

## **Biomonitoring de la pollution urbaine en zone tropicale à partir des caractéristiques spectrales et anatomiques des feuilles de *Ficus polita* Vahl**

### **[ Biomonitoring of urban pollution by leaves spectrals and anatomical characteristics of *Ficus polita* Vahl ]**

**Tra Bi Zamblé Fidèle<sup>1</sup>, Barima Yao Sadaïou Sabas<sup>2-3</sup>, Angaman Djédoux Maxime<sup>4</sup>, and Bini Kouamé Dongui<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Unité de Formation et de Recherche en Science et Gestion de l'Environnement,  
Université Nangui Abrogoua,  
BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire

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

<sup>3</sup>Department of Bioscience Engineering, Laboratory of Environmental and Urban Ecology,  
University of Antwerp,  
Groenenborgerlaan 171 B-2020 Antwerpen, Belgium

<sup>4</sup>Unité de Formation et de Recherche en Agroforesterie,  
Université Jean Lorougnon Guédé,  
BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

---

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Traffic roads intensification contribute to ambient air pollution of the city of Abidjan, in Ivory Coast, as other African capitals. Biomonitoring methods based on spectrals and anatomical plants leaves characteristics are effective to assess urban environment quality. Measurements of reflectance in the visible and taking stomatal imprints have been made on leaves of *Ficus polita* Vahl. Leaves were collected in roads vicinity and in parks of the city of Abidjan. Measurements of reflectance allow to distinguish road environment pollution relatively to parks while stomatal density (DS) revealed leaves anatomical response to road atmosphere quality. Air pollution impact on leaves physiology was determined by Normalised Dorsiventral Asymmetry Index (NDAI) and Stress Index (SI). NDAI is higher in parks than roadsides. Besides DS increasing values are observed with distance from the road when the contrary tendency is observed with SI. These results make it possible to consider an operational approach for assessment and monitoring of urban environment quality based on radiometric index and stomatal parameter.

**KEYWORDS:** Biomonitoring, Air pollution, Reflectance in the visible, Stomatal density, Ivory Coast.

**RESUME:** L'intensification du trafic routier contribue à la pollution de l'air ambiant de la ville d'Abidjan, en Côte d'Ivoire, à l'instar des autres capitales africaines. Les méthodes de biomonitoring basées sur les caractéristiques spectrales et anatomiques des feuilles des plantes s'avèrent efficaces pour évaluer la qualité de l'environnement urbain. Des mesures de la réflectance dans le visible et des prélèvements d'empreintes de stomates ont ainsi été effectuées sur des feuilles de *Ficus polita* Vahl. Les feuilles ont été prélevées au niveau des axes routiers et dans les parcs de la ville d'Abidjan. Les mesures de la réflectance ont permis de distinguer la pollution de l'environnement routier de celle des parcs tandis que la densité des

stomates (DS) a révélé la réponse anatomique des feuilles à la qualité de l'atmosphère routière. L'impact de la pollution de l'air sur la physiologie des feuilles a été déterminé grâce à l'Indice Normalisé d'Asymétrie Dorsiventrals (NDAI) et l'indice de stress (SI). Le NDAI est plus élevé dans les Parcs qu'aux abords des axes routiers. En outre les valeurs croissantes de DS sont observées avec la distance à la voie alors que la tendance contraire est observée avec SI. Ces résultats permettent d'envisager une approche opérationnelle pour l'évaluation et le suivi de la qualité de l'environnement urbain à partir d'indice radiométrique et de paramètre stomatal.

**MOTS-CLEFS:** Biomonitoring, Pollution de l'air, Réflectance dans le visible, Densité des stomates, Côte d'Ivoire.

## 1 INTRODUCTION

L'industrialisation croissante et les activités humaines intensifient l'émission de plusieurs polluants dans l'environnement et introduisent plusieurs substances nocives dans l'atmosphère [1]. Dans de nombreuses zones urbaines du monde, le trafic automobile est une source importante de pollution de l'air et contribue à 57 % voire 75 % des émissions totales [2]. En Côte d'Ivoire, notamment dans la ville d'Abidjan les émissions liées au trafic routier constituent une source majeure de dioxyde d'azote [3] et de matières particulaires [4]. L'accumulation des polluants atmosphériques gazeux et particulaires dans l'organisme humain constituent un risque pour la santé [5].

