



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE
Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique

ANNEE : 2017-2018
N° D'ORDRE :
001

THESE DE DOCTORAT

Mention : Ecologie, Biodiversité et Evolution
Spécialité : Ecologie Végétale

CANDIDAT

Nom : KOFFI
Prénom : N'GUESSAN
ACHILLE

Biosurveillance de la qualité de l'air dans le District
Autonome d'Abidjan (Côte d'Ivoire) à partir des
caractéristiques anatomiques et biochimiques des
feuilles de *Ficus benjamina* L. (Moraceae)

JURY

Président : Madame TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Professeur
Titulaire, Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : Madame TRAORE Karidia, Maître de Conférences, Université
Jean LOROUGNON GUEDE

Rapporteur : Monsieur TROKOUREY Albert, Professeur Titulaire,
Université Félix Houphouët Boigny

Examineur : Monsieur ACKAH Jacques Auguste Alfred Bognan, Maître
de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : Monsieur SORO Dodiomon, Professeur Titulaire, Université
Félix Houphouët Boigny

Soutenue publiquement
le : 07 Mars 2019

TABLE DES MATIERES

	Pages
DEDICACE.....	vi
AVANT-PROPOS.....	vii
REMERCIEMENTS.....	viii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITESUR LE MATERIEL, LA ZONE D’ETUDE ET SUR LES NOTIONS DE BIOSURVEILLANCE.....	5
1.1- Zone d’étude.....	6
1.1-1- Situation géographique du District Autonome d’Abidjan.....	6
1.1-2- Climat.....	7
1.1-3- Sol.....	7
1.1-4- Végétation.....	8
1.1-5- Activités économiques.....	9
1.2- Pollution de l’air.....	9
1.2-1- Sources de pollution.....	9
1.2-1-1- Sources naturelles.....	9
1.2-1-2- Sources anthropiques.....	10
1.2-2- Principaux polluants de l’air et pathologies.....	11
1.2-2-1- Oxydes d’azote.....	11
1.2-2-2- Dioxyde de soufre.....	11
1.2-2-3- Particules fines en suspension.....	12
1.2-2-4- Ozone.....	11
1.2-2-5- Monoxyde de carbone.....	13
1.2-3- Impacts sanitaires des principaux polluants de l’air.....	13
1.2-3-1- Impacts sanitaires des principaux polluants de l’air sur l’Homme.....	13
1.2-3-2- Impacts sanitaires des principaux polluants atmosphériques sur les animaux.....	14
1.2-3-3- Impacts sanitaires des polluants atmosphériques sur les végétaux.....	15
1.2-4- Effets généraux des polluants sur les plantes.....	15
1.2-4-1- Définition du stress oxydant.....	15

1.2-4-2- Facteurs du stress oxydant chez les plantes.....	15
1.2-4-3- Espèces réactives de l'oxygène.....	16
1.2-5- Antioxydants.....	17
1.2-5-1- Antioxydants non enzymatiques.....	17
1.2-5-1-1- Ascorbate.....	11
1.2-5-1-2- Glutathion.....	11
1.2-5-1-3- Vitamine E.....	19
1.2-5-1-4- Caroténoïdes.....	19
1.2-5-2- Antioxydants enzymatiques.....	19
1.2-5-2-1- Superoxyde dismutases.....	20
1.2-5-2-2- Catalases.....	20
1.2-5-2-3- Ascorbate peroxydase.....	21
1.3- <i>Ficus benjamina</i> Linné (Moraceae).....	21
1.3-1- Origine de <i>Ficus benjamina</i>	21
1.3-2- Description botanique de <i>Ficus benjamina</i>	21
1.3-3- Position systématique de <i>Ficus benjamina</i>	23
1.3-4- Importance de <i>Ficus benjamina</i>	23
1.4- Biosurveillance.....	23
1.4-1- Définition de la biosurveillance.....	23
1.4-1-1- Biosurveillance active.....	24
1.4-1-2- Biosurveillance passive.....	24
1.4-2- Différentes approches de la bio-surveillance.....	24
1.4-2-1- Biosurveillance par des bio-marqueurs.....	24
1.4-2-1-1- Bio-marqueur d'exposition.....	25
1.4-2-1-2- Bio-marqueur d'effet.....	25
1.4-2-1-3- Bio-marqueur de susceptibilité.....	25
1.4-2-2- Bio-intégrateur.....	26
1.4-2-3- Bio-accumulateur.....	26
1.4-2-4- Bio-indicateur.....	26
1.5- Indicateurs de pollution chez les plantes.....	27
1.5-1- Stomates.....	27
1.5-2- Ouverture et fermeture des stomates.....	28
1.5-3- Densité des stomates.....	30
1.5-4- Résistance des stomates.....	30

fonction des différentes classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	50
3.1-1-1-3- Variation de la surface des pores des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	51
3.1-1-1-4- Variation du degré d'ouverture des pores des stomates suivant les hauteurs de prélèvement en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	52
3.1-1-1-5- Variation de la résistance des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	53
3.1-1-1-6- Variation de la résistance des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol à différentes hauteurs de prélèvement en saison sèche et en saison des pluies.....	55
3.1-1-2- Variation des particules fines dans les feuilles de <i>Ficus benjamina</i> en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	55
3.1-1-2-1- Corrélation entre l'émission des particules fines et la densité des stomates en saison sèche et en saison des pluies.....	56
3.1-1-2-2- Corrélation entre l'émission des particules fines et le degré d'ouverture des pores des stomates en saison sèche et en saison des pluies.....	57
3.1-1-2-3- Corrélation entre l'émission des particules fines et la résistance des stomates en saison sèche et en saison des pluies.....	59
3.1-2- Bio-surveillance active	60
3.1-2-1- Caractéristiques des stomates des feuilles de <i>Ficus benjamina</i> L.....	60
3.1-2-1-1- Variation de la densité des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	60
3.1-2-1-2- Variation de la densité des stomates en fonction de la localisation des plants par rapport à la route en saison sèche et en saison des pluies.....	60
3.1-2-1-3- Variation du degré d'ouverture des pores des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	62
3.1-2-1-4- Variation du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles en fonction de la localisation des plants de <i>Ficus benjamina</i> par rapport à la route, en saison sèche et en saison des pluies.....	63
3.1-2-1-5- Variation de la résistance des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....	65
3.1-2-1-6- Variation de la résistance des stomates des feuilles en fonction de la	

localisation des plants de <i>Ficus benjamina</i> par rapport à l'axe routier, en saison sèche et en saison des pluies.....	67
3.1-2-2- Variation de l'activité enzymatique dans les feuilles de <i>Ficus benjamina</i> L. en fonction des classes d'utilisation du sol.....	69
3.1-2-2-1- Variation de l'activité de la catalase en saison sèche et en saison des pluies	69
3.1-2-2-2- Variation de l'activité de l'ascorbate peroxydase en saison sèche et en saison des pluies.....	71
3.1-2-2-3- Corrélation entre les activités de la catalase et celle de l'ascorbate peroxydase en saison sèche et en saison des pluies.....	72
3.2- Discussion.....	73
3.2-1- Caractéristiques des stomates influençant la qualité de l'habitat en période de bio- surveillance.....	73
3.2-2- Influence des particules fines sur les caractéristiques des stomates.....	74
3.2-3- Distribution horizontale des caractéristiques des stomates des feuilles de <i>Ficus</i> <i>benjamina</i>	75
3.2-4- Caractéristiques des stomates des feuilles en fonction des saisons de prélèvement...76	
3.2-5- Relation entre la pollution de l'air et l'activité enzymatique dans les classes d'utilisation du sol.....	77
CONCLUSION	80
REFERENCES	83
PUBLICATIONS	104

DEDICACE

A mon Père HOUPHOUET Koffi Marcel, pour m'avoir permis d'avoir l'instruction et pour sa rigueur dans le travail. Aujourd'hui, la plante que tu as arrosée commence à porter des fruits. Que Dieu te garde en vie pour en bénéficier.

A ma Mère YAO Kla, mes frères et sœurs pour leur soutien moral, leur patience et leurs bénédictions. Que Dieu vous garde en vie et vous gratifie de sa bonté.

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire s'inscrit dans la cadre d'un projet intitulé « Évaluation de la qualité de l'air à partir des feuilles des plantes dans le district Autonome d'Abidjan ».

Ce travail n'aurait pas pu avoir lieu sans le soutien et l'apport majeur de Vlaamse Interuniversitaire Raad (VLIR) et de la politique fédérale belge (BELSPO). Aussi, cette étude a-t-elle bénéficié de l'aide de la Fondation David et Alice Van Büuren (Belgique) pour l'acquisition d'un microscope relié à une caméra pour le traitement des données des stomates. Nous avons bénéficié également de l'aide de l'International Foundation Science (IFS) pour l'acquisition d'un spectrophotomètre, du Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES) pour les allocations de recherches et l'achat de consommables et, du District Autonome d'Abidjan qui a facilité les travaux sur le terrain.

REMERCIEMENTS

Le présent travail effectué a bénéficié de la contribution de plusieurs personnes à qui je souhaite exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements.

Je remercie le Professeur TIDOU Abiba Sanaogo Epouse KONÉ, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) ainsi que ses vices présidents, Professeur KONÉ Tidiani et Docteur AKAFFOU Doffou Sélastique pour tout le travail qu'ils ont accompli afin de mettre à notre disposition un cadre d'étude sain où règnent la quiétude et la rigueur scientifique. Je remercie particulièrement le Professeur TIDOU Abiba Sanaogo Epouse KONÉ pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je remercie également Monsieur KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, pour sa disponibilité et son dévouement au bon déroulement de ce travail au sein de l'UFR Environnement.

Je suis reconnaissant envers Madame TRAORÉ Karidia, Maître de Conférences, Directrice de l'UFR Agroforesterie et du présent mémoire. Ses conseils avisés et son sens élevé du devoir m'ont été d'un apport très appréciable.

Je remercie Monsieur BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Maître de Conférences, et le Docteur ANGAMAN Djédoux Maxime (Maître de Conférences), pour leur apport scientifique et matériel à la rédaction de ce mémoire.

Je remercie les membres du jury de la soutenance que sont Madame TIDOU Abiba Sanaogo Epouse KONÉ, Madame TRAORÉ Karidia, Monsieur TROKOUREY Albert, Monsieur ACHAH Jacques Auguste Albert Bognan, Monsieur SORO Dodiomon, pour leur disponibilité et leurs critiques objectives pour l'amélioration de la qualité de ce manuscrit.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux différents rapporteurs de cette thèse, Professeur TROKOUREY Albert et Monsieur AYOLIE Koutoua, Maîtres de Conférences, pour leur contribution à l'amélioration de ce manuscrit.

Je remercie Messieurs SANGNE Yao Charles (Maître-Assistant), BAMBA Issouf (Maître-Assistant) et KPANGUI Kouassi Bruno (Maître-Assistant) du Groupe de Recherche Interdisciplinaire en Ecologie du Paysage et en Environnement (GRIEPE) pour leur disponibilité, leurs conseils, leurs critiques enrichissantes et leurs suggestions qui ont permis d'améliorer ce travail.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma reconnaissance aux Docteurs KOUAKOU Kouassi Apollinaire et KOUAKOU Akoua Tamia, Doctorants TRA Bi Zamblé Fidèle, ASSALÉ Adjo Yvette, ZANH Golou Gisèle, KOUA Kadio Noël, TIMITE Nakouana, KOUMAN Akoua Djinabou, YEO Amy Julie et KOUMAN Kouame Jean Marc du Groupe de Recherche Interdisciplinaire en Ecologie du Paysage et en Environnement (GRIEPE) pour leurs encouragements tout au long de mes travaux.

Merci à tous mes amis, qui ont rendu le travail plus agréable dans une ambiance hors du commun.

Enfin, je voudrais associer mes parents qui m'ont toujours encouragé dans les études.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ABA	:	Acide abscissique
ANOVA	:	Analysis of variance
ADN	:	Acide Désoxyribo Nucléique
APX	:	Ascorbate peroxydase
AR	:	Axe Routier
ASC	:	Acide ascorbique
CAM	:	Crassulacean Acid Metabolism
DAA	:	District Autonome d'Abidjan
EDTA	:	Acide éthylène diamine tétraacétique
ERO	:	Espèces réactives de l'oxygène
ETM	:	Elément Trace Métallique
GPS	:	Global Positioning System
GSH	:	Glutathion (forme réduit)
GSSG	:	Glutathion (forme oxydé)
HAP	:	Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique
HPLC	:	High performance liquid chromatography
OMS	:	Organisation Mondiale de la Santé
O₃	:	Ozone
P	:	Probabilité
PM	:	Particulate Matter ou Particule fine
PM₁₀	:	Particule fine de diamètre aérodynamique < 10 µm
PM_{2,5}	:	Particule fine de diamètre aérodynamique < 2,5 µm
PM_{0,1}	:	Particule fine de diamètre aérodynamique < 0,1 µm
PJ	:	Parc et Jardin
R	:	Coefficient de corrélation
RGPH	:	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SIRM	:	Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation
SOD	:	Superoxydes dismutases
UFR	:	Unité de Formation et de Recherche
ZI	:	Zone Industrielle
Zn	:	Zinc
ZR	:	Zone Résidentielle

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Flux de quelques polluants dans l'environnement.....	10
Tableau II : Quelques polluants de l'environnement dus aux activités anthropique.....	11
Tableau III : Effets de quelques polluants sur la santé humaine.....	14
Tableau IV : Densité des stomates de <i>Ficus benjamina</i> L. en fonction de la hauteur de prélèvement, des classes d'utilisation du sol et des saisons.....	51
Tableau V : Surface des pores des stomates de <i>Ficus benjamina</i> L. en fonction de la hauteur de prélèvement, des classes d'utilisation du sol et des saisons.....	53
Tableau VI : Valeurs de la résistance des stomates de <i>Ficus benjamina</i> L. en fonction des hauteurs de prélèvement dans les classes d'utilisation du sol.....	55
Tableau VII : Densité des stomates des feuilles en fonction de la localisation des plants de <i>Ficus benjamina</i> par rapport à la route, en saison sèche et en saison pluvieuse	62
Tableau VIII : Valeurs moyennes du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles de plants de <i>Ficus benjamina</i> situés à différentes distances des axes routiers, en saison sèche et en saison pluvieuse.....	65
Tableau IX : Valeurs de la résistance des stomates des feuilles de <i>Ficus benjamina</i> situées à différentes distances des axes routiers, en saison sèche et en saison pluvieuse	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du district d’Abidjan en Côte d’Ivoire et des différents points d’échantillonnage dans les quatre (04) classes d’utilisation du sol.....6

Figure 2 : Diagramme Ombrothermique de la ville d’Abidjan de 1988 à 2017.....7

Figure 3 : Rameau feuillé et fructifère de *Ficus benjamina* L. (Moraceae).....22

Figure 4 : Coupe transversale d’une feuille montrant un stomate..... 28

Figure 5 : Mécanisme d’ouverture et de fermeture des stomates..... 32

Figure 6 : Rameau de *Ficus benjamina* L.....32

Figure 7 : Quelques matériel de laboratoire pour l’extraction des enzymes et mesure du taux de particules fines.....34

Figure 8 : Sites de prélèvement des feuilles des plants de *Ficus benjamina*.....36

Figure 9 : Quelques entreprises de Côte d’Ivoire37

Figure 10 : Plants de *Ficus benjamina* cultivés dans des pots. 40

Figure 11 : Disposition des plants de *Ficus benjamina* L. aux abords des axes routiers..... 41

Figure 12 : Méthode de prélèvement des empreintes des stomates 42

Figure 13 : Dispositif d’observation des empreintes des stomates.....43

Figure 14: Variation de la densité des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d’utilisation du sol et des saisons.....50

Figure 15 : Variation du degré d’ouverture des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d’utilisation du sol et des saisons.....50

Figure 16 : Variation de la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d’utilisation du sol et des saisons54

Figure 17 : Variation des particules fines des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d’utilisation du sol et des saisons.....56

Figure 18 : Corrélation entre les aimantations rémanentes isothermes à saturation et la densité des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L en saison sèche et en saison des pluies.....57

Figure 19 : Corrélation entre les aimantations rémanentes isothermes à saturation et la surface des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L en saison sèche et en saison des pluies.....58

Figure 20 : Corrélation entre les aimantations rémanentes isothermes à saturation et la résistance du stomate des feuilles de *Ficus benjamina* L en saison sèche et en saison des pluies.....59

Figure 21 : Variation de la densité des stomates de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....60

Figure 22: Variation de la densité des stomates à différentes distances de la route.en saison sèche et en saison des pluies 61

Figure 23: Degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol, en saison sèche et en saison des pluies.....63

Figure 24: Variation du degré d'ouverture des pores des stomates à différentes distances de la route, en saison sèche et en saison des pluies.....64

Figure 25: Variation de la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol, en saison sèche et en saison des pluies.....67

Figure 26 : Variation de la résistance des stomates à différentes distance de la route en saison sèche et en saison des pluies 68

Figure 27 : Variation de l'activité de la catalase au niveau des différentes classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies..... 70

Figure28: Variation de l'ascorbate peroxydase au niveau des différentes classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies.....71

Figure 29 : Corrélation entre la catalase et l'ascorbate peroxydase dans les feuilles de *Ficus benjamina* L. en saison sèche et en saison pluvieuse.....72

INTRODUCTION

De tous les milieux avec lesquels les êtres vivants sont en contact, l'atmosphère est le seul dont ils ne peuvent se soustraire. C'est aussi le milieu avec lequel ces êtres ont les échanges les plus importants. En effet, chaque être vivant a besoin d'air tous les jours pour pouvoir vivre. L'air étant un élément indispensable de la vie sur terre, sa pollution est donc un problème majeur de santé dans le monde entier (Cunningham & Berti, 1993).

Parmi les grands secteurs d'activités humaines, le transport et l'industrie sont plus à l'origine de la pollution de l'air. Les polluants provenant des gaz d'échappement des véhicules et des cheminées des industries de tailles variables sous l'influence du soleil, des précipitations, du vent et de la température sont susceptibles de polluer l'environnement et de polluer l'air (Garbisu & Alkorta, 2001 ; Atolaye *et al.*, 2007). Ces polluants constituent les causes majeures de la dégradation de la qualité de l'air (Han & Naeher, 2006 ; Assamoi & Liousse, 2010).

La surveillance de la qualité de l'air, comme celle de l'eau, est généralement assurée par des réseaux de capteurs physico-chimiques donnant des valeurs numériques (Garrec, 2007). Ces mesures antipollution fondamentale sont des limites liées entre autres au fait qu'il n'est pas possible d'associer facilement ces valeurs à des effets toxiques qui se manifesteraient sur des êtres vivants. Une alternative aux procédés physiques et chimiques consistera à avoir recours à des méthodes biologiques basées directement sur l'observation et les réactions d'organismes vivants exposés aux épisodes de pollution de l'air.

Les polluants de l'air pénètrent généralement dans les végétaux supérieurs par les stomates des feuilles et sont stockés au niveau des cuticules et des cires. Ces polluants de l'air causent un stress au niveau de la plante et par conséquent peuvent induire des changements morphologiques et physiologiques dans les feuilles (Rajput & Agrawal, 2005 ; Klumpp *et al.*, 2006) à travers les stomates qui assurent les échanges gazeux entre la plante et son environnement (Zarinkamar, 2007). En général, les plantes sont plus sensibles aux polluants que les humains et les animaux (Nali & Lorenzini, 2007). Les feuilles des plantes sont continuellement exposées à la pollution de l'air et peuvent ainsi intercepter une quantité variable de polluants et être utilisées comme bioindicateur (Bealey *et al.*, 2007).

Parmi les méthodes biologiques, la biosurveillance permet de définir non seulement la nature ou la répartition spatio-temporelle des polluants présents dans l'air, mais également leur dangerosité pour les êtres vivants (Villalobos-Pietrini *et al.*, 2007). La biosurveillance présente l'avantage de rendre compte de la biodisponibilité des polluants *in situ* (Forbes & Forbes, 1997), contrairement aux mesures physico-chimiques qui sont en plus coûteuses (Amiard *et al.*, 1998).

En Côte d'Ivoire, notamment dans le District Autonome d'Abidjan, l'accroissement du nombre de véhicules à moteurs usagers aurait engendré une production importante de

polluants de l'air dans les différentes classes d'utilisation du sol (AR, ZI, ZR et PJ). Ces polluants de l'air d'origine anthropique, composés de métaux lourds tels que le Mercure, le plomb, le Zinc, le Cadmium et le Chrome (Georgeaud *et al.*, 1997) et de particules en suspension (Bealey *et al.*, 2007) sont à l'origine de décès prématurés des êtres vivants (Gurjar *et al.*, 2010). Ces conséquences sanitaires de la pollution de l'air suscitent actuellement des inquiétudes dans les populations, surtout dans toutes les grandes villes, tant dans les pays en voie de développement que dans les pays industrialisés. Par conséquent, la mise en place de la biosurveillance à partir des plantes pour évaluer la qualité de l'air, permettra de révéler la présence de polluants dans l'atmosphère qui constituent un risque pour la santé humaine, animale et végétale (Morion, 1991 ; Gratani *et al.*, 2008). L'utilisation des plantes comme bio-indicateur de la pollution a été un succès dans plusieurs pays du monde, tels que les Etats-Unis d'Amérique, l'Allemagne, la Belgique, le Brésil (Wittig, 1993 ; Hijano *et al.*, 2005 ; Verma & Singh, 2006). La bio-indication de la pollution de l'air en Côte d'Ivoire dans les habitats a été effectuée avec les espèces telles que *Jatropha integerrima* (Jacq), *Barleria prionitis* (Linné), *Ficus religiosa* (Linné), (Barima *et al.*, 2014 ; N'Gouran *et al.*, 2014). La plupart de ces auteurs ont utilisé « l'Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation (ARIS) » des feuilles pour l'évaluation de la qualité de l'air. La bio-indication à partir des feuilles des plantes est connue dans les zones tempérées pour être une technique rapide, non destructive (Kardel *et al.*, 2011 ; Hofman *et al.*, 2014) et peu coûteuse. Ainsi, l'utilisation des feuilles de plantes pour l'évaluation et la surveillance de la qualité de l'habitat dans un milieu urbain, constitue un enjeu scientifique important.

A cet effet, dans cette étude, nous avons utilisé *Ficus benjamina* (Moraceae), une des espèces ornementales les plus répandues dans la ville d'Abidjan susceptibles d'intercepter une quantité variable de polluants. Dans cette étude nous vérifions l'hypothèse selon laquelle les activités humaines exercées dans une zone influencent la qualité de l'air de cet habitat (zone). Ainsi, les axes routiers et les zones industrielles seront potentiellement plus pollués que les parcs et les zones résidentielles.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel bio-indicateur de pollution de l'air des feuilles de *Ficus benjamina* L. Pour atteindre cet objectif, quatre objectifs spécifiques ont été définis :

(1) évaluer l'influence des classes d'utilisation du sol sur les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. ;

(2) mesurer les activités enzymatiques des feuilles de *Ficus benjamina* L. en fonction du niveau de pollution des classes d'utilisation du sol ;

(3) évaluer l'influence de la saison sur les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. ;

(4) évaluer l'influence de la distribution spatiale des particules fines sur les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. ;

Outre l'introduction, la conclusion, les perspectives et recommandations, le présent mémoire est structuré en trois (03) chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur le matériel, la zone d'étude et sur les notions de biosurveillance. Le deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés pour acquérir et traiter les données. Le troisième chapitre présente les résultats analysés et discutés.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE MATERIEL, LA ZONE D'ETUDE ET SUR LES NOTIONS DE BIOSURVEILLANCE

1.1-Zone d'étude

La ville d'Abidjan et ses environs (District Autonome d'Abidjan) dans lesquels cette étude a été réalisée, sont situés au Sud de la Côte d'Ivoire, en bordure de l'Océan Atlantique, dans le golfe de Guinée. Le DAA comporte Abidjan la capitale économique de la Côte d'Ivoire et regroupe la majeure partie des activités industrielles et administratives du pays (Ahoussi *et al.*, 2013). Le DAA a été créé par la loi N°2001-478 du 09 Août 2001 pour gérer l'aménagement du territoire, la gestion des déchets et les grands projets de développement qui prennent en compte l'agglomération d'Abidjan dans son ensemble (Kassoum, 2013).

1.1-1- Situation géographique du District Autonome d'Abidjan

Le District Autonome d'Abidjan (DAA) est situé au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°00' et 5°30' N et les longitudes 3°50' et 4°10' W. Il est constitué aujourd'hui de treize (13) communes dont Abobo, Yopougon, Cocody, Adjamé, Plateau, Treichville, Marcory, Koumassi, Attécoubé, Port-Bouët, Bingerville, Songon et Anyama et s'étend sur une superficie de 57 735 hectares dont 8 981 hectares de lagune, soit 16 (%) de la superficie totale (Tohourri *et al.*, 2017). Des coordonnées géographiques ont été prises (N'Gouran *et al.*, 2014) sur les axes routiers, dans les zones résidentielles, dans les zones industrielles, dans les parcs à bois et jardin botaniques (Figure 1).

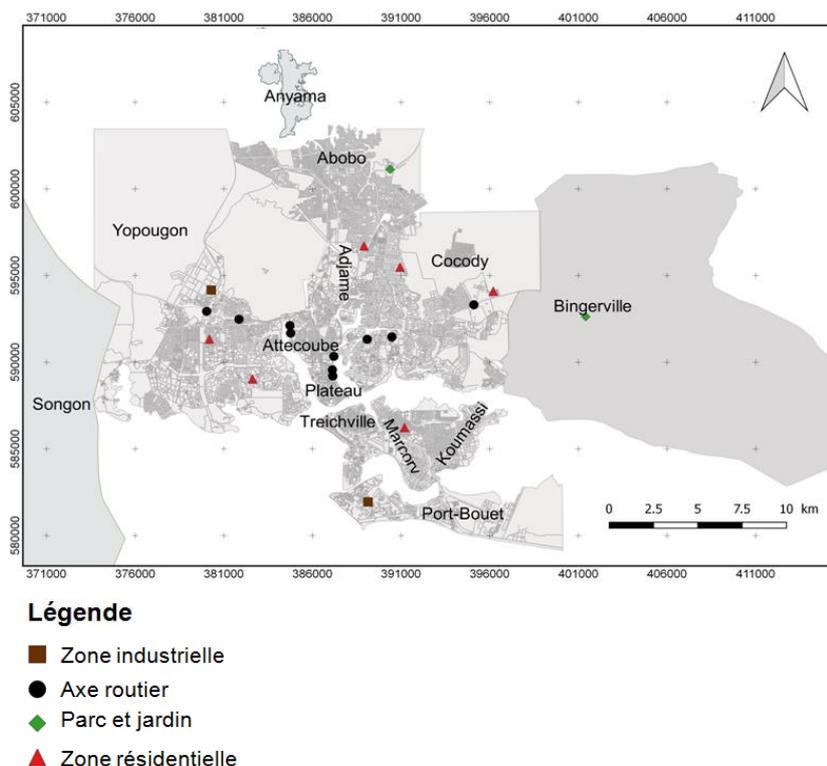


Figure 1 : Plan d'échantillonnage des différentes classes d'utilisation du sol (N'Gouran *et al.*, 2014 modifiée par Koffi)

1.1-2-Climat

Le District Autonome d'Abidjan (DAA) est soumis à un climat équatorial de transition qui se divise en quatre (4) saisons (Figure 2) dont deux pluvieuses et deux sèches (Tapsoba, 1995). Une grande saison sèche qui s'étend de décembre à mars suivi de la grande saison des pluies d'avril à juillet dont le pic est atteint en juin avec 419,6 mm. Une petite saison sèche en août suivi de la petite saison des pluies de septembre à novembre. Les précipitations moyennes mensuelles varient entre 20 et 419,6 mm de pluie.

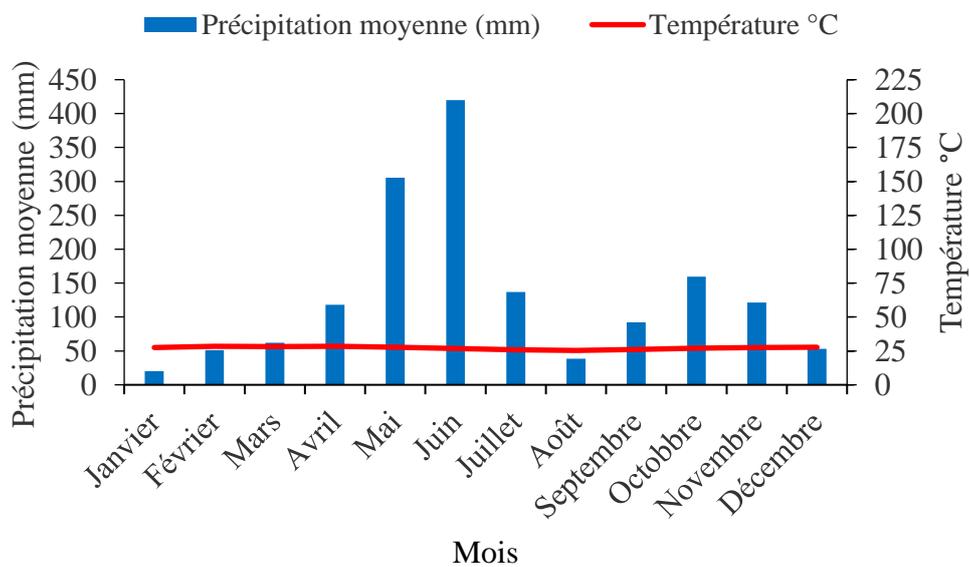


Figure 2 : Diagramme Ombrothermique de la ville d'Abidjan de 1988 à 2017 (Source de données : www.Tutiempo.net).

1.1-3-Sol

Le sol du District Autonome d'Abidjan, dans sa grande majorité, est de type sablo-argileux (Delor *et al.*, 1992). Selon Tastet (1979), le District Autonome d'Abidjan appartient au bassin sédimentaire côtier ivoirien. Ce bassin d'âge du Crétacé Quaternaire présente d'énormes potentialités en eaux souterraines (Jourda, 1987). Au Nord du District Autonome d'Abidjan, les terrains géologiques sont constitués des sédiments du Tertiaire représentés par les sables, les argiles et les grès ferrugineux. Les vases et les sables lessivés sont rencontrés vers les bordures lagunaires. Au Sud du District Autonome d'Abidjan, les sédiments du Quaternaire sont constitués de sables des cordons marins, de sables, d'argiles et de grès ferrugineux, avec des vases et des sables lessivés.

La transformation de ces roches a donné des sols ferrallitiques fortement dessaturés et présentant un horizon humifère peu épais. L'ensemble des sols remaniés (horizon gravillonnaire ou granuleux épais) occupe les modelés plus ou moins ondulés issus des granites, des schistes et des roches basiques (Ambé, 2001).

Les sols hydromorphes constituent l'élément pédologique important du District Autonome d'Abidjan. Cette hydromorphie a été provoquée par une évolution pédologique dominée par un excès d'eau. Les sols récents et peu évolués, bien que spatialement plus réduits que les deux autres, se sont développés dans le secteur littoral, en présentant un faciès assez grossier où dominent les éléments sableux (Guillaumet & Adjanohoun, 1971).

Les caractéristiques des sols revêtent d'une importance considérable pour le temps de transfert des polluants depuis la surface du sol vers les eaux souterraines (Macary *et al.*, 2006). La nappe du continental terminal, principale réserve d'eau souterraine du District Autonome d'Abidjan est captée dans des aquifères à sables argileux. En effet, le continental terminal se caractérise par une stratification lenticulaire, des sables grossiers, des argiles bariolées, des grès ferrugineux (Aghui & Biémi, 1984).

1.1-4-Végétation

Le District Autonome d'Abidjan appartient au secteur ombrophile du Domaine Guinéen où la végétation est dominée par la forêt dense humide sempervirente (Guillaumet & Adjanohoun, 1971). Selon Mangenot (1955), cette forêt est caractérisée par la présence de deux espèces : *Turraeanthus africanus* (Welw. Ex. C.DC.) Pellegr (Meliaceae) et *Heisteria parvifolia* Sm (Olacaceae). La forêt est actuellement perturbée par des pressions anthropiques telles que l'urbanisation, l'exploitation forestière, les différents défrichements agricoles. De la forêt originale, il ne reste plus que quelques îlots de forêt dense (Guillaumet & Adjanohoun, 1971) sempervirente dont la plus importante est la forêt du Banco qui couvre une superficie de 3000 hectares. La forêt du Banco, désormais encerclée par la ville d'Abidjan et ses axes routiers, constitue toutefois le véritable moteur du District Autonome d'Abidjan, indispensable à l'équilibre environnemental de la région des lagunes. En outre, le DAA regorge d'une mosaïque de végétations dont des savanes côtières, des formations marécageuses, des fourrés, des forêts denses sempervirentes, des forêts secondaires, des forêts littorales et des plantations abandonnées (Gnagbo *et al.*, 2016).

Les mangroves (forêts sur sols hydromorphes à gley, salés, issus des alluvions soumises au régime des marées) sont assez réduites. La mangrove, pauvre en espèce, est interrompue par

des plages vaseuses couvertes de *Paspalum vaginatum* Sw. (Poaceae) et des touffes dressées d'*Acrostichum aureum* Linn. (Pteridaceae)

1.1-5- Activités économiques

A la fin de l'année 1975, la population d'Abidjan atteignait le million d'habitants. En 2006, le District d'Abidjan comptait 5 060 858 d'habitants. Le dernier recensement indique que la population du District Autonome d'Abidjan est estimée à 4 707 404 habitants en 2014, soit 20,8 (%) de la population totale du pays, faisant de la capitale économique de la Côte d'Ivoire, la ville la plus peuplée de l'Afrique de l'Ouest francophone (RGPH, 2014). Le DAA accueille beaucoup d'habitants à la recherche d'emplois. En outre, considéré comme le carrefour culturel ouest-africain, le DAA connaît une croissance soutenue caractérisée par une forte industrialisation et une urbanisation. Le DAA renferme aussi l'essentiel des usines et le Port Autonome d'Abidjan, le plus important port de la Côte d'Ivoire, représentant 40% du produit intérieur brut (PIB) du pays. Le DAA possède également dix (10) boulevards et deux (2) autoroutes et un important réseau de routes asphaltées reliant les communes entre elles et menant dans les autres villes du pays. La plupart des véhicules de transport du DAA ont des moteurs Diesel (Barima *et al.*, 2014). Le carburant de ces moteurs contient encore une quantité significative de soufre par rapport aux pays industrialisés (PNUE, 2006). En effet, la norme locale de pollution (5 000 ppm) est bien au-dessus de la norme de pollution dans l'Union Européenne qui est inférieure à 50 ppm (PNUE, 2006 ; Barima *et al.*, 2014).

1.2- Pollution de l'air

La pollution de l'air provient d'émissions de polluant varié d'origine naturelle et anthropique (Pacyna & Pacyna, 2001). La pollution de l'air se présente sous forme de dépôts directs ou indirects de poussières transportées par le vent puis déposés au sol.

1.2-1- Sources de pollution

1.2-1-1- Sources naturelles

Les émissions de polluants naturels dans l'atmosphère ont diverses origines, les embruns marins, les poussières minérales, les éruptions volcaniques et les végétaux (pollens) (Pacyna, 1986 ; Turner & Colbeck, 2008). Les polluants primaires sont émis directement dans l'atmosphère à partir de la source de pollution et de plus, ils conservent leurs formes chimiques. Ce sont : le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NOX), l'oxyde de carbone (CO), le plomb (Pb), les hydrocarbures non méthaniques (NMHC) ou composés organiques volatils

(COV) et les particules fines. Contrairement aux précédents polluants, les polluants secondaires tels que l'ozone (O₃) ne sont pas directement émis dans l'atmosphère, mais résultent de réactions photochimiques avec les polluants primaires (Masclat, 2005). Les particules secondaires sont formées dans l'atmosphère généralement sous l'effet des réactions chimiques avec des polluants gazeux. Les particules secondaires sont surtout présentes dans les matières fines (Spengler & Wilson, 1997). Le Tableau I présente les flux de quelques polluants dans l'environnement.

Tableau I : Flux de quelques polluants dans l'environnement (Tonneau, 2003)

Polluants	Flux naturels (t/an)
Mercure (Hg)	0,90
Cadmium (Cd)	4,50
Arsenic (As)	90
Plomb (Pb)	180
Nickel (Ni)	255
Cuivre (Cu)	375
Zinc (Zn)	540
Chrome (Cr)	810

t/an : taux par an

1.2-1-2- Sources anthropiques

Les principales sources anthropiques sont la combustion incomplète de carburant des véhicules motorisés ou à moteurs, l'utilisation de combustibles domestiques solides (charbon, lignite et biomasse), les activités industrielles (construction, secteur minier, cimenteries, fabrication de céramique et de briques, fonderie), l'érosion des chaussées sous l'effet de la circulation routière, l'abrasion des pneus et des freins ainsi que les travaux agricoles (Xu *et al.*, 2006 ; Zhang & Tao, 2009). Le tableau II présente les polluants de l'environnement dus aux activités anthropiques (Juste, 1990).

Tableau II : Quelques polluants de l'environnement dus aux activités anthropique (Juste, 1990)

Polluants	Flux anthropogéniques (t/an)
Mercure (Hg)	17,80
Cadmium (Cd)	43
Arsenic (As)	150
Nickel (Ni)	1134
Plomb (Pb)	3665
Zinc (Zn)	7467
Chrome (Cr)	7810
Cuivre (Cu)	9162

t/an : taux par an

1.2-2-Principaux polluants de l'air et pathologies

1.2-2-1- Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote (NO_x) proviennent essentiellement de procédés fonctionnant à haute température. Les principales sources d'émission de NO_x sont les véhicules et les industries (Fourn & Fayomi, 2006). L'oxyde d'azote est un agent oxydant, il donne par réaction avec l'air, de l'acide nitrique et des nitrates organiques. La valeur limite de concentration est de 500 mg/m³, si le flux horaire est supérieur à 25 kg/h (Fourn & Fayomi, 2006).

1.2-2-2- Dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre (SO₂) est un gaz incolore qui dégage une odeur semblable à celle d'allumettes consumées. Combiné à l'oxygène, il se transforme en anhydride sulfurique qui, conjugué à l'eau atmosphérique, forme un brouillard d'acide sulfurique. Le processus d'oxydation peut aussi entraîner la formation d'un aérosol d'acide sulfurique. Le dioxyde de soufre est le précurseur des sulfates, principaux composants des particules en suspension respirables dans l'atmosphère (Fourn & Fayomi, 2006).

Il est à l'origine de l'accroissement des pathologies respiratoires (toux, gêne respiratoire, bronchiolites, rhino-pharyngites, etc.). La valeur limite de concentration est de 300 mg/m³, si le flux horaire est supérieur à 25 kg/h (Fourn & Fayomi, 2006).

1.2-2-3- Particules fines en suspension

Les particules fines sont un mélange complexe de particules solides et liquides de composants organiques et inorganiques qui dérivent de diverses sources de pollution, telles que l'activité des industries lourdes et la circulation routière (Morawska & Zhang, 2002). Ces particules en suspension (notées PM qui vient de l'anglais Particule Matter) varient en termes de taille, de nombre, de surface, de composition chimique et de solubilité et d'origine (OMS, 2006 ; Pope *et al.*, 2006). L'augmentation de la pollution de l'air s'accompagne également d'une augmentation de 1 (%) des hospitalisations pour asthme et affections respiratoires obstructives chroniques chez les personnes âgées (Atkinson *et al.*, 2001) et d'une augmentation de 0,5 (%) des hospitalisations pour affections cardiovasculaires (Le Tertre *et al.*, 2002). Parmi ces particules, il faut distinguer les particules de taille, inférieures à 2,5 μm qui peuvent pénétrer dans les poumons et les particules ultrafines (moins de 0,1 μm), qui peuvent pénétrer dans les vaisseaux sanguins. Les particules fines sont aussi dangereuses au regard de la santé humaine en raison de leur aptitude à pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire et à y véhiculer des composés nocifs. L'exposition humaine à certaines particules fines, selon l'OMS, peut engendrer des affections telles que des réactions inflammatoires au niveau des poumons, des symptômes respiratoires, des affections du système cardio-vasculaire. Les particules les plus dangereuses pour la santé sont celles d'un diamètre de 2,5 μ ou moins. L'exposition au $\text{PM}_{2,5}$ peut entraîner l'hospitalisation et divers troubles graves de la santé, voire le décès prématuré. Les personnes souffrant d'asthme, d'une maladie cardiovasculaire ou respiratoire, ainsi que les enfants et les personnes âgées sont les plus sensibles aux effets des particules fines. La valeur limite de concentration est de 100 mg/m^3 , si le flux horaire est inférieur ou égal à 1 kg/h , et la valeur limite de concentration est de 40 mg/m^3 , si le flux horaire est supérieur à 1 kg/h (Brook *et al.*, 2010).

1.2-2-4-Ozone

L'ozone (O_3) est une forme d'oxygène présente naturellement dans la stratosphère. Il forme une couche "écran" protégeant l'homme et l'environnement des rayons ultraviolets et de leurs effets néfastes sur la santé (Wahid *et al.*, 2001). Cependant, l'ozone troposphérique est formé par une réaction chimique impliquant le dioxyde d'azote (NO_2) provenant du monoxyde d'azote (NO) directement rejeté par les automobiles, combiné à des composés organiques volatils (COV) provenant principalement des industries en présence de l'oxygène de l'air. En outre, la lumière est également essentielle pour la formation photochimique de l'ozone, car elle

sert à augmenter la concentration de radicaux libres qui participent à la réaction (Wahid *et al.*, 2001). L'ozone résulte de la transformation de polluants dits primaires qui proviennent des gaz d'échappements des automobiles, comme les oxydes d'azote et les composés organiques volatiles sous l'action du soleil. Il provoque des épisodes photochimiques ou pics d'ozone et contribue à l'effet de serre. A forte dose, l'ozone est à l'origine d'irritations respiratoires et oculaires (Zmirou *et al.*, 2000).

