GC-MS. J.Northeast Forestry University 30:18-20.

## ANNEXE I: COEFFICIENTS DES MODELES STATISTIQUES

Coefficients du modèle de la comparaison des COV+EM à EM seul (expérience 2):				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-0.954041	0.819117	-1.165	0.246007
TT1	-0.600469	0.243742	-2.464	0.014903 *
TT2	-0.443976	0.221102	-2.008	0.046461 *
TT3	-1.206468	0.295590	-4.082	7.29e-05 ***
TT4	-1.291133	0.322606	-4.002	9.89e-05 ***
TT5	-0.533728	0.224728	-2.375	0.018831 *
TT6	-1.028733	0.295490	-3.481	0.000656 ***
TT7	-0.581006	0.230995	-2.515	0.012963 *
Co1	0.025363	0.004938	5.136	8.70e-07 ***
D2	-1.022600	1.287749	-0.794	0.428409
P2	0.513757	0.206019	2.494	0.013741 *
t	0.115839	0.076233	1.520	0.130762

Tableau 1: Coefficients de chaque modalité des facteurs et des covariables de l'analyse de l'expérience 2

Coefficients du modèle de l'expérience sur la recherche d'un répulsif				
Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.85760	0.73640	3.880	0.000196 ***
TT1	-1.56325	0.50975	-3.067	0.002842 **
TT2	-2.78858	0.70853	-3.936	0.000161 ***
TT3	-0.37847	0.39976	-0.947	0.346261
TT4	-0.34077	0.40691	-0.837	0.404501
Co1	0.02964	0.00499	5.941	5.01e-08 ***
D2	-1.04609	0.55301	-1.892	0.061686 .

Tableau 2: Coefficients des modalités des facteurs et de la covariable de l'analyse de l'expérience 3

Coefficients de la comparaison des 2 traitements avec $\alpha$ -pinène et EM (expérience 4):				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.336320	0.345638	6.759	4.06e-08 ***
T0,01	-0.705212	0.239994	-2.938	0.00545 **
Co1	0.078896	0.009919	7.954	9.13e-10 ***

Tableau 3: Coefficients de chaque modalité des traitements d'  $\alpha$ -pinène et de la covariable de l'analyse 1 de l'expérience 2

Coefficients de la comparaison de tout les traitements de l'expérience 4 à EM seul:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.705072	0.197651	8.627	1.02e-14 ***
TT2	0.323416	0.243599	1.328	0.18638
TT3	0.648544	0.235298	2.756	0.00660 **
TT4	0.456677	0.231059	1.976	0.05000 .
TT5	0.234993	0.240683	0.976	0.33051
Co1	0.052225	0.003853	13.555	< 2e-16 ***
D2	-0.292289	0.106796	-2.737	0.00698 **

Tableau 4: Coefficients de la comparaison de tout les traitements à base d'  $\alpha$ -pinène et de limonène associés à l'EM seul au témoin (EM seul)