Les arbres en milieu urbain peuvent améliorer la qualité de l'air à travers la séquestration et l'accumulation de gaz et des matières particulaires [6] mais peuvent aussi être affectés par l'exposition à la pollution [7]. Divers expositions des plantes à des émissions du trafic routier entraînent des changements dans l'anatomie et la morphologie foliaire [8] et [9] et des changements dans leur teneur en chlorophylle [10] et [11]. Le feuillage d'arbres à proximité des routes peut être enduit de matières particulaires [4] qui peuvent obstruer les stomates conduisant ainsi à la réduction de la photosynthèse [12]. En outre les stress environnementaux peuvent également influencer les propriétés de réflectance des feuilles [13].

Les modifications anatomiques, physiologiques et spectrales des feuilles en zones urbaines peuvent être utilisées comme des bioindicateurs de la qualité de l'environnement urbain [14] et [15]. En effet, [14] ont utilisé les caractéristiques des stomates de *Plantago lanceolata* L. pour la classification des zones polluées et moins polluées tandis que [15] ont estimé la qualité de l'habitat urbain à partir de la réflectance spectrale des feuilles de *Carpinus betulus* L. et de *Tilia sp.*

L'hypothèse de cette étude stipule que la réflectance et la densité des stomates des feuilles de *Ficus polita* Vahl., espèce d'arbre à feuillage large, présente en bordure de routes urbaines et dans les parcs, pourrait être utilisée pour le biomonitoring de la pollution de l'environnement urbain. Pour vérifier cette hypothèse, cette étude vise à déterminer l'effet des émissions du trafic routier sur les caractéristiques spectrales et stomatales des feuilles de *F. polita*. Plus spécifiquement il s'agira de déterminer la réflectance des feuilles aux abords des axes routiers dans le spectre du visible et la comparer à celle des feuilles prélevées dans les parcs et jardins. L'impact des émissions gazeuses et particulaires sur les caractéristiques anatomiques et physiologiques à différentes distances d'exposition des plantes de la route sera ensuite étudié. Enfin le lien entre les caractéristiques anatomiques et la réflectance des feuilles sera mis en exergue.

## 2 MATERIEL ET METHODES

### 2.1 ZONE D'ETUDE ET TYPOLOGIE DES SITES

La ville d'Abidjan (5°00' - 5°30' N, 3°50' - 4°10' W), capitale économique de la Côte d'Ivoire a une population de plus de 4 millions d'habitants sur une superficie de 422 km<sup>2</sup>. Elle renferme la plupart des activités industrielles du pays et un nombre importants de véhicules à moteurs.

La ville d'Abidjan renferme plusieurs parcs et jardins dont un parc national, un jardin botanique et un centre de floristique. Dans ces espaces « verts », la pollution de l'air est relativement faible [16], [14], [17] et [4]. La ville à l'instar des villes des pays du sud est caractérisée par des émissions automobiles qui constituent une source importante de pollution de l'environnement.

## 2.2 ESPECE D'ETUDE

*Ficus polita* Vahl. est l'espèce d'étude. Elle a été choisie à cause de sa large distribution dans la ville. Il s'agit d'une dicotylédone de la famille des Moraceae. La forme des feuilles est ovale ou oblongue avec des surfaces glabres et ternes. La longueur du limbe est comprise entre 4 et 8 cm. *F. polita* est utilisée dans la ville comme ornement ou palissade. Elle est régulièrement appréciée pour servir d'ombrage aux hommes et aux animaux.

## 2.3 PERIODE ET PLAN D'ECHANTILLONNAGE

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée dans le mois de juin 2012, durant deux semaines. Ce mois se situe dans la grande saison de pluie. La température moyenne de l'air pendant cette période était 26°C, pendant que l'humidité de l'air était 89,2 %. Les précipitations et la vitesse moyenne du vent étaient respectivement 375,91 mm et 12 m.s<sup>-1</sup>. Trois axes routiers et deux parcs ont été sélectionnés pour y effectuer les échantillonnages. Sur chacun de ces sites 9 échantillons de feuilles mûres et bien érigées ont été récoltés à des hauteurs comprises entre 2 m et 2,5 m et à trois niveaux de distances (dist) de la route (dist 1 = 1,4 m ; dist 2 = 4,2 m et dist 3 = 7,5 m).