1.2-2-5- Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore, inodore et insipide produit par la combustion incomplète de toute matière organique, incluant les carburants fossiles (dérivés du pétrole), les déchets et le bois (Dumont, 1991 ; Donati *et al.*, 2005). Les principales sources anthropiques de monoxyde de carbone sont de loin le transport (véhicules diesels), mais aussi le secteur industriel et le chauffage au bois. Une fois dans l'atmosphère, il se transforme éventuellement en dioxyde de carbone (CO₂), un des plus importants gaz à effet de serre. En milieu urbain, on observe les concentrations maximales de CO aux heures de pointe de circulation automobile, à proximité des autoroutes et des grandes artères urbaines. Le monoxyde de carbone trouve ses principales sources dans les transports et l'industrie. La valeur limite de concentration est de 10 mg/ m³ (Dumont, 1991 ; Donati *et al.*, 2005).

1.2-3- Impacts sanitaires des principaux polluants de l'air

1.2-3-1- Impacts sanitaires des principaux polluants de l'air sur l'Homme

L'exposition humaine à certains éléments traces métalliques peut engendrer des affections sanitaires telles que les troubles gastro-intestinaux, les troubles du système nerveux, du foie, des poumons et des reins (GESAMP, 1988). Bien que la pollution de l'air concerne tout être vivant, les couches les plus vulnérables sont les enfants, les personnes âgées et les personnes prédisposées ou souffrant de maladies telles que l'asthme, l'emphysème ou les maux de cœur (Zmirou *et al.*, 2000). La pollution atmosphérique affecte principalement les systèmes respiratoires, circulatoires, olfactifs et optiques avec un accent particulier sur le système respiratoire, principale voie d'entrée des polluants dans l'organisme. Ces polluants sont responsables des irritations du nez et des yeux, des problèmes pulmonaires et respiratoires, maux de tête, fatigue et nausées (Sydbom *et al.*, 2001 ; Maricq, 2007). Le tableau III présente les effets de quelques polluants sur la santé humaine.

Tableau III : Effets de quelques polluants sur la santé humaine (Tonneau, 2003)

Polluants	Valeurs limites	Effets sur la santé
Arsenic (As)	1 mg/m ³	- Cancérogène et atteinte de différents organes (foie, système nerveux, peau)
Cadmium (Cd)	0,1 mg/m ³	- Potentiel toxique élevé - Dommages rénaux pour des expositions chroniques à faible dose - Oxydes, chlorures, sulfates et sulfures de Cd classés cancérogènes
Chrome (Cr)	1 mg/m ³	- Dommages du système respiratoire pour des expositions à long terme aux chromates - Composés avec Cr (VI) responsable d'eczéma ; Cr (VI) cancérogène - Chromate de Zn cancérogène
Cuivre (Cu)	1 mg/m ³	- Effets irritants par inhalation, allergie par contact - Lésion du foie par voie orale sur longue période
Mercure (Hg)	0,1 mg/m ³	- Tous les composés de Hg sont toxiques à faible dose - Cerveau et reins touchés - Intoxication chronique responsable de dommage irréversible sur le système nerveux central et périphérique - Sous la forme organique peut perturber le développement du fœtus
Nickel (Ni)	1 mg/m ³	- Allergies par contact avec la peau et présence dans la nourriture pour les personnes sensibles - Composés de Ni cancérogène du nez et des poumons
Plomb (Pb)	1 mg/m ³	- Anémie à forte dose - Perturbation du système nerveux et du fonctionnement des reins - Effet mutagène de l'acétate et du phosphate de Pb
Etain (Sn)	1 mg/m ³	- Effet irritatif à forte dose des yeux, du nez, des bronches
Zinc (Zn)	1 mg/m ³	- Chromate de Zn cancérogène

1.2-3-2- Impacts sanitaires des principaux polluants atmosphériques sur les animaux

Chez l'animal, l'inhalation de particules provoque une atteinte fonctionnelle qui repose sur l'induction d'une réaction inflammatoire au niveau de la trachée, des bronches et des alvéoles pulmonaires (Lewis *et al.*, 1989). Les effets écotoxiques potentiels des poussières ont été démontrés par la présence de nombreux adduits d'ADN dans les poumons de rongeurs exposés aux émissions de diesel (Wong *et al.*, 1986). Une étude faite sur des lièvres à proximité d'une autoroute en Prague-Brno (ex Tchécoslovaquie) a démontré que les poils de ces espèces

contiennent du plomb, du cuivre, du zinc (3 fois plus de plomb que de Cuivre et de Zinc) (Deletraz, 1998).

1.2-3-3- Impacts sanitaires des polluants atmosphériques sur les végétaux

A l'échelle macroscopique, les polluants inorganiques entraînent des effets néfastes sur les plantes. En premier lieu, la germination est fortement inhibée et le développement de la plantule est limité (Leitao *et al.*, 2003). A plus long terme, ces polluants diminuent l'accroissement de la biomasse végétale et entraînent l'apparition de nécroses au niveau des racines et des feuilles, ainsi que des chloroses foliaires (Pourrut *et al.*, 2008 ; Greaver *et al.*, 2012).

1.2-4- Effets généraux des polluants sur les plantes

1.2-4-1- Définition du stress oxydant

Le stress oxydatif ou stress oxydant se définit comme étant un déséquilibre de la balance oxydants-antioxydants en faveur des oxydants (Atamer *et al.*, 2008). Il se développe lorsque les radicaux libres des molécules oxydantes et les espèces réactives de l'oxygène (ERO) sont produits plus rapidement qu'ils ne peuvent être neutralisés par l'organisme. La terminologie de "stress oxydant" est généralement utilisée pour toute agression environnementale ayant pour conséquence une production accrue d'oxydants, molécules toxiques dérivées de l'oxygène. On parle de stress oxydant lorsque la formation d'ERO excède les capacités de défense du système antioxydant (Tremellen, 2008).

1.2-4-2- Facteurs du stress oxydant chez les plantes

Dans les cellules végétales, les chloroplastes, les mitochondries et les peroxysomes sont les principales sources génératrices des espèces réactives de l'oxygène (Hernandez *et al.*, 1995 ; Lamb & Dixon, 1997). Des composés à fort potentiel oxydant, sont produits constamment en situation physiologique au sein d'un organisme. Lorsqu'un déséquilibre intervient (par surproduction de composés pro-oxydants ou par déficit en substances antioxydantes), on parle de stress oxydatif ou stress oxydant (Favier, 2003).

Le stress oxydant, conséquence naturelle du métabolisme de l'oxygène, est normalement contrôlé par des systèmes endogènes de défense antioxydants. Les antioxydants cellulaires peuvent être enzymatiques ou non enzymatiques (Cho & Seo, 2005). Généralement, l'augmentation des activités des enzymes impliquées dans les réactions de défense semble être liée à l'espèce ou à la variété végétale utilisée, aux conditions physiologiques de la plante

utilisée, ou encore au type de stress oxydant appliqué. Les chaînes de transfert d'électrons au niveau de l'appareil photosynthétique sont également capables de produire une grande quantité des espèces réactives de l'oxygène (Parent *et al.*, 2008). Les espèces réactives de l'oxygène sont formées au cours du métabolisme normal de la plante et l'augmentation de leur concentration intracellulaire est souvent synonyme de stress. En effet, de nombreux stress (la sécheresse, la salinité, les chocs thermiques, l'attaque par un pathogène, les ultraviolets, les polluants atmosphériques ou encore les Eléments Traces Métalliques) sont capables d'induire une production accrue des espèces réactives de l'oxygène (Dat *et al.*, 2000 ; Van Breusegem & Dat, 2006). Si la contribution de la mitochondrie à la production des espèces réactives de l'oxygène lors de la réponse au stress est encore mal définie (Heyno *et al.*, 2008), dans la plupart des situations où les conditions environnementales sont modifiées, une forte augmentation des espèces réactives de l'oxygène est observée au niveau des chloroplastes et des péroxysomes (Dat *et al.*, 2000 ; Mittler, 2002 ; Laloi *et al.*, 2004 ; DalCorso *et al.*, 2008). Elles peuvent, en effet, agir comme molécules de la signalisation cellulaire pour mettre en place des mécanismes de défense vis-à-vis d'un stress, qu'il soit d'origine biotique ou abiotique (Dat *et al.*, 2000).

1.2-4-3- Espèces réactives de l'oxygène

Le terme espèces réactives de l'oxygène (ERO ou ROS) est un terme collectif décrivant à la fois les radicaux de l'oxygène (O_2^- , OH^\cdot , ROO^\cdot , RO^\cdot) et ses dérivés non radicalaires (H_2O_2 , $HOCl$, O_2 singulet, O_3). Les espèces réactives de l'oxygène sont des dérivés de l'oxygène où certains électrons se trouvent dans un état énergétique excité et très réactionnel. Elles représentent la plus importante classe d'espèces réactives générées dans les organismes vivants et la cause majeure du stress oxydatif (Valko *et al.*, 2007).

Dans une large gamme de stress chimiques provoqués par des xénobiotiques de cibles variées, les organismes photosynthétiques subissent souvent un stress oxydatif généralisé lié à une surproduction des espèces réactives de l'oxygène (Mittler *et al.*, 2004). Les espèces réactives de l'oxygène possèdent une configuration électronique spécifique très réactive générant des cascades de réactions d'oxydation de molécules biologiques. Les principales espèces réactives de l'oxygène sont l'anion superoxyde (O_2^-), l'oxygène singulet (1O_2), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle (OH^\cdot). Ces molécules sont naturellement et continuellement produites chez les plantes par différentes voies métaboliques, comme les processus liés à la respiration ou la photosynthèse et sont retrouvées au niveau des mitochondries, des chloroplastes, des peroxysomes, du réticulum endoplasmique et du cytoplasme (Dat *et al.*, 2000). Les espèces réactives de l'oxygène sont aussi à l'origine d'un

système de signalisation cellulaire, notamment en contexte de stress où leur rôle comme messager secondaire est clairement établi (Desikan *et al.*, 2001 ; Mittler *et al.*, 2011 ; Foyer & Noctor, 2013). Leur implication dans la régulation de l'expression génétique a aussi permis de démontrer leur rôle d'inducteur de la mort cellulaire programmée (Van Breusegem & Dat, 2006). En conditions de stress, notamment abiotiques, la surproduction des espèces réactives de l'oxygène aboutit à un stress oxydatif quand leur détoxification n'est pas performante ou inhibée. Les espèces réactives de l'oxygène sont constamment produites chez les organismes vivants au cours du métabolisme normal et en particulier au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale où 1 à 2 (%) de l'oxygène métabolisé est converti en ion superoxyde (Foyer & Noctor, 2005). Des sources exogènes telles que les radiations ionisantes et les polluants peuvent également générer ces espèces réactives de l'oxygène et imposer un stress oxydant supplémentaire aux systèmes biologiques. Elles peuvent causer des dommages oxygènes permanents ou transitoires (Favier, 2003).

1.2-5- Antioxydants

Un antioxydant est défini comme une substance qui, ajoutée à faible dose à un produit naturellement oxydable à l'air, est capable de ralentir ou d'inhiber le phénomène d'oxydation. Le terme "antioxydant" englobe ainsi toutes les substances qui protègent les systèmes biologiques contre les effets délétères potentiels des processus ou réactions qui engendrent une oxydation excessive (Shimizu, 2004).

Les plantes possèdent des mécanismes leur permettant de limiter la production des espèces réactives de l'oxygène lors de leurs processus métaboliques. Elles sont dotées d'un arsenal d'enzymes et de métabolites antioxydants suffisants pour faire face aux espèces réactives de l'oxygène. La tolérance des plantes aux facteurs environnementaux qui provoquent un stress oxydatif est assurée par l'augmentation du niveau de différents antioxydants dans la plante (Mittler, 2002). Les plantes possèdent également de nombreux composés et enzymes leur permettant d'empêcher la production des espèces réactives de l'oxygène ou de la contrôler. En effet, les stress induits par les métaux lourds, la sécheresse, la salinité, les chocs thermiques, les polluants atmosphériques sont responsables d'une production accrue des espèces réactives de l'oxygène dans les plantes (Dat *et al.*, 2000 ; Van Breusegem & Dat, 2006).

1.2-5-1- Antioxydants non enzymatiques

Les molécules antioxydantes non enzymatiques agissent par réduction ou piégeage de radicaux. Elles renforcent les actions des enzymes antioxydantes (Deneke & Fanburg, 1989).

Ainsi, l'acide lipoiqne est un réducteur puissant du glutathion (GSH) et des radicaux peroxydes. Le glutathion neutralise les espèces réactives de l'oxygène comme les radicaux hydroxyles et réduit le peroxyde d'hydrogène et les lipoperoxydes (Munday & Winterburn, 1989 ; Deleve & Kaplowitz, 1991) et inactive l'oxygène singulet à pH 7 (Cadenas, 1989).

1.2-5-1-1- Ascorbate

L'acide ascorbique (ou vitamine C) au niveau du cytoplasme est hydrosoluble, il réduit l'anion superoxyde, le radical hydroxyle et de nombreux hydroperoxydes lipidiques (Koechlin-Ramonatxo, 2006). L'acide L- ascorbique (ASC) est l'un des principaux acides faibles de la cellule végétale (Potters *et al.*, 2002).

L'ascorbate est essentiellement utilisé au niveau cellulaire comme un donneur d'électrons. Il interviendrait notamment dans la régulation du cycle cellulaire et dans l'extension de la paroi (Horemans *et al.*, 2000). L'ascorbate est toutefois plus connu pour ses propriétés antioxydantes (Horemans *et al.*, 2000 ; Potters *et al.*, 2002 ; Pignocchi & Foyer, 2003).

En effet, il réagit rapidement avec l'anion superoxyde et l'oxygène singulet, ou encore avec le peroxyde d'hydrogène, mais cette dernière réaction est catalysée par l'ascorbate peroxydase (Foyer & Noctor, 2005). L'ascorbate est indispensable pour sa capacité à réduire d'autres antioxydants oxydés comme la vitamine E ou les caroténoïdes (Asada, 1994).

1.2-5-1-2- Glutathion

Le glutathion (GSH) est le thiol le plus abondant dans les organismes et les systèmes vivants. Il est antioxydant par son caractère nucléophile et radicalaire (Baudin, 2006). L'oxydation du glutathion entraîne la formation d'un pont disulfure entre les cystéines de deux glutathions (forme réduit et forme oxydé). En conditions non stressantes, les cellules maintiennent un ratio du glutathion forme réduit et du glutathion forme oxydé très important, supérieur à 100 dans le cytosol et la mitochondrie (May *et al.*, 1998). La concentration en GSH est très importante dans les cellules végétales, et en particulier dans les chloroplastes où elle peut atteindre 5 mM (Noctor & Foyer 1998). Le glutathion joue de nombreux rôles physiologiques chez les végétaux (May *et al.*, 1998 ; Noctor & Foyer 1998). Il représente une forme importante de stockage de sulfure réduit, et participe à l'allocation en sulfure des différents compartiments cellulaires et des différents organes (Herschbach & Rennenberg, 1991 ; Lappartient & Touraine, 1996). C'est également un régulateur de l'expression génique

(Wingate *et al.*, 1988) et le précurseur des phytochélatines (PC) jouant un rôle prédominant dans la séquestration des métaux chez les végétaux (Grill *et al.*, 1989 ; Clemens, 2006).

1.2-5-1-3- Vitamine E

La vitamine E (dont l' α -tocophérol) est un lipophile, considérée comme étant le plus important chez les animaux, les humains et les plantes (Van Eenennaam *et al.*, 2003).

Toutefois, l' α -tocophérol est un piègeur d'oxygène singulet et de radical hydroxyle (Krieger-Liszkay & Trebst, 2006). La vitamine E protège les membranes contre la lipoperoxydation en cédant un atome d'hydrogène aux espèces radicalaires (Byczkowski & Gessner, 1988 ; Cadenas, 1989). Elle est régénérée par la vitamine C. Elle protège également les pigments photosynthétiques, participant ainsi à la protection de l'appareil photosynthétique (Fryer, 1992).

1.2-5-1-4- Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments végétaux lipophiles formant une famille de plus de 600 molécules. Ils jouent le rôle de pigments accessoires de l'antenne collectrice des photosystèmes (El Mannoubi *et al.*, 2010). En dehors de cette implication dans le processus photosynthétique, les caroténoïdes associés à l'antenne collectrice, participent à la protection de l'appareil photosynthétique contre les espèces réactives de l'oxygène (Asada, 1994 ; Miller *et al.*, 1996).

En effet, ces pigments possèdent la capacité de capter l'énergie de la chlorophylle triplet ou de l'oxygène singulet (Telfer *et al.*, 1994 ; Mozzo *et al.*, 2008). La capacité de transfert d'énergie des caroténoïdes vers le dioxygène étant faible, ces pigments retrouvent leurs états initiaux en perdant leurs énergies sous forme de chaleur. Le mécanisme de captage/perte d'énergie par la chaleur peut également s'effectuer à partir de la chlorophylle singulet (Demmig-Adams & Adams, 1996).

1.2-5-2- Antioxydants enzymatiques

Les cellules végétales possèdent de nombreuses voies de dégradation enzymatique des espèces réactives de l'oxygène. Les molécules antioxydantes enzymatiques sont des superoxydes dismutases (SOD) présentes au niveau des chloroplastes, du cytoplasme et des mitochondries. Elles constituent les premières lignes de défense cellulaire contre les radicaux oxygènes (Alscher *et al.*, 1997). Elles catalysent la réaction de dismutation du radical superoxyde. Les peroxydases catalysent la réduction chimique d'une grande variété de

peroxydes à l'aide d'un substrat (l'ascorbate peroxydase). Les catalases, possédant un groupement hème (fer), catalysent la réduction du peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène. Elles possèdent également une activité peroxydase (le peroxyde d'hydrogène) qui réagit avec le fer du site actif de l'enzyme pour former un composé non réactif (Chance *et al.*, 1979). Ces enzymes sont toutes des métalloprotéines et agissent de façon coordonnée.

1.2-5-2-1- Superoxyde dismutases

Les superoxydes dismutases (EC 1.15.1.1) sont des métallo-enzymes se retrouvant dans l'ensemble du monde du vivant, mis à part dans quelques microorganismes (Alscher *et al.*, 2002). Les plantes possèdent trois types de Superoxyde dismutases (SOD) contenant des groupements prosthétiques renfermant des métaux différents (fer (FeSOD), du manganèse (MnSOD) ou du cuivre et du zinc (CuZnSOD)). L'activité du superoxydes dismutases augmente dans des conditions qui favorisent le stress oxydatif (Smirnoff, 1995).

La dismutation des anions superoxydes doit néanmoins être couplée à des réactions qui éliminent spécifiquement le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂). Du fait de leur localisation subcellulaire (peroxysomes), les catalases ne sont cependant pas les enzymes les plus importantes dans le contexte d'élimination du superoxyde mitochondrial (Halliwell, 2006). Le superoxydes dismutases convertit le superoxyde en peroxyde d'hydrogène et oxygène moléculaire selon la réaction suivante (Matès *et al.*, 1999 ; Matès, 2000) :



1.2-5-2-2- Catalases

La catalase (EC 1.11.1.6) est une enzyme majoritairement peroxysomale catalysant la dismutation du peroxyde d'hydrogène (Arora *et al.*, 2002). Elle est formée de quatre chaînes polypeptidiques d'environ 500 acides aminés, comportant chacune un groupe hémique comprenant un atome de fer. L'activité de la catalase augmente lors du stress oxydatifs (Smirnoff, 1995 ; Feierabend, 2005). L'affinité de la catalase pour le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) montre que ces enzymes sont impliquées dans l'élimination des espèces réactives d'oxygènes dans un contexte de stress oxydatif (Mittler, 2002 ; Feierabend, 2005). La catalase n'est efficace que lorsque la concentration en peroxyde d'hydrogène est élevée. La catalase réagit très efficacement avec le peroxyde d'hydrogène, pour former de l'eau et de l'oxygène

moléculaire et avec les donneurs d'hydrogène (méthanol, éthanol, acide formique ou phénol) (Matès *et al.*, 1999 ; Matès, 2000) selon les équations ci-dessous :



1.2-5-2-3- Ascorbate peroxydase

L'ascorbate peroxydase (APX) est une enzyme présente chez les plantes, les algues et certaines cyanobactéries (Raven, 2003). Parmi les différentes peroxydases qui inactivent le H_2O_2 , l'ascorbate peroxydase occupe une place importante (Halliwell, 2006).

L'ascorbate peroxydase est surtout présente dans les chloroplastes et le cytosol. Elle élimine le peroxyde d'hydrogène en utilisant l'ascorbate (vitamine C) comme co-substrat et en l'oxydant (Halliwell, 2006). En plus du site de liaison pour l'ascorbate, elle possède un second site de liaison potentiel pour les composés phénoliques (Mittler & Poulos, 2005).

1.3- *Ficus benjamina* Linné (Moraceae)

1.3-1-Origine de *Ficus benjamina*

Cet arbuste décorateur à port pleureur est originaire de l'Inde et de Malaisie (Aeini *et al.*, 2014). Le figuier pleureur est dans sa contrée natale un arbre, avec un tronc très épais ou de multiples troncs soudés entre eux ainsi que de nombreuses racines aériennes. Il est devenu une plante d'appartement parce qu'il supporte l'air sec, mais en milieu chaud et humide, il développe de longues racines aériennes qui, une fois en contact avec le sol, forment de nouveaux troncs excentrés. Ceux-ci permettent à l'arbre de s'élargir sur une grande surface. En climat plus sec, *Ficus benjamina* montre un tronc simple et lignifié, portant un branchage densément ramifié (Pérez-Arévalo & Velázquez-Martí, 2018). Ses branches fines ploient sous le poids du feuillage dense.

1.3-2-Description botanique de *Ficus benjamina*

L'espèce *Ficus benjamina* Linné (Moraceae) ou Fiquier Pleureur appartient aux genres *Ficus*. Dans sa région natale ou ce figuier peut atteindre 30 mètres de hauteur (Dweck & Meadows, 2002). Les feuilles de *Ficus benjamina* sont alternées, ovales, transversalement striée, lisse sur les bords, pétiolées avec des rameaux foibles. Elles ont des nervures pennées

terminées en pointe allongée (Figure 3). La feuille de *Ficus benjamina* présente une structure bifaciale du limbe. Certaines espèces sont dites monoïques (une plante possédant des fleurs mâles et des fleurs femelles sur le même pied), d'autres sont dioïques (une plante possédant des fleurs mâles et des fleurs femelles portées par des pieds différents).

Une cuticule et un épiderme sont présents sur la face adaxiale. Sous l'épiderme, le mésophylle est subdivisé en 2 parties, une couche constituée de cellules longues et bien alignées (le parenchyme palissadique) et une deuxième couche constituée de cellules plus petites et moins bien organisées (Arriaga *et al.*, 2014). Le côté abaxial, contrairement à l'adaxial, est caractérisé par la présence de stomates. La cuticule abaxiale est lisse et cireuse (Klimko & Truchan, 2006). Des études révèlent aussi la présence de plusieurs composés chimiques dans la feuille tels que l'acide ascorbique (Khan *et al.*, 1993), les flavonoïdes (Ilyas & Ilyas 1990), les alcaloïdes (Baumgartner *et al.*, 1990), etc.

Les feuilles sont vert vif lorsqu'elles sont jeunes, puis vert sombre au limbe luisant. Les fleurs se développent à l'intérieur de figes. Le figuier pleureur existe sous forme verte ou panaché, à feuilles ondulées ou planes, à petites feuilles, etc. (Mathieu *et al.*, 1999). Ses fleurs se développent à l'intérieur des jeunes figes (sycone). Chez les espèces de *Ficus* où les plants mâles et femelles sont distincts (dioécie), la pollinisation et la fécondation des fleurs femelles est assurée par une minuscule guêpe (Agaonidae). Le figuier et le pollinisateur sont totalement dépendantes l'une de l'autre pour se reproduire. On peut parler de mutualisme entre ces deux espèces.



Figure 3 : Rameau feuillé et fructière de *Ficus benjamina*

1.3-3- Position systématique de *Ficus benjamina*

La nomenclature de *Ficus benjamina* proposée par Cronquist (1981) se présente comme suit :

Règne	: Végétal
Embranchement	: Spermaphytes
Sous-embranchement	: Angiospermes
Classe	: Dicotylédone
Ordre	: Urticales
Famille	: Moraceae
Genre	: <i>Ficus</i>
Espèce	: <i>Ficus benjamina</i> Linn.
Synonyme	: Figuier pleureur

1.3-4- Importance de *Ficus benjamina*

Ficus benjamina lutte efficacement contre l'ammoniac, le formaldéhyde, le xylène et le toluène. Elles transforment les molécules toxiques contenues dans l'air en nutriment ou elles les stockent dans leurs tissus (Reyes *et al.*, 2012). Les polluants de l'air sont absorbés par les feuilles, les tiges et le tronc grâce à des stomates qui régulent la respiration de la plante, ils sont ensuite transformés en nutriment par des micro-organismes vivants dans les racines. Parallèlement la plante émet de la vapeur d'eau par un processus de transpiration. S'adaptant facilement à des milieux très divers (Held & Boyd, 2008). *Ficus* est une plante facile à entretenir. Pour se développer convenablement, il réclame une lumière vive, sans soleil direct et une température modérée avec un arrosage régulier. Il est traditionnellement utilisé comme un stomachique, un hypotenseur et un anti-dysentérique (Eshwarappa *et al.*, 2015).

1.4- Biosurveillance

1.4-1- Définition de la biosurveillance

La biosurveillance (active et passive) se définit comme l'utilisation d'organismes vivants pour avoir des informations sur des aspects quantitatifs de la qualité de l'environnement. Différentes approches de biosurveillance telles que les bio-marqueurs, les bio-intégrateurs, les

bio-indicateurs et les bio-accumulateurs peuvent être distinguées selon les objectifs à atteindre (Market, 2007).

1.4-1-1- Biosurveillance active

La biosurveillance active est une technique expérimentale où les organismes utilisés pour l'étude sont transférés d'un environnement non pollué (milieu dit « sain ») vers un site pollué ou suspecté de l'être (Wuytack *et al.*, 2010). La biosurveillance active est généralement utilisée pour connaître le niveau de pollution d'un milieu, ainsi que la répartition des contaminants dans une ou plusieurs régions (Rzepka & Cuny, 2009 ; Tilghman *et al.*, 2009). Cette méthode est utilisée pour pallier aux problèmes d'absence d'espèces utilisables dans la zone d'étude, à la mauvaise répartition d'une espèce qui ne permet pas un échantillonnage représentatif de la zone d'étude. L'avantage principal de la transplantation est qu'il permet un total contrôle du temps d'exposition (Tilghman *et al.*, 2009).

1.4-1-2- Biosurveillance passive

La biosurveillance passive est utilisée pour l'observation sur le long terme d'une évolution des concentrations de polluants dans une zone définie (Tilghman *et al.*, 2009). Dans ce cas de figure, les végétaux poussant naturellement sur les zones d'investigation sont utilisés. La biosurveillance a l'avantage de pouvoir suivre l'évolution de la pollution sur une période donnée dans des conditions stationnelles (climat, température, etc.) et des facteurs propres au végétal (variabilité génétique). L'inconvénient majeur de cette approche reste le choix limité des sites, des espèces et de leur environnement (Garrec & Van Haluwyn, 2002).

1.4-2- Différentes approches de la biosurveillance

1.4-2-1- Biosurveillance par des bio-marqueurs

Un bio-marqueur est un paramètre biologique observable qui permet d'obtenir des informations quant au degré d'exposition présent ou passé (Stagg, 1998 ; Key *et al.*, 2006). Il peut s'agir de paramètres génétiques, enzymatiques, physiologiques, morphologiques, moléculaires, cellulaires, biochimiques, etc. (Kaiser, 2001 ; Markert *et al.*, 2003). Dans certains cas, les altérations provoquées par les polluants sur ces paramètres biologiques peuvent engendrer des changements au niveau comportemental chez les organismes et c'est pourquoi ces changements sont alors considérés comme un type particulier de bio-marqueurs (Kaiser, 2001). Par conséquent, un bio-marqueur peut permettre de détecter les pressions

environnementales dans un milieu donné avant même que les effets néfastes se fassent sentir au niveau des organismes (Den Besten *et al.*, 2001).

1.4-2-1-1-Bio-marqueur d'exposition

Un bio-marqueur d'exposition est un indicateur de la contamination des systèmes biologiques par un ou des xénobiotique(s). Ils peuvent être le résultat de l'interaction du polluant avec des molécules biologiques dans des tissus et/ou dans des liquides corporels (Cuzick *et al.*, 1990).

Un bio-marqueur d'exposition peut également prendre la forme d'activités ou de quantités anormales d'enzymes (telles que celles impliquées dans les activités de biotransformation). En effet, certaines enzymes sont capables d'être induites ou activées par les polluants. Cette induction peut revêtir un caractère plus ou moins spécifique d'un type de polluant donné (Savela & Hemminki, 1991).

1.4-2-1-2-Bio-marqueur d'effet

Un bio-marqueur d'effet se distingue d'un bio-marqueur d'exposition car les dommages biologiques engendrés par le polluant chimique ou physique sont irréversibles. Un bio-marqueur d'effet correspond à une altération biologique. En fonction de l'intensité de la réponse, le bio-marqueur peut être associé à une altération possible de l'état physiologique de l'individu, comme des effets sur la croissance ou sur le succès reproducteur (Dallinger-Marianne *et al.*, 2000). Il révèle l'action des contaminants par la mesure de paramètres biologiques. Ces derniers sont très nombreux et variés suivant le niveau biologique considéré (biochimique, cellulaire, physiologique, etc.). Contrairement aux biomarqueurs d'exposition, ces biomarqueurs ne sont pas spécifiques d'un polluant, mais intègrent plutôt tous les types de toxicités complexes (Amiard & Amiard-Triquet, 2008).

1.4-2-1-3- Bio-marqueur de susceptibilité

Un bio-marqueur de susceptibilité n'est pas fondamentalement un marqueur de l'exposition ou de la toxicité, mais il dépend de la sensibilité induite par des facteurs extrinsèques (polluants chimiques, physiques et infections parasitaires) ainsi que par des facteurs intrinsèques héréditaires ou acquis lors d'exposition(s) durant le développement (Payne *et al.*, 1996 ; Flammarion *et al.*, 2001). Cette sensibilité peut affecter le métabolisme, les systèmes de sauvegarde et de réparation de l'ADN. Ainsi, une population peut être plus ou

moins sensible à une exposition par son polymorphisme génétique. La version allélique peut déterminer ou non la possibilité d'adduit à l'ADN en présence d'un polluant (Rojas *et al.*, 2000).

1.4-2-2-Bio-intégrateur

Un bio-intégrateur se situe au niveau de la variation de la densité dans des populations ou des écosystèmes. Autour de certaines sources de pollution atmosphérique, il est parfois difficile de mettre en évidence des polluants à partir de leurs seuls effets morphologiques ou tissulaires, voire même de leur accumulation. Les modifications biologiques provoquées par des polluants peu concentrés se distinguent difficilement des fluctuations naturelles. Il est donc important de mesurer les effets au niveau des communautés, de manière à infirmer ou à confirmer les observations faites au niveau des individus. Pour ce type d'étude, on pourra utiliser les végétaux supérieurs, les bryophytes et les lichens (Garrec & Van Haluwyn, 2002).

1.4-2-3- Bio-accumulateur

Un bio-accumulateur est un organisme ayant la capacité d'accumuler certains contaminants présents dans l'environnement (Kaiser, 2001). Selon Ramade (1993), la bio-accumulation est un phénomène par lequel une substance, présente dans un biotope, s'accumule en surface et pénètre dans un organisme.

Le concept de bio-accumulateur se distingue totalement des deux précédents en ce sens que ce n'est pas un indicateur de réaction. Dans ce cas, l'organisme utilisé sert principalement de matrice pour le dosage de différents polluants suite à des mécanismes de transfert et d'accumulation de polluants (Ramade, 1993).

1.4-2-4-Bio-indicateur

Un bio-indicateur est défini comme un simple relais ne faisant référence qu'à des effets observables au niveau de l'individu se traduisant par des altérations morphologiques, tissulaires ou physiologiques. Le bio-indicateur est utilisé à la fois en approches passive et active (Garrec & Van Haluwyn, 2002).

Les bio-indicateurs sont de deux (2) types : les bio-indicateurs de dommage et les bio-indicateurs d'effet :

- Les bio-indicateurs de dommage sont des organismes (ou parties d'organisme) qui développent une réponse, spécifique ou non, à la suite d'une exposition à un contaminant (Markert *et al.*, 2003). Les bio-indicateurs de dommage répondent assez rapidement à un stress, de façon observable ou mesurable

(Kaiser, 2001). Ils doivent pour cela posséder une résistance peu élevée au stress (Markert *et al.*, 2003).

Chez les végétaux bio-indicateurs particulièrement sensibles, les perturbations dues aux pollutions atmosphériques vont se traduire rapidement par des nécroses foliaires, ainsi que par des modifications morphologiques (Garrec & Van Haluwyn, 2002).

- Les bio-indicateurs d'effet sont des organismes (ou parties d'organisme) qui accumulent des substances provenant de leur environnement (Markert *et al.*, 2003). Ils possèdent une résistance élevée et sont capables d'assimiler des substances polluantes pendant un laps de temps sans dommage (Kaiser, 2001 ; Markert *et al.*, 2003).

1.5- Indicateurs de pollution chez les plantes

1.5-1- Stomates

Localisés dans les feuilles, les stomates sont des structures (cellules de garde) spécialisées, formant des pores au sein de l'épiderme (Figure 4) des organes aériens de tous les végétaux où ils assurent les échanges gazeux entre la plante et son environnement (Croxdale, 2000). Ces pores microscopiques situés sur les feuilles permettent l'entrée de CO₂ nécessaire à la photosynthèse et l'évaporation d'environ 95 (%) de la majeure partie de l'eau absorbée par la plante (Casson & Hetherington, 2010). Ce mécanisme est indispensable à la montée de la sève et au transport des solutés depuis les racines. Les cellules de garde possèdent une paroi interne épaisse et un réseau de microfibrilles de cellulose à orientation radiale. Ces propriétés structurales permettent aux stomates de se gonfler et se déformer en réponse à un changement de turgescence (Franks *et al.*, 2001). D'une manière générale, les Dicotylédones sont majoritairement hypostomes ou amphistomes avec une majorité de stomates sur la face abaxiale et les Monocotylédones majoritairement amphistomes (Kelly & Beerling, 1995).

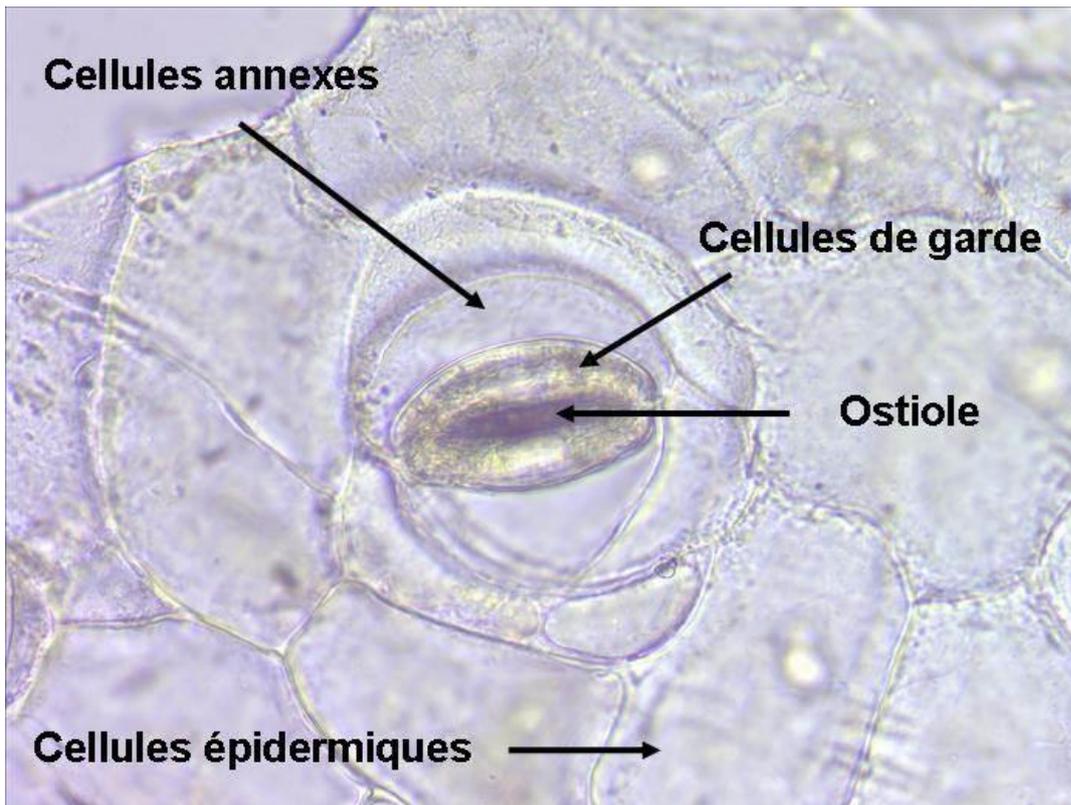


Figure 4 : Coupe transversale de la feuille montrant un stomate (Reyes *et al.*, 2012 modifiée par Koffi)

1.5-2- Ouverture et fermeture des stomates

Les changements morphologiques des cellules de garde induisent l'ouverture et la fermeture des stomates. Les stomates sont présents soit sur les deux faces (feuilles amphistomes) comme chez *Acacia mangium* Willd. (Fabaceae) avec une densité plus élevée sur la face abaxiale (face inférieure) ou sur une seule face (feuilles hypostomes) comme chez *Duranta repens* L. (Verbenaceae) et *Baleria prionitis* L. (Acanthaceae). L'ensemble des stomates forme une surface alvéolée d'espaces remplis d'air qui peut constituer entre 15 et 40 (%) de la surface foliaire totale (Tardieu, 2003).

L'ouverture des stomates est provoquée par la force motrice liée à l'augmentation du volume des cellules de garde et la pression de turgescence causée par une entrée d'eau. Ces flux d'eau suivent généralement l'accumulation d'ions Potassium (K^+) provoquée par une hyperpolarisation de la membrane plasmique, suite à l'activation d'une pompe à proton (Outlaw & Manchester, 1979). L'ouverture stomatique est ensuite maintenue par l'accumulation de sucres issus de la photosynthèse des chloroplastes des cellules de garde. La fermeture stomatique est le processus inverse de celui décrit ci-dessus, impliquant en plus le calcium

(Ca²⁺), c'est-à-dire avec une perte en solutés au sein des cellules de garde (Figure 5). L'eau va alors sortir des cellules de garde, ce qui cause une perte de turgescence entraînant la fermeture des cellules stomatiques.

Plusieurs facteurs comme l'acide abscissique (ABA) ou une hausse de concentration en CO₂ peuvent stimuler l'absorption de l'ion calcium (Ca²⁺) ce qui entraîne une dépolarisation de la membrane puis une sortie d'ions Cl⁻ et malate²⁻ et enfin une diffusion passive des ions potassium (Lawson, 2009). La fermeture des stomates correspond à un mécanisme signalétique intervenant dans les premières minutes d'un déficit hydrique. Il s'agit de l'un des principaux moyens mis en place par la plante pour éviter les pertes excessives en eau (Wasilewska *et al.*, 2008). La fermeture des stomates permet une diminution de la perte en eau mais elle provoque également une diminution de l'apport en CO₂ destiné à la photosynthèse (Lawlor & Cornic, 2002). Les mouvements stomatiques sont affectés par un certain nombre de facteurs environnementaux tels que le CO₂, la lumière et la température (Vatèn & Bergman, 2012). Généralement une augmentation de la concentration de CO₂ induit une fermeture stomatique. Les stomates s'ouvrent en présence de lumière et se ferment dans l'obscurité.

L'ouverture ou la fermeture des stomates est très finement régulée dans la plante par des facteurs environnementaux tels que la lumière, la concentration de dioxyde de carbone ou la disponibilité de l'eau (Tyree & Alexander, 1993). Selon les recherches, il est connu que certains cations (le potassium et le Calcium) et les anions (le chlorure) interviennent activement dans l'ouverture et la fermeture des stomates. En cas de sécheresse donnant un stress de nature hydrique (stress hydrique), les stomates se ferment en empêchant les pertes d'eau, empêchant également l'échange de gaz et par conséquent, l'entrée de dioxyde de carbone atmosphérique (gaz carbonique CO₂) nécessaire pour la nutrition des plantes à travers le processus de photosynthèse (Bunce, 2008). C'est pourquoi dans les régions xérophiles, les stomates sont souvent petits ou presque inexistant, et contiennent également des quantités appréciables de cire, de poils et de trichomes, ce qui rend difficile l'évacuation de la vapeur d'eau. L'intérêt porté à la fonction stomatique s'est accru, lorsqu'il a été montré que des polluants tels que l'ozone (O₃) et le soufre (SO₂) pénétraient également dans la feuille par les stomates (Hopkins, 2003). Aussi, des effets négatifs des polluants de l'air sur la densité et l'ouverture des stomates ont-ils été mis en évidence dans des espèces de la famille des Fabaceae telles que *Trifolium pratense* L. et *Trifolium repens* L. (Longhurst *et al.*, 2009). En effet, des modifications de la surface foliaire et des caractéristiques stomatiques, peuvent se produire dans les zones polluées (Gulz *et al.*, 2005).

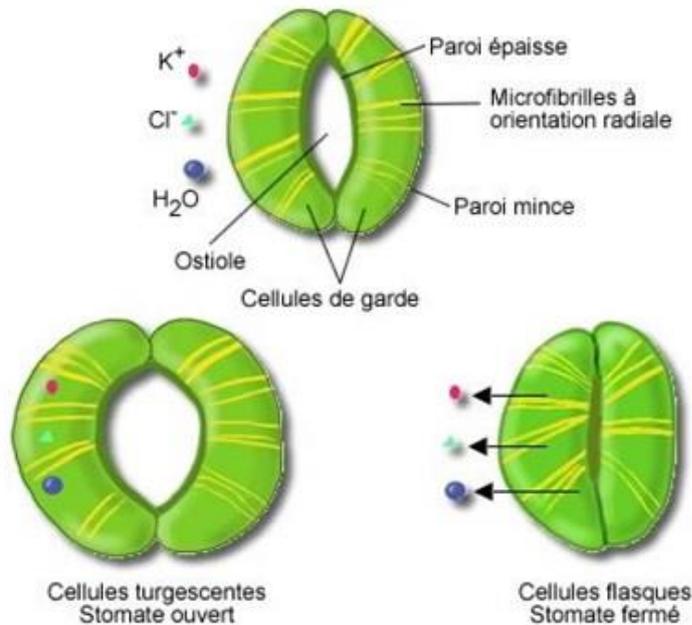


Figure 5 : Mécanisme d'ouverture et fermeture des stomates (Bergmann, 2004)

1.5-3- Densité des stomates

La densité des stomates (DS), définie comme le nombre de stomates par mm^2 de surface foliaire (Chen *et al.*, 2001) varie largement entre 5 et 1000 stomates par mm^2 de l'épiderme (Hetherington & Woodward, 2003). La densité stomatique dépend des espèces de plantes et peut être liée à leur écotype. La densité des stomates augmente avec l'intensité de la pollution de l'air indiquant les zones les plus polluées et les moins polluées. La densité des stomates et leur répartition entre les deux surfaces du limbe sont variables selon les espèces ou en réponse à l'environnement (Woodward *et al.*, 1995).

1.5-4- Résistance des stomates

Les stomates interviennent dans la régulation des échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère. Au travers des stomates, ont lieu la diffusion de l'eau sous forme de vapeur vers l'extérieur et l'entrée de CO_2 vers les sites de carboxylation. En modifiant leur degré d'ouverture, les stomates font varier la résistance stomatique et affectent les échanges entre la feuille et son environnement. Plusieurs facteurs abiotiques et biotiques contrôlent l'ouverture et la fermeture stomatique, comme le déficit de pression de vapeur d'eau entre la feuille et l'air, le potentiel hydrique, la température de la feuille, la concentration externe de CO_2 , la lumière, la résistance minimale, la résistance maximale et le déficit en eau du sol (Munro, 1989 ; Lynn & Carlson, 1990). Les facteurs les plus fréquemment étudiés sont le potentiel hydrique (Mielke *et al.*, 1999) et la lumière (Denden, 1999).

CHAPITRE II :

MATERIEL ET METHODES

2.1-Matériel

2.1-1-Matériel biologique

Le matériel biologique est constitué des feuilles de *Ficus benjamina* (Figure 6) récoltées sur les sites. Cet arbre à un usage généralement décoratif, s'adapte à des milieux très divers. Les feuilles longues de 4 à 8 cm et légèrement ondulées au bord sont vert tendre. Les arbres âgés de cette espèce peuvent atteindre 30 m de haut et plusieurs mètres de diamètre et sont remarquables en raison de leurs racines échasses (celles qui partent du tronc) et des racines aériennes (celles qui partent des branches) parfois appelées cordages partant des branches.

F. benjamina, espèce ornementale, fréquemment rencontrée dans de nombreux pays tropicaux, est plantée en sujet isolé ou sous forme de haies épaisses et parfois comme brise-vent. Cette espèce ornementale est également la plus répandue des plantes d'intérieur. Elle est généralement utilisée dans le District Autonome d'Abidjan comme plante de haie. Dans son habitat naturel, cet arbre, peu exigeant de la nature du sol, fournit du latex et du liber avec lequel on fabrique des cordes.



Figure 6 : Rameau de *Ficus benjamina* (Photo prise par Koffi)

2.1-2-Matériel technique

2.1-2-1- Matériel de terrain

Le matériel de terrain utilisé dans le cadre de cette étude comprend :

- un carnet pour des prises de notes ;
- un GPS pour relever des coordonnées géographiques des sites de prélèvement ;
- un vernis incolore pour fixer les stomates sur les faces des feuilles ;
- un ruban adhésif pour décoller les empreintes des stomates sur les feuilles ;
- des lames portes objets qui ont servi à la fixation des empreintes des stomates.

2.1-2-2- Matériel de laboratoire

Pour cette étude le matériel de laboratoire utilisé comprend :

- une balance électronique pour faire des pesées ;
- un spectrophotomètre pour la lecture des valeurs de la densité optique ;
- une centrifugeuse pour homogénéiser les préparations ;
- un mortier et pilon en porcelaine pour broyer les feuilles ;
- un microscope pour faire les différentes observations des empreintes des stomates ;
- un Molspin pulse Magnetiser (Molspin Ltd, UK) connecté à un magnétomètre (Molspin Minispin®) pour la détermination de la Magnétisation Rémanente Isotherme (IRM) ;
- une bombonne à azote liquide pour conserver les échantillons sur le terrain jusqu'au laboratoire ;
- un film alimentaire pour enrouler les différents échantillons de feuilles qui sont ensuite placés dans un tube plastique de 10 cm³ ;
- un scanner pour numériser les spécimens de feuilles ;
- une étuve pour le séchage des feuilles.

Un aperçu des six (6) premiers appareils utilisés au laboratoire est présenté par la figure 7.

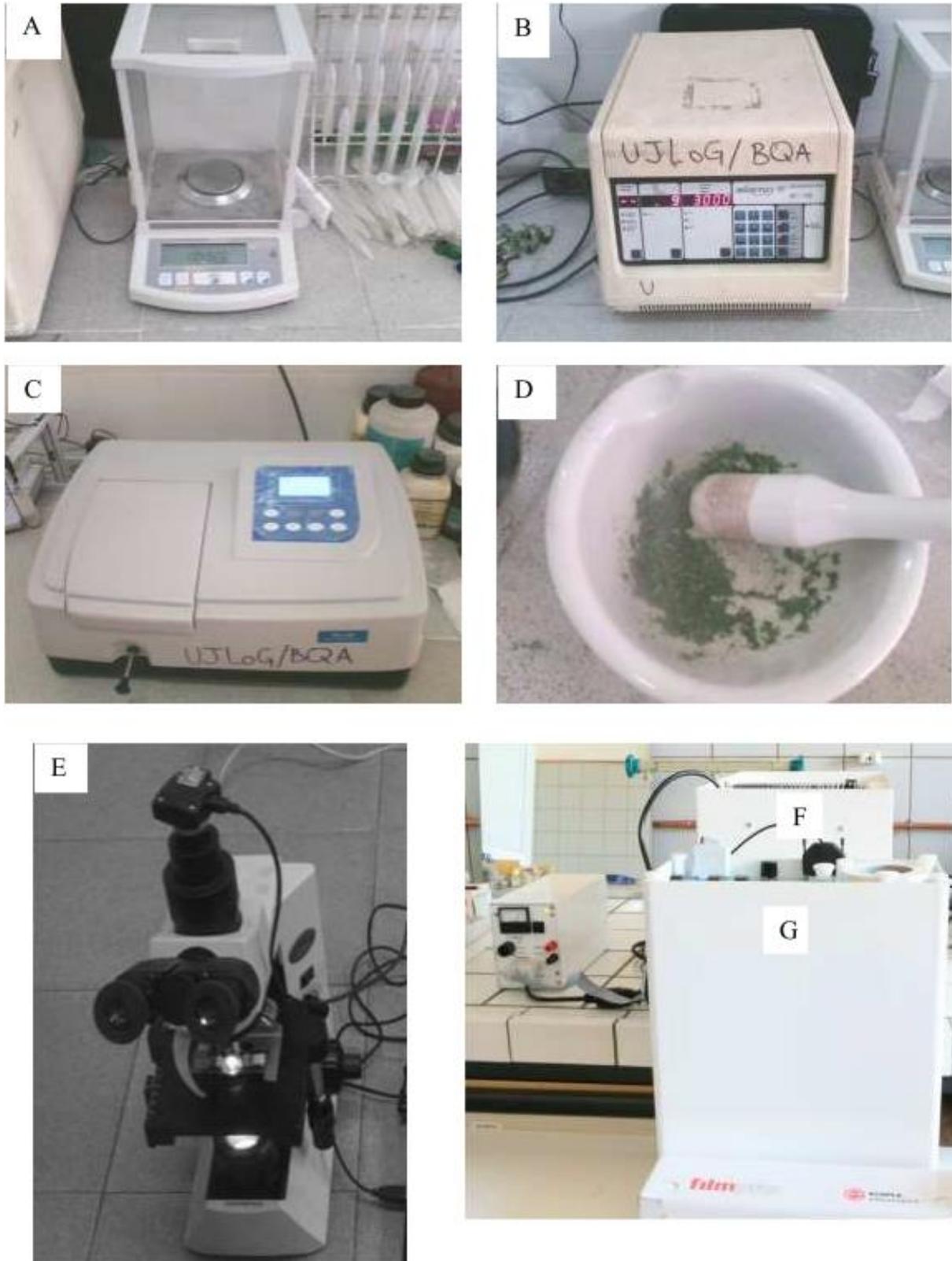


Figure 7 : Quelques matériel de laboratoire pour l'extraction des enzymes et de mesure du taux de particules fines (Photos prises par Koffi)

A : Balance, B : Spectrophotomètre, C : Centrifugeuse, D : Mortier, E : Microscope, F : Molspin pulse Magnetiser, G : Magnétomètre

2.2-Méthodes

2.2-1- Description des sites d'échantillonnage

L'échantillonnage s'est déroulé dans le District Autonome d'Abidjan, subdivisé en quatre (4) zones d'utilisation du sol dans le cadre de cette étude (Figure 8). Les zones choisies sont les axes routiers (AR), les parcs et jardins (PJ), les zones industrielles (ZI) et les zones résidentielles (ZR). Dans chacune de ces classes d'utilisation du sol, le prélèvement des feuilles et prélèvement des empreintes des stomates ont été effectués sur trois sites. Sur chacun de ces sites, les prélèvements des feuilles ont été effectués à deux niveaux de hauteur : de 0 à 1,3 m (H1) et de 1,3 à 2,5 m (H2). Le prélèvement des feuilles et prélèvement des empreintes des stomates se sont déroulées tout au long de l'année 2012. Le prélèvement des feuilles et prélèvement des empreintes des stomates ont été effectués de 8 heures à 15 heures de la journée afin de respecter le temps d'exposition des feuilles à chaque campagne.

Le choix de ces zones a été soutenu par l'hypothèse selon laquelle le type d'utilisation du sol pouvait impacter la qualité de l'air. Ce critère a déjà été utilisé dans des travaux similaires au nôtre en Côte d'Ivoire par Koffi *et al.* (2014), Tra Bi *et al.* (2014) et Barima *et al.* (2016) et en Belgique par Kardel *et al.* (2010 ; 2011).

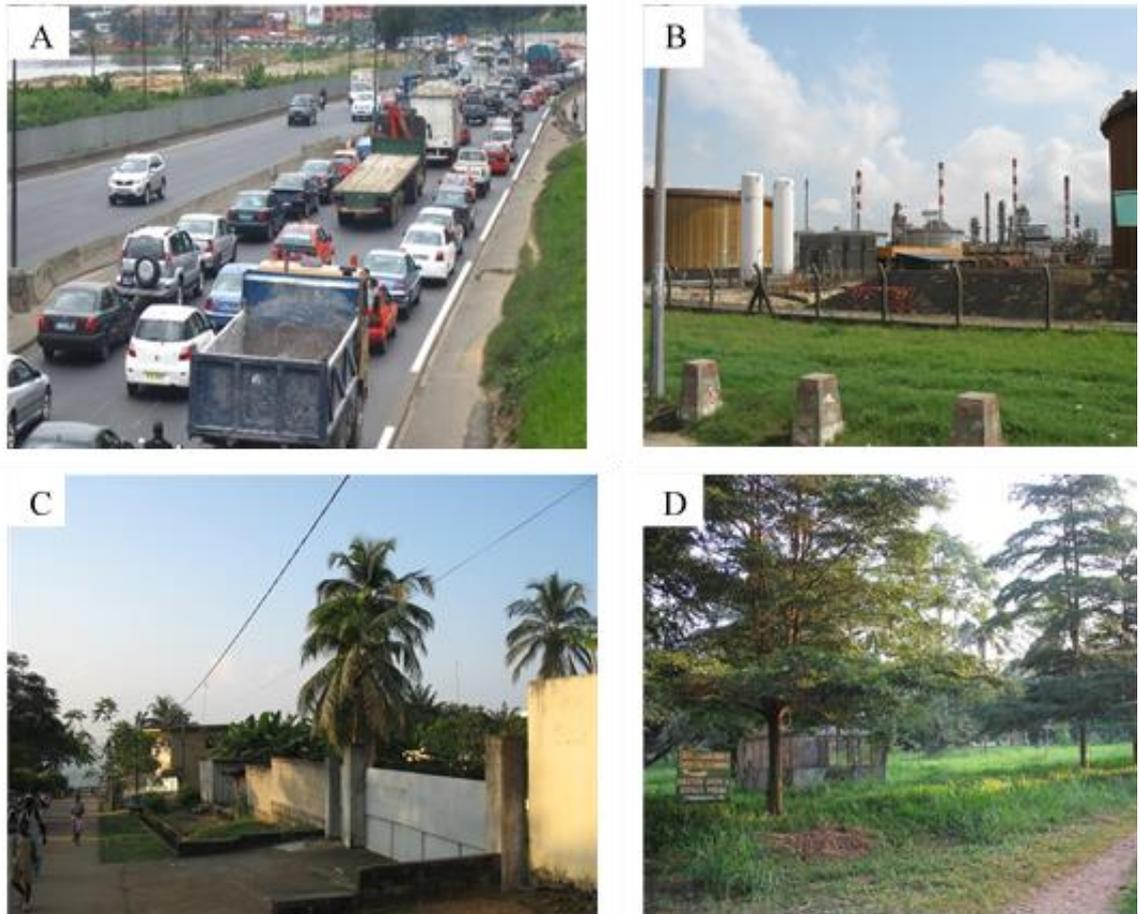


Figure 8 : Sites de prélèvement des feuilles des plants de *Ficus benjamina* (Photos prises par Koffi)

A : axe routier (Boulevard Lagunaire), B : zone industrielle (SIR), C : zone résidentielle (Cocody),
D : parc et Jardin (Jardin Botanique de Bingerville)

2.2-1-1- Zones industrielles

Nous avons travaillé dans les zones industrielles de Port-Bouët et de Yopougon. La zone industrielle de Port-Bouët enregistre les deux plus grandes entreprises pétrolières de Côte d'Ivoire (Figure 9), la SIR (Société Ivoirienne de Raffinage) et la PETROCI (Société Nationale d'Opérations Pétrolières de la Côte d'Ivoire), ainsi que plusieurs entreprises de distribution de produits pétroliers. En outre, elle comprend des cimenteries et des usines de transformation de thon.

La zone industrielle de Yopougon est située à l'Ouest du District Autonome d'Abidjan, dans la zone géographique Abidjan Nord. La zone industrielle de Yopougon regorge d'industries constituées de diverses usines de ciments, plastiques, sidérurgie, produits pharmaceutiques et cosmétiques, textiles, produits laitiers et agroalimentaires.



Figure 9 : Quelques entreprises de Côte d'Ivoire (Photos prises par Koffi)

A : SIR, B : Petroci, C : Unilever

2.2-1-2- Zones résidentielles

Les échantillonnages ont été réalisés dans les zones résidentielles situées dans les communes d'Abobo ($5^{\circ}24'58''$ N ; $4^{\circ}00'57''$ W) et de Cocody ($5^{\circ}20'56''$ N ; $4^{\circ}00'42''$ W) (N'Gouran *et al.*, 2014).

La commune d'Abobo est située au Nord du District Autonome d'Abidjan, à une dizaine de kilomètres du centre-ville. Elle regroupe 28 quartiers et villages. La population de la commune d'Abobo a atteint 938 424 habitants en 2011 et 1 500 000 habitants en 2014 (Boutin & N'Guessan, 2016). Le taux d'accroissement annuel s'élève à 2,69 (%). Le territoire communal d'Abobo s'étend sur une superficie de 78 km². La commune d'Abobo est limitée par la commune d'Anyama au Nord, celle d'Adjamé (Williamsville) et le quartier des Deux-Plateaux de Cocody au Sud. Cette commune est également limitée à l'Est par le quartier d'Angré (Cocody) et à l'Ouest, par la forêt du Banco (Boutin & N'Guessan, 2016).

La commune de Cocody est le quartier résidentiel le plus huppé du District Autonome d'Abidjan. Les classes les plus aisées de la société ivoirienne, ainsi que la plupart des expatriés

et des diplomates en font leur résidence de choix. Les quartiers Génie 2000 et Faya font partie du Secteur 4 selon la division communale. La commune de Cocody est située dans la partie Nord du District Autonome d'Abidjan. Cette commune a une superficie de 90 km² et comprend 21 quartiers et 4 villages. La population de Cocody était estimée à 447 055 habitants en 2014 (Boutin & N'Guessan 2016).

2.2-1-3- Parcs et jardins

Le type d'utilisation du sol parcs et jardins du District Autonome d'Abidjan regroupe le Centre National de Floristique (CNF), le jardin botanique de Bingerville et la pépinière du District Autonome d'Abidjan.

Le Centre National de Floristique est un espace de recherche sur la diversité floristique de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Bâti sur une surface de 11 hectares au sein de l'Université Félix Houphouët-Boigny, le CNF est une véritable forêt qui apporte de l'oxygène à cette zone (Boraud, 1995 ; CNF, 1998).

Le jardin botanique de Bingerville a été créé en 1904 sur une superficie de 56 hectares, dans la banlieue d'Abidjan. Ce jardin est localisé dans la commune de Bingerville, à environ 10 km du centre de la Capitale économique, Abidjan. Il regorge d'une importante flore constituée d'espèces exotiques provenant de divers continents et des espèces locales (N'Douba, 1990). Ces dernières sont constituées d'espèces des savanes et des forêts ivoiriennes.

La pépinière du District Autonome d'Abidjan est localisée sur la route d'Alépé après le quartier Belleville.

2.2-1-4- Axes routiers

Des axes routiers du District Autonome d'Abidjan à forte densité de trafic relativement intense ont été identifiés pour mener la présente étude. Il s'agit de l'Autoroute du Nord, du Boulevard De Gaule, Boulevard Latrille, Route du Zoo et du Boulevard de la Paix.

L'Autoroute du Nord dans le District Autonome d'Abidjan est long de 6,15 km. Sur cet important axe routier, circulent en moyenne 4 128 véhicules par heure (N'Gouran *et al.*, 2014).

Le boulevard De Gaule, reliant le pont De Gaulle et les communes d'Adjamé et de Cocody, est une voie structurante. Sur cet axe, on peut compter près de 8 280 véhicules / heure aux heures de pointe (N'Gouran *et al.*, 2014).

Le Boulevard de la Paix relie les communes de Yopougon et du Plateau en passant par la commune d'Attécoubé. Ce boulevard, situé en bordure de la baie du Banco, a une longueur de 4,6 km, avec un trafic routier de 3 228 véhicules/heure (N'Gouran *et al.*, 2014).

Le Boulevard Latrille part de l'Hôtel Ivoire à la commune d'Abobo. Ce boulevard situé dans la commune de Cocody, est emprunté par environ 2 796 véhicules/heure (N'Gouran *et al.*, 2014).

La route du Zoo, passant par le Zoo d'Abidjan, reliant la commune d'Abobo à la commune d'Adjamé. Cette route est pratiquée par environ 2 124 véhicules en moyenne par heure (N'Gouran *et al.*, 2014).

2.2-2- Activités sur le terrain

Les activités pour la collecte des données sur le terrain ont consisté en la mise en place de deux dispositifs de biosurveillance.

2.2-2-1- Biosurveillance passive

La biosurveillance passive consistait à faire des prélèvements sur l'espèce *Ficus benjamina* dans les différents types d'utilisation du sol.

Sur chacun des axes routiers, les échantillonnages ont été effectués sur trois sites distants d'au moins 2 km. Sur chacun de ces sites, 3 feuilles par plante de *Ficus benjamina* situées à une hauteur de 0-1,3m (H1) et de 1,3-2,5m (H2) ont été sélectionnées pour y effectuer des prélèvements d'empreintes de stomates.

Dans chacun des autres types d'utilisation du sol (zones industrielles, zones résidentielles, et parcs et jardins), trois sites ont été choisis en fonction des critères d'accessibilité et de répartition géographique pour les prélèvements de feuilles. Trois (3) feuilles par plante de *Ficus benjamina* ont été sélectionnées dans chaque type d'utilisation du sol, pour y effectuer des prélèvements d'empreintes de stomates.

2.2-2-2- Biosurveillance active

La biosurveillance active consistait à la mise en culture de *Ficus benjamina* dans 108 pots de 15 litres, contenant de la terre mélangée à la sciure de bois et à la fiente de volaille, sans apport d'engrais chimique (Figure 10). Les plants de *Ficus benjamina* ont été cultivés pendant trois mois (Octobre, Novembre et Décembre 2012) dans la pépinière du District Autonome d'Abidjan située dans la commune d'Abobo. Cette pépinière jouit de conditions relativement homogènes permettant de l'utiliser comme site témoin (Cuny *et al.*, 2001).



Figure 10 : Plants de *Ficus benjamina* cultivés dans des pots (Photo prise par Koffi)

Aux abords des principaux axes routiers, les plantes ont été mises en terre sur chaque site d'échantillonnage selon le protocole schématisé à la figure 11.

Ainsi, six (06) pots contenant les plants de *Ficus benjamina* ont été disposés sur trois (03) rangées de deux pots et distants de 2 m. La première rangée de plantes est située à une distance de 2 m (D1) de la route, la deuxième rangée est située à 4 m (D2) de la route. La troisième rangée est située à 6 m (D3) de la route, avec un espacement de 1 m entre les plants de la même rangée. Concernant les classes d'utilisation du sol zones résidentielles (ZR), parcs et zones industrielles (ZI), deux sous sites ont été identifiés où deux pots de l'espèce y ont été placés.

Après trois (3) mois d'exposition à l'air libre dans les différents types d'utilisation du sol du District Autonome d'Abidjan, les pots contenant les plants ont été remplacés par des nouveaux pots de plantes qui sont restées eux aussi exposées pendant trois (3) mois.

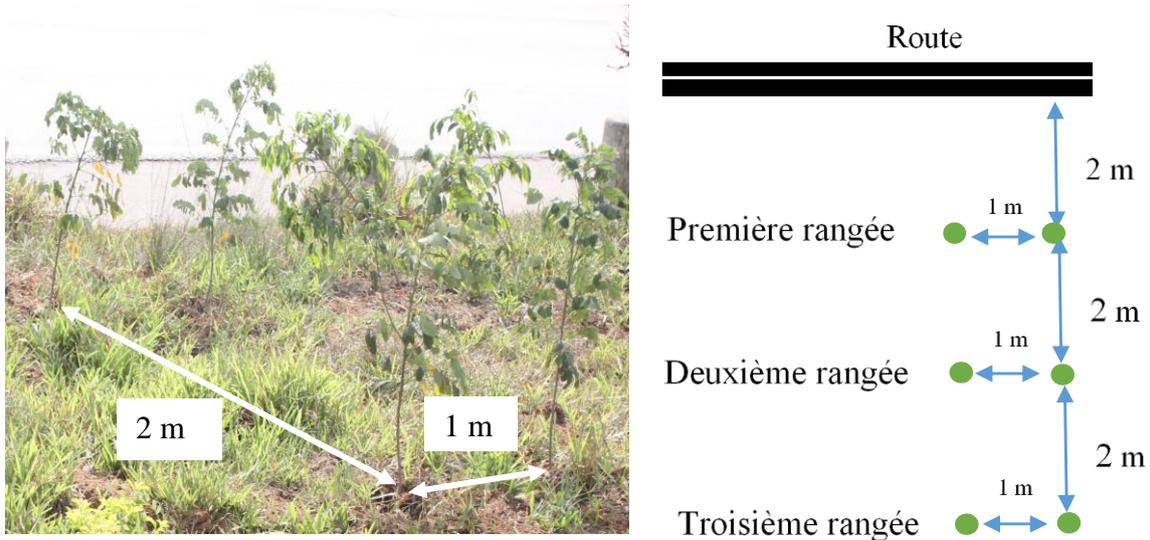


Figure 11 : Disposition des plants de *Ficus benjamina* L. aux abords des axes routiers
Point en vert = pots de plants

2.2-2-3-Prélèvement des empreintes des stomates

Les prélèvements ont été effectués pendant l'année 2013, de 8 heures à 15 heures de la journée afin de respecter le même temps d'exposition des feuilles à chaque campagne pour la détermination des caractéristiques des stomates. Les prélèvements ont été effectués sur deux sous sites dans les différentes classes.

La méthode de prélèvement a suivi le protocole mis en place par Kardel *et al.* (2012) et Barima *et al.* (2014). Une feuille non endommagée mature de chaque plante a été choisie pour mesurer la densité, la longueur et la largeur des stomates. Les feuilles rattachées à la plante à la hauteur H1 (0-1,3 m) et H2 (1,3-2,5 m), ont été nettoyées à l'aide d'un linge propre imbibé d'eau distillée. Une partie de chaque face inférieure (face contenant plus de stomate) de la feuille a été recouverte par une mince couche de vernis à ongles incolore, tout en évitant de recouvrir la nervure centrale et la zone de marge de la feuille et laissé sécher pendant 15 à 20 minutes. Après séchage, le vernis a été détaché à l'aide d'un ruban adhésif transparent puis collé et référencé sur une face propre de lame de microscopie (Figure 12). Pour chacune des feuilles, trois empreintes de stomates (ou préparations) ont ainsi été récoltées.

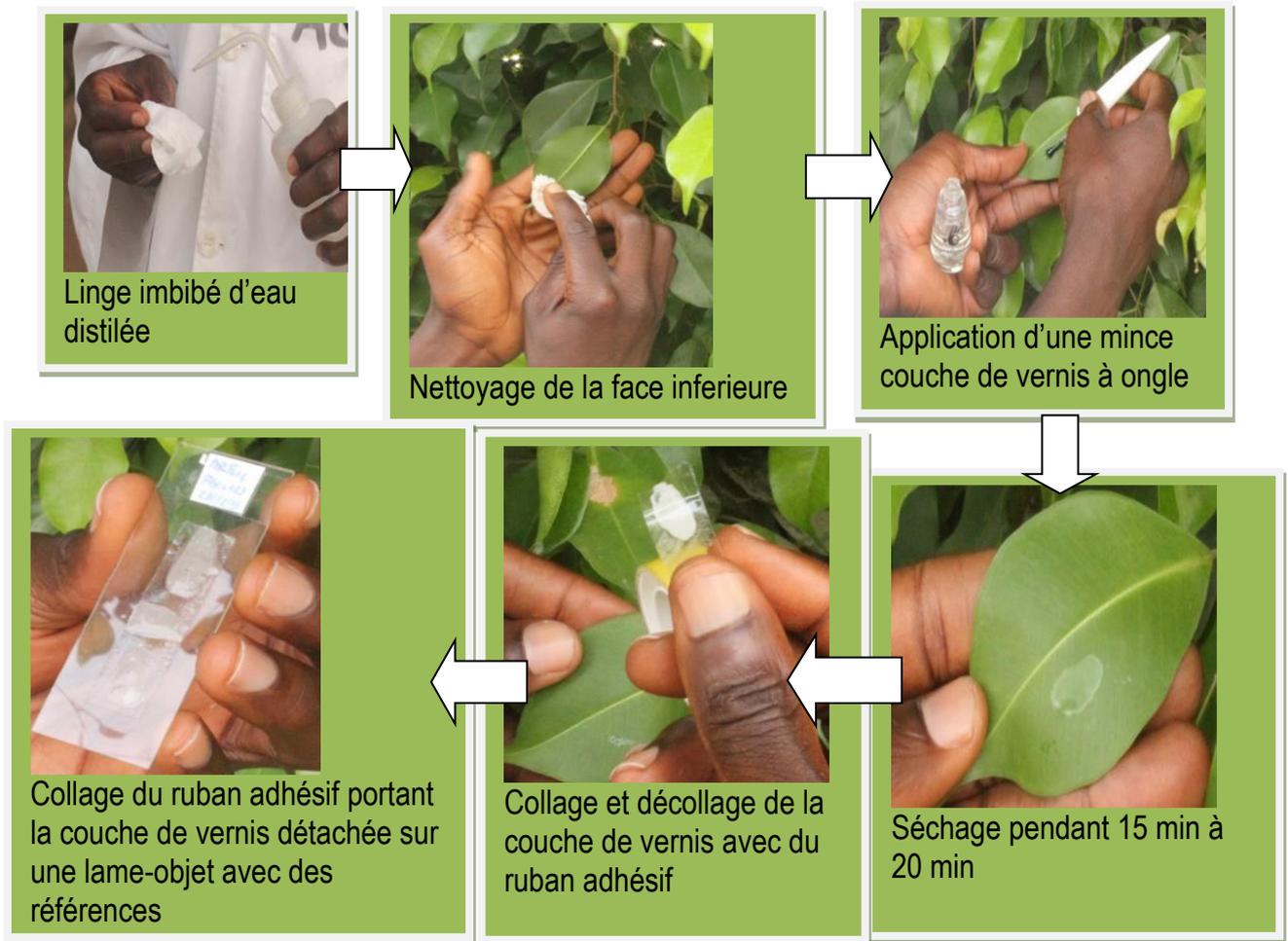


Figure 12 : Méthode de prélèvement des empreintes des stomates sur les feuilles de *Ficus benjamina*

2.2-3- Activités au laboratoire

2.2-3-1- Analyse des empreintes de stomates

Au laboratoire, chacune des lames porte-objet a été observée avec un grossissement de 400 à l'aide d'un microscope optique (de marque Olympus CX31) relié à une caméra (Figure 13). Le nombre de stomates a été déterminé, la longueur et la largeur ont été mesurées. Une coupe transversale de la feuille a été faite pour déterminer la profondeur du stomate au microscope. Sur chaque préparation (empreinte de stomate), le nombre moyen de stomates par préparation a été obtenu après 10 observations, soit un total de 90 observations pour chacun des pieds de *Ficus benjamina*.

Les moyennes des longueurs et des largeurs des pores de stomates ont été obtenues après des mesures réalisées sur 16 stomates par préparation soit 144 mesures pour chaque pied de *Ficus benjamina*.

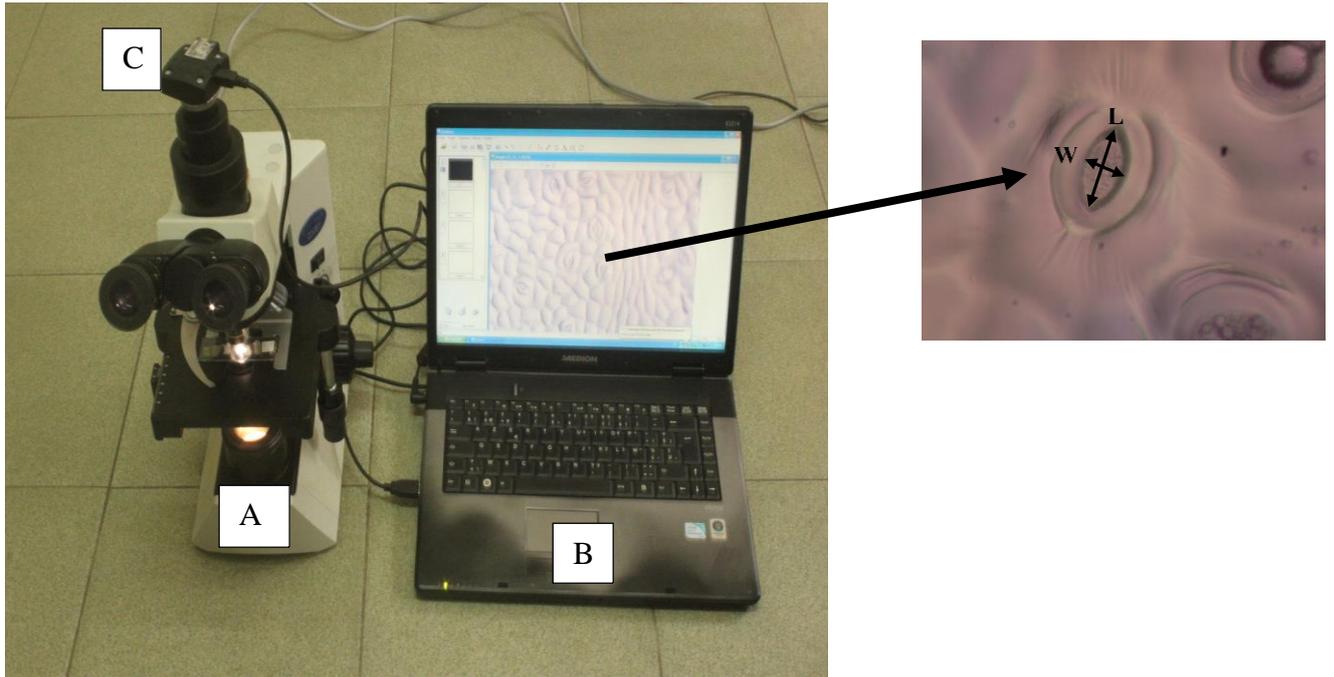


Figure 13 : Dispositif d'observation des empreintes des stomates

A : microscope, B : ordinateur, C : caméra, L : longueur de l'ouverture du stomate, W : largeur de l'ouverture du stomate

Des indices ont été calculés afin d'analyser les paramètres des stomates des feuilles en fonction de la classe d'utilisation du sol et de la hauteur de prélèvement. Il s'agit de la résistance des stomates (RS), du degré d'ouverture des pores des stomates (DOPS) et de la densité des stomates (DS).

2.2-3-1-1- Détermination de la densité des stomates

La densité des stomates (DS), définie comme le nombre de stomates par mm^2 de surface foliaire (Chen *et al.*, 2001) varie entre 5 et 1000 stomates par mm^2 de l'épiderme (Hetherington & Woodward, 2003). La densité des stomates est le nombre des stomates par unité de surface. Pour déterminer cette densité, l'objectif X10 du microscope relié à une caméra a été utilisé. Les stomates existants sur une surface délimitée à l'aide d'un logiciel ImageJ installé sont comptés puis ramenés en mètre carré. Pour chaque prélèvement, 3 mesures ont été faites sur la surface de la feuille. Sur chaque mesure 10 observations ont été faites pour définir la densité moyenne des stomates.

2.2-3-1-2- Détermination du degré d'ouverture des pores des stomates

Le degré d'ouverture des pores des stomates (DOPS) est obtenu à partir de la longueur et la largeur de l'ouverture des stomates. Elle s'exprime en μm^2 et permet de connaître le degré d'ouverture des stomates. Le degré d'ouverture des pores des stomates est déterminé à partir de l'équation ci-dessous (Kardel *et al.*, 2010) :

$$\text{DOPS} = \frac{L \times W \times \pi}{4} \quad (\mu\text{m}^2) \quad (4)$$

DOPS = Degré d'ouverture des pores des stomates, μm^2 = micromètre carrée
Où W = largeur de l'ouverture du stomate (m) et L = longueur de l'ouverture du stomate (m).

2.2-3-1-3- Détermination de la résistance des stomates

La résistance des stomates (RS) exprime la mesure de l'inhibition de la diffusion des gaz à travers les stomates (Balasooriya *et al.*, 2009). En cas de pollution de l'air, la limitation de la diffusion des gaz est observée en raison d'une augmentation de la RS (Verma & Singh, 2006 ; Balasooriya *et al.*, 2009). Elle s'exprime en $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ et permet de mettre en évidence l'état de stress de la plante. La résistance des stomates est déterminée selon l'équation suivante (Kardel *et al.*, 2010) :

$$\text{RS} = \frac{4 \times l}{n \times \pi \times L \times W \times D} + \frac{L + W}{4 \times n \times L \times W \times D} \quad (\text{S} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (5)$$

RS = Résistance des stomates

Où l = profondeur du stomate (m), D = coefficient de diffusion de la vapeur d'eau en air ($24,2 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ à 20°C), n = nombre de stomates par m^2 , W = largeur de l'ouverture du stomate (m) et L = longueur de l'ouverture du stomate (m). $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ = Surface par mètre

2.2-3-2- Détermination des particules fines

Les feuilles prélevées ont été méticuleusement scannées le jour de prélèvement en évitant les contaminations par les objets métalliques. Les images scannées ont servi à déterminer la surface des feuilles grâce au logiciel Image J. La détermination de la surface des feuilles permet d'estimer la teneur en particules fines par unité de surface. Chaque échantillon de feuilles a été ensuite séché à température ambiante. Après séchage, chaque lot de feuilles a été enroulé fermement dans un film alimentaire, puis pressé dans un tube plastique de 10cm^3 .

La détermination des particules fines a été faite à partir de l'Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation (ARIS) des feuilles. En effet, des travaux ont déjà montré une forte corrélation entre les particules fines et l'Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation (Prajapati *et al.*, 2006 ; Mitchell *et al.*, 2010 ; Kardel *et al.*, 2012 ; Barima *et al.*, 2014 et N'Gouran *et al.*, 2014).

L'échantillon préalablement compressé dans un film alimentaire est ensuite comprimé dans un tube plastique de 10 cm³, puis magnétisé avec un champ magnétique (Prajapati *et al.*, 2006) de 1 Tesla grâce au Molspin pulse Magnetiser (Molspin Ltd, UK), et enfin la Magnétisation Rémanente Isotherme (IRM) est mesurée avec un magnétomètre (Molspin Minispin®). L'appareil est calibré avant et après dix mesures, comme décrit par Matzka & Maher (1999). Chaque IRM retenue est une moyenne de 2 mesures de Magnétisation Rémanente Isotherme du même échantillon. Les Aimantations Rémanentes Isothermes à Saturations des feuilles sont obtenues en ramenant la Magnétisation Rémanente Isotherme à la surface des feuilles contenues dans le tube de 10 cm³ (Barima *et al.*, 2014). La détermination des Magnétisations Rémanentes Isothermes a été réalisée par des techniciens au Laboratoire du Department of Bioscience Engineering, Faculty of Sciences à l'Université de Anvers (Belgique).

2.2-3-3- Détermination des différentes activités enzymatiques

2.2-3-3-1- Méthode d'extraction enzymatique

Les feuilles fraîches sont prélevées sur les plantes dans les 4 classes d'utilisation du sol du District Autonome d'Abidjan. Deux cents (200) mg de tissu de la feuille ont été pesés et broyés en une poudre fine à l'aide de l'azote liquide en utilisant un mortier et un pilon prérefroidis. Le poids exact de chaque échantillon de poudre a été déterminé avant qu'il ne soit soigneusement homogénéisé dans 1,2 mL de 0,2 M tampon phosphate de potassium (pH 7,8 avec 0,1 mM d'EDTA). Les extraits ont été centrifugés à 15000 x g pendant 20 min. Le surnageant a été éliminé. Le culot a été remis en suspension dans 0,8 mL du même tampon et la suspension a été centrifugée à nouveau durant 15 min à 15000 x g. Les surnageants ont été mélangés puis stockés dans la glace. Ce mélange a servi à la détermination des différentes activités des enzymes antioxydantes.

2.2-3-3-2- Méthode de dosage ou mesure de l'activité de la catalase (EC 1.11.1.6)

L'activité de la catalase (CAT) a été déterminée en fonction de la méthode de Aebi (Lu *et al.*, 2009). La décomposition de H₂O₂ a été suivie par une diminution d'absorbance à

240 nm. Le mélange réactionnel de 3 mL contenant 2 mL d'extrait brut de feuille (dilué 200 fois dans 50 mM de tampon phosphate de potassium, pH 7,0) et 10 mM H₂O₂. Le coefficient d'extinction de H₂O₂ (40 L.mol⁻¹.cm⁻¹ à 240 nm) a été utilisé pour calculer l'activité enzymatique (exprimée en termes de millimoles de H₂O₂ par minute par gramme de matière fraîche). Le mélange réactionnel sans extrait de feuille a servi de témoin.

2.2-3-3-3- Méthode de dosage de l'activité de l'ascorbate peroxydase (EC 1.11.1.11)

L'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) a été calculée en utilisant une méthode modifiée de Chen & Asada (1989). L'activité de l'APX a été déterminée à partir de la diminution de l'absorbance à 290 nm due à l'oxydation de l'ascorbate dans la réaction. La solution de réaction de 1 ml constituée de 50 mM phosphate de potassium tampon (pH 7,0), 0,5 mM ascorbate, 0,5 mM H₂O₂, et 10 µl de l'extrait brut de feuilles. Le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) a été ajouté en dernier pour amorcer la réaction et la diminution de l'absorbance. Le coefficient d'extinction de 2,8 M⁻¹.cm⁻¹ de l'ascorbate a été utilisé dans le calcul de l'activité enzymatique (exprimée en termes de millimole d'ascorbate par minute par gramme de matière fraîche).