## 2.4 MESURE DE REFLECTANCE

Pour les mesures de réflectance, un appareil photo numérique de précision (Canon EOS 550D) équipé d'un zoom (EF-S 18-55 mm f/3,5-5,6 IS) a été utilisé. Les feuilles ont été placées dans une enceinte standardisée dont les parois sont tapissées d'une couche de peinture noire non brillante pour éviter la lumière parasite. L'appareil photo numérique est fixé au dessus d'un tube accédant à l'enceinte de sorte que la distance entre l'objectif et l'intérieur de l'enceinte est constante. La lumière incidente à l'intérieur de l'enceinte est issue de deux LED blanches de type Ostar 2005. Une grille amovible en fil de nylon transparent a été utilisée pour assurer la planéité des feuilles. Une feuille de papier de couleur blanche qui sert de référence est placée dans le fond de l'enceinte. Les mesures de réflectance ont été effectuées sur les deux faces des feuilles avec l'appareil photo numérique en maintenant constants les paramètres tels que la distance focale, la vitesse d'obturation, la valeur de correction d'exposition.

Sur chaque site, la feuille détachée de la plante est immédiatement placée sur le papier de référence au fond de l'enceinte standardisée puis photographiée sur ses deux faces. Les images des feuilles obtenues ont été ensuite transférées à l'ordinateur et grâce au logiciel ENVI 4.4 converties en trois bandes spectrales Rouge (R, 620 à 700 nm), Verte (V, 500 à 580 nm) et Bleue (B, 450 à 500 nm) en nuance de gris de 1 byte chacun. Des polygones ont été extraits sur les deux faces de la photographie de la feuille. La moyenne des nombres digitaux (DN ou "Digital Number") de ces polygones est calculée dans les bandes spectrales R, V et B ainsi que pour la surface de référence (feuille blanche). Le pourcentage de réflectance de la feuille dans les bandes spectrales ( $R_f, \lambda$ ) est calculée suivant l'équation (1) [15]:

$$R_f, \lambda = 100 \times R_r, \lambda \times \frac{DN_f, \lambda}{DN_r, \lambda} \quad (1)$$

Où  $R_r, \lambda$  désigne le pourcentage de réflectance de la surface de référence dans les différentes bandes spectrales ( $\lambda$ ).  $DN_f, \lambda$  et  $DN_r, \lambda$  désignent respectivement la moyenne des nombres digitaux de la feuille et de la surface de référence dans chacune des bandes spectrales.

## 2.5 INDICE NORMALISE D'ASYMETRIE DORSIVENTRALE ET INDICE DE STRESS

L'asymétrie de la réflectance dorsiventrals de la feuille est quantifiée par l'indice normalisé d'asymétrie dorsiventrals (NDAI ou "Normalised difference asymmetry index").

Le NDAI est obtenu suivant l'équation (2):

$$NDAI = \frac{Rf_{ab} - Rf_{ad}}{Rf_{ab} + Rf_{ad}} \quad (2)$$

Où  $Rf_{ab}$  et  $Rf_{ad}$  désignent respectivement les proportions relatives de réflectance des faces abaxiale et adaxiale de la feuille dans la même bande spectrale.

L'indice de stress des feuilles (SI ou "Stress index") exprime la sensibilité des longueurs d'ondes au cours de l'activité photosynthétique.

Il est obtenu à partir l'équation (3):

$$SI = \frac{(Rf_r)^2}{Rf_b} \quad (3)$$

Où Rf désigne respectivement les proportions relatives de réflectance de la face abaxiale ou adaxiale de la feuille dans la bande spectrale rouge et bleue.

Les variations du NDAI et de SI sont des indicateurs des modifications structurales et physiologiques des feuilles [17] et [18].

## 2.6 DENSITE DES STOMATES

Les empreintes de stomates ont été prélevées du côté de la face abaxiale de la feuille en appliquant 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 laisser pendre. Après 15 à 20 minutes de séchage, 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 prélevées puis chacune des lames de microscope a été observée avec un grossissement de 40 x 10 au microscope optique (Olympus CX31) relié à une camera (LC20) où le nombre de stomates a été compté. Pour chaque préparation la densité des stomates (DS/mm<sup>2</sup>) a été déterminée sur 10 observations.

## 2.7 ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica (version 6).

Une analyse de variance à un facteur et un test t ont permis de comparer les paramètres de réflectance (Rf, NDAI, SI) entre les axes routiers et les parcs, ainsi que la densité des stomates et l'indice de stress à différentes distances de la route. En outre des régressions linéaires ont été faites pour déterminer la relation entre la densité des stomates et la réflectance abaxiale et adaxiale.