2.2-4-Analyse statistiques des résultats

Les statistiques employées pour analyser les données comprennent la statistique descriptive (test de normalité et d'homogénéité) et les tests LSD de Fisher (test paramétrique). Au niveau de la statistique descriptive, la moyenne a été calculée pour chaque variable considérée. En outre, les paramètres de dispersion tels que l'erreur type sur la moyenne, les valeurs minimale et maximale ont été déterminés. Elles ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica 7.1. La normalité de la distribution des données et l'homogénéité des variances ont été vérifiées (Meyer *et al.*, 2013) respectivement avec le test de Kolmogorov Smirnov. Le seuil de significativité p de l'ensemble de ces tests est de 0,05. La représentation des variations de ces descripteurs a été réalisée sous forme de boîtes à moustaches indiquant la moyenne, les valeurs maximale et minimale.

Une ANOVA à un facteur a été employée pour comparer la densité, la surface des pores, la résistance des stomates et l'Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation dans les quatre classes d'utilisation du sol au cours de la même période de prélèvement (Kardel *et al.*, 2011). Des tests t de Student des échantillons appariés ont permis de comparer les paramètres de stomates entre la saison sèche et la saison des pluies pour une même classe d'utilisation du sol.

Différents modèles de régression ont servi à trouver les liens entre les SIRM des feuilles et la densité, le degré d'ouverture des pores et la résistance des stomates. De même, des modèles de régression ont servi à trouver les liens entre la catalase et l'ascorbate peroxydase pour une même saison (Koffi *et al.*, 2015). L'ensemble des tests d'analyses a été réalisé saison par saison (saison sèche et saison des pluies). Un test t de student a servi à comparer les moyennes des différents paramètres entre les saisons.

CHAPITRE III :

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1- Résultats

3.1-1-Bio-surveillance passive

3.1-1-1- Caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L.

3.1-1-1-1-Variation de la densité des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

La densité des stomates varie d'une classe d'utilisation du sol à une autre (Figure 14). Les classes les plus polluées (Axes Routiers et Zones Industrielles) enregistrent plus de stomates ($27,41.10^7$ stomates.m⁻²) dans les feuilles que les classes moins polluées (Zones Résidentielles et Parc et Jardin). Par ailleurs, cette variation est fonction des saisons.

Ainsi, en saison sèche, les valeurs de la densité stomatique sont comprises entre $23,741.10^7$ et $27,41.10^7$ stomates.m⁻². A cette période, la densité des stomates présente une différence significative entre la zone Axe Routier et les Zones Résidentielles, Parc et Jardin (Test t de Student, $p = 0,000$).

En saison pluvieuse, les valeurs sont faibles et elles sont comprises entre $20,65.10^7$ et $27,17.10^7$ stomates.m⁻². Cependant, elle présente une différence significative entre Axe Routier et Parc et Jardin, Zone Industrielle et Parc et Jardin, Zone Résidentielle et Parc et Jardin (Test t de Student, $p = 0,000$).

Relativement à la comparaison des saisons en fonction des classes d'utilisation du sol, les résultats de l'analyse statistique ne révèlent pas de différence significative entre les valeurs de la densité des stomates au niveau des Axes Routiers, des Zones Industrielles et des Zones Résidentielles. Par contre, l'effet saison se fait ressentir au niveau des Parcs et Jardins où la densité des stomates est significativement plus élevée en saison sèche qu'en saison des pluies (Test t de Student, $p = 0,0001$).

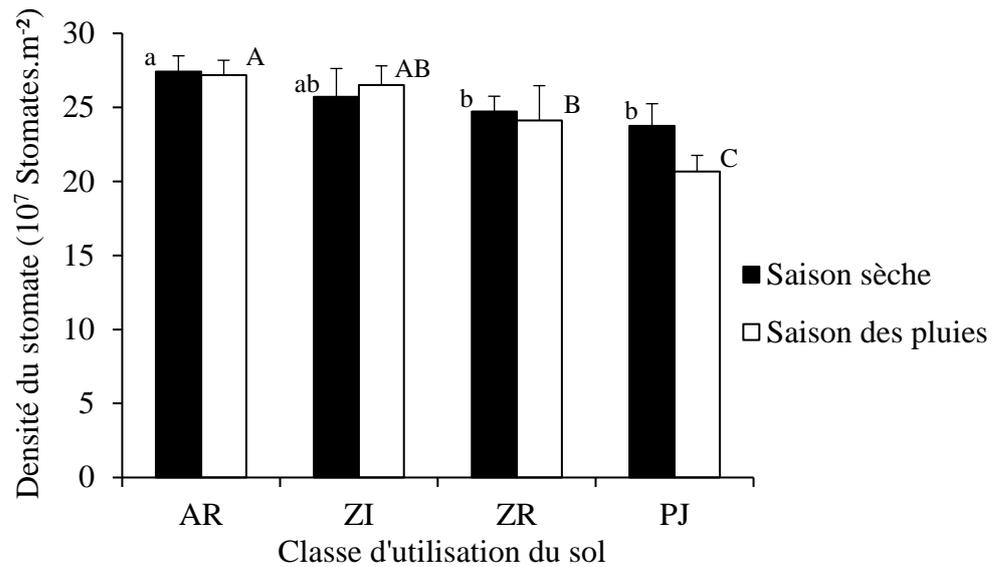


Figure 14 : Variation de la densité des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol et des saisons.

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle, PJ = Parc et Jardin. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies pour la saison concernée. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

3.1-1-1-2- Densité des stomates en fonction de la hauteur de prélèvement foliaire des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Le tableau IV présente la variation de la densité des stomates de *Ficus benjamina* en fonction des classes d'utilisation du sol, des hauteurs de prélèvements et des saisons. La densité des stomates pour des hauteurs de prélèvement basses ($0 < H1 < 1,3$ m) présente des valeurs élevées au niveau des Axes Routiers et faibles au niveau des Parcs et Jardins. Pour la saison sèche dans les différentes classes d'utilisation du sol ces valeurs oscillent entre $23,93.10^7$ et $26,86.10^7$ stomates.m⁻² pour la hauteur H1. En saison des pluies, dans les différentes classes d'utilisation du sol, la densité des stomates oscille entre $24,83.10^7$ et $27,13.10^7$ stomates.m⁻² pour la hauteur H1

Pour les hauteurs plus élevées ($1,3 < H2 < 2,5$ m), la densité des stomates présente des valeurs élevées au niveau des Axes Routiers et faibles au niveau des Parcs et Jardins. Pour la saison sèche dans les différentes classes d'utilisation du sol ces valeurs oscillent entre $23,87.10^7$ et $27,02.10^7$ stomates.m⁻² pour la hauteur H2. En saison des pluies, dans les différentes classes d'utilisation du sol, la densité des stomates oscille entre $23,48.10^7$ et $27,21.10^7$ stomates.m⁻² pour la hauteur H2.

Dans l'ensemble, quelle que soit la saison de prélèvement, les valeurs de la densité des stomates à différentes hauteurs (H1) et (H2) ne présentent pas de différence significative dans les classes d'utilisation du sol (Test t de Student : $p > 0,05$). Cependant, elles présentent une différence significative à la hauteur H2 au niveau des Zones Industrielles (Test t de Student : $p = 0,001$).

Tableau IV : Densité des stomates (10^7 stomates.m⁻²) de *Ficus benjamina* L. en fonction de la hauteur de prélèvement, des classes d'utilisation du sol et des saisons.

Classes d'utilisation du sol	Saisons	Hauteurs	
		H1	H2
AR	Saison sèche	26,82	27,06
	Saison des pluies	27,13	27,21
ZI	Saison sèche	26,86	24,50 ^B
	Saison des pluies	25,65	26,81 ^A
ZR	Saison sèche	24,35	24,35
	Saison des pluies	24,83	23,48
PJ	Saison sèche	23,93	23,87
	Saison des pluies	26,31	25,42

A et B désignent les différences significatives entre les saisons sèche et pluvieuse pour la hauteur H2 au niveau de ZI, H1= [0-1,3 m [, H2 = [1,3-2,5 m [.

AR = Axes Routier ; ZI = Zone industrielle ; ZR = Zone résidentielles ; PJ = Parc et Jardin.

Les valeurs significatives au seuil $\alpha = 5 \%$ sont en gras.

3.1-1-1-3- Variation du degré d'ouverture des pores des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates de *Ficus benjamina* dans les différentes classes d'utilisation du sol et des saisons sont illustrées à la figure 15.

Le degré d'ouverture des pores des stomates présente des valeurs plus élevées. Ces valeurs sont également plus élevées au niveau des parcs et jardins (106,042 - 129,094 μm^2) et des Zones Résidentielles (96,071 - 107,612 μm^2) qu'au niveau des Zones Industrielles (75,810 - 99,615 μm^2) et des Axes Routiers (70,180 - 90,566 μm^2). Toutefois, le degré d'ouverture des

pores des stomates est plus important en saison sèche qu'en saison des pluies quel que soit la classe d'utilisation du sol.

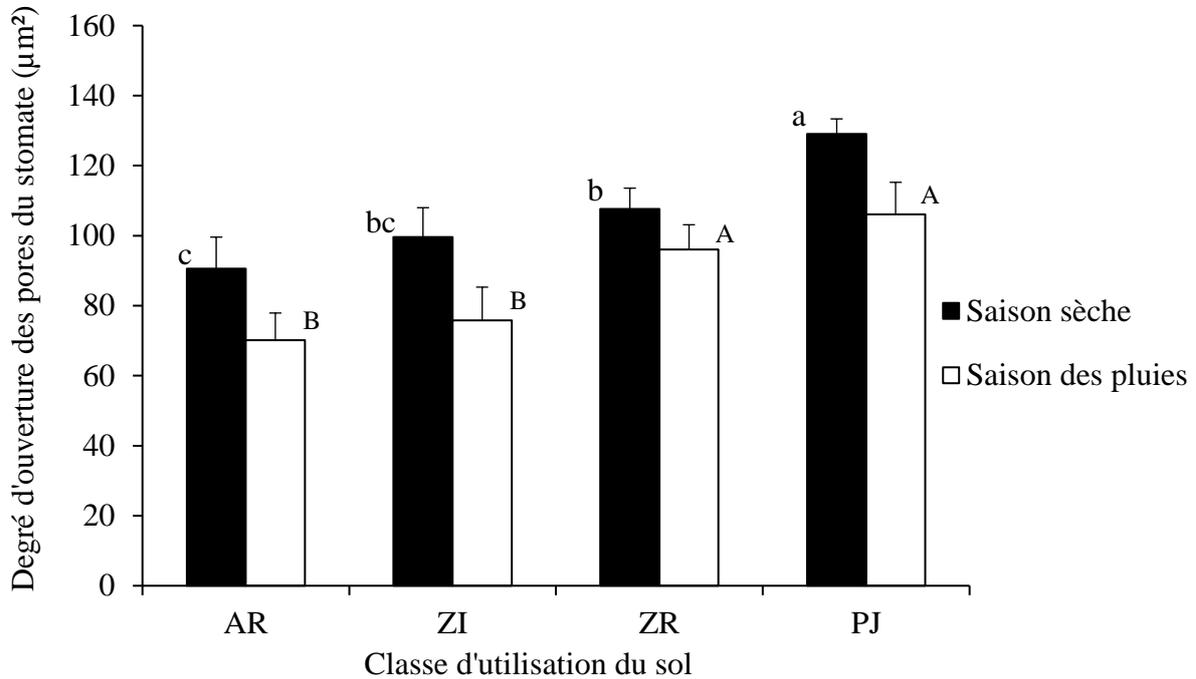


Figure 15 : Variation du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol et des saisons.

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle, PJ = Parc et Jardin. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

3.1-1-1-4- Variation du degré d'ouverture des pores des stomates suivant les hauteurs de prélèvement et en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Le degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles prélevées à différentes hauteurs (H1 et H2) présente des valeurs élevées au niveau des Zones Résidentielles et faibles au niveau des Axes Routiers, quelle que soit la saison de prélèvement (Tableau V).

Pour la hauteur H1, le degré d'ouverture des pores des stomates présente des valeurs qui varient de $64,58 \mu\text{m}^2$ à $121,36 \mu\text{m}^2$ et de $67,47$ à $129,89 \mu\text{m}^2$ pour la hauteur H2. Ces valeurs sont significativement différentes entre les valeurs des Axes Routiers et des Zones Industrielles pour la hauteur H1, entre les valeurs des Axes Routiers, des Zones Industrielles et des Zones Résidentielles pour la hauteur H2. Pour des hauteurs de prélèvements dans la même saison ces valeurs présentent des différences significatives au niveau des Axes Routiers, des Zones

Industrielles et des Zones Résidentielles. Cependant, aucune différence n'est notée pour les hauteurs H1 et H2 au niveau des Parcs et jardins et au niveau des Zones Résidentielles pour la hauteur H1 (Test t de Student, $p > 0,05$).

Tableau V : Degré d'ouverture des pores des stomates (μm^2) de *Ficus benjamina* L. en fonction des hauteurs de prélèvement, des classes d'utilisation du sol et des saisons.

Classes d'utilisation du sol	Saisons	Hauteurs	
		H1	H2
AR	Saison sèche	95,81 ^{b, A}	112,07 ^{a, A}
	Saison des pluies	64,58 ^{b, B}	75,86 ^{a, B}
ZI	Saison sèche	99,31 ^{a, A}	97,98 ^{b, A}
	Saison des pluies	85,38 ^{a, B}	67,47 ^{b, B}
ZR	Saison sèche	121,36 ^b	129,89 ^{a, A}
	Saison des pluies	107,25	106,30 ^B
PJ	Saison sèche	83,96	113,43
	Saison des pluies	87,35	103,24

a et b désignent les différences significatives entre les hauteurs pour la même saison, A et B désignent les différences significatives entre les saisons pour une même hauteur, H1 = [0-1,3 m [, H2 = [1,3-2,5 m [. AR = Axes Routier ; ZI = Zone industrielle ; ZR = Zone résidentielles, PJ = Parc et Jardin. Les valeurs significatives au seuil $\alpha = 5 \%$ sont en gras.

3.1-1-1-5- Variation de la résistance des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Les valeurs de la résistance des stomates de *Ficus benjamina*, obtenues en saison sèche et en saison des pluies au niveau des différentes classes d'utilisation du sol, sont présentées à la figure 16. En saison sèche, les valeurs les plus élevées de la résistance des stomates ont été obtenues au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles et les plus faibles sont enregistrées niveau des Parcs et Jardins et des Zones Résidentielles. Les valeurs élevées varient de 26,88 S.m^{-1} à 29,11 S.m^{-1} et les plus faibles de 18,47 S.m^{-1} à 22,81 S.m^{-1} . Le test t de Student présente une différence significative entre les Axes Routiers et Parcs et jardins (Test t de Student, $p = 0,005$). Cependant, aucune différence n'est obtenue entre les valeurs des Zones Industrielles et Zones Résidentielles (Test t de Student, $p > 0,05$).

En saison des pluies, les valeurs les plus élevées de la résistance des stomates ont été obtenues au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles. Par contre, les plus faibles sont enregistrées au niveau des Parcs et Jardins et Zones Résidentielles. Les valeurs élevées varient de 33,49 $S.m^{-1}$ à 32,04 $S.m^{-1}$ et les plus faibles de 26,53 $S.m^{-1}$ à 26,18 $S.m^{-1}$. Le test t de Student présente une différence significative entre les Axes Routiers, Zones Résidentielles et Parcs et Jardins (Test t de Student, $p = 0,002$). Cependant, aucune différence n'est obtenue entre les Axes Routiers et Zones Industrielles, Zones Résidentielles et Parcs et Jardins (Test t de Student, $p > 0,05$).

Dans chacune des classes, les valeurs les plus élevées de la résistance des stomates sont observées pendant la saison des pluies et les plus faibles en saison sèche. Les valeurs de la résistance des stomates sont significativement plus élevées en saison des pluies qu'en saison sèche au niveau des Parcs et Jardins et des Zones Résidentielles (Test t de Student, $p < 0,05$). Cependant, au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles, ces valeurs ne présentent pas de différence significative entre les saisons.

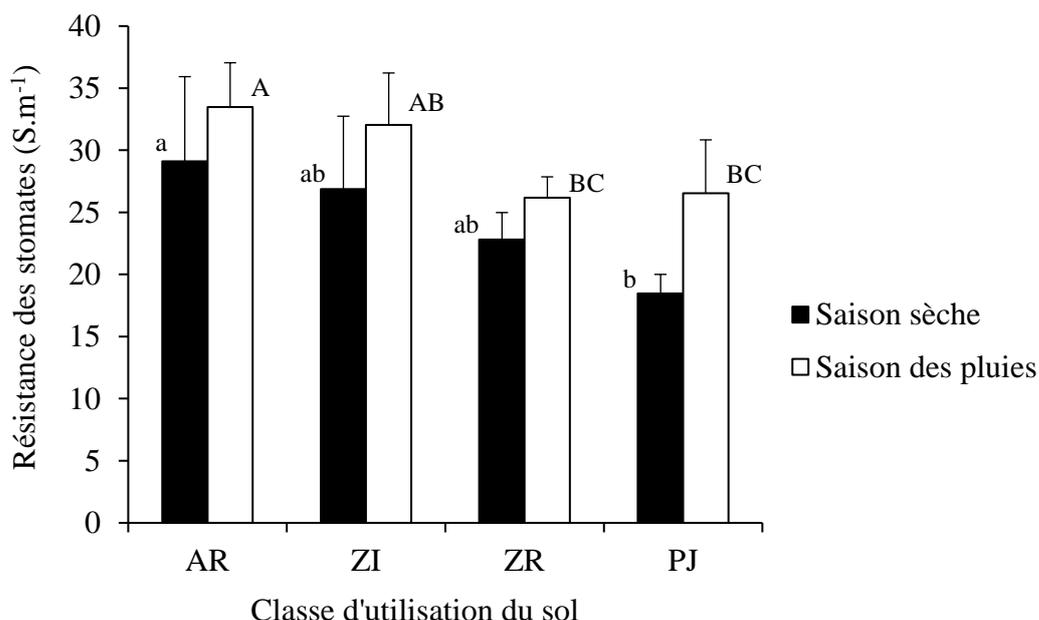


Figure 16 : Variation de la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison pluies.

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle, PJ = Parc et Jardin. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

3.1-1-1-6- Variation de la résistance des stomates en fonction des hauteurs de prélèvement et des classes d'utilisation en saison sèche et en saison des pluies

Les valeurs de la résistance des stomates varient de 22,60 S.m⁻¹ à 36,15 S.m⁻¹ pour la hauteur H1 et de 19,55 S.m⁻¹ à 34,87 S.m⁻¹ pour la hauteur H2 (Tableau VI). Pour la hauteur H1 et H2, il existe une différence significative entre les Axes Routiers et Zones Industrielles quelle que soit la saison. De plus, entre la hauteur H1 et hauteur H2, les valeurs diffèrent statistiquement significative entre les Axes Routiers et les Zones Industrielles. Cependant, elles ne présentent aucune différence significative entre les Zones Résidentielles et les Parcs et Jardins, quelle que soit la saison et la hauteur (Test t de Student, p > 0,05).

Tableau VI : Valeurs de la résistance des stomates (S.m⁻¹) de *Ficus benjamina* L. en fonction des hauteurs de prélèvement dans les classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Classes d'utilisation du sol	Saisons	Hauteurs	
		H1	H2
AR	Saison sèche	22,60 ^{a, B}	19,55 ^{b, B}
	Saison des pluies	36,15 ^{a, A}	31,66 ^{b, A}
ZI	Saison sèche	26,48	26,97 ^B
	Saison des pluies	29,83 ^b	34,87 ^{a, A}
ZR	Saison sèche	27,89	27,74
	Saison des pluies	25,84	27,23
PJ	Saison sèche	29,59	28,53
	Saison des pluies	30,79	25,72

a et b désignent les différences significatives entre les hauteurs pour la même saison, A et B désignent les différences significatives entre les saisons pour une même hauteur, H1 = [0-1,3 m [, H2 = [1,3-2,5 m [. AR = Axe Routier ; ZI = Zone industrielle ; ZR = Zone résidentielles, PJ = Parc et Jardin. Les valeurs significatives au seuil $\alpha = 5\%$ sont en gras.

3.1-1-2- Variation des particules fines des feuilles de *Ficus benjamina* en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Les valeurs des Aimantations Rémanentes Isothermes à Saturation (SIRM) obtenues des feuilles de *Ficus benjamina* au niveau des différentes classes d'utilisation du sol sont illustrées à la figure 17.

Les valeurs les plus élevées des Aimantations Rémanentes Isothermes à Saturation sont obtenues au niveau des Axes Routiers ($11,60 \cdot 10^{-5}A$) et des Zones Industrielles ($11,30 \cdot 10^{-5}A$) et les plus faibles valeurs ont été enregistrées au niveau des parcs et jardins ($1,41 \cdot 10^{-5}A$) et Zone Résidentielle ($1,79 \cdot 10^{-5}A$).

Toutefois, les valeurs des Aimantations Rémanentes Isothermes à Saturation obtenues, sont plus importantes en saison sèche qu'en saison des pluies au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles.

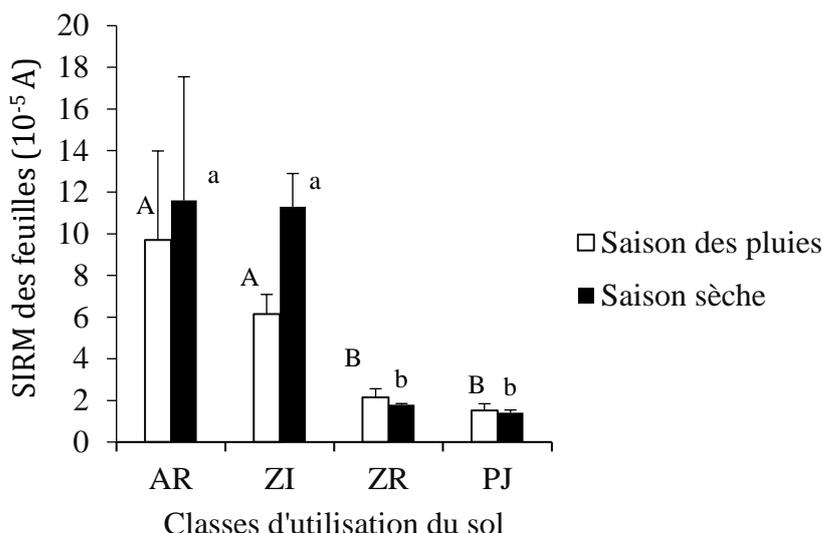


Figure 17 : Variation des particules fines des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison pluies

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle, PJ = Parc et Jardin. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Seuil de significativité $\alpha = 5 \%$.

3.1-1-2-1- Corrélation entre l'émission des particules fines et la densité des stomates en saison sèche et en saison des pluies

La droite de régressions du rapport entre les moyennes des Aimantations Rémanentes Isothermes à Saturations des feuilles de *Ficus benjamina* et la densité des stomates (Figure 18) montre un accroissement du gradient de concentration des particules fines au fur et à mesure que la densité des stomates augmente. En saison sèche aussi qu'en saison des pluies la densité des stomates présente une corrélation positive avec la teneur en Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation des feuilles de *Ficus benjamina*. Bien que non significative, la pente de régression est plus élevée en saison des pluies ($R^2 = 0,311$; $r = 0,557$; $p < 0,05$) qu'en saison sèche ($R^2 = 0,106$; $r = 0,448$; $p < 0,05$).

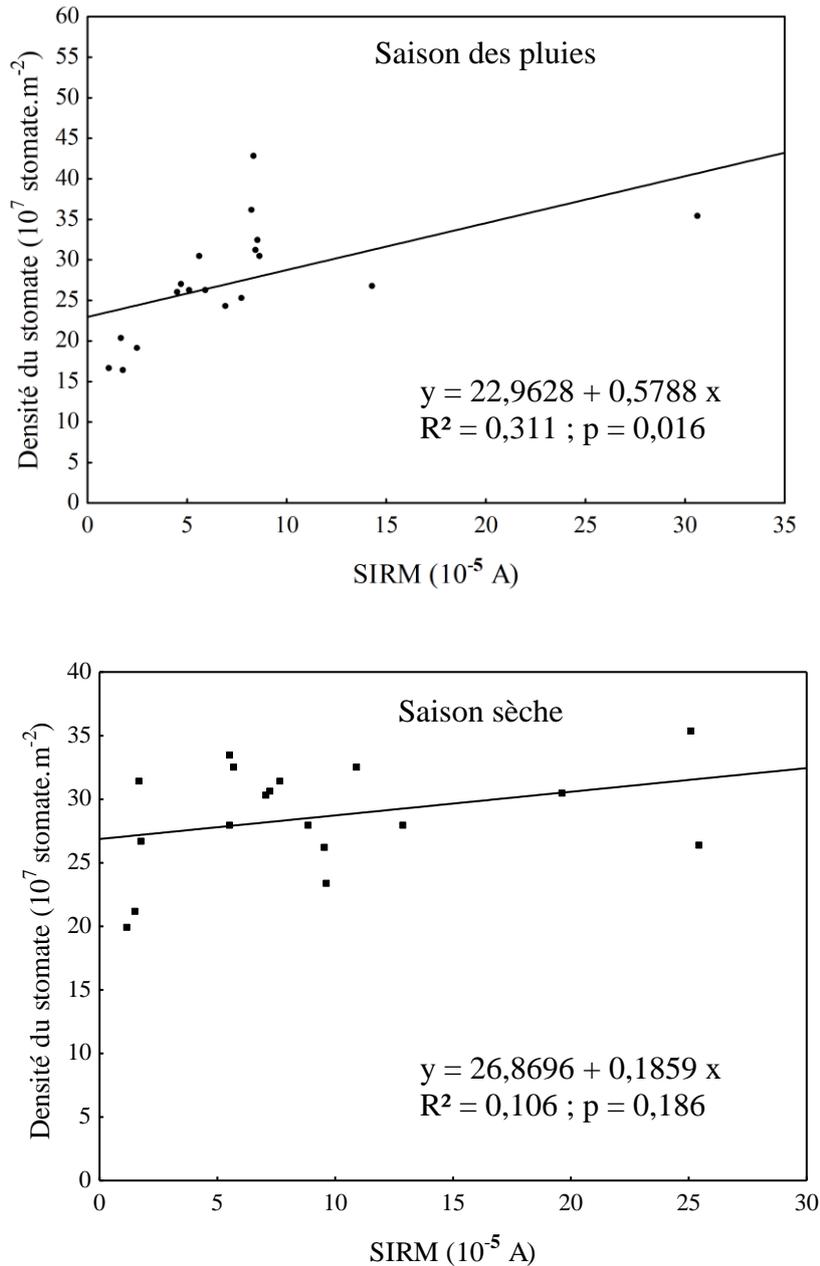


Figure 18 : Corrélation entre les aimantations rémanentes isothermes à saturation et la densité des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. en saison sèche et en saison des pluies
 p = probabilité ; R = coefficient de corrélation

3.1-1-2-2- Corrélation entre l'émission des particules fines et le degré d'ouverture des pores des stomates en saison sèche et en saison des pluies

La corrélation entre l'émission des particules fines et le degré d'ouverture des pores des stomates montre une augmentation du gradient de concentration des particules fines au fur et à mesure que le degré d'ouverture des pores des stomates diminue. En effet, la droite de régression linéaire entre l'émission des particules fines et le degré d'ouverture des pores des

stomates obtenue à partir de la pente des modèles de régression (Figure 19) montre une corrélation positive pendant la saison sèche ($R^2 = 0,134$; $r = -0,366$; $p = 0,135$; $p > 0,05$) et pendant la saison des pluies ($R^2 = 0,240$; $r = -0,490$; $p = 0,038$; $p < 0,05$). Cependant, le gradient de concentration des particules fines et le degré d'ouverture des pores des stomates sont statistiquement élevés en saison des pluies qu'en saison sèche.

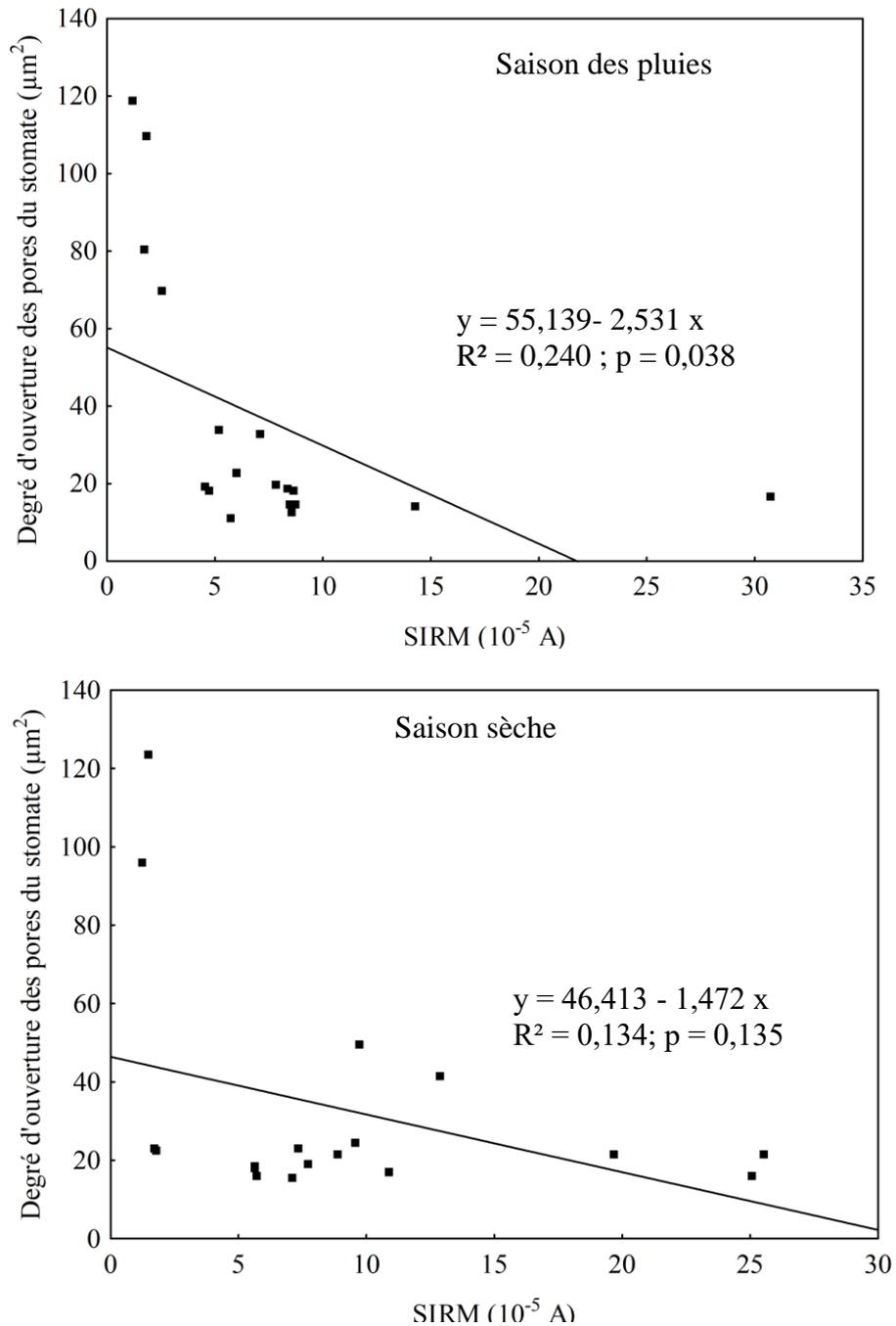


Figure 19 : Corrélation entre les aimantations rémanentes isothermes à saturation et le degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. en saison sèche et en saison des pluies
 p = probabilité ; R = coefficient de corrélation

3.1-1-2-3- Corrélation entre l'émission des particules fines et la résistance des stomates en saison sèche et en saison des pluies

La droite de régression linéaire entre l'émission des particules fines et la résistance des stomates à la saison sèche ($R^2 = 0,219$; $r = 0,468$; $p < 0,05$) et à la saison des pluies ($R^2 = 0,122$; $r = 0,349$; $p > 0,05$) obtenue à partir de la pente des modèles de régression (Figure 20), montre une corrélation positive. Cependant, le gradient de concentration entre les particules fines et la résistance des stomates est significativement élevé en saison des pluies qu'en saison sèche.

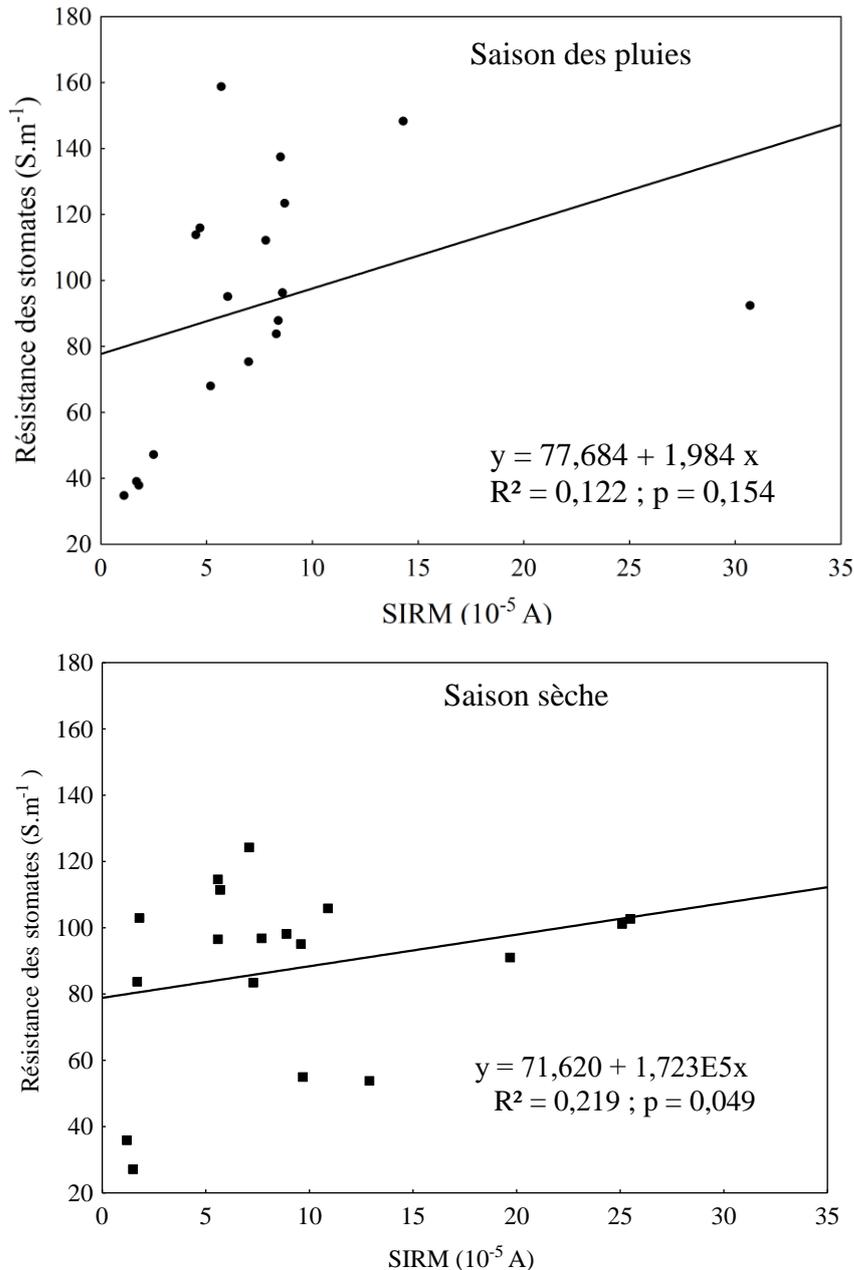


Figure 20 : Corrélation entre les aimantations rémanentes isothermes à saturation et la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. en saison sèche et en saison des pluies

p = probabilité ; R = coefficient de corrélation

3.1-2- Biosurveillance active

3.1-2-1- Caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L.

3.1-2-1-1-Variation de la densité des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Les valeurs de la densité des stomates de *Ficus benjamina* (Figure 21) sont plus élevées dans les classes d'utilisation du sol potentiellement polluées (Axe Routier et Zone Industrielle) que dans les classes moins polluées (Zone Résidentielle et Parc et Jardin). La densité des stomates présente des valeurs comprises entre $18,35.10^7$ stomates.m⁻² et de $32,96.10^7$ stomates.m⁻² et entre $16,18.10^7$ stomates.m⁻² et de $34,47.10^7$ stomates.m⁻² respectivement en saison sèche et en saison des pluies.

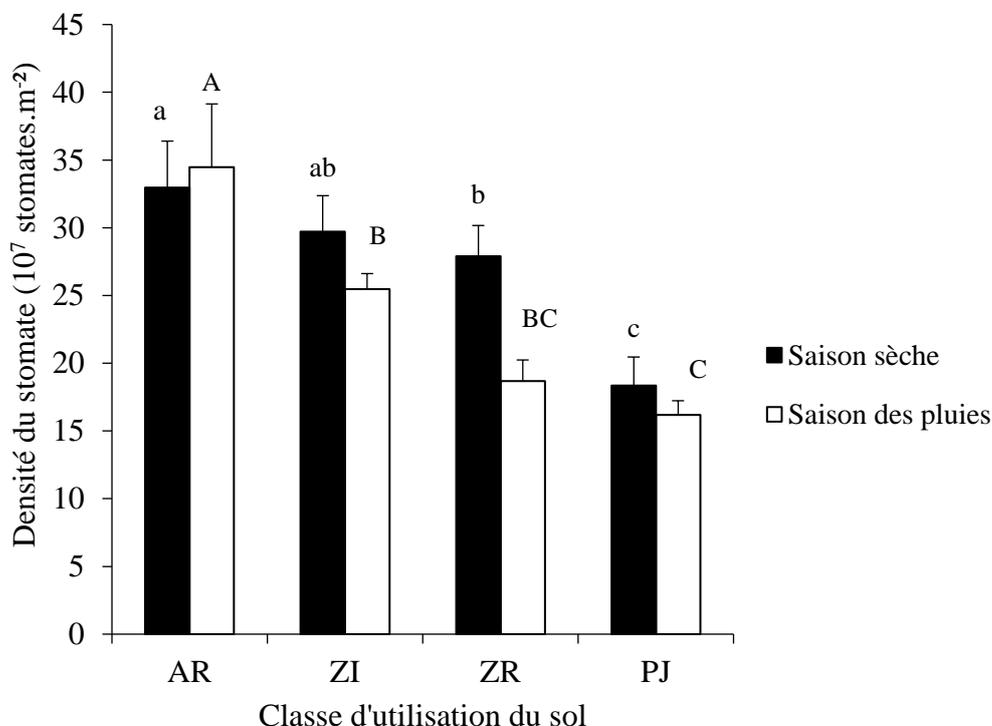


Figure 21 : Variation de la densité des stomates de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies .

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Seuil de significativité $\alpha = 5 \%$.

3.1-2-1-2-Variation de la densité des stomates en fonction de la localisation des plants par rapport à la route en saison sèche et en saison des pluies

La figure 22 indique la variation de la densité des stomates (DS) des feuilles en fonction des distances de prélèvements de la route. La densité des stomates diminue avec la

distance quelque soit la saison de prélèvement. Une différence significative est observée entre les valeurs de la densité des stomates à 2 m et 4 m, à 2 m et 6 m (Tukey-HSD test, $p < 0,05$) pour la saison sèche. En saison des pluies, une différence significative est observée entre la densité des stomates à 2 m, 4 m et 6 m (Tukey-HSD test, $p < 0,05$).

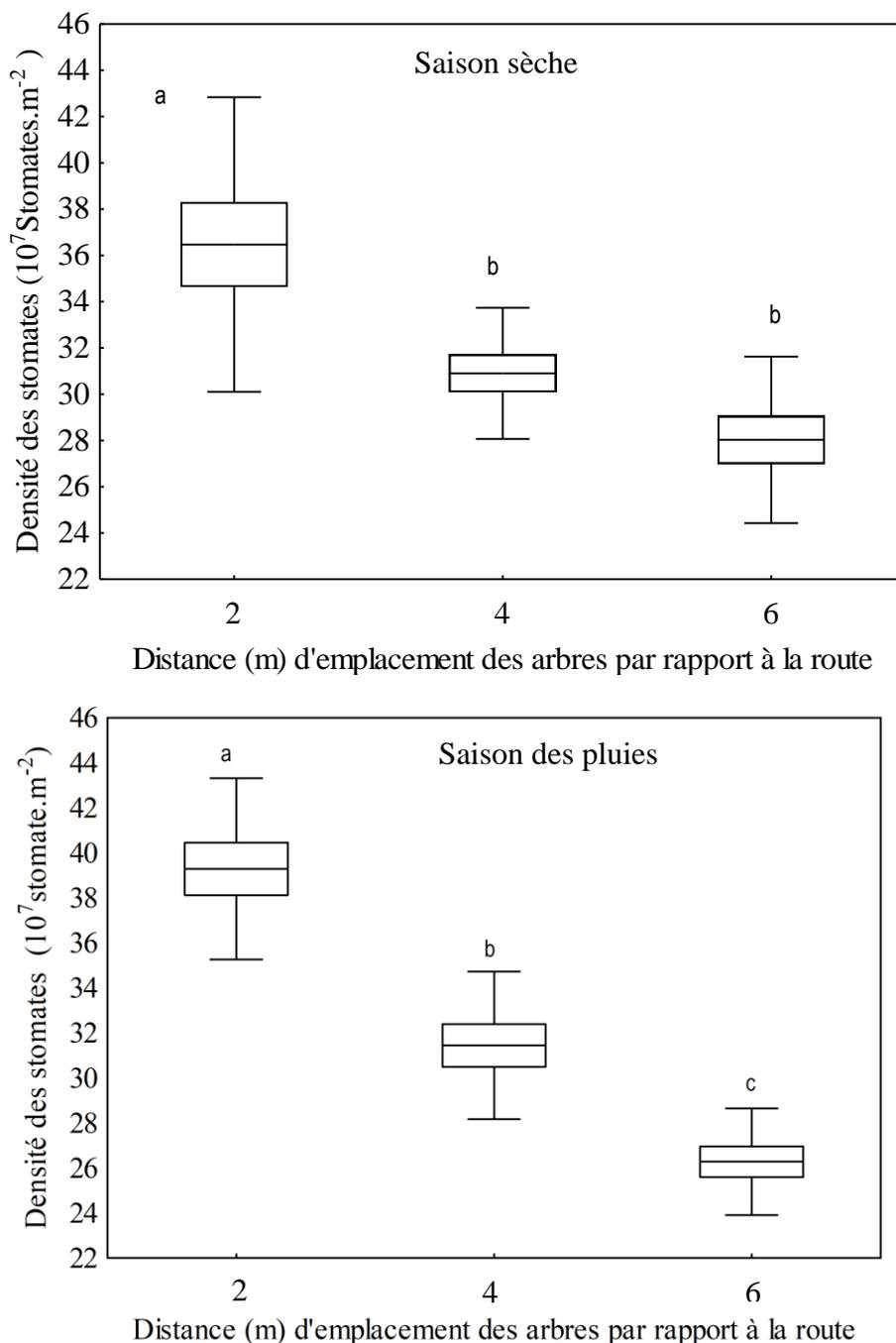


Figure 22 : Variation de la densité des stomates à différentes distances de la route en saison sèche et en saison des pluies.