## 3 RESULTATS

### 3.1 REFLECTANCE DES FEUILLES

Les valeurs de la réflectance des feuilles de *F. polita* dans les différentes bandes spectrales semblent plus élevées au niveau des axes routiers (AR) que celles dans les Parcs quelque soit la face de la feuille (Tableau 1). Toutefois, les fortes valeurs de la réflectance sont observées dans la bande verte et les plus basses dans la bande bleue. Dans l'ensemble les valeurs varient de 11,65 % à 23,44 % dans le rouge, de 24,49 % à 38,59 % dans le vert et de 8,78 % à 14,73 %. Les valeurs de la réflectance entre les AR et les Parcs au niveau de la face adaxiale des feuilles sont significativement différentes dans les bandes spectrales rouge et verte (Test LSD de Fisher : p < 0,05), tandis qu'aucune différence significative n'est observée au niveau de la face abaxiale des feuilles (Test LSD de Fisher : p > 0,05).

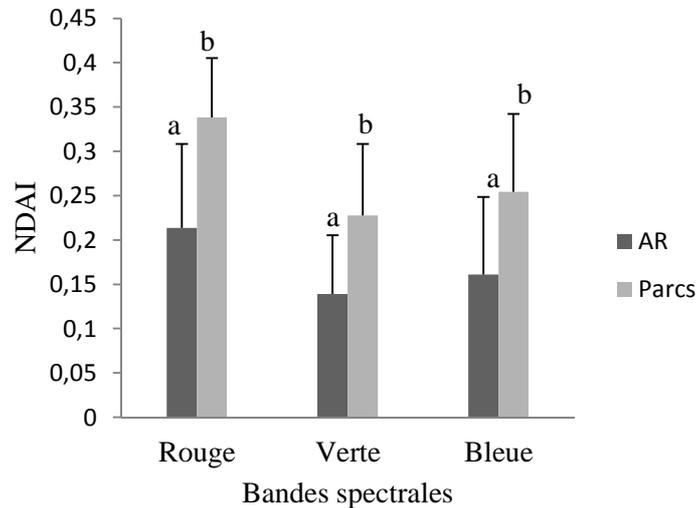
**Tableau 1. Réflectance dans les bandes spectrales rouge, verte et bleue des faces adaxiale et abaxiale des feuilles de *Ficus polita* échantillonnées aux abords des axes routiers (AR) et dans les Parcs.**

Classe d'utilisation du sol	Bande spectrale	Face adaxiale des feuilles	Face abaxiale des feuilles
AR	Rouge	15,77* ± 3,87 b	23,44 ± 1,97 b
	Verte	29,39* ± 4,28 c	38,59 ± 1,91 c
	Bleue	11,66 ± 3,81 a	15,37 ± 2,79 a
Parcs	Rouge	11,65* ± 1,91 b	23,26 ± 4,58 b
	Verte	24,49* ± 4,16 c	38,03 ± 4,84 c
	Bleue	8,78 ± 1,53 a	14,73 ± 1,89 a

Les lettres suivant les moyennes indiquent leurs rangs. \* : Différence significative entre les classes d'utilisation du sol dans une même bande spectrale à p = 0,05

### 3.2 INDICE NORMALISÉ D'ASYMÉTRIE DORSIVENTRALE ET INDICE DE STRESS

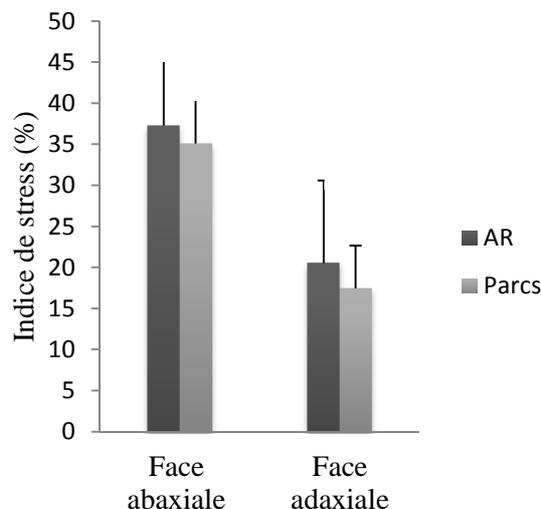
L'indice normalisé d'asymétrie dorsiventrals (NDAI) est plus élevé dans les Parcs qu'au niveau des axes routiers (AR) quelque soit la bande spectrale (Fig 1). Les valeurs pour les AR sont respectivement 0,21 dans le rouge, 0,13 dans le vert et 0,16 dans le bleu tandis que dans les Parcs, le NDAI est respectivement 0,33 dans le rouge, 0,22 dans le vert et 0,25 dans le bleu. Ces valeurs sont significativement différentes entre les deux classes d'utilisation du sol dans les bandes rouge, verte et bleue (Test t de Student :  $p < 0,05$ ).