Les lettres au-dessus des boîtes à moustache indiquent les différences significatives entre les distances. Les barres d'erreurs indiquent les Ecart-types.

Au la distance de prélèvement 2 m, 4 m et 6 m de la routier, la densité des stomates est élevée en saison des pluies qu'en saison sèche (Tableau VII). En saison sèche, il existe une différence significative entre les densités des stomates des feuilles prélevées à 2 m, 4 m et 6 m de la route. En saison des pluies une différence significative est notée à la distance 2 m, 4 m et 6 m de la route.

Pour le prélèvement à la distance 2 m, aucune différence significative n'est notée entre les densités des stomates en saison sèche et en saison des pluies. Par contre, pour les distances 4 m et 6 m une différence significative est notée entre les densités des stomates des feuilles en saison sèche et en saison des pluies.

Tableau VII : Densité des stomates des feuilles en fonction de la localisation des plants de *Ficus benjamina* par rapport à la route, en saison sèche et en saison des pluies.

Saisons	Saison sèche			Saison des pluies		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Localisation des plants par rapport à la route						
Densité des stomates des feuilles (10^7 stomates.m ⁻²)	36,47 ^{A;a}	30,90 ^{B;bc}	28,02 ^{B;bc}	39,286 ^{A;a}	31,44 ^{B;b}	26,27 ^{C;c}

Les lettres majuscules au-dessus des moyennes représentent les différences entre les distances pour une saison donnée. Les lettres minuscules au-dessus des moyennes représentent les différences entre les saisons pour une distance donnée.

3.1-2-1-3-Variation du degré d'ouverture des pores des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

La figure 23 présente les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates en saison sèche et en saison des pluies de *Ficus benjamina* suivant les différentes classes d'utilisation du sol. En saison sèche, le degré d'ouverture des pores observé présente des valeurs plus élevées au niveau des Parcs et Jardins (101,02 μm^2) et Zones Résidentielles (41,67 μm^2) par rapport aux Zones Industrielle (29,75 μm^2) et Axes Routiers (23,81 μm^2). En saison des pluies, la surface des pores des stomates observée présente également des valeurs plus élevées dans les Parcs et Jardins (108,04 μm^2) et Zones Résidentielles (82 μm^2) par rapport aux Zones Industrielles (38,06 μm^2) et Axes Routiers (23,10 μm^2). Ces valeurs présentent une différence significative entre Axes Routiers, Zones Résidentielles et Parcs et Jardins (Test t de Student, $p < 0,05$) en saison sèche et entre Parcs et Jardins, Zones Résidentielles, Zones Industrielles et Axes Routiers (Test t de Student, $p < 0,05$) en saison des pluies.

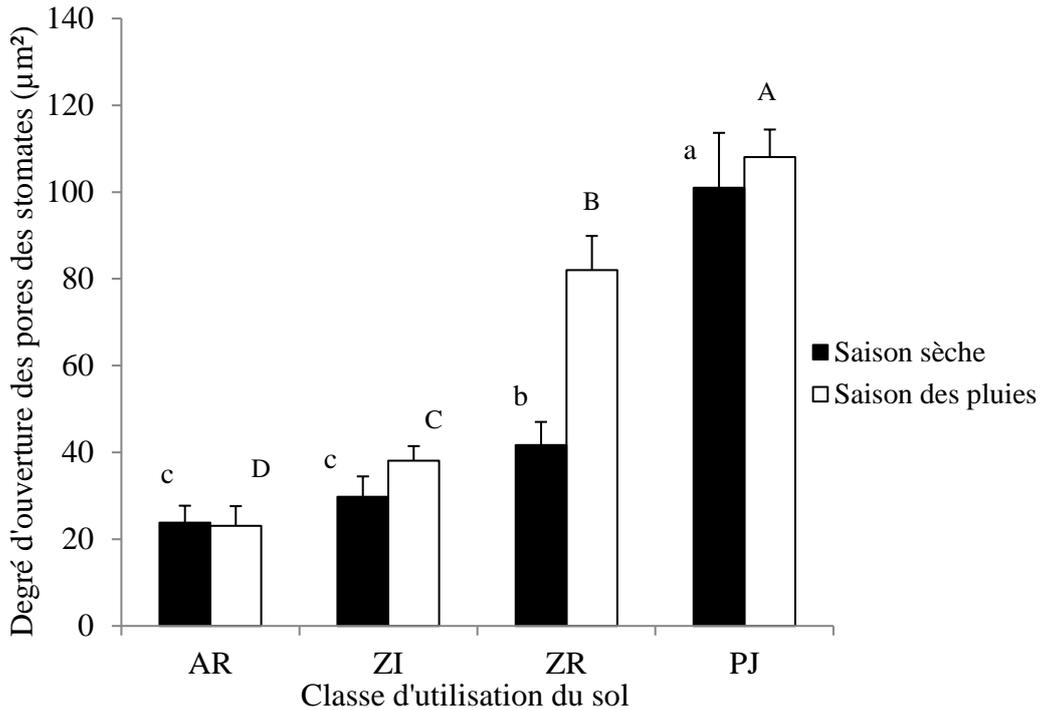


Figure 23 : Degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol, en saison sèche et en saison des pluies.

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

3.1-2-1-4-Variation du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles en fonction de la localisation des plants de *Ficus benjamina* par rapport à la route, en saison sèche et en saison des pluies

Le degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles augmente avec la distance d'emplacement des plants de *Ficus benjamina* par rapport à l'axe routier, en saison sèche et en saison des pluies (Figure 24). En saison sèche, aucune différence significative n'est observée entre les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles des plant situés à 2 m, 4 m et 6 m de la route (Tukey-HSD test, $P > 0,05$). Par contre, en saison des pluies les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles des plants de *Ficus benjamina* situés à différentes distances de l'axe routier diffèrent statistiquement (Tukey-HSD test, $p < 0,05$).

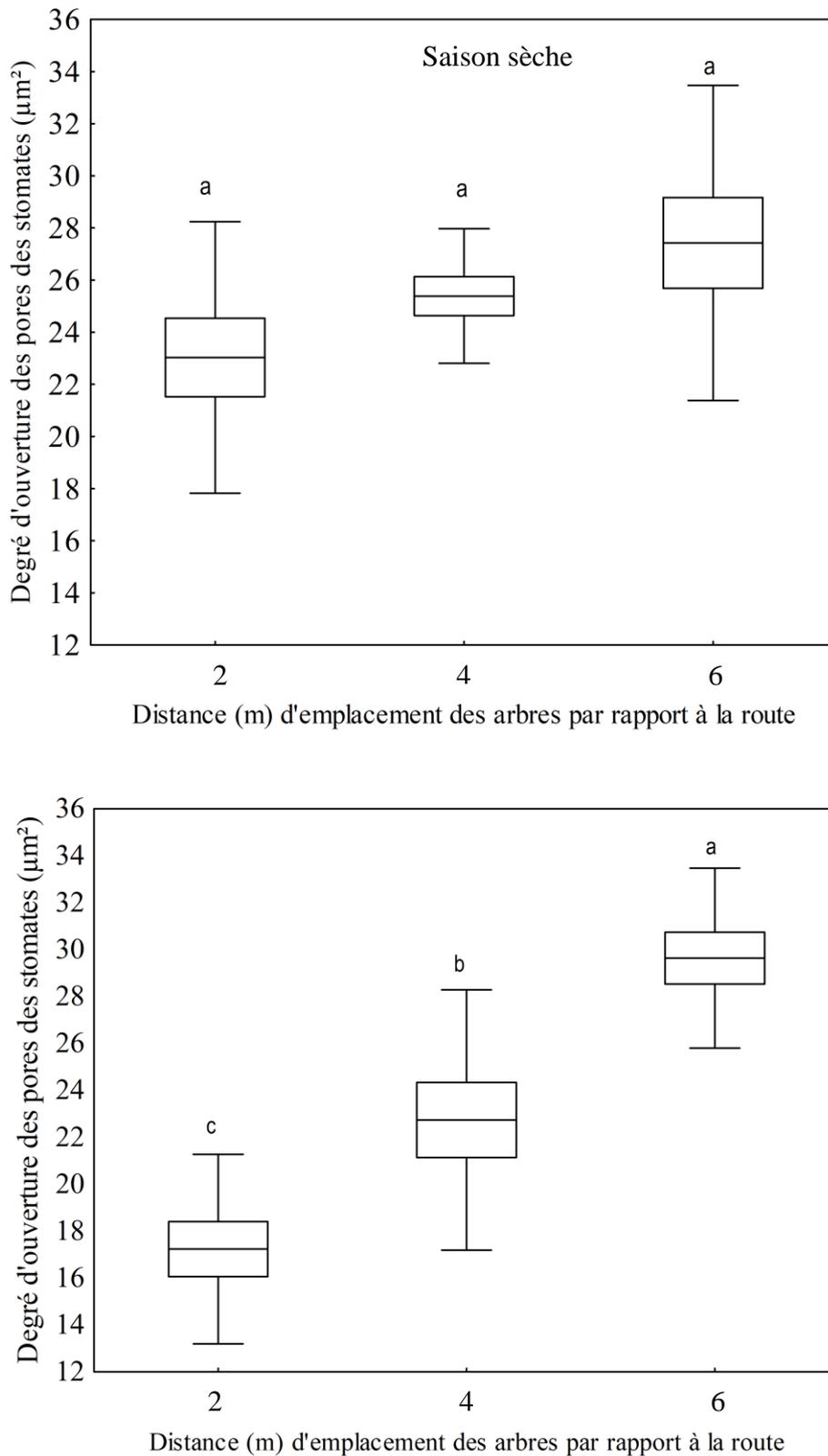


Figure 24 : Variation du degré d'ouverture des pores des stomates à différentes distances de la route en saison sèche et en saison des pluies.

Les lettres au-dessus des boîtes à moustaches indiquent les différences significatives entre les distances. Les barres d'erreurs indiquent les Ecart-types.

Les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates des plants situés à 2 m et 4 m de l'axe routier sont plus élevées en saison sèche par rapport aux valeurs obtenues pour ce paramètre sur les mêmes plants en saison des pluieuses (Tableau VIII). En revanche, pour les plants situés à 6 m des axes routiers, les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates sont plus élevées en saison des pluies qu'en saison sèche. En saison sèche, il n'existe pas de différence significative entre les moyennes des valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates des plants situés à différentes distances des axes routiers. Par contre, en saison des pluies, les moyennes des valeurs de ce paramètre diffèrent statistiquement d'un emplacement des plants à l'autre.

En saison sèche et en saison des pluies, les valeurs moyennes du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles des plants situées à la distance 2 m et 4 m diffèrent significativement. Par contre, il n'existe pas de différence significative entre les valeurs moyennes du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles des plants situées à la distance 6 m.

Tableau VIII : Valeurs moyennes du degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles de plants de *Ficus benjamina* situés à différentes distances des axes routiers, en saison sèche et en saison des pluies.

Saisons	Saison sèche			Saison des pluies		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Localisation des plants par rapport à la route						
Degré d'ouverture des pores des stomates des feuilles (μm^2)	23,03 ^{A;b}	25,38 ^{A;ab}	27,42 ^{A;ab}	17,23 ^{C;c}	22,73 ^{B;bc}	29,63 ^{A;a}

Les lettres majuscules au-dessus des moyennes représentent les différences entre les distances pour une saison donnée. Les lettres minuscules au-dessus des moyennes représentent les différences entre les saisons pour une distance donnée.

3.1-2-1-5- Variation de la résistance des stomates en fonction des classes d'utilisation du sol, en saison sèche et en saison des pluies

Les valeurs moyennes de la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* obtenues au niveau des différentes classes d'utilisation du sol, en la saison sèche et la saison des pluies sont, représentées à la figure 25.

En saison sèche, les valeurs les plus élevées de la résistance des stomates les plus élevées (80,31 S.m^{-1} à 72,68 S.m^{-1}) ont été obtenues au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles. Par contre, les plus faibles valeurs de ce paramètre (53,74 S.m^{-1} à 38,31 S.m^{-1}) ont

été enregistrées dans les Zones Résidentielles et Parcs et Jardins. Le test t de Student présente une différence significative entre les valeurs obtenues au niveau des Axes Routiers, des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins ($p < 0,05$). Mais, aucune différence n'est obtenue entre les valeurs enregistrées au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles, ainsi qu'entre les valeurs enregistrées au niveau des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins (Test t de Student, $p > 0,05$).

En saison des pluies, les valeurs les plus élevées de la résistance des stomates (79,55 $S.m^{-1}$ à 63,53 $S.m^{-1}$) ont été obtenues au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles. Par contre, les plus faibles valeurs de ce paramètre (42,61 $S.m^{-1}$ à 38,98 $S.m^{-1}$) ont été enregistrées au niveau des Parcs et Jardins et des Zones Résidentielles. Le test t de Student présente une différence significative entre les valeurs obtenues au niveau des Axes Routiers, des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins ($p < 0,05$).

Dans chacune des classes, les valeurs les plus élevées (80,31 $S.m^{-1}$) de la résistance des stomates sont observées pendant la saison sèche et les plus faibles (63,53 $S.m^{-1}$) de ce paramètre ont été enregistrées en saison des pluies. Les valeurs de la résistance des stomates sont significativement plus élevées en saison des pluies qu'en saison sèche dans Zones Résidentielles et Parcs Jardins (Test t de Student, $p < 0,05$). Au niveau des classes Axes Routiers et des Zones Industrielles, il n'existe pas une différence significative entre la saison sèche et la saison des pluies.

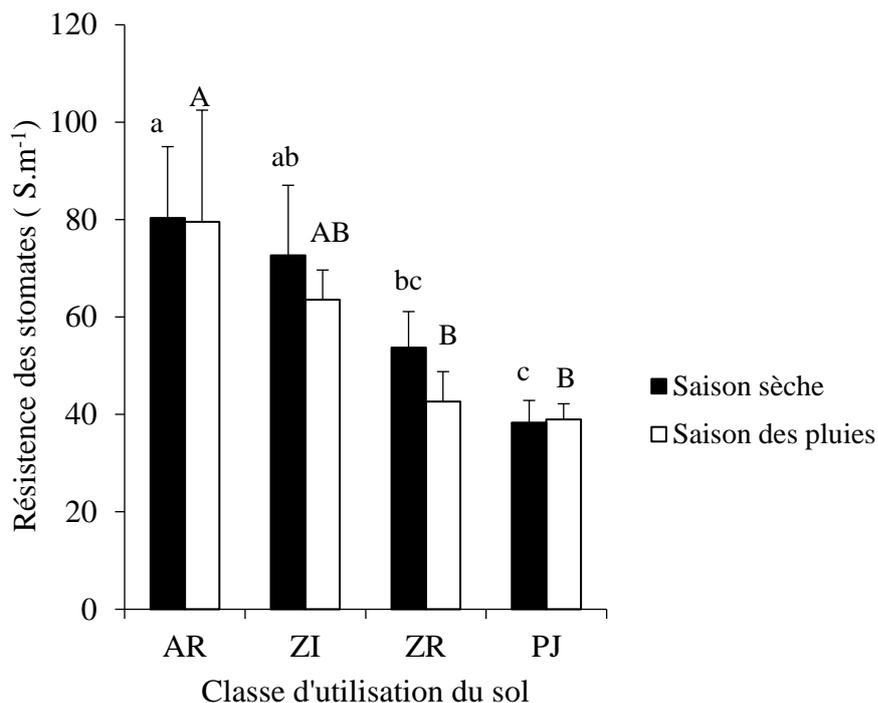


Figure 25 : Variation de la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. suivant les classes d'utilisation du sol, en saison sèche et en saison des pluies.

AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les lettres minuscules et majuscules au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol respectivement en saison sèche et en saison des pluies. Seuil de significativité $\alpha = 5 \%$.

3.1-2-1-6-Variation de la résistance des stomates des feuilles en fonction de la localisation des plants de *Ficus benjamina* par rapport à l'axe routier, en saison sèche et en saison des pluies

La résistance des stomates des feuilles diminue avec la distance d'emplacement des plants de *Ficus benjamina* par rapport à l'axe routier (Figure 26). En saison des pluies, aucune différence n'est observée entre les valeurs de la résistance des stomates des feuilles des plants situés à 2 m, 4 m et 6 m de la route. Par contre, en saison sèche, les valeurs de la résistance des stomates des feuilles des plants de *Ficus benjamina* situés à différentes distances de l'axe routier diffèrent statistiquement (Tukey-HSD test, $p < 0,05$).

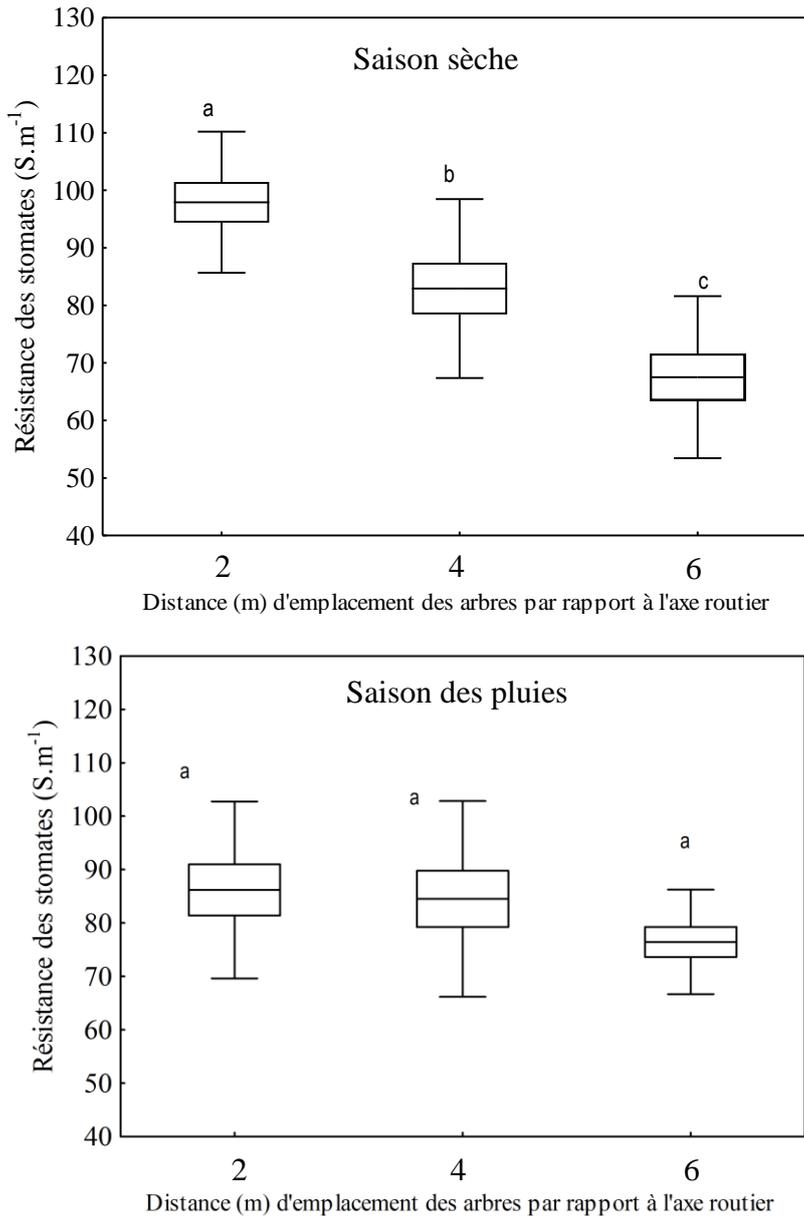


Figure 26 : Variation de la résistance des stomates à différentes distances de la route, en saison sèche et en saison des pluies.

Les boîtes à moustaches surmontées de la même lettre ne sont pas significatives à seuil de $\alpha = 5\%$. Les barres d'erreurs indiquent les Ecart-types.

Les valeurs de la résistance des stomates des plants situés à 2 m de l'axe routier sont plus élevées en saison sèche par rapport aux valeurs obtenues pour ce paramètre sur les mêmes plants en saison des pluies (Tableau IX). En revanche, pour les plants situés à 4 m et 6 m des axes routiers, les valeurs de la résistance des stomates sont plus élevées en saison des pluies qu'en saison sèche. En saison sèche, il n'existe pas de différence significative entre les valeurs moyennes de la résistance des stomates des plants situés à différentes distances des axes

routiers. Par contre en saison des pluies, les valeurs moyenne de ce paramètre ne diffèrent pas statistiquement d'un emplacement des plants à l'autre.

Tableau IX : Valeurs moyenne de la résistance des stomates des feuilles des plants de *Ficus benjamina* situées à différentes distances des axes routiers, en saison sèche et saison pluvieuse.

Saisons	Saison sèche			Saison des pluies		
	2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Localisation des plants par rapport à la route						
Résistance des stomates des feuilles (S.m ⁻¹)	97,92 ^{A:a}	82,92 ^{B:abc}	67,52 ^{C:c}	86,178 ^{A:ab}	84,50 ^{A:abc}	76,44 ^{A:bc}

Les lettres majuscules au-dessus des moyennes représentent les différences entre les distances pour une saison donnée. Les lettres minuscules au-dessus des moyennes représentent les différences entre les saisons pour une distance donnée.

3.1-2-2- Variation de l'activité enzymatique dans les feuilles de *Ficus benjamina* L. en fonction des classes d'utilisation du sol

3.1-2-2-1- Variation de l'activité de la catalase en saison sèche et en saison des pluies

Les variations de l'activité de la catalase pendant les saisons sèches et pluvieuses au niveau des différentes classes d'occupation du sol, sont représentées à la figure 27. Les variations de l'activité de la catalase sont plus fortes (0,10 à 0,34 DO/min/g.matière fraîche) au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles et faibles (0,07 à 0,01 DO/min/g.matière fraîche) dans les Zones Résidentielles et Parcs et Jardins. En saison sèche, les valeurs moyennes de ce paramètre diffèrent statistiquement entre les Axes Routiers et les Parcs et Jardins (Tukey-HSD test, $p < 0,05$). Par contre, en saison des pluies, il n'existe pas de différence significative entre les valeurs de la catalase enregistrées au niveau des classes d'utilisation du sol.

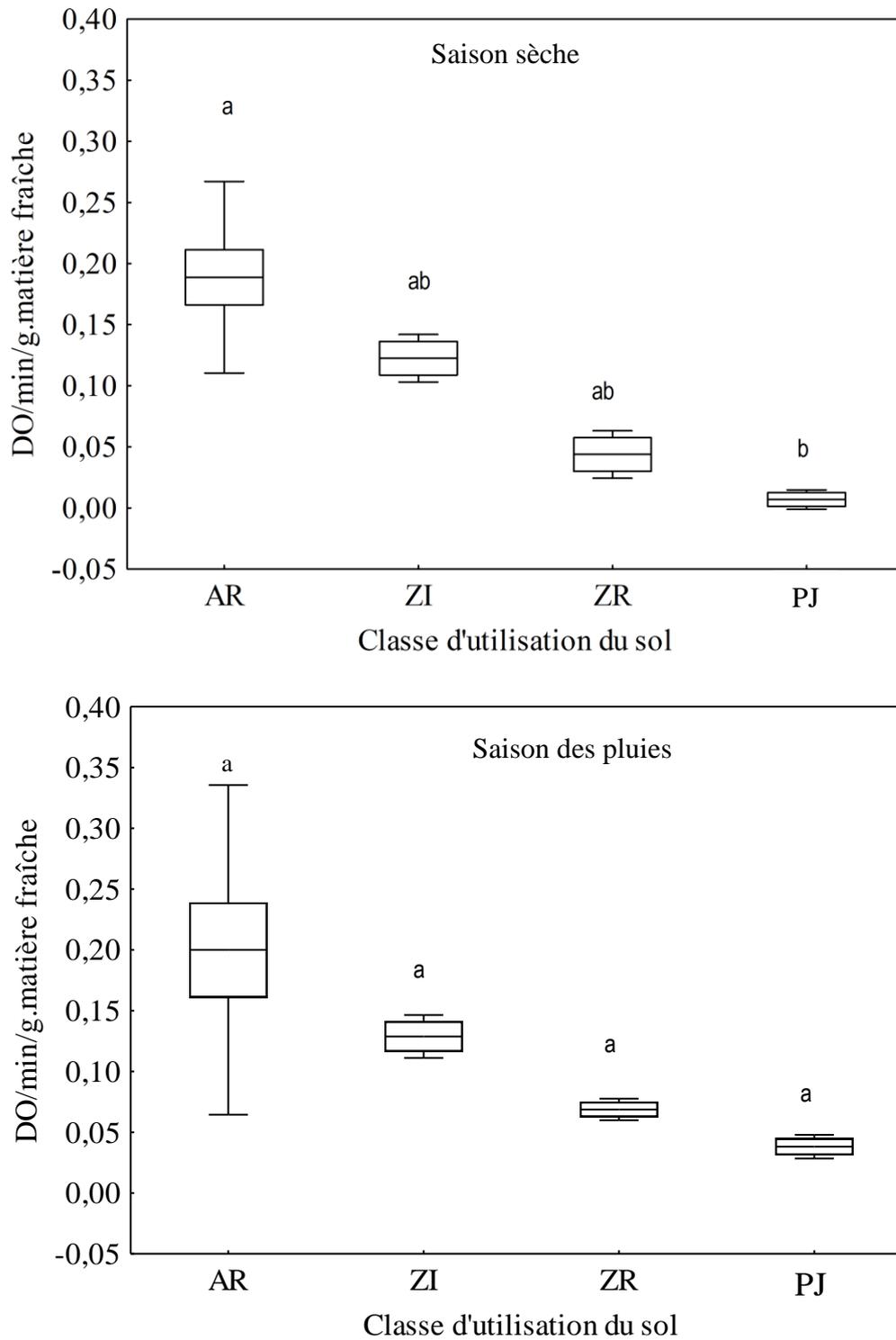


Figure 27 : Variation de l'activité de la catalase au niveau des différentes classes d'utilisation du sol, en saison sèche et en saison des pluies.

Les lettres au-dessus des boîtes à moustaches indiquent les différences significatives entre les distances. Les boîtes à moustaches surmontées de la même lettre ne sont pas significatives à seuil de $\alpha = 5\%$. AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle.

3.1-2-2-2- Variation de l'activité de l'ascorbate peroxydase en saison sèche et en saison des pluies

Les variations de l'activité de l'ascorbate peroxydase pendant les saisons sèche et pluvieuses au niveau des différentes classes d'occupation du sol sont représentées à la figure 28. Les valeurs de l'ascorbate peroxydase sont fortes (0,2 à 2,1 DO/min/g.matière fraîche) au niveau des Parcs et Jardins et des Zones Résidentielles et faibles (0,01 à 0,5 DO/min/g.matière fraîche) au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles. En saison sèche et en saison des pluies, les valeurs de l'ascorbate peroxydase diffèrent statistiquement d'une classe d'utilisation à l'autre (Tukey-HSD test, $p < 0,05$).

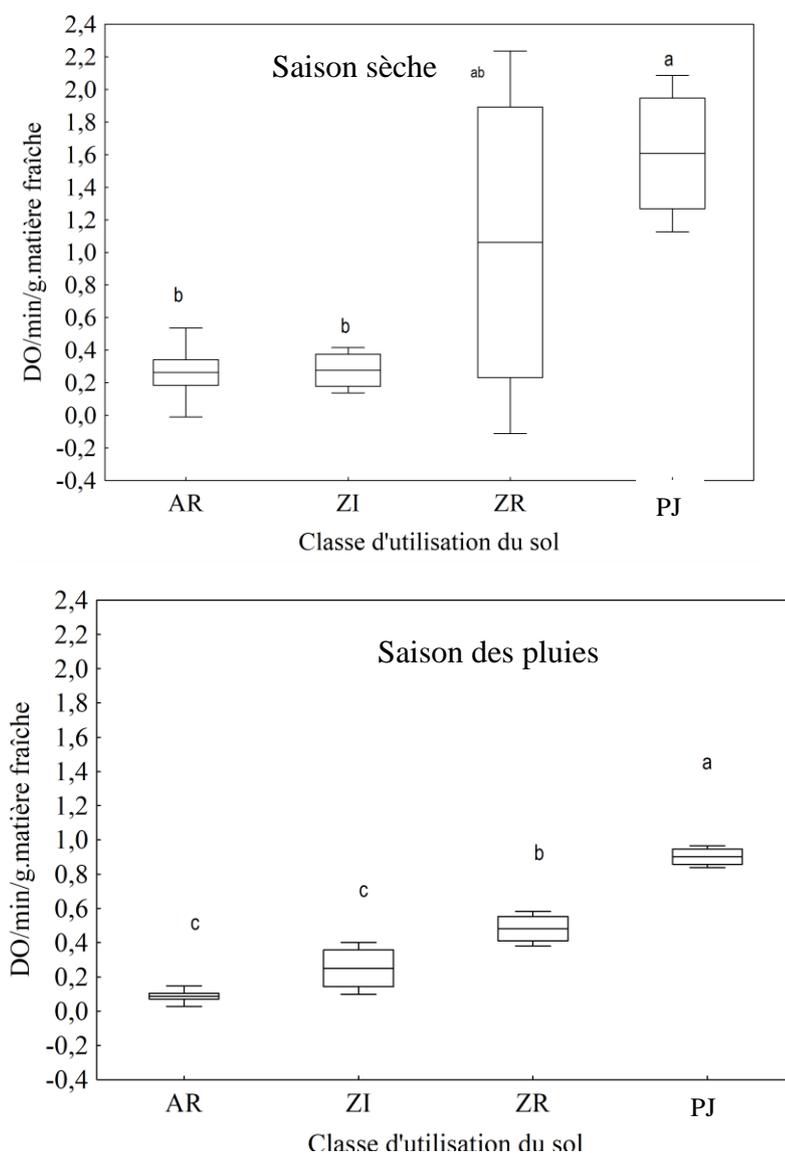


Figure 28 : Variation de l'ascorbate peroxydase au niveau des différentes classes d'utilisation du sol en saison sèche et en saison des pluies

Les lettres au-dessus des boîtes à moustaches indiquent les différences significatives entre les distances. AR = Axe routier, ZI = Zone industrielle, ZR = Zone résidentielle. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

3.1-2-2-3- Corrélation entre les activités de la catalase et celle de l'ascorbate peroxydase, en saison sèche et en saison des pluies

La droite de régression linéaire (Figure 29) présentant les activités des enzymes de la catalase et celles de l'ascorbate peroxydase, obtenue à partir de la pente des modèles de régression, pendant la saison sèche ($R^2 = 0,26$; $r = -0,51$; $p < 0,05$) et la saison des pluies ($R^2 = 0,15$; $r = -0,38$; $p > 0,05$) montre une corrélation négative. Les concentrations de l'activité des enzymes de la catalase et de l'ascorbate peroxydase ne sont pas significatives en saison des pluies. Par contre, les concentrations enregistrées en saison sèche présentent une régression linéaire significative $\alpha = 5\%$.

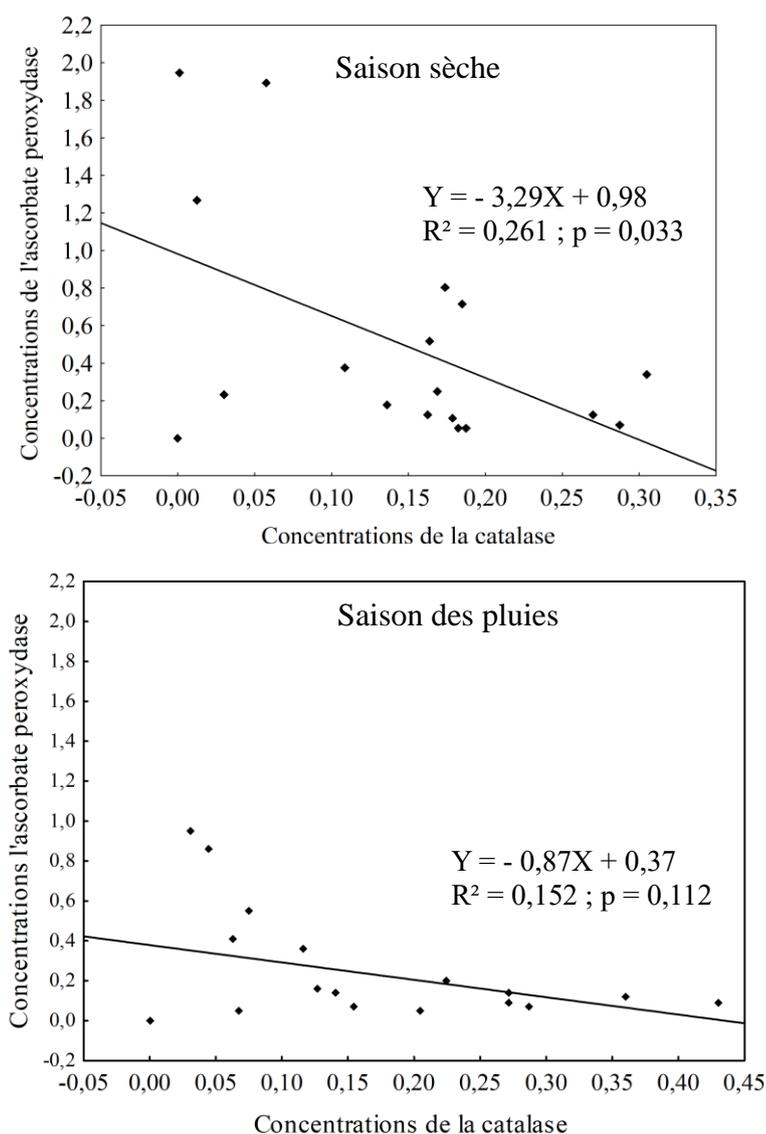


Figure 29 : Corrélation entre l'activité de la catalase et celle de l'ascorbate peroxydase dans les feuilles de *Ficus benjamina* L. en saison sèche et en saison pluvieuse
 p = probabilité ; R = coefficient de corrélation

3.2- Discussion

3.2-1- Caractéristiques des stomates influençant la qualité de l'habitat en période de biosurveillance

La densité des stomates observées dans les feuilles de *Ficus benjamina* montre des valeurs plus élevées dans les classes Axes Routiers et Zones Industrielles, faibles dans les classes Zones Résidentielles et Parcs et Jardins. Ces observations pourraient s'expliquer par l'intensité des activités des différentes unités industrielles et les véhicules à moteur. En effet, l'espace industriel de la zone portuaire est concentré en dioxyde de soufre (SO₂), en oxyde nitrique (NO_x) émis par les raffineries et en poussière toxique dégagée par les cimenteries (Kablan *et al.*, 2013). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Elagoz *et al.* (2006) et Balasooriya *et al.* (2009) qui indiquent que, dans un environnement pollué, les concentrations élevées de dioxyde de carbone (CO₂), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), monoxyde de carbone (CO), oxyde d'azote (NO_x), l'ozone (O₃), composés organiques volatils pourraient se déposer à la surface des feuilles entraînant une augmentation de la densité des stomates de la feuille.

Contrairement à la densité des stomates, le degré d'ouverture des pores des stomates présente des valeurs significativement élevées au niveau des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins mais, faibles au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles ($p < 0,05$). Cette observation pourrait s'expliquer par le fait que la température élevée, la lumière, le vent soient des facteurs de réduction de la taille des stomates en limitant la perte d'eau qui entraîne aussi la diminution de l'absorption des polluants (El Hassani & Persoons, 1995 ; Barber *et al.*, 2004 ; Elagoz *et al.*, 2006 ; Kardel *et al.*, 2010). Nos résultats corroborent ceux de Kardel *et al.* (2010) qui ont montré au niveau des axes routiers, un degré d'ouverture des pores des stomates faible. Toutefois, les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates qui sont observées en saison sèche sont plus élevées au niveau des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins qu'au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles. Les valeurs élevées en saison sèche et faibles en saison des pluies du degré d'ouverture des pores des stomates pourraient être dues à des dispositions prises par la plante en ouvrant ces stomates pour fixer le CO₂, en présence d'énergie lumineuse (Balasooriya *et al.*, 2009).

Les stomates des feuilles de *Ficus benjamina* présentent une résistance à la pollution de l'air plus importante au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles par rapport aux Zones Résidentielles et Parcs et Jardins, quelque soit la saison et la hauteur de prélèvement des empreintes de stomate des feuilles. Ce résultat s'explique selon Verma & Singh (2006), par le

stress dû à la pollution de l'air entraînant une augmentation de résistance des stomates en présence des facteurs environnementaux tels que le soleil et la pluie (Hetherington & Woodward, 2003 ; Paoletti & Grulke, 2005). Nos résultats sont en accord avec ceux de Balasooriya *et al.* (2009) qui ont obtenu avec *Taraxacum officinalis* L. une augmentation significative de la résistance du stomate au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles en comparaison avec les Zones Résidentielles et les Parcs et Jardins. Ces résultats montrent ainsi que les paramètres climatiques tels que la température, la pluviométrie, la vitesse du vent, pourraient augmenter le taux des polluants dans les feuilles (Cuny *et al.*, 2006) entraînant une augmentation de la résistance du stomate en saison des pluies. Toutefois, il faut noter que d'autres facteurs biotiques, liés à l'âge, au stade physiologique et à la présence de parasites pourraient entraîner une résistance, une tolérance ou une sensibilité de la plante à la pollution (Wang *et al.*, 2008).

Les tendances de la variation de la densité, du degré d'ouverture des pores et de la résistance des stomates au niveau des différentes classes d'utilisation du sol, obtenues chez *Ficus benjamina* sont similaires aux résultats de nombreuses études faites par Pal *et al.* (2002) pour *Ficus religiosa* (L.) et *Bougainvillea spectabilis* (Wild.) et Verma & Singh, (2006) pour *Thevetia nerifolia* (Juss).

3.2-2- Influence des particules fines sur les caractéristiques des stomates

Les résultats de cette étude montrent une relation remarquable entre le taux de particules accumulées par les feuilles de *Ficus benjamina* et les caractéristiques de ses stomates. La densité et la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* augmentent avec la teneur élevée en particules fines. En effet, plusieurs études ont montré que les Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation de feuilles sont plus élevées au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles, qu'au niveau des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins (Terzaghi *et al.*, 2013 ; Barima *et al.*, 2014 ; N'Gouran *et al.*, 2014). Ces observations montreraient le transfert des particules les plus fines vers les stomates. Ces résultats corroborent ceux de N'Gouran *et al.* (2014) qui ont montré qu'au niveau des axes routiers, le taux de polluants est plus élevé. Ainsi, la densité des stomates augmente en fonction de la concentration des particules fines accumulées sur la surface des feuilles de *Ficus benjamina* au niveau des axes routiers. Ce taux élevé de particules peut s'expliquer par la présence d'une couche épaisse de cuticule de cire sur les faces adaxiale et abaxiale des feuilles. En effet, la cuticule de cire est une substance imperméable qui protège la feuille contre la dessiccation et les contraintes

environnementales externes (Rieder & Schreiber, 2001 ; Feakins & Sessions, 2010). Ce résultat est confirmé par plusieurs études (Lehndorff *et al.*, 2006 ; Dzierzanowski *et al.*, 2011 ; Terzaghi *et al.*, 2013 ; Barima *et al.*, 2014) qui ont observé une corrélation entre les valeurs de l'Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation de feuilles et la densité du trafic avec l'espèce *Eulesine indica* L. (Poaceae). En outre, cette augmentation de la densité du stomate et de la résistance des stomates pourrait être due à un contrôle de l'absorption des polluants par la plante (Verma & Singh, 2006) ou à une obstruction des stomates par les matières particulaires (Auclair, 1977).

En revanche, le degré d'ouverture des pores des stomates diminue avec la teneur élevée en particules fines. Cette faible ouverture du stomate en réponse à une augmentation du taux de particules fines récoltées prouve le contrôle anatomique qui s'opère lors du stress des feuilles des plantes dans un environnement pollué. Ce stress constant a pour conséquence la détérioration de la cire épicuticulaire qui recouvre la surface des feuilles (Cape *et al.*, 1995 ; Holder, 2012 ; Kardel *et al.*, 2012). Aussi, Sharma, (1987) remarque qu'en atmosphère polluée les feuilles des plantes ont-elles un degré d'ouverture de stomates faible, ce qui constitue une adaptation écologique de protection des tissus de la plante contre les gaz polluants qui pénètrent par les stomates. En dépit de l'épaisseur de la couche de cire épicuticulaire des feuilles responsables de l'encapsulation des polluants atmosphériques, l'accumulation des particules peut s'expliquer aussi par la direction du vent par rapport à la route (Ward, 1990).