**Fig. 1. Indice normalisé d'asymétrie dorsiventrals (NDAI) des feuilles issues des Parcs et des axes routiers (AR) pour les trois bandes spectrales Rouge, Verte et Bleue.**

Les valeurs portant les lettres différentes entre les différentes classes d'utilisation du sol dans une même bande spectrale sont significativement différentes ( $p < 0,05$ ). Les barres au dessus des histogrammes sont les écart-types

L'indice de stress (SI) est plus élevé au niveau des AR que dans les Parcs quelque soit la face des feuilles (Fig 2). En outre aucune différence significative n'est observée au niveau des deux faces (Test t de Student :  $p > 0,05$ ). Les valeurs de SI sont respectivement 20,5 % pour les AR et 17,42 % pour les Parcs du côté de la face adaxiale; 35,1 % dans les Parcs et 37,3 % au niveau de AR du côté de la face abaxiale.

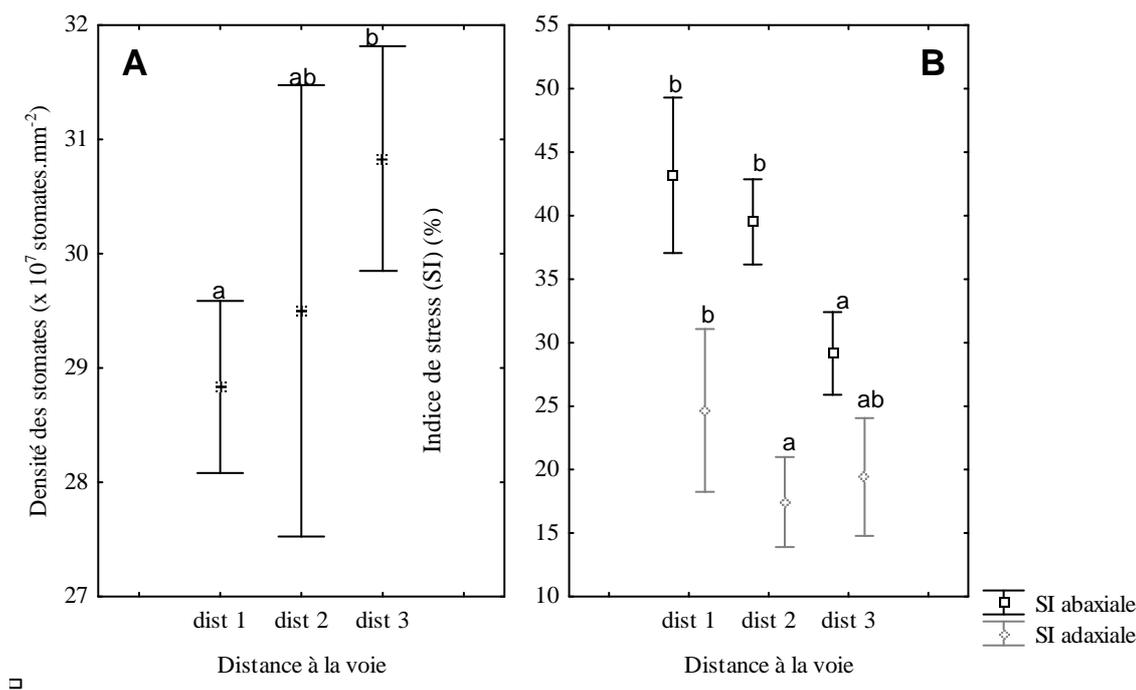


**Fig. 2. Indice de stress des feuilles issues des Parcs et des axes routiers (AR).**

Les valeurs portant les mêmes lettres entre les différentes classes d'utilisation du sol ne sont pas significativement différentes ( $p > 0,05$ ). Les barres au dessus des histogrammes sont les écart-types