3.2-3- Distribution horizontale des caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina*

La densité et la résistance des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* aux abords des axes routiers montrent un gradient décroissant par rapport à la distance (2 à 6 m). Ces observations pourraient être liées à une atmosphère polluée en bordure de route (Sharma, 1987). Nos résultats concordent avec ceux de Barima *et al.* (2014) qui ont prouvé qu'aux abords des routes, entre 0-5 m, le taux de polluants est très élevé et diminue après les 5 m. Et aussi, ces auteurs ont montré que les distances entre 0 m et 5 m de la route sont les plus vulnérables ($20,1-45,1 \cdot 10^{-6}$ A) à la pollution en matières particulaires dans le District Autonome d'Abidjan. De plus, les travaux de Tra bi *et al.* (2014) ont montré une densité des stomates faible des plants de *Ficus polita* situés au niveau des axes routiers, par rapport aux plants situés à des distances plus éloignés. Les travaux de Pourkhabbaz *et al.* (2010) ont également montré une faible densité des stomates et de résistance des stomates au niveau des feuilles des plants de *Platanus orientalis* situés également aux abords des axes routiers par rapport à ceux situés dans un site

rural. La réduction de la densité des stomates et la résistance des stomates viendrait en réponse à une atmosphère polluée, afin de contrôler l'absorption de polluants par les plantes (Verna *et al.*, 2006). Ainsi, les fortes concentrations en CO₂ dans l'environnement des plantes représentent une cause majeure de la réduction de la résistance des stomates et de la densité des stomates (Auclair, 1977 ; Royer, 2001).

Les empreintes des stomates prélevées aux abords des Axes Routiers présentent des ouvertures des pores qui augmentent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la route (2 à 6 m). Ceci traduit la diminution de la concentration en polluant avec l'augmentation de la distance à la route (Hautela *et al.*, 1994 ; Bakker *et al.*, 2001). Ces observations s'expliqueraient par le stress dû à la pollution de l'air qui affecte le taux de transpiration (Hetherington & Woodward, 2003 ; Paoletti & Grulke, 2005). Selon Shimazaki *et al.* (2007), cette faible ouverture des stomates à proximité des routes est due à une concentration élevée de CO₂. De plus, Tiwari *et al.* (2006) montrent que le dépôt d'oligo-éléments, de polluants gazeux, d'oxydes d'azote (NO_x), de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂), ainsi que du dioxyde de soufre (SO₂) sur les feuilles des plantes, affecte leurs comportements physiologiques réduisant l'ouverture des stomates. En effet, les fortes teneurs en polluant vont entraîner une dépolarisation de la membrane des cellules de garde, par la sortie d'ions K⁺ et Cl⁻ conduisant directement à la fermeture des stomates à une teneur élevée en CO₂ (Tyree & Alexander, 1993 ; Kim *et al.*, 2010). Abeyratne & Ileperuma (2006) ont également observé une réduction de 50 (%) de l'ouverture des stomates des feuilles de *Argyrea populifolia* situés dans des sites à forte teneur en SO₂ par rapport à un site à faible teneur en SO₂. Zelitch (2004) a rapporté que SO₂ et ses produits métaboliques affectaient de nombreux processus physiologiques dans les cellules des plantes. Ainsi, la réponse stomatique à des concentrations élevées en SO₂ résulte en une fermeture stomatique entraînant une résistance de la plante face au stress dû à la pollution de l'air. D'autres études s'accordent à montrer que les concentrations des polluants sont plus importantes au niveau de la chaussée puis diminuent de façon exponentielle avec l'éloignement à l'autoroute ou à la route (Parmentier & Garrec, 1994).

3.2-4- Caractéristiques des stomates des feuilles en fonction des saisons de prélèvement

Les valeurs du degré d'ouverture des pores des stomates observés en saison sèche et saison des pluies, au niveau des différentes classes d'utilisation du sol, sont significativement élevées dans les Zones Résidentielles et Parcs et Jardin, mais au niveau des Axes Routiers et Zones Industrielles. Cela s'explique par une obstruction des stomates par les polluants entraînant une réduction de leur taille, voire leur fermeture, empêchant par la suite l'absorption

d'autres polluants à travers ces stomates (El Hassani & Persoons, 1995 ; Barber *et al.*, 2004 ; Elagoz *et al.*, 2006). A cela, il faut ajouter qu'en période humide les végétaux sont plus sensibles aux dépôts de polluants. En effet, l'humidité favorise la dissolution des dépôts à la surface, ce qui accélère l'ouverture des stomates et permet en conséquence l'entrée des polluants dans l'organisme végétal (Garrec & Renard, 1996).

Contrairement au degré d'ouverture des pores des stomates en saison sèche et saison des pluies, les feuilles de *Ficus benjamina* présentent une densité et une résistance des stomates à la pollution de l'air plus importante au niveau des Axes Routiers et Zones Industrielles par rapport aux classes Zones Résidentielles et Parcs et Jardins. Les valeurs les plus élevées sont obtenues en saison sèche. Ces résultats s'expliqueraient par le stress dû à la pollution de l'air induisant une forte transpiration foliaire (Hetherington & Woodward, 2003 ; Paoletti & Grulke, 2005). En effet, les plantes tendent à réguler l'entrée du CO₂ tout en minimisant et régulant la perte d'eau par transpiration dans la cavité sous-stomatique de sorte qu'il y ait un rapport constant à la concentration atmosphérique (Goudriaan & Unsworth, 1990). Une faible pression partielle de CO₂ dans l'espace intercellulaire du mésophylle stimule l'ouverture, tandis qu'une forte pression partielle induit la fermeture comme observée dans beaucoup d'études porométriques (Morison & Gifford, 1983 ; Tyree & Alexander, 1993 ; Field *et al.*, 1995). Ainsi, la réponse stomatique à des concentrations élevées en CO₂ résulte d'une fermeture stomatique entraînant une résistance de la plante face au stress dû à la pollution de l'air.

Malgré le rôle des stomates à réguler l'entrée du CO₂ dans les feuilles, l'accumulation des particules peut s'expliquer aussi par les activités enzymatiques dans les feuilles des plantes exposées à la pollution de l'air (Terzaghi *et al.*, 2013).

3.2-5- Relation entre la pollution de l'air et l'activité enzymatique dans les feuilles au niveau des classes d'utilisation du sol

L'ascorbate peroxydase (APX) est une enzyme impliquée dans l'élimination du peroxyde d'hydrogène lors du stress oxydatif chez les plantes supérieures, les algues et plusieurs cyanobactéries (Sairam & Saxena, 2000). Elle est une composante du cycle ascorbate-glutathion qui fonctionne comme un éboueur des formes actives d'oxygène et semble être importante pour la protection des plantes contre les formes actives d'oxygène générées (peroxyde d'hydrogène) durant l'exposition des plantes aux polluants (Miyake *et al.*, 1993). L'activité de l'ascorbate peroxydase des feuilles de *Ficus benjamina* suivant les classes d'utilisation du sol, montre des valeurs significativement élevées (1,6 DO) au niveau des Zones

Résidentielles et des Parcs et Jardins, mais faible (0,1 DO) au niveau des Axes Routiers et des Zones Industrielles. Cette forte teneur d'ascorbate peroxydase obtenue dans les zones moins polluées se justifie par l'action des facteurs environnementaux (température élevée, l'intensité lumineuse élevée et le manque d'eau) et par les effets toxiques des polluants, qui peuvent inciter la mise en place des systèmes de défenses antioxydants (Bebiano *et al.*, 2004). L'augmentation de l'activité de l'ascorbate peroxydase au niveau des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins démontre une élimination du peroxyde d'hydrogène en utilisant la vitamine C comme co-substrat. En zones polluées, le faible taux de l'ascorbate peroxydase démontre une réduction de la capacité des cellules à piéger le peroxyde d'hydrogène (Kubo *et al.*, 1999). Nos résultats sont en accord avec ceux de Murgia *et al.* (2004) et Tarantino *et al.* (2005), Ghorbanli *et al.* (2007) qui ont montré une inhibition de l'activité de l'Ascorbate Peroxydase dans les zones polluées par les polluants.

Contrairement à l'activité de l'Ascorbate Peroxydase, les résultats de notre étude, montrent une activité de la catalase significativement élevées (0,20 DO) au niveau des Axes Routiers et Zones Industrielles et faible (0,02 DO) au niveau des Zones Résidentielles et des Parcs et Jardins pour la saison sèche et la saison des pluies. L'augmentation de l'activité de la catalase dans les classes polluées peut être due, en outre, à la présence de polluants environnementaux qui occasionnerait une forte production de H₂O₂ chez ces espèces sous un stress oxydatif (Dautremepuits *et al.*, 2004 ; Farombi *et al.*, 2007). Cela s'explique par le fait que le système superoxyde dismutase-catalase (SOD-CAT) représente la première ligne de défense contre le stress oxydatif (Yildirim, 2011). Nos résultats confirment ceux de Ghorbanli *et al.* (2007) et Mittler *et al.* (1999) qui expliquent ce fait par une augmentation de la sensibilité des plantes au stress environnemental ou à l'attaque d'un pathogène dans ces milieux.

La corrélation négative obtenue entre la catalase et l'ascorbate peroxydase pour les deux saisons montre un mécanisme de défense plus efficace de la catalase à travers une augmentation de celle-ci. En effet, la catalase joue un rôle important dans l'élimination du peroxyde d'hydrogène à forte concentration (Spolarics & Wu, 1997). L'augmentation de l'activité de la catalase suivie de la réduction de l'ascorbate peroxydase dans les zones polluées s'explique par les teneurs élevées en peroxyde d'hydrogène. Les teneurs élevées en peroxyde d'hydrogène stimuleraient une expression de la catalase dans la détoxification des plantes afin de survivre à ce stress (Schutzendubel & Polle, 2002). Le peroxyde d'hydrogène participe activement à la régulation du mécanisme d'ouverture/fermeture des cellules de garde (Desikan *et al.*, 2004). Il pourrait jouer le rôle de molécule signal entre les racines et les feuilles lors d'un stress métallique pour induire la fermeture des stomates lors de ce stress (Yang *et al.*, 2006). La

catalase est une enzyme contenue dans les peroxysomes et dans le cytosol, d'où sa forte activité dans les feuilles où elle catalyse la réduction du peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène moléculaire (Powers & Jackson, 2008).

CONCLUSION

A travers cette étude, nous avons cherché à déterminer la qualité de l'air du District Autonome d'Abidjan via le biomonitoring de la qualité de l'air à partir des feuilles des plantes de *Ficus benjamina*. Cette méthode serait une alternative complémentaire pour faire face aux limites des appareils électroniques utilisés. L'objectif de ce travail était d'évaluer le potentiel des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* à être utilisés comme le potentiel indicateur de la pollution locale de l'air à partir de la densité, le degré d'ouverture des pores, la résistance du stomate et des activités enzymatiques. Après avoir vérifié les caractéristiques des stomates face aux stress environnementaux, nos résultats montrent que la densité moyenne ($34,473.10^7 \text{ Stomates.m}^{-2}$) et la résistance moyenne du stomate ($80,317 \text{ S.m}^{-1}$) présentent des valeurs plus élevées dans les zones potentiellement polluées (Axes routiers et Zones industrielles) par rapport aux zones moins polluées (Zones résidentielles et Parcs et Jardins). Cependant, le degré d'ouverture moyenne des pores du stomate présente des valeurs plus élevées ($129,094 \mu\text{m}^2$) en zones moins polluées qu'en zones polluées ($23,108 \mu\text{m}^2$). La faible ouverture des stomates dans les zones polluées (Axe routier et Zone industrielle), prouve la sensibilité de la plante face au stress. Au demeurant, les caractéristiques des stomates étudiées peuvent donc être de bons bio-indicateurs de la qualité de l'air.

Quant aux activités enzymatiques, elles montrent que la catalase est élevée (0,20 Densité Optique) dans les zones polluées (Axes routiers et Zones industrielles) et faibles (0,02 Densité Optique) dans les zones moins polluées (Zones résidentielles et Parcs et Jardins). Par ailleurs, l'ascorbate peroxydase présente une activité faible (0,1 Densité Optique) dans les zones polluées et élevée (1,6 Densité Optique) dans les zones moins polluées. Les activités enzymatiques indiquent, en outre, la sensibilité de la plante face aux stress.

Les résultats ont aussi indiqué que l'espèce *Ficus benjamina* possède une bonne capacité d'accumulation de particules fines due aux caractéristiques morphologiques et physiologiques des feuilles de *F. benjamina*. En effet, la structure coriace des feuilles de même que la présence de cire et la production de latex font de cette espèce une excellente accumulatrice de polluants atmosphériques.

Cette étude nous a permis de mieux comprendre l'impact de la qualité de l'air ambiant sur les caractéristiques morphologiques et physiologiques des feuilles des plantes dans leur milieu. Les polluants atmosphériques gazeux pénètrent généralement chez les végétaux supérieurs dans les feuilles par les stomates, quand les polluants particuliers s'accumulent le plus souvent à la surface des feuilles au niveau de la cuticule et des cires.

PERSPECTIVES

Ce travail pourrait se poursuivre en tenant compte des paramètres climatiques mensuels (étude sur une année) et des aspects biochimiques qui contrôlent l'ouverture ou la fermeture des stomates ou leur densité. En outre, la mise en place d'un biomonitoring actif sur toute l'étendue du territoire ivoirien permettra de mieux contrôler les différents paramètres édaphiques et génétiques pour caractériser les capacités réelles de cette espèce comme bio-indicatrice de la pollution de l'air.

Il serait utile d'apprécier l'effet des polluants sur d'autres paramètres morphologiques (la taille, l'épaisseur et radiométriques des feuilles).

Des travaux futurs devraient permettre d'identifier les différents types de polluants atmosphériques présents dans les différentes classes d'utilisation du sol du District Autonome d'Abidjan. Cette typologie devrait être accompagnée par les teneurs exactes de chacun des polluants dans les différents espaces.

Enfin, il serait important d'évaluer les risques sanitaires liés aux polluants atmosphériques sur les populations riveraines, en général, mais singulièrement sur les enfants, les femmes enceintes et les personnes âgées par une approche épidémiologique et toxicologique. Ces approches pourraient être réalisées en comparant des données cliniques et les résultats d'échantillons prélevés dans les différents types d'utilisation de sol dans le District Autonome d'Abidjan.

RECOMMANDATIONS

La biosurveillance végétale bien qu'elle soit avantageuse pour les pays en développement, demeure complémentaire de la méthode d'analyse physico-chimique. Ainsi, les décideurs devraient multiplier l'installation de stations de bioindication de la qualité de l'air dans les zones industrielles, aux abords des axes routiers les plus fréquentés du District Autonome d'Abidjan afin d'évaluer régulièrement la qualité de l'habitat.

Le District Autonome d'Abidjan et les autres collectivités décentralisées devraient encourager le planting de *Ficus benjamina* dans les zones vulnérables de la ville. Ainsi, en plus de ses caractéristiques ornementales *Ficus benjamina* pourrait dans une certaine mesure épurer l'air atmosphérique des différents polluants. Enfin, les décideurs politiques devraient prendre des mesures visant à contrôler, limiter voire interdire la quantité et la qualité des gaz d'échappement des véhicules motorisés produisant des gaz toxiques.

REFERENCES

- Abeyratne V.D.K. & Ileperuma O.A. (2006). Impact of ambient air pollutants on the stomatal aperture of *Argyrea populifolia*. *Ceylon Journal of Sciences*, 35 (1) : 9-15.
- Aebi H. (1984). Catalase in vitro. In *Methods in enzymology*. Academic Press, 105 : 121-126.
- Aeini M., Mirzaee H., Taghavi S.M., Khodakaramian G.R. & Mazhar M.A. (2014). Occurrence of crown gall disease on *Ficus benjamina* in Fars and Isfahan provinces of Iran. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 47(18) : 2257-2262.
- Aghui N. & Biémi J. (1984). Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination. *Annales Université Nationale Côte d'Ivoire, série c (Sciences)*, 20 : 313-347.
- Ahoussi K.E., Loko S., Koffi Y.B., Soro G., Oga Y.M.S. & Soro N. (2013). Evolution spatio-temporelle des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal Pure Applied Biosciences*, 1(3) : 45-60.
- Alscher R.G., Donahue J.L. & Cramer C.L. (1997). Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells. *Physiologia Plantarum*, 100(2) : 224-233.
- Alscher R.G., Erturk N. & Heath L.S. (2002). Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of experimental botany*, 53(372) : 1331-1341.
- Ambé G.A. (2001). Les fruits sauvages comestibles des savanes guinéennes de Côte d'Ivoire : état de la connaissance par une population locale, les Malinkés. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 5(1) : 43-58.
- Amiard J.C., Caquet T. & Lagadic L. (Eds) (1998). Les biomarqueurs parmi les méthodes d'évaluation de la qualité de l'environnement. In *Utilisation de biomarqueurs pour la surveillance de la qualité de l'environnement*, Paris (France) pp. XXI-XXXI.
- Amiard J.C., & Amiard-Triquet C. (2008). Les biomarqueurs de dommages. *Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques*, 95.
- Atamer A., Bilici A., Yenice N., Selek S., Ilhan N. & Atamer Y. (2008). The importance of paraoxonase 1 activity, nitric oxide and lipid peroxidation in hepatosteatosis. *Journal of International Medical Research*, 36(4) : 771-776.
- Atkinson R.W., Anderson H.R., Sunyer J., Ayres J., Baccini M., Vonk J.M., Boumghar A., Forastiere F., Forsberg B., Touloumi G., Schwartz J. & Katsouyanni K. (2001). Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 164 : 1860-1866.
- Atolaye B.O. & Aremu M.O. (2007). Bioaccumulation of some trace elements in the body parts of fish species associated with soil sediment and water from "Magani" confluence

- in Nasarawa State, Nigeria. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 6(5) : 2001-2008.
- Arriaga M.O., Stampacchio M.L., Fernández Pepi M.G., Perelman P.E. & Faggi A.M. (2014). Use of epidermal characters as bioindicators of environmental pollution. *Multequina*, (23) : 41-53.
- Arora A., Sairam R.K. & Srivastava G.C. (2002). Oxidative stress and antioxidative system in plants. *Current science-bangalore*, 82(10) : 1227-1238.
- Assamoi E. & Liousse C. (2010). Focus on the impact of two wheel vehicles on African combustion aerosols emissions. *Atmospheric Environment*, 44 : 3985-3996.
- Asada K. (1994). Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissues. Causes of photooxidative stress and amelioration of defense system in plants, 77-103.
- Auclair D. (1977). Effets des poussières sur la photosynthèse. II.-Influence des polluants particulaires sur la photosynthèse du Pin sylvestre et du Peuplier. *Annales des Sciences forestières*, 34(1) : 47-57.
- Balasoorya B., Samson R., Mbikwa F., Vitharana U.W.A., Boeckx P. & Van Meirvenne M. (2009). Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. *Environmental and Experimental Botany*, 65 : 386-394.
- Bakker M.I., Trolls J. & Kollofel C. (2001). Deposition of atmospheric semivolatile organic compounds to vegetation. *American Chemical Society*, 16 : 218-236.
- Barber J.L., Thomas G.O., Kerstiens G. & Jones K.C. (2004). Current issues and uncertainties in the measurement and modelling of air-vegetation exchange and with in-plant processing of POPS. *Environmental pollution*, 128 : 99-138.
- Barima Y.S.S., Angaman D.M., N’Gouran K.P., Kardel F., De Cannière C. & Samson R. (2014). Assessing atmospheric particulate matter distribution based on Saturation Isothermal Remanent Magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. *Science of The Total Environment*, 470 : 975-982.
- Barima Y.S.S., Angaman D.M., N’Gouran K.P., Koffi N.A., Tra Bi Z.F. & Samson R. (2016). Involvement of leaf characteristics and wettability in retaining air particulate matter from tropical plant species. *Environmental Engineering Research*, 21 : 121-131.
- Bartosz G. (1997). Oxidative stress in plants. *Acta Physiologiae Plantarum* 19 : 47-64.
- Baudin B. (2006). Stress oxydant et pathologies cardiovasculaires. *Mt Cardio*, 2(1) : 43-52.
- Baumgartner B., Erdelmeier C.A., Wright A.D., Rali T. & Sticher O. (1990). An antimicrobial alkaloid from *Ficus septica*. *Phytochemistry*, 29(10) : 3327-3330.

- Bealey W.J., McDonald A.G., Nernitz E., Donovan R., Dragosits U., Duffy T.R. & Fowler D. (2007). Estimating the reduction of urban PM10 concentrations by trees within an environmental information system for planners. *Journal of Environmental Management*, 85 : 44-58.
- Bebianno M.J., Geret F., Hoarau P., Serafim M.A., Coelho M.R., Gnassia-Barelli M. & Romeo M. (2004). Biomarkers in *Ruditapes decussatus*: a potential bioindicator species. *Biomarkers*, 9(4-5) : 305-330.
- Bergmann D.C. (2004). Integrating signals in stomatal development. *Current Opinion in Plant Biology* 7 : 26-32
- Boraud N.M. (1995). Etude floristique et phytosociologique de la jachère attenante du Jardin Botanique de Cocody. Mémoire de DEA, UFR Biosciences, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 58 p.
- Boutin A.B. & N'Guessan J.K. (2016). Abidjan, une métropole de plus en plus francophone? *Le Français en Afrique*, (30) : 177-195.
- Brook R.D., Rajagopalan S., Pope C.A., Brook J.R., Bhatnagar A., Diez-Roux A.V., Holguin F., Hong Y., Luepker R.V., Mittleman M.A., Peters A, Siscovick D., Smith S.C. Jr., Whitsel L. & Kaufman J.D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease : An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121 : 2331-2378.
- Bunce J.A. (2008). Acclimation of photosynthesis to temperature in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica oleracea*. *Photosynthetica*, 46(4) :517-524.
- Byczkowski J.Z. & Gessner T. (1988). Biological role of superoxide ion-radical. *International Journal of Biochemistry*, 20(6) : 569-580.
- Cadenas E. (1989). Biochemistry of oxygen toxicity. *Annual review of biochemistry*, 58(1) : 79-110.
- Cape J.N., Sheppard L.J. & Binnie J. (1995). Leaf surface properties of Norway spruce needles exposed to sulphur dioxide and ozone in an open-air fumigation system at Liphook. *Plant, Cell and Environment*, 18 : 285-289.
- Casson S.A. & Hetherington A.M. (2010). Environmental regulation of stomatal development. *Current opinion in plant biology*, 13(1) : 90-95.
- Chance B., Sies H. & Boveris A. (1979). Hydroperoxide metabolism in mammalian organs. *Physiological reviews*, 59(3) : 527-605.

- Chen G.X. & Asada K. (1989). Ascorbate peroxidase in tea leaves: occurrence of two isozymes and the differences in their enzymatic and molecular properties. *Plant and Cell Physiology*, 30(7) : 987-998.
- Chen L.Q., Chaloner W.G., Beerling D.J., Sun Q.G., Collinson M.E. & Mitchell P.L. (2001). Assessing the potential for the stomatal characters of extant and fossil Ginkgo leaves to signal atmospheric CO₂ change. *American Journal of Botany*, 88 : 1309-1315.
- Cho U.H. & Seo N.H. (2005). Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. *Plant Science*, 168(1) : 113-120.
- Clemens S. (2006). Evolution and function of phytochelatin synthases. *Journal of Plant Physiology*, 163(3) : 319-332.
- CNF (1998). Le CNF, un patrimoine national, voire mondial à sauvegarder. CNF, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 15 p.
- Cronquist A. (1981). An integrated system of classification of flowering plants. Columbia University Press, New York (USA), 1262 p.
- Croxdale J.L. (2000). Stomatal patterning in angiosperms. *American Journal of Botany*, 87(8) : 1069-1080.
- Cunningham S.D. & Berti W.R. (1993). Remediation of contaminated soil with green plants : An overview. *In vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 29 : 207-212.
- Cuny D., Van Haluwyn C. & Pesch R. (2001). Biomonitoring of trace elements in air and soil compartments along the major motorway in France. *Water, Air, and Soil Pollution*, 125 : 273-289.
- Cuny D., Rzepka M.A., Bulteau G., Lakel A., Devred I. & Van Haluwyn C. (2006). Quels rôles les plantes peuvent-elles jouer vis à vis de la pollution à l'intérieur des locaux ? *Air Pur*, 69 : 33-36.
- Cuzick J., Routledge M.N., Jenkins D. & Garner R.C. (1990). DNA adducts in different tissues of smokers and non-smokers. *International journal of cancer*, 45(4) : 673-678.
- Dat J., Vandenabeele S., Vranová E., Van Montagu M., Inzé D. & Van Breusegem F. (2000). Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. *Cellular and Molecular Life Sciences* 57 : 779-795.
- Dautremepuits C., Paris-Palacios S., Betoulle S. & Vernet G. (2004). Modulation in hepatic and head kidney parameters of carp induced by copper and chitosan. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C : Toxicology & Pharmacology*, 137(4) : 325-333.

- Dallinger-Marianne J., Kohler-Vibeke H.D.H.R. & Weeks S.R.T.J.M. (2000). Biomarkers in terrestrial invertebrates for ecotoxicological soil risk assessment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 164 : 93.
- DalCorso G., Farinati S., Maistri S. & Furini A. (2008). How plants cope with cadmium: staking all on metabolism and gene expression. *Journal of Integrative Plant Biology*, 10 : 1268-1280.
- DeLeve L.D. & Kaplowitz N. (1991). Glutathione metabolism and its role in hepatotoxicity. *Pharmacology & therapeutics*, 52(3) : 287-305.
- Deletraz G. & Paul E. (1998). Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes. *Contrat ADEME*, (9793022).
- Delor C., Diady I., Simeon Y., Yao B., Tastet J.P., Vidal M., Chiron J.P. & Dommanget A. (1992). Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000, Feuille Grand-Bassam. Mémoire de la Direction de la géologie de Côte d'Ivoire, 4, Abidjan (Côte d'Ivoire), 30 p.
- Denden M. & Lemeur R. (1999). Mesure de la transpiration par le modèle de Penman-Monteith. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 10(1) : 39-44.
- Deneke S.M. & Fanburg B.L. (1989). Regulation of cellular glutathione. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, 257(4) : L163-L173.
- Den Besten P.J., Valk S., Van Weerlee E., Nolting R.F., Postma J.F. & Everaarts J.M. (2001). Bioaccumulation and biomarkers in the sea star *Asterias rubens* (Echinodermata: Asteroidea) : a North Sea field study. *Marine environmental research*, 51(4) : 365-387.
- Demmig-Adams B. & Adams W.W. (1996). The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant science*, 1(1) : 21-26.
- Desikan R., Soheila A.H., Hancock J.T. & Neill S.J. (2001). Regulation of the Arabidopsis transcriptome by oxidative stress. *Plant physiology*, 127(1) : 159-172.
- Desikan R., Cheung M.K., Bright J., Henson D., Hancock J.T. & Neill S.J. (2004). ABA, hydrogen peroxide and nitric oxide signalling in stomatal guard cells. *Journal of experimental botany*, 55(395) : 205-212.
- Donati S.Y., Gainnier M. & Chibane-Donati O. (2005). Intoxication au monoxyde de carbone. *EMC-Anesthésie-Réanimation*, 2(1) : 46-67
- Dumont D. (1991). Intoxication oxycarbonée : physiopathologie, étiologie, diagnostic, principes de traitement. *La Revue du praticien*, 41(12) : 1123-1128.

- Dweck A.C. & Meadows T. (2002). Tamanu (*Calophyllum inophyllum*) the African, Asian, Polynesian and Pacific Panacea. *International journal of cosmetic science*, 24(6) : 341-348.
- Dzierżanowski K., Popek R., Gawrońska H., Sæbø A. & Gawroński S.W. (2011). Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *International Journal of Phytoremediation*, 13(10) : 1037-1046.
- Elagöz V., Han S.S. & Manning W.J. (2006). Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity. *Environmental pollution*, 140 : 395-405.
- El Hassani T.A. & Persoons E. (1995). *Agronomie Moderne : Base physiologiques et agronomiques de la production végétale*. Torino (Italie) : Hatier-Aupelf-Uref; 275p.
- El Mannoubi I., Skanji T., Barrek S. & Zarrouk H. (2010). Caractérisation de l'huile des graines de l'orange maltaise (*Citrus sinensis*) poussant en Tunisie. *Journal de la Société Chimique de Tunisie*, 12 : 31-36.
- Eshwarappa R.S.B., Iyer S., Subaramaiha S.R., Richard S.A. & Dhananjaya B.L. (2015). Antioxidant activities of *ficus glomerata* (moraceae) leaf gall extracts. *Pharmacognosy research*, 7(1) : 114.
- Farombi E.O., Adelowo O.A. & Ajimoko Y.R. (2007). Biomarkers of oxidative stress and heavy metal levels as indicators of environmental pollution in African cat fish (*Clarias gariepinus*) from Nigeria Ogun River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4(2) : 158-165.
- Favier A. (2003). Le stress oxydant, intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique. *L'actualité chimique*, 269-270 : 108-115.
- Feakins S.J. & Sessions A.L. (2010). Controls on the D/H ratios of plant leaf waxes in an arid ecosystem. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(7) : 2128-2141.
- Feierabend J. (2005). Catalases in plants: molecular and functional properties and role in stress defence. *Antioxidants and reactive oxygen species in plants*, 101-140.
- Field C.B., Jackson R.B. & Mooney H.A. (1995). Stomatal responses to increased CO₂ : implications from the plant to the global scale. *Plant, Cell and Environment*, 18(10) : 1214-1225

- Flammarion P., Devaux A. & Garric J. (2001). Marqueurs biochimiques de pollution dans les écosystèmes aquatiques continentaux : exemples d'utilisation et perspectives pour le gestionnaire. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (357-360) : 209-226.
- Forbes V.E. & Forbes T.L. (Eds) (1997). Ecotoxicologie, théorie et applications. INRA Editions, Versailles, 256 p.
- Fourn L. & Fayomi E.B. (2006). Pollution atmosphérique en milieu urbain à Cotonou et à Lokossa, Bénin. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 99(4) : 264-268.
- Foyer C.H. & Noctor G. (2005). Oxidant and antioxidant signalling in plants : a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell & Environment*, 28(8) : 1056-1071.
- Foyer C.H. & Noctor G. (2013). Redox signaling in plants. *Antioxidants and redox signaling* 18 : 2087-2090.
- Franks P.J., Buckley T.N., Shope J.C. & Mott K.A. (2001). Guard cell volume and pressure measured concurrently by confocal microscopy and the cell pressure probe. *Plant Physiology*, 125(4) : 1577-1584.
- Fryer M.J. (1992). The antioxidant effects of thylakoid Vitamin E (alpha-tocopherol). *Plant, Cell and Environment*, 15(4) : 381-392.
- Garrec J.P. & Renard E. (1996). Foliar absorption of aluminium : study of the fixation and the cuticular penetration. *Environmental and experimental botany*, 36 : 365-375.
- Garrec J.P. & Van Haluwyn C. (2002). Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. *Editions Technique & Documentation*, Paris, 117 p.
- Garrec J.P. (2007). Biosurveillance végétale de la pollution de l'air et de l'eau. *Techniques de l'ingénieur*. Bioprocédés, (BIO5500).
- Garbisu C. & Alkorta I. (2001). Phytoextraction : a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource technology*, 77(3) : 229-236.
- GESAMP (1988). Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement. VI/10 Supp 1 (Consulté le 02-03-2010), <http://www.Fao.Org/drocrep/008/3880F/htm.Suppl.1> : 199-209.
- Georgeaud V.M., Rochette P., Ambrosi J.P., Vandamme D. & Williamson D. (1997). Relationship between heavy metals and magnetic properties in a large polluted catchment: the Etang de Berre (South of France). *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(1-2) : 211-214.

- Ghorbanli M., Bakand Z. & Bakand S. (2007). Air pollution effects on the activity of antioxidant enzymes in *Nerium oleander* and *Robinia pseudo acacia* plants in Tehran. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 4(3) : 157-162.
- Gnagbo A., Kouamé D. & Adou Yao C.Y. (2016). Diversité des épiphytes vasculaires de la strate inférieure des formations végétales du Parc National d'Azagny (Sud de la Côte d'Ivoire). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 28 (1) : 4366-4386.
- Goudriaan J. & Unsworth M.H. (1990). Implications of increasing carbon dioxide and climate change for agricultural productivity and water resources. *Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*, (impact of carbond), 111-130.
- Gratani L., Crescente M.F. & Varone L. (2008). Long-term monitoring of metal pollution by urban trees. *Atmospheric Environment*, 42 : 8273-8277.
- Greaver T.L., Sullivan T.J., Herrick J.D., Barber M.C., Baron J.S., Cosby B.J. & Herlihy A.T. (2012). Ecological effects of nitrogen and sulfur air pollution in the US: what do we know? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(7) : 365-372.
- Grill E., Löffler S., Winnacker E.L. & Zenk M.H. (1989). Phytochelatins, the Heavy-Metal-Binding Peptides of Plants, are Synthesized from Glutathione by a Specific gamma-glutamylcysteine Dipeptidyl Transpeptidase (Phytochelatin Synthase). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86(18) : 6838-6842.
- Guillaumet J.L. & Adjanohoun E. (1971). La végétation de la Côte d'Ivoire. In Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. *Mémoires ORSTOM*, 50, Paris (France) : pp 161-263.
- Gulz P.A., Gupta S.K. & Schulin R. (2005). Arsenic accumulation of common plants from contaminated soils. *Plant and soil*, 272(1-2) : 337-347.
- Gurjar B.R., Jain A., Sharma A., Agarwal A., Gupta P., Nagpure A.S. & Lelieveld J. (2010). Human health risks in megacities due to air pollution. *Atmospheric Environment*, 44(36) : 4606-4613.
- Halliwell B. (2006). Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant physiology*, 141(2) : 312-322.
- Han X. & Naeher L.P. (2006). A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environment International*, 32 : 106-120.
- Hautela E.I., Rekila R., Tarhanen J. & Ruuskanen J. (1994). Deposition of motor vehicle emissions and winter maintenance along roadside assessed by snow analysis, *Environmental Pollution*, 87 : 45-49.

- Held D.W. & Boyd J.D.W. (2008). New records of *Gynaikothrips uzeli* (Zimmerman) (Thysanoptera: Phlaeothripidae) on *Ficus benjamina* in Texas and O'ahu, Hawaii, USA. *The Pan-Pacific Entomologist*, 84(2), 77-80.
- Hetherington A.M. & Woodward F.I. (2003). The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424 : 901-908.
- Hernandez J.A., Olmos E., Corpas F.J., Sevilla F., & Del Rio L.A. (1995). Salt-induced oxidative stress in chloroplasts of pea plants. *Plant Science*, 105(2) : 151-167.
- Herschbach C. & Rennenberg H. (1991). Influence of Glutathione (GSH) on Sulphate Influx, Xylem Loading and Exudation in Excised Tobacco Roots. *Journal of Experimental Botany*, 42(8) : 1021-1029.
- Heyno E., Klose C. & Krieger-Liszkay A. (2008). Origin of cadmium-induced reactive oxygen species production: mitochondrial electron transfer versus plasma membrane NADPH oxidase. *New Phytologist*, 179 : 687-699.
- Hijano C.F., Dominguez M.D.P., Gimenez R.G., Sanchez P.H. & Garcia I. (2005). Higher plants as bioindicators of sulphur dioxide emissions in urban environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 111 : 75-88.
- Hofman J., Wuyts K., Van Wittenberghe S. & Samson R. (2014). On the temporal variation of leaf magnetic parameters : seasonal accumulation of leaf-deposited and leaf-encapsulated particles of a roadside tree crown. *Science of the Total Environment*, 493 : 766-772.
- Holder C.D. (2012). The relationship between leaf hydrophobicity, water droplet retention, and leaf angle of common species in a semi-arid region of the western United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152 : 11-16.
- Hopkins W.G. (2003). *Physiologie végétale*, 1^{ère} édition. De Boeck et Larcier s.a.: Bruxelles.
- Horemans N., Foyer C.H., Potters G. & Asard H. (2000). Ascorbate function and associated transport systems in plants. *Plant physiology and biochemistry*, 38(7) : 531-540.
- Ilyas M. & Ilyas N. (1990). Flavonoids from the leaves of *Ficus capensis*. *Ghana Journal of Chemistry*, 1(3) : 176-178.
- Jourda J.P. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université scientifique, technique et médicale de Grenoble, 319 p.
- Juste C. (1990). Eléments pour l'établissement d'un bilan des oligo-éléments. *C.R. Academic Agriculture of France*, 76 : 135-146.

- Kablan N., Hassy J. & Kouakou N.N. (2013). Impact environnemental de la zone industrialoportuaire (zip) d'Abidjan. *European Scientific Journal*, 9 (35) : 1857-1881.
- Kaiser J. (2001). Bioindicators and Biomarkers of Environmental Pollution and Risk Assessment, *Science Publishers Inc* , 204 p.
- Kardel F., Wuyts K., Babanezhad M., Vitharana U.W.A., Wuytack T., Potters G. & Samson R. (2010). Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L. *Environmental Pollution*, 158 : 788-794.
- Kardel F., Wuyts K., Maher B.A., Hansard R. & Samson R. (2011). Leaf saturation isothermal remanent magnetisation (SIRM) as a proxy for particulate matter monitoring : interspecies differences and in-season variation. *Atmospheric Environment*, 45 : 5164-5171.
- Kardel F., Wuyts K., Maher B.A., Samson R. & Hansard R. (2012). Intra-urban spatial variation of magnetic particles : monitoring via leaf saturation isothermal remanent magnetisation (SIRM). *Atmospheric Environment*, 55 : 111-120.
- Kassoum T. (2013). De la sensibilisation des populations à la gestion de l'environnement urbain dans les quartiers précaires de la ville d'Abidjan. *African Population Studies*, 22(2) : 173 p.
- Khan I.A., Rali T. & Sticher O. (1993). Alkaloids from *Ficus pachyrhachis*. *Planta medica*, 59(3) : 286-286.
- Kelly C.K. & Beerling D.J. (1995). Plant life form, stomatal density and taxonomic relatedness: a reanalysis of Salisbury (1927). *Functional Ecology*, 9 : 422-431.
- Key P.B., Wirth E.F. & Fulton M.H. (2006). A review of grass shrimp, *Palaemonetes* spp., as a bioindicator of anthropogenic impacts. *Environmental bioindicators*, 1 : 115-128.
- Kim T.H., Bohmer M., Hu H., Nishimura N. & Schroeder J.I. (2010). Guard cell signal transduction network: advances in understanding abscisic acid, CO₂, and Ca²⁺ signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 61 : 561-591.
- Klimko M. & Truchan M. (2006). Morphological variability of the leaf epidermis in selected taxa of the genus *Ficus* L.[Moraceae] and its taxonomic implications. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 75(4) : 309-324.
- Klumpp A., Ansel W., Klumpp G., Vergne P., Sifakis N., Sanz M.J. & Kambezidis H. (2006). Ozone pollution and ozone biomonitoring in European cities Part II. Ozone-induced plant injury and its relationship with descriptors of ozone pollution. *Atmospheric Environment*, 40(38) : 7437-7448.

- Koehler-Ramonatxo C. (2006). Oxygène, stress oxydant et suppléments antioxydants ou un aspect différent de la nutrition dans les maladies respiratoires. *Nutrition clinique et métabolisme*, 20(4) : 165-177.
- Koffi N.A., Barima Y.S.S., Angaman D.M. & Dongui B.K. (2014). Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 78 : 6675-6684.
- Koffi N.A., Angaman D.M., Barima Y.S.S. & Dongui B.K. (2015). Detoxifying hydrogen peroxide enzymes activity in two plant species exposed to air pollution in Abidjan city (Côte d'Ivoire). *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 5(1) : 2231-4490.
- Krieger-Liszky A. & Trebst A. (2006). Tocopherol is the scavenger of singlet oxygen produced by the triplet states of chlorophyll in the PSII reaction centre. *Journal of experimental botany*, 57(8) : 1677-1684.
- Kubo A., Aono M., Nakajima N., Saji H., Tanaka K. & Kondo N. (1999). Differential responses in activity of antioxidant enzymes to different environmental stresses in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Plant Research*, 112 : 279-390.
- Lamb C. & Dixon R.A. (1997). The oxidative burst in plant disease resistance. *Annual review of plant biology*, 48(1) : 251-275.
- Laloi C., Apel K. & Danon A. (2004). Reactive oxygen signaling : The latest news. *Current Opinion in Plant Biology*, 7(3) : 323-328.
- Lappartient A.G. & Touraine B., (1996). Demand-Driven Control of Root ATP Sulfurylase activity and SO_4^{2-} Uptake in Intact Canola (The Role of Phloem-Translocated Glutathione). *Plant Physiology*, 111(1) : 147-157.
- Lawlor D.W. & Cornic G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, cell & environment*, 25(2) : 275-294.
- Lawson T. (2009). Guard cell photosynthesis and stomatal function. *New Phytologist*, 181(1) : 13-34.
- Le Tertre A., Medina S., Samoli E., Forsberg B., Michelozzi P., Boumghar A., Vonk J.M., Bellini A., Atkinson R., Ayres J.G., Sunyer J., Schwartz J. & Katsouyanni K. (2002). Shortterm effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 56 : 773-779.