### 3.3 DENSITE DES STOMATES ET INDICE DE STRESS A DIFFERENTES DISTANCE DE LA ROUTE

La figure 3A indique la variation de la densité des stomates (DS) au niveau des feuilles en fonction des distances de prélèvements. La DS augmente avec la distance. En outre une différence significative de la DS est observée entre la DS obtenue sur les feuilles prélevées à 1,4 m de la voie (dist 1) et celles prélevées à 7,5 m de la voie (dist 3) (Test LSD de Fisher :  $p < 0,05$ ). La tendance contraire est observée pour l'indice de stress (SI) quelque soit la face des feuilles (Fig 3B) avec une différence significative entre dist 1 et dist 3 ; dist 2 (4,2 m) et dist 3 du côté de la face abaxiale. Du côté de la face adaxiale la différence significative se situe entre dist 1 et dist 2 (Test LSD de Fisher :  $p < 0,05$ ).



**Fig. 3. Variation de la densité des stomates (A) et de l'indice de stress (B) à différentes distance de la route.**

Les barres d'erreurs indiquent les écart-types. dist 1 = 1,4 m de la voie ; dist 2 = 4,2 m de la voie ; dist 3 = 7,5 m de la voie

### 3.4 CORRELATION ENTRE LA DENSITE DES STOMATES ET LA REFLECTANCE ABAXIALE ET ADAXIALE DES FEUILLES

Les régressions linéaires entre la densité des stomates et la réflectance de la face abaxiale et adaxiale des feuilles dans les différentes spectrales au niveau des axes routiers semblent montrer des corrélations négatives et significatives du côté de la face abaxiale dans les bandes spectrales rouge ( $R^2 = 0,29$  ;  $p < 0,05$ ) et verte ( $R^2 = 0,31$  ;  $p < 0,05$ ) contrairement à celles observées au niveau de la face adaxiale (Fig 4).