- Leitao L., Goulas P. & Biolley J-P. (2003). Time-course of Rubisco oxidation in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to a long-term ozone stress. *Plant Science*, 165(3) : 613-620.
- Lehndorff E., Urvat M. & Schwark L. (2006). Accumulation histories of magnetic particles on pine needles as function of air quality. *Atmospheric Environment*, 40(36) : 7082-7096.
- Lewis T.R., Green F.H.Y., Moorman W.J., Burg J.R. & Lynch D.W. (1989). A chronic inhalation toxicity study of diesel engine emissions and coal dust, alone and combined. *Journal of the American College of Toxicology*, 8(2) : 345-375.
- Longhurst J.W.S., Irwin J.G., Chatterton T.J., Hayes E.T., Leksmono N.S. & Symons J.K. (2009). The development of effects-based air quality management regimes. *Atmospheric Environment*, 43(1) : 64-78.
- Lu T., He X., Chen W., Yan K. & Zhao T. (2009). Effects of elevated O₃ and/or elevated CO₂ on lipid peroxidation and antioxidant systems in Ginkgo biloba leaves. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 83(1) : 92-96.
- Lynn B.H. & Carlson T.N. (1990). A stomatal resistance model illustrating plant vs. external control of transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52(1-2) : 5-43.
- Macary F., Balestrat M., Puech C. & Saudubray F. (2006). Méthode d'estimation d'un risque potentiel de la contamination des eaux de surface par les intrants agricoles à différentes échelles spatiales 20 p.
- Maksymiec W., Wojcik M. & Krupa Z. (2007). Variation in oxidative stress and photochemical activity in Arabidopsis thaliana leaves subjected to cadmium and excess copper in the presence or absence of jasmonate and ascorbate. *Chemosphere*, 66(3) : 421-427.
- Mangenot, G. (1955). Etude sur les forêts des plaines et plateaux de la Côte-d'Ivoire. *Etudes éburnéennes*, (4) : 6-61.
- Markert B.A., Breure A.M. & Zechmeister H.G. (2003). Definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment. *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, 6 : 3-39.
- Market B. (2007). Definitions and principles for bioindication and biomonitoring of trace metals in the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 21 : 77-82.
- Maricq M. M. (2007). Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science*, 38(11) : 1079-1118.

- Masclet P. (2005). Pollution atmosphérique – Causes, conséquences, solutions, perspectives, Ellipses, Paris, 213 p.
- Matès J.M., Pérez-Gómez C. & De Castro I.N. (1999). Antioxidant enzymes and human diseases. *Clinical biochemistry*, 32(8) : 595-603.
- Matès J.M. (2000). Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species toxicology. *Toxicology*, 153(1-3) : 83-104.
- Mathieu D., Mathieu-Nolf M., Bocquillon B., Linke J.C. & Wattel F. (1999). Accuracy of carbon monoxide (CO) measurement in expired air for the diagnosis of CO poisoning. *Journal of Toxicology-Clinical Toxicology*, 37(3) : 406-407.
- Matzka J. & Maher B.A. (1999). Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves : identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. *Atmospheric Environment*, 33 : 4565-4569.
- May M., Vernoux T., Leaver C., Van Montagu M. & Inze D. (1998). Review article. Glutathione homeostasis in plants: implications for environmental sensing and plant development. *Journal of Experimental Botany*, 49(321) : 649-667.
- Meyer F., Cadran M. & Gaillard M. (2013). M2 Statistiques et Économétrie, 86 p.
- Mielke M.S., Oliva M.A., de Barros N.F., Penchel R.M., Martinez C.A. & de Almeida A.C. (1999). Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal Eucalyptus grandis plantation. *Trees-Structure and Function*, 13(3) : 152-160.
- Miller N.J., Sampson J., Candeias L.P., Bramley P.M. & Rice-Evans C.A. (1996). Antioxidant activities of carotenes and xanthophylls. *Federation of European Biochemical Societies letters*, 384(3) : 240-242.
- Mitchell R., Maher B.A. & Kinnersley R. (2010). Rates of particulate pollution deposition on to leaf surfaces : Temporal and inter-species magnetic analyses. *Environmental Pollution*, 158 : 1472-1478.
- Mittler R., Herr E.H., Orvar B.L., Van Camp W., Willekens H., Inzé D. & Ellis B.E. (1999). Transgenic tobacco plants with reduced capability to detoxify reactive oxygen intermediates are hyperresponsive to pathogen infection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(24) : 14165-14170.
- Mittler R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in plant science*, 7(9) : 405-410.
- Mittler R., Vanderauwera S., Gollery M. & Van Breusegem F. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in plant science*, 9(10) : 490-498.

- Mittler R. & Poulos T.L. (2005). Ascorbate peroxidase. *Antioxidants and reactive oxygen species in plants*, Nicholas Smirnoff (Ed) 17 : 87.
- Mittler R., Vanderauwera S., Suzuki N., Miller G., Tognetti V.B., Vandepoele K. & Van Breusegem F. (2011). ROS signaling: the new wave? *Trends in plant science*, 16(6) : 300-309.
- Miyake C., Cao W.H. & Asada K. (1993). Purification and molecular properties of the thylakoid-bound ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and cell physiology*, 34 : 881-889.
- Morawska L. & Zhang J.F. (2002). Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. *Chemosphere*, 49 : 1045-1058.
- Morion G. (1991). Base de traitement biologique en épuration d'eaux usées résiduaires, rapport de recherche, 12 p.
- Morison J.I. & Gifford R.M. (1983). Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity. *Plant physiology*, 71(4) : 789-796.
- Mozzo M., Dall'Osto L., Hienerwadel R., Bassi R. & Croce R. (2008). Photoprotection in the antenna complexes of photosystem II Role of individual xanthophylls in chlorophyll triplet quenching. *Journal of Biological Chemistry*, 283(10) : 6184-6192.
- Munday R. & Winterbourn C.C. (1989). Reduced glutathione in combination with superoxide dismutase as an important biological antioxidant defence mechanism. *Biochemical pharmacology*, 38(24) : 4349-4352.
- Munro D.S. (1989). Stomatal conductances and surface conductance modelling in a mixed wetland forest. *Agricultural and forest meteorology*, 48(3) : 235-249.
- Murgia I., Tarantino D., Vannini C., Bracale M., Carravieri S. & Soave C. (2004). Arabidopsis thaliana plants overexpressing thylakoidal ascorbate peroxidase show increased resistance to Paraquat-induced photooxidative stress and to nitric oxide-induced cell death. *The Plant Journal*, 38(6) : 940-953.
- Nali C. & Lorenzini G. (2007). Air quality survey carried out by school children : An innovative tool for urban planning. *Environmental Monitoring and Assessment*, 131 : 201-210.
- N'Douba N. (1990). Plantes du Jardin Botanique de Bingerville, Jardin Botanique de Bingerville, Côte d'Ivoire, 33 p.
- N'Gouran K.P., Barima Y.S.S., Angaman D.M., Koffi N.A., Tra Bi Z.F., Da K.P. & Dongui B.K. (2014). Distribution spatiale intra-urbaine des particules fines : monitoring par

- l'Aimantation Rémanente Isotherme à Saturation des feuilles (SIRM) en milieu tropical urbain (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 81 : 7186 - 7197.
- Noctor G. & Foyer C.H. (1998). Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual review of plant biology*, 49(1) : 249-279.
- OMS Working Group, (2006). Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. European Centre for Environment and Health, Bonn. World Health Organization.
- Outlaw W.H. & Manchester J. (1979). Guard cell starch concentration quantitatively related to stomatal aperture. *Plant Physiology* 64 : 79-82
- Pacyna J.M. (1986). Atmospheric trace elements from natural and anthropogenic sources. *Toxic metals in the atmosphere*, 33-52.
- Pacyna J.M. & Pacyna E.G. (2001). An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, 9 : 269-298.
- Pal A., Kulshreshtha K., Ahmad K.J. & Behl H.M. (2002). Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 197(1) : 47-55.
- Paoletti E. & Grulke N.E. (2005). Does living in elevated CO₂ ameliorate tree response to ozone? A review on stomatal responses. *Environmental Pollution*, 137 : 483-493.
- Parent C., Capelli N. & Dat J.F. (2008). Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes. *Comptes Rendus Biologies*, 331 : 255-261.
- Parmentier C. & Garrec J.P. (1994). Impact de la pollution atmosphérique le long des routes et autoroutes sur la végétation environnante - Utilisation de la bio-indication végétale - *Synthèse bibliographique*, INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy, (France), 84 p.
- Payne J.F., Mathieu A., Melvin W. & Fancey L.L. (1996). Acetylcholinesterase, an old biomarker with a new future? Field trials in association with two urban rivers and a paper mill in Newfoundland. *Marine Pollution Bulletin*, 32(2) : 225-231.
- Pérez-Arévalo J.J.& Velázquez-Martí B. (2018). Evaluation of pruning residues of *Ficus benjamina* as a primary biofuel material. *Biomass and Bioenergy*, 108 : 217-223.
- Pignocchi C. & Foyer C.H. (2003). Apoplastic ascorbate metabolism and its role in the regulation of cell signalling. *Current opinion in plant biology*, 6(4) : 379-389.
- PNUE (2006). Opening the door to cleaner vehicles in developing and transition countries : the role of lower sulphur fuels. Report of the sulphur working group of the partnership

- for clean fuels and vehicles. Nairobi Kenya : United Nations Environment Program, 41 p.
- Pourkhabbaz A., Rastin N., Olbrich A., Langenfeld-Heyser R. & Polle A. (2010). Influence of environmental pollution on leaf properties of urban plane trees, *Platanus orientalis* L. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 85(3) : 251-255.
- Pourrut B., Perchet G., Silvestre J., Cecchi M., Guisresse M. & Pinelli E. (2008). Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots. *Journal of plant physiology*, 165(6) : 571-579.
- Potters G., De Gara L., Asard H. & Horemans N. (2002). Ascorbate and glutathione : guardians of the cell cycle, partners in crime? *Plant Physiology and Biochemistry*, 40(6) : 537-548.
- Pope C.A., Young B. & Dockery D.W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution : lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56 : 709-742.
- Powers S. K., & Jackson M. J. (2008). Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiological reviews*, 88(4) : 1243-1276.
- Prajapati S.K., Pandey S.K. & Tripathi B.D. (2006). Monitoring of vehicles derived particulates using magnetic properties of leaves. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120(1-3) : 169-175.
- Rajput M. & Agrawal M. (2005). Biomonitoring of air pollution in a seasonally dry tropical suburban area using wheat transplants. *Environmental monitoring and assessment*, 101(1-3) : 39-53.
- Ramade F. (1993). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. *Ediscience internationale*, 216 p.
- Raven E.L. (2003). Understanding functional diversity and substrate specificity in haem peroxidases: what can we learn from ascorbate peroxidase? *Natural product reports*, 20(4) : 367-381.
- Reyes B.A., Ruiz R.C., Martínez-Cruz J., Bautista F., Goguitchaichvili A., Carvallo C. & Morales J. (2012). *Ficus benjamina* leaves as indicator of atmospheric pollution: a reconnaissance study. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56(3) : 879-887.
- Rieder M. & Schreiber L. (2001). Protecting against water loss : analysis of the barrier properties of plant cuticles. *Journal of experimental botany*, 52(363) : 2023-2032.
- Rojas M., Cascorbi I., Alexandrov K., Kriek E., Auburtin G., Mayer L. & Bartsch H. (2000). Modulation of benzo [a] pyrene diol-epoxide–DNA adduct levels in human white

- blood cells by CYP1A1, GSTM1 and GSTT1 polymorphism. *Carcinogenesis*, 21(1) : 35-41.
- Royer D.L. (2001). Stomatal density and stomatal index as indicators of paleoatmospheric CO₂ concentration. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 114(1-2) : 1-28.
- Rzepka M.A. & Cuny D. (2009). Biosurveillance végétale et fongique des éléments traces métalliques atmosphériques. *Air Pur*, 75 : 66-77.
- Sairam R.K. & Saxena D.C. (2000). Oxidative stress and antioxidants in wheat genotypes: possible mechanism of water stress tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 184(1) : 55-61.
- Savela K. & Hemminki K. (1991). DNA adducts in lymphocytes and granulocytes of smokers and nonsmokers detected by the 32P-postlabelling assay. *Carcinogenesis*, 12(3) : 503-508.
- Scandalios J.G. (1993). Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiology*, 101 : 7-12.
- Schutzendubel A. & Polle A. (2002). Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of experimental botany*, 53(372) : 1351-1365.
- Shimazaki K.I., Doi M., Assmann S.M. & Kinoshita T. (2007). Light regulation of stomatal movement. *Annual Review of Plant Biology*, 58 : 219-247.
- Sharma G.K. (1987). Plant cuticular complex in response to highway pollution. *The Science of the Total Environment*, 59 : 303-307.
- Shimizu H. (2004). Relationship between plasma glutathione levels and cardiovascular disease in a defined population : the Hisayama study. *Stroke*, 35(9) : 2072-2077.
- Smirnoff N. (1995). Antioxidant systems and plant response to the environment. In Environment and plant metabolism. *Environmental plant biology series*, 217-243.
- Spengler J.D. & Wilson R. (1997). Health effects of exposure to low levels of particulate matter. *Environment International*, 23(4) : 587-589.
- Spolarics Z. & Wu J.X. (1997). Role of glutathione and catalase in H₂O₂ detoxification in LPS-activated hepatic endothelial and Kupffer cells. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 273(6) : 1304-1311.
- Stagg R.M. (1998). The development of an international programme for monitoring the biological effects of contaminants in the OSPAR convention area. *Marine environmental research*, 46 : 307-313.
- Sydbom A., Blomberg A., Parnia S., Stenfors N., Sandström T. & Dahlen S.E. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions. *European Respiratory Journal*, 17(4) : 733-746.

- Tapsoba S. (1995). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (sud de la Côte d'Ivoire) : hydrochimie, isotopie, et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de doctorat 3^{ème} cycles, Université de Cocody, 201 p.
- Tardieu F. (2003). Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in plant Science*, 8(1) : 9-14.
- Tastet J.P. (1979). Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin). Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université Bordeaux I, France, 175 p.
- Tarantino D., Vannini C., Bracale M., Campa M., Soave C. & Murgia I. (2005). Antisense reduction of thylakoidal ascorbate peroxidase in Arabidopsis enhances paraquat-induced photooxidative stress and nitric oxide-induced cell death. *Planta*, 221(6) : 757-765.
- Telfer A., Dhami S., Bishop S., Phillips D. & Barber J., (1994). Beta-Carotene quenches singlet oxygen formed by isolated photosystem II reaction centers. *Biochemistry*, 33(48) : 14469-14474.
- Terzaghi M., Montagnoli A., Di Iorio A., Scippa G.S. & Chiatante D. (2013). Fine-root carbon and nitrogen concentration of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Italy Prealps: possible implications of coppice conversion to high forest. *Frontiers in Plant Science*, 13 : 1-8
- Tilghman A., Garric J. & Coquery M. (2009). La mesure des contaminants dans le biote : avantages et inconvénients pour la surveillance chimique du milieu continental. *polluantes (Ed.)*, Lyon, 56 p.
- Tiwari S., Agrawal M. & Marshall F.M. (2006). Evaluation of ambient air pollution impact on carrot plants at a sub urban site using open top chambers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119(1-3) : 15-30.
- Tohouri P., Soro G., Kouassi E.A., Miessan G.A., Gabriel E.A. & Biemi J. (2017). Pollution by trace metals of the surface water of bonoua area in high water time (southeast of ivory coast). *larhyss journal issn 1112-3680*, (29) : 23-43.
- Tonneau J. (2003). D'un bout à l'autre de la chaîne. *Printemps des sciences*, 10 p.
- Tra Bi Z.F., Barima Y.S.S., Angaman D.M. & Dongui B.K. (2014). Biomonitoring de la pollution urbaine en zone tropicale à partir des caractéristiques spectrales et anatomiques des feuilles de *Ficus polita* Vahl. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8(2) : 861-870.

- Tremellen K. (2008). Oxidative stress and male infertility a clinical perspective. *Human reproduction update*, 14(3) : 243-258.
- Turner J., & Colbeck I. (2008). Physical and chemical properties of atmospheric aerosols. *Environmental Chemistry of Aerosols*, 1-29.
- Tyree M.T. & Alexander J.D. (1993). Plant water relations and the effects of elevated CO₂: a review and suggestions for future research. *Vegetatio*, 104(1) : 47-62.
- Van Breusegem F. & Dat J.F. (2006). Reactive oxygen species in plant cell death. *Plant Physiology*, 141 : 384-390.
- Van Eenennaam A.L., Lincoln K., Durrett T.P., Valentin H.E., Shewmaker C.K., Thorne G. M. & Hao, M. (2003). Engineering vitamin E content : from Arabidopsis mutant to soy oil. *The Plant Cell*, 15(12) : 3007-3019.
- Valko M., Leibfritz D., Moncol J., Cronin M.T., Mazur M. & Telser J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The international journal of biochemistry & cell biology*, 39(1) : 44-84.
- Vatén A. & Bergmann D.C. (2012). Mechanisms of stomatal development: an evolutionary view. *Evo Devo*, 3(1) : 11.
- Verna R.B., Mahmooduzzafar T.O. & Siddiqi M.I. (2006). Foliar Response of *Ipomea pes-trigidis* L. to coal smoke pollution, *Turkish Journal of Botany*, 30(5) : 413-417.
- Verma A. & Singh S. (2006). Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120 : 585-602.
- Villalobos-Pietrini R., Hernández-Mena L., Amador-Muñoz O., Munive-Colín Z., Bravo-Cabrera J.L., Gómez-Arroyo S. & Ortiz-Muñiz R. (2007). Biodirected mutagenic chemical assay of PM10 extractable organic matter in Southwest México City. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 634(1) : 192-204.
- Wahid A., Milne E., Shamsi S.R.A., Ashmore M.R. & Marshall F.M. (2001). Effects of oxidants on soybean growth and yield in the Pakistan, Punjab. *Environmental Pollution*, 113 : 271-280.
- Wang C.R., Wang X.R., Tian Y., Yu H.X., Gu X.Y., Du W.C. & Zhou H. (2008). Oxidative stress, defense response, and early biomarkers for lead-contaminated soil in *Vicia faba* seedlings. *Environment Toxicology Chemical*, 27(4) : 970-977.
- Ward N.I., (1990). Lead contamination of the London orbital (M25) motorway (since its opening in 1986). *Science of the total environment*, 93 : 277-283.

- Wasilewska A., Vlad F., Sirichandra C., Redko Y., Jammes F., Valon C. & Leung J. (2008). An update on abscisic acid signaling in plants and more. *Molecular plant*, 1(2) : 198-217.
- Wingate V.P.M., Lawton M.A. & Lamb C.J. (1988). Glutathione Causes a Massive and Selective Induction of Plant Defense Genes. *Plant Physiology*, 87(1) : 206-210.
- Wittig R. (1993). General aspects of biomonitoring heavy metals by plants. *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. (Ed.) : B. Markert Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 3-28.
- Woodward F.I., & Kelly C.K. (1995). The influence of CO₂ concentration on stomatal density. *New Phytologist*, 131(3) : 311-327.
- Wong D., Mitchell C.E., Wolff R.K., Mauderly J.L. & Jeffrey A.M. (1986). Identification of DNA damage as a result of exposure of rats of diesel engine exhaust. *Carcinogenesis*, 7(9) : 1595-1597.
- Wuytack T., Verheyen K., Wuyts K., Kardel F., Adriaenssens S. & Samson R. (2010). The potential of biomonitoring of air quality using leaf characteristics of white willow (*Salix alba* L.). *Environmental Monitoring and Assessment*, 171 (1-4) : 197-204.
- Xu S.S., Liu W.X. & Tao S. (2006). Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in china. *Environmental Science Technologie*, 40 : 702-708.
- Yang S., Huang C., Wu Z., Hu J., Li T., Liu S. & Jia W. (2006). Stomatal movement in response to long distance-communicated signals initiated by heat shock in partial roots of *Commelina communis* L. *Science in China Series C*, 49(1) : 18-25.
- Yildirim N.C., Benzer F. & Danabas D. (2011). Evaluation of environmental pollution at Munzur river of tunceli applying oxidative stress biomarkers in Capoeta trutta (Heckel, 1843). *Journal of Animal & Plants Sciences*, 21(1) : 66-71.
- Zarinkamar F. (2007). Stomatal observations in dicotyledons. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10(2) : 199-219.
- Zelitch I. (2004). Biochemical control of stomatal opening in leaves. *National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington (USA), 47(9) : 1423-1433.
- Zhang Y. & Tao S. (2009). Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons for 2004. *Atmospheric Environmental*, 43 : 812-819.
- Zmirou D., Bard D., Dab W., Dor F., Goldberg M. & Hubert P. (Eds) (2000). Pollution, air, eau, aliments, bruit, nucléaire. Quels risques pour notre santé ? *Editions la Découverte et Syros*, Paris (France), 336 p.

Publications

Publication 1 : Koffi N.A., Traoré K., Barima Y.S.S. & Angaman D.M., 2018. Active biomonitoring of air quality using stomatal characteristics and particulate matter of *Ficus benjamina* L. leaf in a tropical urban environment. *International Journal of Innovation Sciences and Research*, **7(8)** : 1175-1180.

Publication 2 : Koffi N.A., Barima Y.S.S., Angaman D.M. & Dongui B.K., 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, **78** : 6675-6684.

Publication 1

International Journal of Innovation Sciences and Research

Vol.7, No, 08, pp.1175-1180, August, 2018

Available online at <http://www.ijisr.com>

RESEARCH ARTICLE

ACTIVE BIOMONITORING OF AIR QUALITY USING STOMATAL CHARACTERISTICS AND PARTICULATE MATTER OF *FICUS BENJAMINA* L. LEAF IN A TROPICAL URBAN ENVIRONMENT

¹N'guessan Achille Koffi, ^{*2}Karidia Traoré, ¹Yao Sadaïou Sabas Barima and ²Djédoux Maxime Angaman

¹ Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Environnement. BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

² Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Agroforesterie. BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

Accepted 18th July 2018; Published Online 30th August 2018

ABSTRACT

Plants that are constantly exposed to environmental pollutants absorb, accumulate and integrate these pollutants into their systems. Particulate matter (PM) emissions, stomatal characteristics such as Stomatal density (SD), stomatal pore surface (SPS) and Stomatal resistance (RS) were investigated in *Ficus benjamina* exposed along main roads (MR) as well as in parks (P) as control in Abidjan. This study found a higher level of particulate matter (1,354.10-4 A), Stomatal density (4,26 108 number of stomata.mm-2) and stomatal resistance (45,050 s.m-1) in polluted area (Roads). The highest stomatal pore surface (269,479 µm2) is observed in parks (P). This study showed that particulate matter, stomatal density and stomatal resistance are more effective in stress conditions in *Ficus benjamina* and in tropical countries to estimate the atmospheric pollution, it's possible by using particulate matter, stomatal density and stomatal resistance plants.

Key words: Bioindicator, Air Pollution, Stomata, Leaf SIRM, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

The growing industrialization and the intensification of human activities (transport, industry, waste, etc.) affected the urban air quality. Air pollution can also be transported over very long distances by wind. Plants play an important role in monitoring and capture the pollutant as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), hazardous air pollutants (HAPs), nitrogen oxides (NO_x), sulphur dioxide (SO₂) and tropospheric ozone (O₃). Plants are more frequently used as biomonitor/bioindicator than humans and animals because plants have abroad geographical distribution, are easy to gather and reflect better the local conditions, since they are more sensitive in terms of physiological reaction to the common air pollutants (Falla *et al.*, 2000; Nali *et al.*, 2007; Raz *et al.*, 2011). The anatomical, morphological and physiological plant parameters, which have been proved to be sensitive to air pollution (Wen *et al.*, 2004; Verma and Singh, 2006; Balasooriya *et al.*, 2009; Wuytack *et al.*, 2011). Among these methods, the biological method is known to be inexpensive for prolonged surveys of air quality due to integration of the effect of all the environmental factors (Yu-mei *et al.*, 2005; Fernández *et al.*, 2007).

***Corresponding author: N'guessan Achille Koffi,**
Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Environnement. BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

In this study, the air pollution effects on the stomatal characteristics and particulate matter were investigated in *Ficus benjamina* in Abidjan city. The present study was conducted on trees growing along national highway as well as Park area.

MATERIALS AND METHODS

Study area: The study was conducted in the city of Abidjan city, Côte d'Ivoire. Abidjan is the economic capital city with a human population of over 4 million on 422 km². The intensive development of industry and road traffic and the increasing number of automobiles in the city lead to a notable increase of air pollution. All transport vehicles (about 30,000 in 2010) have diesel engines (Barima *et al.*, 2014). The city was subdivided into 2 land use classes: Parks (2 sites) and Roads (4 sites). It is suggested that the air pollution is an important problem which should be resolved. First of all, effective technology of monitoring air pollution is needed. At each site three sampling leaf were selected to determine the particulate matter and stomata characteristics. The city of Abidjan also contains several parks of which a national park, a botanical garden and a floristic center. In these green areas, the human influence is relatively weak and activities of pollution are most controlled relatively to the industrial areas and road traffic.

Sampling and measurements: We used *Ficus benjamina* plant species which was usually used as ornamental plant. This

specie was obtained and grown in a garden of the city. This plant was grown in 30 cm diameter, 27 cm height plastic pots. The Medium was a mixture of compost and soil. The plant was grown for three months until reaching 140-180 cm. *Ficus benjamina* have more hairs in the adaxial leaf than abaxial leaf.

Leaf magnetic properties: Magnetic measurements were carried out at the Department of Bioscience Engineering of the University of Antwerp (Belgium). All six dried leaves of each sampling location were tightly packed together by cling film, avoiding the movement of any leaf parts, and pressed into a 10 cm³ plastic tube. These tubes containing leaf samples were magnetised in a direct current (DC) field of 300 mT with a Molspin pulse magnetiser (Molspin Ltd, UK). Isothermal Remanent Magnetisation (IRM) of the samples (A.m²) was measured using a Molspin Minispin magnetometer (MolspinLtd,UK) with high sensitivity, and was normalized by leaf area (m²) (Kardel *et al.*, 2011).

Stomatal characteristics: Stomatal imprints were made by applying a very thin coat of color less nail varnish on the abaxial leaf, thereby avoiding the midrib and the leaf margin, while the leaf remained attached to the plant. Subsequent to drying (15-20 minutes), the adhered nail varnish film was gently peeled off by using transparent tape and was subsequently fixed on a clean labelled microscopic slide. Stomatal density (SD, number of stomata.mm⁻²), stomatal pore surface (SPS, μm²) and Stomatal resistance (RS, s.m⁻¹) were determined with a light microscope as described by (Balasooriya *et al.*, 2009; Kardel *et al.*, 2010).

Statistical analysis: The mean leaf SIRM and stomatal characteristic were calculated and compared using ANOVA procedure for each land use class. We used STATISTICA 7.1 software, to make correlation between stomatal parameters and find linear regression.

RESULTS AND DISCUSSION

Leaf SIRM: *Ficus benjamina* presents the highest leaf SIRM ($1,354.10^{-4}$ A) at Roads and the lowest was observed at Park ($6,789.10^{-6}$ A) (Figure 1). The leaf SIRM was significantly ($p < 0.05$) between land use classes. The most polluted land use class was major roads. These results are in agreement with those obtained by [10] who found high levels of SIRM in urban (main roads and intersections) and industrial areas compared to parks and residential areas in the city of Abidjan (Cote d'Ivoire). Also, in the city of Gent (Belgium) (Kardel *et al.*, 2012) have found high levels of SIRM in urban (tram lines, highways, main roads and intersections) and harbor-industrial areas compared to green and sub-urban areas. Our results indicate that the main sources of pollution determined with SIRM were car exhaust as described by (Bukowiecki *et al.*, 2010; Kardel *et al.*, 2012).

Stomatal characteristics: Figure 3 shows the results of stomatal density (SD), stomatal pore surface (SPS) and stomatal resistance (RS). The results revealed that SD and RS of *Ficus benjamina* significantly increased from main roads toward parks, while the reverse was observed for SPS. It means that the stomatal characteristics of *Ficus benjamina* allow clear distinction between the most polluted land use classes (Roads) and the less polluted land use classes (Park). This result can be explained by the adaptation mechanisms of

plants to stressful habitats, due to e.g. air pollution stress (Kardel *et al.*, 2012). Also, plants can reduce the uptake of pollutants by decreasing their stomatal density (Larcher *et al.*, 2003). Thereby, when plants increase stomatal density and reduce stomatal size that leads to an optimal adjustment for control of gas exchange in general and the entrance of pollutants through stomata in particular (Alves *et al.*, 2008). The reduction of stomatal densities and pore size may be important for controlling absorption of pollutants (Verma and Singh, 2006), but will limit photosynthesis at the same time.

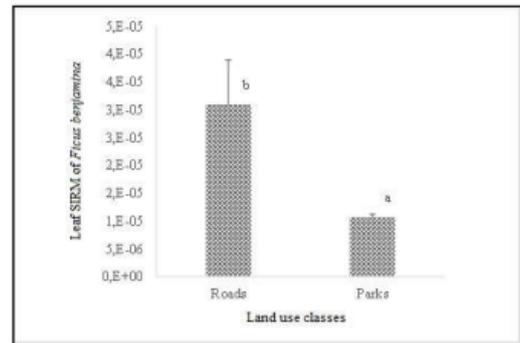


Figure 1. Leaf SIRM for *Ficus benjamina* in mean roads and parks. Small letters indicate significant differences between land use classes in *Ficus benjamina*. Error bars are standard deviation. Significant $p < 0.05$

Correlation between stomatal pore surface (SPS) and stomatal resistance (RS) in *Ficus benjamina*: The linear regression of stomatal pore surface (SPS) and stomatal resistance (RS) obtained starting from the slope of the models of regression (Figure 3) shows a negative but significant correlation ($R^2 = 0,5613$; $P \leq 0.05$). The result shows the influence of stomatal resistance on stomatal pore surface. Moreover, it is this RS which will influence the exchange of pollutants between the atmosphere and the interior of the leaf (Kardel *et al.*, 2010). This significativity could suggest, that in polluted areas the plant reduces the surface of the pores and shows a stomatal resistance.

Correlation between stomatal density (SD) stomatal and resistance (RS) in *Ficus benjamina*: The linear regression of stomatal density (SD) stomatal resistance (RS) obtained from the slope of the models of regression (Figure 4) shows a negative but significant correlation ($R^2 = 0,227$; $p \leq 0,05$). Atmospheric pollutants can disturb stomatal control mechanisms (Robinson *et al.*, 1998), since plants optimize their stomatal closure efficiency by increasing SD and decreasing SPS as a response to air pollution (Elagoz *et al.*, 2006; Kardel *et al.*, 2010). This observation, could be explained by a control of absorption of the pollutants (Verma and Singh, 2006) with an obstruction of the stomata by the particulate matters (Auclair, 1997) thus leading to the reduction of photosynthesis (Thompson, 1984) at roadsides. This observation could represent the limitation of the diffusion of gas by the stomata front of externe pollution (Verma and Singh, 2006; Balasooriya *et al.*, 2009).

Correlation between Leaf SIRM, stomatal density and Stomatal pore surface: The positive correlation obtained between leaf SIRM and stomatal density (Figure 5A) shows

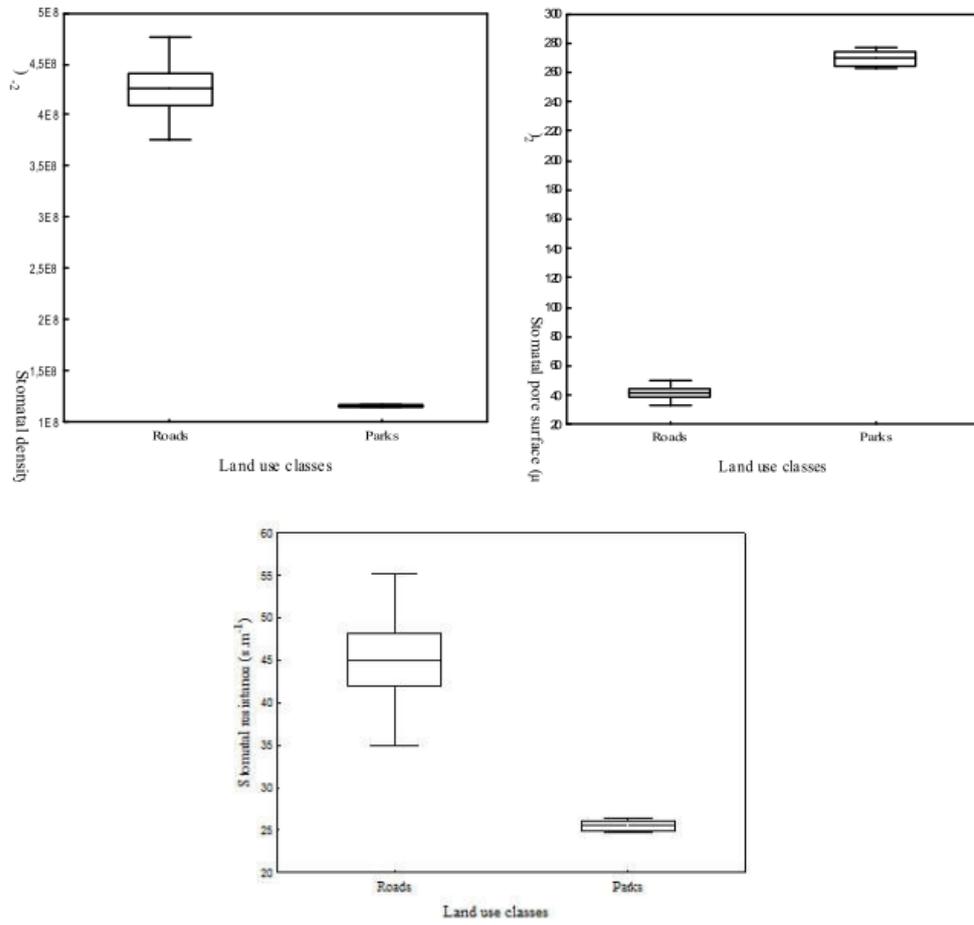


Figure 2. The stomatal characteristics of *Ficus benjamina*

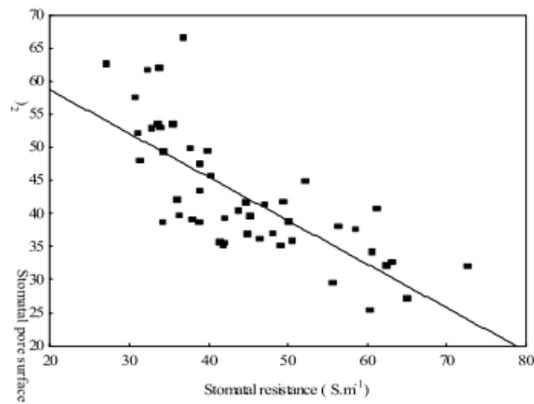


Figure 3. Correlation of stomatal pore surface (SPS) and stomatal resistance (RS) in *Ficus benjamina*

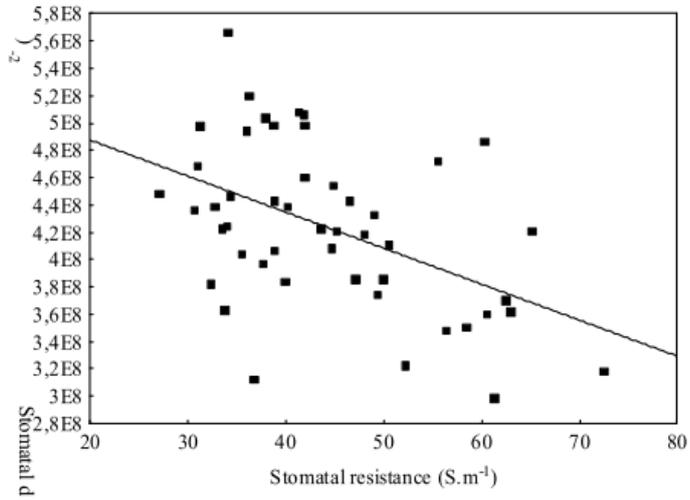


Figure 4. Correlation between stomatal density (SD) stomatal resistance (RS) in *Ficus benjamina*

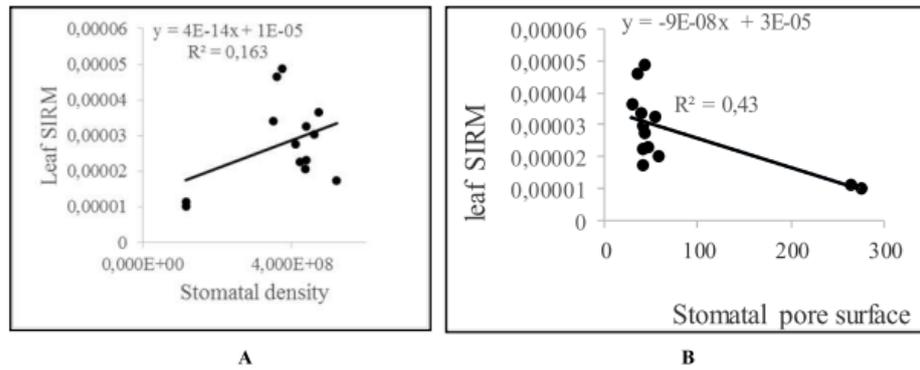


Figure 5. Correlation of Leaf SIRM, Stomatal density and Stomatal pore surface

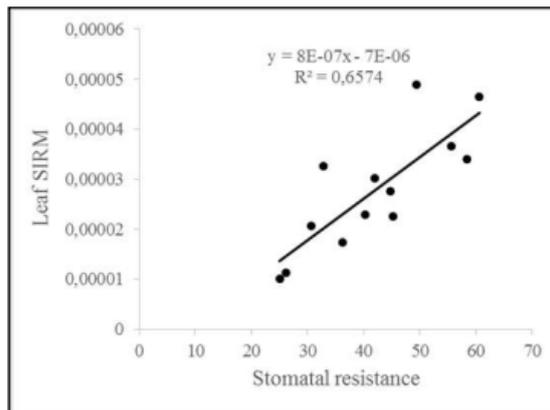


Figure 6. Correlation of Leaf SIRM and Stomatal resistance

International Journal of Innovation Sciences and Research

that no significant correlation ($R^2 = 0,163$; $p \geq 0,05$). These results could be also explained due to this characteristic as an important bioindicator. The gases that penetrate into the plant's leaves through the ostiole can cause alterations in their physiology, metabolism, ultra structure, and/or cellular structures. And these observations indicated that the pollution levels in those localities were unfavorable to normal physiological development, and that the increase in the number of stomata is essential for effective gas exchange under adverse conditions. Also, the negative correlation obtained between leaf SIRM and stomatal pore surface (Figure 5B) show that significant correlation ($R^2 = 0,43$; $p \leq 0,05$). These results could be also explained by a reduction of stomata is also found in response air pollution. The highest level of pollution led to the reduction of stomatal pores from exchange air, thus causing stress on plant metabolism (Kapoor *et al.*, 2013). The reduction in pore size may be important for controlling absorption of pollutants but would limit photosynthesis at the same time (Verma and Singh, 2006).

Correlation between Leaf SIRM and stomatal resistance:

The positive correlation obtained between Leaf SIRM and Stomatal resistance (Figure 6) show that significant correlation ($R^2 = 0,231$; $p \leq 0,05$). Plants are constantly exposed to environmental pollutants that they absorb, integrate and accumulate in their systems. It is reported that, depending on their level of sensitivity, the plants show visible changes that would include biochemical and physiological modification (Agbaire, 2009).

Conclusion

This study favours the choice of *Ficus benjamina* as an active biomonitoring species of tropical urban habitat quality due to its wide cosmopolitan distribution. The present study allowed to estimate air quality of the city of Abidjan from leaf SIRM values, stomatal characteristics (stomatal density, stomatal pore surface and stomatal resistance) in *Ficus benjamina*. Moreover, the species is easy to sample, it has a suitable height for biomonitoring and its leaves are less delicate. This study showed that the higher level of leaf SIRM, stomatal density, stomatal resistance values were found at roadsides.

REFERENCES

- Agbaire P. O., 2009. Air pollution tolerance indices (APTI) of some plants around Erhoike-Kokori oil exploration site of Delta State, Nigeria. *International journal of physical sciences*, 4(6): 366-368.
- Ali A. A. and Alqurainy F., 2006. Activities of antioxidants in plants under environmental stress. *The lutein-prevention and treatment for diseases*, 187-256.
- Alves E. S., Moura B. B. and Domingos M., 2008. Structural analysis of *Tillandsia usneoides* L. exposed to air pollutants in São Paulo City–Brazil. *Water, air, and soil pollution*, 189(1-4): 61-68.
- Auclair D., 1977. Influence des polluants particulaires sur la photosynthèse du Pin sylvestre et du Peuplier. *Annales des Sciences Forestières*, 34(1): 47-57.
- Balasoorya B. L. W. K., Samson R., Mbikwa F., Boeckx P. and Van Meirvenne M., 2009. Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2-3): 386-394.
- Barima Y. S. S., Angaman D. M., N'Gouran K. P., Kardel F., De Cannière C. and Samson R., 2014. Assessing atmospheric particulate matter distribution based on Saturation Isothermal Remanent Magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. *Science of the total environment*, 470: 975-982.
- Bebiano M. J., Geret F., Hoarau P., Serafim M. A., Coelho M. R., Gnassia-Barelli M. and Romeo M., 2004. Biomarkers in *Ruditapes decussatus*: a potential bioindicator species. *Biomarkers*, 9(4-5): 305-330.
- Bukowiecki N., Lienemann P., Hill M., Furger M., Richard A., Amato F. and Gehrig R., 2010. PM10 emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 44(19): 2330-2340.
- Elagöz V., Han S. S. and Manning W. J., 2006. Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity. *Environmental pollution*, 140(3): 395-405.
- Falla J., Laval-Gilly P., Henryon M., Morlot D. and Ferard J. F., 2000. Biological air quality monitoring: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64(3): 627-644.
- Fernández J. Á., Aboal J. R., Real C. and Carballeira A., 2007. A new moss biomonitoring method for detecting sources of small scale pollution. *Atmospheric Environment*, 41(10): 2098-2110.
- Ghorbanli M., Bakand Z. and Bakand S., 2007. Air pollution effects on the activity of antioxidant enzymes in *Nerium oleander* and *Robinia pseudo acacia* plants in Tehran. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 4(31): 57-162.
- Kapoor C. S., Bamniya B. R. and Kapoor K., 2013. Efficient control of air pollution through plants, a cost-effective alternative: studies on *Dalbergia sissoo* Roxb. *Environmental monitoring and assessment*, 185(9): 7565-7580.
- Kardel F., Wuyts K., Babanezhad M., Wuytack T., Potters G. and Samson R., 2010. Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L. *Environmental Pollution*, 158(3): 788-794.
- Kardel F., Wuyts K., Maher B. A. and Samson R., 2012. Intra-urban spatial variation of magnetic particles: monitoring via leaf saturation isothermal remanent magnetisation (SIRM). *Atmospheric environment*, 55: 111-120.
- Kardel F., Wuyts K., Maher B. A., Hansard R. and Samson R., 2011. Leaf saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) as a proxy for particulate matter monitoring: inter-species differences and in-season variation. *Atmospheric Environment*, 45(29): 5164-5171.
- Larcher W., 2003. *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*, fourth ed. Springer, 437-450.
- Murgia I., Tarantino D., Vannini C., Bracale M., Carravieri S. and Soave C., 2004. *Arabidopsis thaliana* plants overexpressing thylakoidal ascorbate peroxidase show increased resistance to Paraquat-induced photooxidative stress and to nitric oxide-induced cell death. *The Plant Journal*, 38(6): 940-953.
- Nakano Y. and Asada K., 1981. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, 22: 867-880.

- Nali C. and Lorenzini G., 2007. Air quality survey carried out by schoolchildren: an innovative tool for urban planning. *Environmental monitoring and assessment*, 131(1-3): 201-210.
- Raz S., Graham J. H., Hel-Or H., Pavlíček T. and Nevo E., 2011. Developmental instability of vascular plants in contrasting microclimates at 'Evolution Canyon'. *Biological Journal of the Linnean Society*, 102(4): 786-797.
- Robinson M. F., Heath J. and Mansfield T. A., 1998. Disturbances in stomatal behaviour caused by air pollutants. *Journal of Experimental Botany*, 461-469.
- Thompson J. R., Mueller P. W., Flückiger W. and Rutter A. J., 1984. The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, 34(2): 171-190.
- Verma A. and Singh S. N., 2006. Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120(1-3): 585-602.
- Wen D., Kuang Y. and Zhou G., 2004. Sensitivity analyses of woody species exposed to air pollution based on ecophysiological measurements. *Environmental Science and Pollution Research*, 11(3): 165-170.
- Wuytack T., Wuyts K., Van Dongen S., Baeten L., Kardel F., Verheyen K. and Samson R., 2011. The effect of air pollution and other environmental stressors on leaf fluctuating asymmetry and specific leaf area of *Salix alba* L. *Environmental pollution*, 159(10): 2405-2411.
- Yu-mei Z., Shi-jie H., Ying L. and Xia J., 2005. Stomatal response of *Pinus sylvestris* to elevated CO₂ concentrations during the four years of exposure. *Journal of Forestry Research*, 16(1): 15-18.

Publication 2

Koffi et al. *J. Appl. Biosci.* 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan



Journal of Applied Biosciences 78:6675 – 6684

ISSN 1997–5902

Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L. comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

N'guessan Achille Koffi ¹, Yao Sadaïou Sabas Barima ², Djédoux Maxime Angaman ³, Bini Kouamé Dongui ²

1 Université Nangui Abrogoua, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Gestion de l'Environnement, BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire.

2 Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Environnement. BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

3 Université Jean Lorougnon Guédé, Unité de Formation et de Recherche en Agroforesterie. BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

Auteur pour la correspondance : Yao Sadaïou Sabas **Barima**, Adresse : BP 150 Daloa, E-mail : byssabas@gmail.com, Téléphone : (+225)49648867

Original submitted in on 25th March 2014. Published online at www.m.elewa.org on 30th June 2014. <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v78i1.12>

RESUME

Objectif : L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel des stomates de *Ficus benjamina* à être utilisé comme des indicateurs de la pollution locale de l'air.

Méthodologie : Des empreintes de stomates ont été prélevées sur l'espèce d'étude aux abords des axes routiers, dans des zones résidentielles et industrielles et dans des parcs. La densité, la surface des pores et la résistance des stomates ont été déterminées à partir de ces empreintes. La densité des stomates était plus élevée au niveau des classes potentiellement plus polluées (axes routiers, zones industrielles) par rapport aux classes moins polluées (zones résidentielles et parcs). Ces dernières affichent des ouvertures des pores beaucoup plus grandes dans les classes moins polluées que les classes plus polluées.

Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* peuvent être de bons bio-indicateurs de la qualité de l'air. Plus précisément, la densité des stomates et la surface des pores des stomates sont potentiellement des paramètres pour évaluer la qualité de l'air.

Mots-clés : Pollution urbaine de l'air, Caractéristiques des stomates, Habitat urbain, Côte d'Ivoire

Stomatal leaf characteristics of *Ficus benjamina* L. as potential bioindicators of air quality in the Abidjan city (Côte d'Ivoire)

ABSTRACT

Objective: The main objective of this study is to assess the potential of *Ficus benjamina* stomata to be used as indicators of local air pollution.

Methodology: Stomatal prints were taken from the species of study in the vicinity of roads, in residential and industrial areas and parks. Density, pore surface and stomatal resistance were determined from these

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

prints. Stomatal density was higher in the potentially most polluted classes (roads, industrial areas) compared to less polluted classes (residential areas and parks). These last classes show much larger pores in less polluted classes than most polluted classes.

Conclusion and application of results: Stomatal leaf characteristics of *Ficus benjamina* can be great bioindicators of air quality. Specifically, stomatal density and pore surface could be potentially parameters for assessing air quality.

Keywords: Urban air pollution, stomatal characteristics, urban habitat, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

La pollution de l'environnement est l'un des problèmes majeurs dans le monde, particulièrement dans les pays en développement (Cunningham & Berti, 1993). En effet, l'industrialisation engendre d'importantes quantités de déchets qui polluent l'environnement (khan, 2006) ces déchets représentent une menace pour la santé humaine : cancer du foie, défaillance du système respiratoire et nerveux, irritation de la peau, etc. (Tchepele & Dias, 2011). Par ailleurs, la croissance démographique associée à l'industrialisation des villes accroissent la production de polluants à travers l'émission dans l'atmosphère des particules fines provenant des gaz d'échappement des véhicules et des cheminés des usines (Barima et al., 2014). En outre, ces polluants dans l'air sont susceptibles de contaminer l'environnement sous l'effet des facteurs influençant la pollution tels que le soleil, les précipitations, le vent et la température (Garbisu & Alkorta, 2001 ; Atolaye et al., 2007). Les bioindicateurs, organismes biologiques fournissant des indices sur la santé des écosystèmes, ont la capacité d'accumuler les polluants dans leurs tissus (Garrec & Van Haluwyn 2002 ; Markert et al., 2003), permettant aussi de valider sur une échelle de temps plus longue les données physicochimiques ponctuelles prises dans l'air ambiant et d'identifier la migration du polluant dans l'environnement (Fadel et al., 2008 ; Maizi et al., 2010). Ils pourront être utilisés pour déceler des changements dans l'environnement, détecter la présence de polluants, déterminer les effets de la pollution sur un écosystème et confirmer l'amélioration de la qualité de l'environnement naturel de l'organisme. Les bioindicateurs sont ainsi des mesures indirectes,

substitutives, d'un phénomène écologique (Landres et al., 1988).

En Côte d'Ivoire, notamment dans la ville d'Abidjan, l'accroissement de véhicules à vieux moteurs aurait engendré une production importante de polluants de l'air. De nombreux procédés physico-chimiques ont été développés pour la surveillance de la pollution de l'air (Ali, 1993 ; Klumpp et al., 1994 ; Brighigan et al., 1997). Mais la plupart de ces méthodes sont coûteuses surtout pour les villes du Sud à faibles revenus économiques (Gombert et al. 2006). L'utilisation de procédés biologiques pour détecter et surveiller les effets de la pollution serait donc une alternative pour ces villes (Mignorange & Rossini, 2006; Tomašević et al., 2008). Parmi ces procédés biologiques, l'utilisation des plantes comme bio-indicateur de la pollution de l'air s'avère avantageuse pour évaluer la qualité de l'habitat urbain (Kardel et al., 2010). Les méthodes biologiques de détermination de la qualité de l'air ont été employées avec succès dans plusieurs pays, notamment aux Etats-Unis d'Amérique, en Allemagne, en Belgique et au Brésil en utilisant des espèces telles que *Ficus religiosa* et *Thevetia nerifolia* (Hijano et al., 2005 ; Verma & Singh, 2006). La plupart de ces auteurs ont utilisé les caractéristiques biochimiques des feuilles pour l'évaluation de la qualité de l'air. D'autres comme Balasooriya et al. (2009), Kardel et al. (2010) ont utilisé les caractéristiques des stomates de *Taraxacum officinalis* et *Plantago lanceolata* pour la classification de la ville de Gent (Belgique) en zones polluées et moins polluées. A Abidjan en Côte d'Ivoire, *Ficus benjamina* est l'un des arbres d'ornementation les plus répandus dans la ville (Barima et al. 2014). En plus, *F. benjamina* est largement représentée dans toute la zone

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

intertropicale et les caractéristiques morphologiques de ses feuilles permettent d'y effectuer une série d'analyse. Cette espèce sera donc utilisée pour tester sa capacité à être utilisée comme un bio-indicateur de la pollution de l'air. Nous supposons dans cette étude que la classe d'utilisation du sol influence la qualité de l'air dans laquelle cet habitat se trouve. Ainsi, du fait de la forte concentration de gaz d'échappement de véhicules à moteur et de cheminées des industries, les axes routiers et les zones industrielles seront potentiellement plus pollués que les parcs et les zones résidentielles. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel

des stomates de *Ficus benjamina* à être utilisé comme des indicateurs de la pollution locale de l'air. Pour y arriver, les paramètres des stomates (la densité des stomates, la surface de leurs pores ainsi que la résistance des stomates) obtenus dans différentes classes d'utilisation du sol seront d'abord déterminés et comparés. Ensuite, l'influence des classes d'utilisation du sol et des saisons (sèche et pluvieuse) sur les paramètres des stomates sera mise en exergue. Enfin, la variation de ces paramètres en fonction de la hauteur de prélèvement des stomates sera déterminée.

MATERIEL ET METHODES

Description du site, plan d'échantillonnage et matériel biologique : La ville d'Abidjan est située au Sud de la Côte d'Ivoire, au bord du Golfe de Guinée et est comprise entre les latitudes 5°00' et 5°30' N et les longitudes 3°50' et 4°10' W. Capitale économique de la Côte d'Ivoire, Abidjan est la ville la plus peuplée d'Afrique de l'Ouest après Lagos au Nigéria. Elle est également la deuxième plus grande ville francophone et la troisième plus grande agglomération en Afrique. Considérée comme le carrefour culturel ouest-africain voire africain, Abidjan connaît une perpétuelle croissance caractérisée par une forte industrialisation et une urbanisation galopante. Pour cette étude, la ville d'Abidjan a été subdivisée en quatre (4) classes d'utilisation du sol: zones industrielles (ZI), zones résidentielles (ZR), parcs et principaux axes routiers (AR). Dans chacune de ces classes d'utilisation du sol, les échantillonnages ont été effectués sur trois sites. Sur chacun de ces sites, les prélèvements des feuilles ont été effectués à deux niveaux de hauteur : de 0 à 1,3 m (H1) et de 1,3 à 2,5 m (H2). La campagne d'échantillonnage s'est déroulée en Mars 2012 (grande saison sèche) et en Mai 2012 (grande saison de pluies). L'échantillonnage s'est effectué de 8 heures à 15 heures de la journée afin de respecter le temps d'exposition des feuilles à chaque campagne. Le matériel biologique est constitué des feuilles de *F. benjamina* récoltées sur les sites. Espèce dicotylédone de la famille des Moraceae, cet arbre a un usage généralement décoratif et s'adapte à des milieux très divers. Les feuilles sont persistantes, brillantes, coriaces et pétiolées.

Détermination des paramètres des stomates

Prélèvement des empreintes des stomates : Une feuille saine adulte de chaque plante a été choisie pour mesurer la densité des stomates, la longueur et la largeur des stomates. Sur la feuille rattachée à la plante à la hauteur H1 et H2, les faces supérieures et inférieures de celle-ci ont été nettoyées à l'eau distillée. Une partie de chaque face inférieure de la feuille a été recouverte par une mince couche de vernis à ongles incolore, tout en évitant de recouvrir la nervure centrale et la zone de marge de la feuille. Après séchage pendant 15 à 20 minutes, le vernis a été détaché méticuleusement à l'aide d'un ruban adhésif transparent puis collé sur une face propre de lame de microscopie étiquetée. Pour chacune des feuilles, trois empreintes de stomates (ou préparations) ont ainsi été récoltées.

Observations microscopiques : Au laboratoire, chacune des lames de microscope a été observée avec un grossissement de 40 x 10 au microscope optique (Olympus CX31) relié à une caméra (LC20). Le nombre de stomates a été compté, ainsi que la longueur et la largeur ont été mesurées. Une coupe transversale de la feuille a été faite pour nous permettre de déterminer la profondeur du stomate au microscope. Sur chaque préparation, le nombre moyen de stomates par préparation a été obtenu après 10 observations, soit un total de 90 observations pour chacun des pieds de *F. benjamina*. Les moyennes des longueurs et des largeurs des pores de stomates ont été obtenues après des mesures réalisées sur 16 stomates par préparation soit 144 mesures pour chaque pied de *F. benjamina*. Au total 216 préparations ont été faites sur l'espèce sur l'ensemble de nos sites d'échantillonnage.

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

Traitement des données : Plusieurs indices ont été calculés pour analyser les paramètres des stomates des feuilles en fonction de la classe d'utilisation du sol et de la hauteur de prélèvement. Il s'agit de la résistance des stomates (RS), la surface des pores des stomates (SPS) et la densité des stomates (DS). La densité des stomates, définie comme le nombre de stomates par mm² de surface foliaire (Chen et al., 2001) varie largement entre 5 et 1000 stomates par mm² d'épiderme (Hetherington & Woodward, 2003). La densité des stomates augmente avec l'intensité de la

pollution de l'air en indiquant les zones les plus polluées et les zones les moins polluées (Woodward et al., 1995). La résistance des stomates (RS) exprime la mesure de l'inhibition de la diffusion des gaz à travers les stomates (Balasooriya et al., 2009). En cas de pollution de l'air, la limitation de la diffusion des gaz est observée en raison d'une augmentation de la (RS) (Verma & Singh, 2006 ; Balasooriya et al., 2009). Elle est calculée pour mettre en évidence l'état de stress de la plante. RS (S.m⁻¹) est obtenu suivant l'équation 1 :

$$RS = \frac{4 \times l}{n \times \pi \times L \times W \times D} + \frac{L+W}{4 \times n \times L \times W \times D} \quad (1)$$

Où
 l = profondeur du stomate (m),
 D = coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air (24,2 X10⁻⁹m².S⁻¹ à 20°C),
 n = nombre de stomates par m²,
 W = largeur de l'ouverture du stomate (m) et
 L = longueur de l'ouverture du stomate (m).
 La surface des pores des stomates (SPS) est obtenue à partir de la longueur et de la largeur de l'ouverture des stomates. Elle est calculée pour connaître le degré d'ouverture des stomates. La surface des pores des stomates est calculée à partir de l'équation (2) :

$$SPS = \frac{L \times W \times \pi}{4} \quad (2)$$

SPS est communément exprimé en µm².
Analyse statistiques des résultats : La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Kolmogorov Smirnov. Une ANOVA à un facteur a été employée pour comparer la densité, la surface des pores et la résistance des stomates dans les quatre classes d'utilisation du sol au cours de la même période de prélèvement. Le test t de Student des échantillons appariés a permis de comparer les paramètres de stomates entre les mois de Mars et de Mai pour une même classe d'utilisation du sol. L'ensemble de ces tests a été effectué à l'aide du programme Statistica 7.1 (StatSoft.Inc.1984-2005).

RESULTATS

Variation de la densité des stomates entre les classes d'utilisation du sol : La densité des stomates de *F. benjamina* obtenue dans les différentes classes d'utilisation du sol (Figure 1) montre que quelques soit la saison de prélèvement, les valeurs plus élevées ont été obtenues dans les classes potentiellement plus polluées (AR et ZI) et les moins élevées dans les classes moins polluées (ZR et Parcs). Relativement à la comparaison des saisons entre les classes

d'utilisation du sol, les résultats de l'analyse statistique ne révèlent pas de différence significative entre les valeurs de la densité des stomates dans les classes d'utilisation du sol AR, ZI et ZR. Par contre, l'effet saison se fait ressentir dans les parcs où la densité des stomates est significativement plus élevée en saison sèche qu'en saison des pluies (Test t de Student : p<0,05).

Koffi et al. *J. Appl. Biosci.* 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

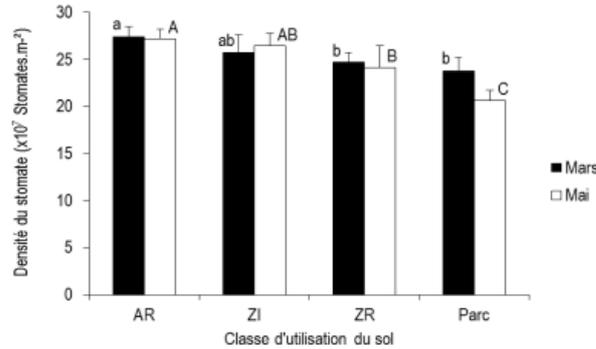


Figure 1 : Densité des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* suivant les classes d'utilisation du sol pendant les mois de Mars (saison sèche) et de Mai (saison pluvieuse). AR = axe routier, ZI = zone industrielle, ZR = zone résidentielle. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les lettres au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol pour le mois concerné. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

Densité des stomates à différentes hauteurs : Le tableau 1 présente la variation de la densité des stomates de *Ficus benjamina* dans les différentes classes d'utilisation du sol en fonction des hauteurs de prélèvements et des saisons. La densité des stomates de la première hauteur de prélèvement (H1, correspondant à 0-1,3 m) et pour des hauteurs plus élevées (H2, correspondant à 1,3-2,5 m) présente des

valeurs élevées dans AR et faibles dans les parcs et ce, quelle que soit la saison de prélèvement. Dans l'ensemble, quelle que soit la saison de prélèvement, les valeurs de la densité des stomates aux hauteurs H1 et H2, ne présentent pas de différence significative dans les classes d'utilisation du sol (Test t de Student : $p > 0,05$). Cependant, elle est plus élevée en AR et ZI, qu'en ZR et Parc.

Tableau 1: Densité des stomates ($\times 10^7$) stomates/m² de *Ficus benjamina* en fonction des hauteurs de prélèvement et des classes d'utilisation du sol.

		H1	H2
AR	Mars	26,82	27,06
	Mai	27,13	27,21
ZI	Mars	26,86	24,50 ^B
	Mai	25,65	26,81 ^A
ZR	Mars	24,35	24,35
	Mai	24,83	23,48
Parc	Mars	23,93	23,87
	Mai	26,31	25,42

AR = axe routier, ZI = zone industrielle, ZR = zone résidentielle, A et B désignent les différences significatives entre les mois de Mars et Mai pour la hauteur H2 dans la classe d'utilisation du sol ZI, H1 = [0-1,3 m [, H2 = [1,3-2,5 m [. En gras, valeur significative au seuil $\alpha = 5\%$.

Surface des pores des stomates entre les classes d'utilisation du sol : La figure 2 présente les valeurs de la surface des pores des stomates de *F. benjamina* dans les différentes classes d'utilisation du sol. Dans ces classes, la surface des pores observée présente

des valeurs plus élevées dans les parcs et ZR par rapport aux ZI et AR. Les valeurs de la surface des pores des stomates sont significativement plus élevées en saison sèche qu'en saison des pluies (Test t de Student : $p < 0,05$).

Koffi et al. *J. Appl. Biosci.* 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

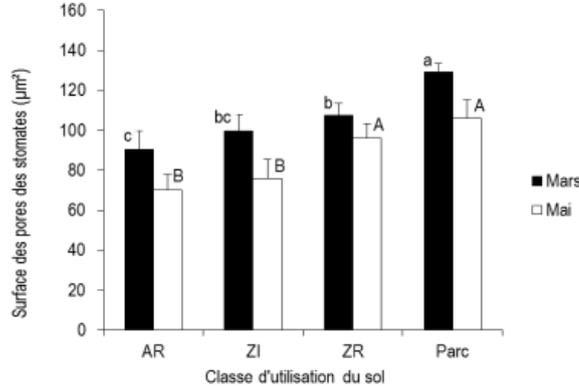


Figure 2 : Surface (μm^2) des pores des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* suivant les classes d'utilisation du sol pendant les mois de Mars (saison sèche) et Mai (saison pluvieuse). AR = axe routier, ZI = zone industrielle, ZR = zone résidentielle. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol pour le mois concerné. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

Surface des pores des stomates entre les hauteurs : La surface des pores des stomates de *F. benjamina* aux différentes hauteurs de prélèvement (H1 et H2) présente des valeurs élevées dans ZR et faibles dans AR, cela quel que soit le mois de prélèvement (Tableau 2). Par ailleurs, la surface des pores des stomates présente des valeurs qui varient de 64,581

μm^2 à 121,363 μm^2 , et de 67,476 μm^2 à 129,893 μm^2 respectivement pour les hauteurs H1 et H2. En outre, ces valeurs sont significativement différentes entre ces différentes hauteurs et entre les mois de prélèvement (Test t de Student : $p < 0,05$). Cependant, dans la classe Parc, elle ne présente aucune différence.

Tableau 2 : Surface (μm^2) des pores des stomates de *Ficus benjamina* en fonction des hauteurs de prélèvement des classes d'utilisation du sol.

		H1	H2
AR	Mars	95,81 ^{b, A}	112,07 ^{a, A}
	Mai	64,58 ^{b, B}	75,86 ^{a, B}
ZI	Mars	99,31 ^{a, A}	97,98 ^{b, A}
	Mai	85,38 ^{a, B}	67,47 ^{b, B}
ZR	Mars	121,36 ^b	129,89 ^{a, A}
	Mai	107,25	106,30 ^B
Parc	Mars	83,96	113,43
	Mai	87,35	103,24

AR = axe routier, ZR = zone résidentielle, ZI = zone industrielle, a et b désignent les différences significatives entre les hauteurs pour le même mois, A et B désignent les différences significatives entre les mois pour une même hauteur, H1 = [0-1,3 m [, H2= [1,3-2,5 m [. En gras, valeurs significatives au seuil $\alpha = 5\%$.

Résistance des stomates entre les classes d'utilisation du sol : Les valeurs de la résistance des stomates de *F. benjamina* obtenues à partir des données des différentes classes d'utilisation du sol en saisons sèche et pluvieuse sont présentées par la figure 3. Dans l'ensemble, les valeurs de la résistance

des stomates les plus élevées ont été obtenues dans AR et ZI, les plus faibles sont présentes dans les parcs et ZR. Dans chacune des classes, les valeurs de la résistance des stomates les plus élevées sont observées pendant la saison des pluies et les plus faibles en saison sèche. Cependant, les valeurs de la

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

résistance des stomates sont significativement plus élevées en saison des pluies qu'en saison sèche dans parc et ZR (Test t de Student : $p < 0,05$). Toutefois, dans

les classes AR et ZI, elles ne présentent pas de différence entre les saisons.

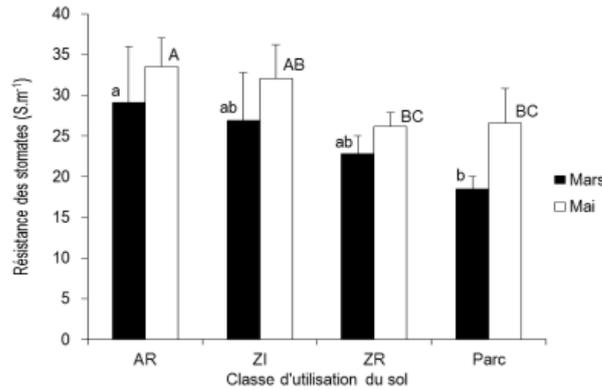


Figure 3 : Résistance ($S.m^{-1}$) des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* suivant les classes d'utilisation du sol pendant les mois de Mars (saison sèche) et Mai (saison pluvieuse). AR = axe routier, ZI = zone industrielle, ZR = zone résidentielle. Les barres au-dessus des histogrammes sont les écart-types. Les différentes lettres au-dessus des histogrammes indiquent les différences significatives entre les classes d'utilisation du sol pour le mois concerné. Seuil de significativité $\alpha = 5\%$.

Résistance des stomates dans les classes d'utilisation du sol à différents niveaux de prélèvement : Le tableau 3 présente la variation de la résistance des stomates de *F. benjamina* dans les différentes classes d'utilisation du sol en fonction des hauteurs dans les mois de Mars et de Mai. Les valeurs de la résistance des stomates de la hauteur (H1) varient de 22,602 $S.m^{-1}$ à 36,152 $S.m^{-1}$ et de 19,555

$S.m^{-1}$ à 34,870 $S.m^{-1}$ pour la hauteur (H2). Les valeurs les plus élevées sont obtenues aux abords des AR et les plus faibles dans les ZR. Quelle que soit la hauteur de prélèvement seules les classes AR et ZI présentent des valeurs significativement différentes, tandis que parc et ZR ne présentent pas des valeurs significatives (Test t de Student : $p > 0,05$).

Tableau 3 : Résistance des stomates ($S.m^{-1}$) de *Ficus benjamina* en fonction des hauteurs de prélèvement et des classes d'utilisation du sol.

		H1	H2
AR	Mars	22,60 ^{a, B}	19,55 ^{b, B}
	Mai	36,15 ^{a, A}	31,66 ^{b, A}
ZI	Mars	26,48	26,97 ^B
	Mai	29,83 ^b	34,87 ^{a, A}
ZR	Mars	27,89	27,74
	Mai	25,84	27,23
Parc	Mars	29,59	28,53
	Mai	30,79	25,72

AR = axe routier, ZR = zone résidentielle, ZI = zone industrielle, a et b désignent les différences significatives entre les hauteurs pour le même mois, A et B désignent les différences significatives entre les mois pour une même hauteur, H1 = [0-1,3 m [, H2 = [1,3-2,5 m [. En gras, valeurs significatives au seuil $\alpha = 5\%$.

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

DISCUSSION

La densité des stomates dans les différentes classes d'utilisation du sol durant la saison sèche et pluvieuse à différentes hauteurs présentent des valeurs significativement élevées dans les classes potentiellement plus polluées (AR et ZI) comparativement aux classes moins polluées (Parc et ZR) ($p < 0,05$). Nos résultats confirment les conclusions faites par Elagoz et al. (2006) et Balasooriya et al. (2009). Ces auteurs expliquent ces résultats par la réponse des plantes à la forte concentration de polluants dans ces milieux. En effet, les AR et les ZI sont caractérisés par leur concentration élevée en O_3 , CO_2 sous une haute température (Elagoz et al., 2006 ; Pandey et al., 2007), NO et NO_2 (Baldauf et al., 2013), d'une part, à l'âge et à la croissance de la plante (Woodward et al., 2002) d'autre part. Ainsi, les travaux de Barima et al. (2014) menés dans la ville d'Abidjan sur la capacité des feuilles à séquestrer les particules fines ont montré que les feuilles de *Panicum maximum*, *Amaranthus spinosus* et *Ficus benjamina* ont des taux de particules fines élevés ($45,1 \times 10^{-6}$ A) dans les classes AR et ZI, et faibles (10×10^{-6} A) dans les classes Parc et ZR. Aussi, leurs travaux montrent-ils que les classes d'utilisation les plus polluées sont les principales routes et les zones industrielles opposées aux parcs et aux zones résidentielles. Contrairement à la densité des stomates, la surface des pores des stomates présente des valeurs significativement élevées dans les classes moins polluées et faibles dans les classes polluées, ($p < 0,05$). Nos résultats confirment les conclusions faites par Kardel et al. (2010) et peuvent s'expliquer par la diminution de l'absorption des polluants, se traduisant par la réduction de la taille des stomates voire sa fermeture (Barber et al., 2004 ; Elagoz et al., 2006). Toutefois, les valeurs de la surface des pores des stomates les plus élevées sont observées en saison sèche qu'en saison des pluies. Ces observations pourraient être dues à la

réaction de la plante à empêcher l'absorption de polluants tout en optimisant l'absorption de CO_2 et en réduisant la perte d'eau due à la transpiration (Balasooriya et al., 2009). Les feuilles de *F. benjamina* présentent une résistance des stomates (RS) à la pollution de l'air plus importante dans les zones polluées par rapport aux zones moins polluées quel que soit la saison et la hauteur de prélèvement. Nos résultats sont en accord avec ceux de Balasooriya et al. (2009) qui ont obtenu avec *Taraxacum officinalis* une augmentation significative de la résistance des stomates au niveau des zones potentiellement polluées en comparaison avec les zones moins polluées ($p < 0,05$). Ce résultat s'expliquerait par le stress dû à la pollution de l'air limitant la diffusion de gaz à travers les stomates en raison d'une augmentation de RS (Verma & Singh, 2006) et des facteurs environnementaux (Hetherington & Woodward, 2003 ; Paoletti & Grulke, 2005) comme l'humidité (86%) qui permettrait d'une part, une dissolution des dépôts de surface et leur pénétration à travers la cuticule et d'autre part une augmentation du degré d'ouverture des stomates. Ces résultats montrent ainsi que les paramètres climatiques tels que la température, la pluviométrie, la vitesse du vent, pourraient influencer sur l'action des polluants dans les feuilles (Cuny et al., 2006) entraînant une augmentation de la résistance des stomates en saison des pluies. Toutefois, faut-il noter que d'autres facteurs biotiques, liés à l'âge, au stade physiologique et à la présence de parasites pourraient déterminer la résistance, la tolérance ou la sensibilité de la plante à la pollution. Les tendances de la variation de la densité, de la surface des pores et de la résistance des stomates dans les différentes classes d'utilisation du sol obtenues avec *F. benjamina* sont similaires aux études faites par Verma & Singh (2006) pour *Thevetia nerifolia* et Pal et al. (2002) pour *Ficus religiosa* et *Bougainvillea spectabilis*.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'évaluer le potentiel des stomates de *Ficus benjamina* à être utilisé comme indicateurs de la pollution locale de l'air à partir de la densité, la surface des pores et la résistance des stomates. Après avoir vérifié les caractéristiques des stomates face aux stress environnementaux, nos résultats montrent que la densité et la résistance des stomates présentent des valeurs plus élevées dans les zones potentiellement polluées qu'en zones moins

polluées. Cependant, la surface des pores des stomates présente des valeurs plus élevées en zones moins polluées qu'en zones polluées. A travers les stomates, nous avons pu vérifier la sensibilité de la plante face au stress environnemental en fonction de la saison. En somme, les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* peuvent être de bons bio-indicateurs de la qualité de l'air.

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié de l'aide de la Fondation David et Alice Van Büuren (Belgique) pour l'acquisition du microscope nécessaire à l'observation et l'analyse des stomates. Nous sommes également reconnaissant au District d'Abidjan pour avoir facilité les travaux sur le terrain et au Programme d'Appui Stratégique à Recherche Scientifique (PASRES) pour les allocations reçues et l'achat des consommables. Enfin nous

exprimons notre reconnaissance au Département de Bioingénieurs de l'Université d'Anvers (Belgique) en particulier au Professeur Roeland Samson. Le deuxième auteur est bénéficiaire d'une bourse de mobilité de la Politique fédérale belge, co-financée par les Actions Marie Curie de la Commission européenne (BELSPO).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ali EA, 1993. Damage to plants due to industrial pollution and their use as bioindicators in Egypt. *Environmental Pollution*, 81: 251-255.
- Atolaye B, Aremu M, 2007. Bioaccumulation of some trace elements in the body parts of fish species associated with soil sediment and water from Eoemaganiã confluence in nasarawa state, Nigeria. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 6(5): 2001-2008.
- Balasoorya B, Samson R, Mbikwa F, Vitharana UWA, Boeckx P, Van Meirvenne M, 2009. Biomonitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics. *Environmental and Experimental Botany*, 65:386-394.
- Barber JL, Thomas GO, Kerstiens G, Jones KC, 2004. Current issues and uncertainties in the measurement and modelling of air-vegetation exchange and with in-plant processing of POPS. *Environmental pollution*, 128: 99-138.
- Barima YSS, Angaman DM, N'Gouran KP, Koffi NA, Kardel F, De Cannière C, Samson R, 2014. Assessing atmospheric particulate matter distribution based on Saturation Isothermal Remanent Magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. *Science of the Total Environment* 470: 975-982.
- Brighigna L, Ravanelli M, Minelli A, Ercoli L, 1997. The use of an epiphyte (*Tillandsia caput-medusae* morren) as bioindicator of air pollution in Costa Rica. *Science of the Total Environment*, 198: 175-180.
- Chen LQ, Chaloner WG, Beerling DJ, Sun QG, Collinson ME, Mitchell PL, 2001. Assessing the potential for the stomatal characters of extant and fossil Ginkgo leaves to signal atmospheric CO₂ change. *American Journal of Botany*, 88: 1309-1315.
- Cunningham SD, Berti WR, 1993. Remediation of contaminated soil with green plants: An overview. *In vitro Cellular and Developmental Biology*, 29: 207-212.
- Cuny D, Rzepka MA, Bulteau G, Lakel A, Devred I, Van Haluwyn C, 2006. Quels rôles les plantes peuvent-elles jouer vis à vis de la pollution à l'intérieur des locaux ? *Air Pur*, 69: 33-36.
- Elagöz V, Han SS, Manning WJ, 2006. Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity. *Environmental pollution* 140: 395-405.
- Fadel D, Djamaï R, Laïfa A, 2008. Estimation de la pollution atmosphérique hydrocarbonée issue de la circulation automobile dans la ville de Skikda (Algérie) à l'aide de transplants lichéniques. *Ghardaïa, Algeria* 16-18 February 2009, 169.
- Garbisu C, Alkorta D, 2001. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 77: 229-236.
- Garrec J.P, Van Haluwyn C, 2002. Biosurveillance végétale de la qualité de l'air : concepts, méthodes et applications/préf. Bernard Festy. Paris : Tec et Doc, 117.
- Gombert S, Asta J, Seaward MRD, 2006. Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France). *Ecological Indicators*, 6: 429-443.
- Hetherington AM, Woodward FI, 2003. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424: 901-908.
- Hijano CF, Dominguez MDP, Gimenez RG, Sanchez PH, Garcia I, 2005. Higher plants as bioindicators of sulphur dioxide emissions in

Koffi et al. J. Appl. Biosci. 2014. Les caractéristiques des stomates des feuilles de *Ficus benjamina* L comme bioindicateurs potentiels de la qualité de l'air dans la ville d'Abidjan

- urban environments. Environmental Monitoring and Assessment, 111:75-88.
- Kardel F, Wuyts K, Babanezhad M, Vitharana UWA, Wuytack T, Potters G, Samson R, 2010. Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L. Environmental Pollution. Environmental Pollution, 158: 788-794.
- Khan AG, 2006. Mycorrhizoremediation—an enhanced form of phytoremediation. Journal of Zhejiang University Science, 7(7): 503-514.
- Klump A, Klumpp G, Domingos M, 1994. Plants as bioindicators of air pollution at the Serra do Mar near the industrial complex of Cubatão, Brazil. Environmental Pollution, 85:109-116.
- Landres PB, Verner J, Thomas, J W 1988. Ecological uses of vertebrate indicator species: a critique. Conservation biology, 2(4), 316-328.
- Maizi N, Alioua A, Tahar A, Semadi F, Fadel D, 2010. The use of inferior plants as bioindicators of automobile lead pollution in the area of Annaba (Algeria)(Utilisation des végétaux inférieurs comme bio indicateurs de la pollution plombique d'origine automobile dans la région de Annaba (Algérie)). Journal of Materials and Environmental Science, 1: 251-266.
- Markert BA, Breure AM, Zeichmeister HG, 2003. Bioindicators & biomonitors : principles, concepts, and applications. Elsevier. Amsterdam. 997.
- Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad KJ, Behl HM, 2002. Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? Flora, 197: 47-55.
- Pandey R, Chacko PM, Choudhary ML, Prasad KV, Pal M, 2007. Higher than optimum temperature under enrichment influences stomata anatomical characters in rose (*Rosa hybrida*). Scientia Horticulturae, 113: 74-81.
- Paoletti E, Grulke NE, 2005. Does living in elevated CO₂ ameliorate tree response to ozone? A review on stomatal responses. Environmental Pollution, 137: 483-493.
- Tchepele O, Dias D, 2011. Quantification of health benefits related with reduction of atmospheric PM10 levels: implementation of population mobility approach. International Journal of Environmental Health Research, 21: 189-200.
- Tomašević M, Vukmirović Z, Rajšić S, Tasić M, Stevanović B, 2008. Contribution to biomonitoring of some trace metals by deciduous tree leaves in urban areas. Environ Monit Assess, 137: 393-401.
- Verma A, Singh S, 2006. Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution. Environmental Monitoring and Assessment, 120: 585-602.
- Woodward FI, Lake JA, Quick WP, 2002. Stomatal development and CO₂: ecological consequences. New Phytologist, 153: 477-484.
- Woodward FI, Kelly CK, 1995. The influence of CO₂ concentration on stomatal density. New Phytologist, 131: 311-327.

Résumé

Le biomonitoring est de plus en plus utilisé pour la surveillance de la qualité de l'habitat urbain. L'échantillonnage de *Ficus benjamina* L. pour la surveillance passive de la qualité de l'air de l'habitat a été réalisé par des relevées de surface dans des sites dûment identifiés dans le district d'Abidjan. Ces sites ont été choisis en fonction de leur nature et des activités qui y sont menées. Dans chaque site, trois (03) points d'échantillonnage ont été retenus. En biosurveillance active quatre (04) sites ont été choisis sur base de la biosurveillance passive. Il s'agit des axes routiers, des zones résidentielles, des zones industrielles et des parcs. L'espèce *Ficus benjamina* L. a été cultivée par marcottage dans une pépinière de la ville d'Abidjan et exposé à la pollution sur les sites choisis pendant trois (03) mois. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel des stomates et des activités enzymatiques des feuilles de *Ficus benjamina* L. à être utilisés comme des indicateurs de la pollution locale de l'air. Des empreintes de stomates ont été prélevées, des activités enzymatiques et le taux particules fines ont été mesurés sur l'espèce dans chaque site après trois (03) mois d'exposition. La densité, la surface des pores et la résistance des stomates ont été déterminées à partir de ces empreintes. Les résultats ont montré que la densité des stomates et la résistance des stomates, le taux de particules fines et les activités de la catalase sont plus élevés au niveau des classes potentiellement plus polluées (axes routiers et zones industrielles) par rapport aux classes moins polluées (zones résidentielles et parcs). Au contraire, la surface des spores des stomates et l'ascorbate peroxydase présentent des valeurs élevées dans les classes moins polluées que les classes plus polluées. Par conséquent, la densité des stomates, la surface des pores des stomates et les activités enzymatiques pourraient être potentiellement des paramètres pour évaluer la qualité de l'air.

Mots-clés : Biomonitoring, Particules fines, Stomate, *Ficus benjamina* L., Habitat urbain, Activité enzymatique, Côte d'Ivoire.

Abstract

The species *Ficus benjamina* L. was cultivated by layering in a nursery in the city of Abidjan and exposed to pollution on selected sites for three (03) months. The main objective of this study is to assess the potential of *Ficus benjamina* L. stomata and the activity of detoxifying peroxide enzymes to be used as indicators of local air pollution. This species was exposed for three months on the sampling sites of four land use classes (Parks, Roads, Industrial and residential areas) in Abidjan city. Biomonitoring is increasingly used for monitoring the quality of the urban habitat. Sampling of species for monitoring air quality habitat was performed by surface surveys in duly identified sites in the city of Abidjan. These sites were selected based on their nature and the activities carried out there. These are roads, residential areas, industrial zones and parks. Density, pore surface and stomatal resistance were determined to assess the impact of air quality in the different land use classes on these parameters. Stomatal density was higher at level of the most polluted classes (roads, industrial areas) compared to the less polluted classes (residential areas and parks). These show much larger pores in less polluted classes than most polluted classes. Therefore, stomatal density and pore surface of the stomata could be potentially parameters for assessing air quality. The activity of catalase, ascorbate peroxidase, leaf SIRM and Stomatal prints were taken. A higher level of catalase, density and stomatal resistance and leaf SIRM were measured in plant samples collected in polluted areas (Roads, Industrial areas). However a lower level activity of ascorbate peroxidase and pore surface were measured in both plant samples collected from less polluted classes (Residential areas and Parks). Stomatal leaf characteristics of *Ficus benjamina* L. can be great bioindicators of air quality. Specifically, stomatal density and pore surface could be potentially parameters for assessing air quality.

Keywords : Biomonitoring, Particulate matter, Stomata, *Ficus benjamina* L., Urban habitat, Enzymatic activity, Ivory Coast.