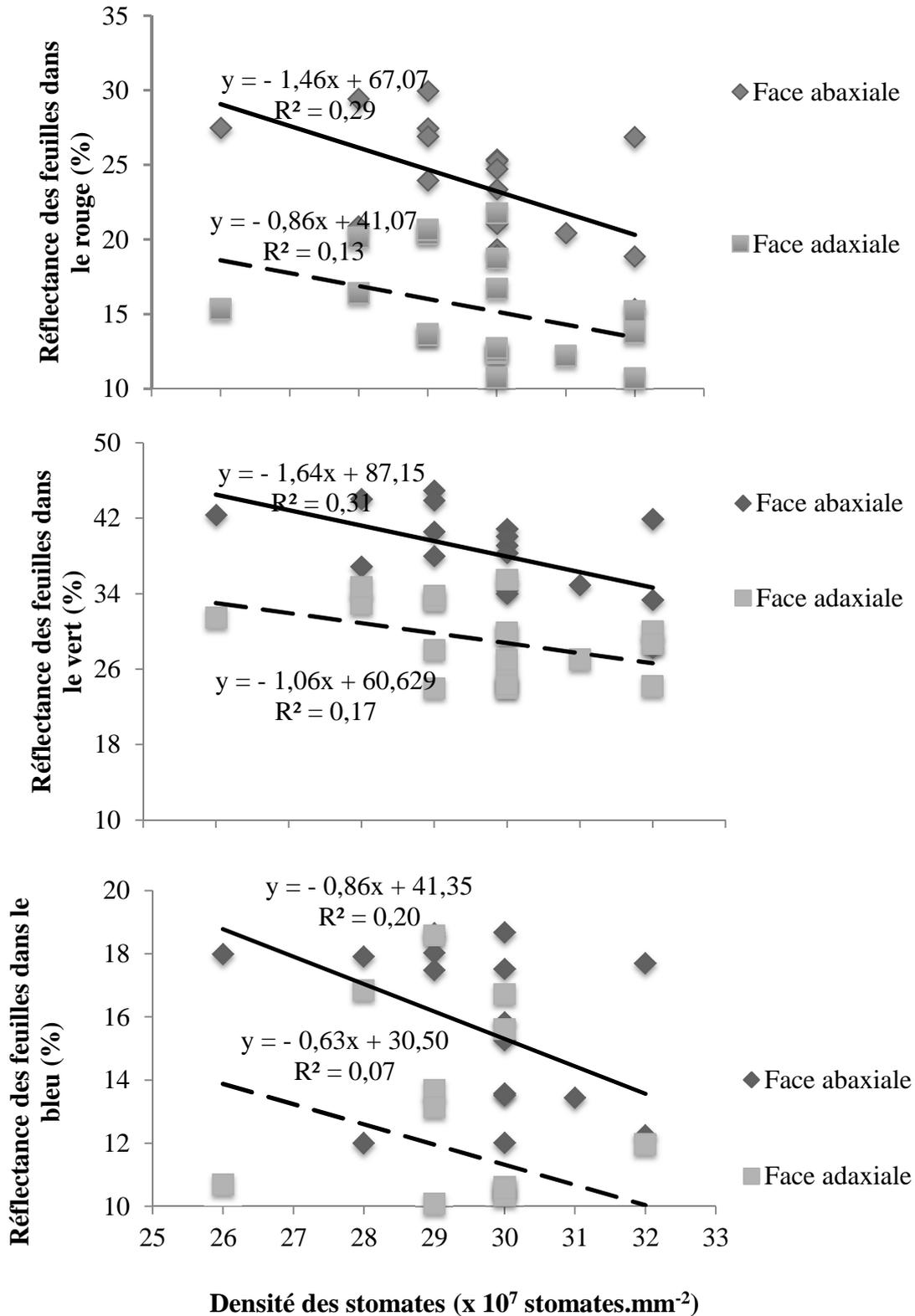


Fig. 4. Régressions linéaires entre la réflectance de la face abaxiale et adaxiale dans les différentes bandes spectrales et la densité des stomates des feuilles au niveau des axes routiers

#### **4 DISCUSSION**

Ces travaux ont montré que les réflectances des feuilles étaient plus élevées au niveau des axes routiers (AR) que dans les Parcs dans les différentes bandes spectrales. Ces résultats confirment ceux de [15]. En effet, leurs travaux ont montré que la réflectance des feuilles de *Tilia sp* est plus élevée dans les classes d'utilisation du sol potentiellement plus polluées que celles potentiellement moins polluées. Ce résultat de la réflectance dans les bandes spectrales du visible pourrait être lié à une baisse de la teneur en chlorophylle des feuilles au niveau des AR du fait de la pollution de l'air contrairement à celle des Parcs. [19] attestent qu'une baisse de la teneur en chlorophylle des feuilles entraîne une augmentation de leur réflectance dans des conditions de stress. En outre une différence significative de la réflectance entre les AR et les Parcs est observée au niveau de la face adaxiale des feuilles dans les bandes spectrales rouge et verte. Cette observation des résultats pourrait également être liée à une meilleure distribution de la lumière incidente à l'intérieur des feuilles à travers les canaux que forment les espaces entre les cellules du parenchyme palissadique [20]. [21] et [22] attestent que ces espaces agissent comme des fibres optiques qui permettent à une plus grande fraction de la lumière, en provenance de la face supérieure de la feuille, de passer au travers de cette assise cellulaire, pour rejoindre le parenchyme lacuneux. En outre selon [23] les lumières rouge et verte pénètrent plus profondément dans le mésophylle que la lumière bleue. [24] et [25] estiment que la lumière bleue diminue exponentiellement avec la profondeur et elle est atténuée entre la couche de l'épiderme supérieure et la moitié du tissu palissadique.

Les résultats obtenus avec l'indice normalisé d'asymétrie dorsiventrals (NDAI) montrent qu'il est significativement plus élevé dans les Parcs que dans les AR. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de [15] avec *Carpinus betulus* L. Cependant ils corroborent ceux de [17] avec *Tilia sp*. En effet, pour ces auteurs les variations du NDAI dans les habitats pollués expriment le niveau de sensibilité des végétaux aux modifications structurales et physiologiques au niveau des feuilles et sont liées à l'espèce. Ainsi [26] ont reporté une plus grande sensibilité sur la physiologie de *Tilia sp* à la pollution de l'air que *C. Betulus*.

L'indice de stress (SI) déterminé du côté de la face adaxiale et abaxiale, est plus élevé dans les AR que dans les Parcs mais ne présente aucune différence significative entre les deux classes d'utilisation du sol. Toutefois le SI élevé au niveau des AR pourrait être due à une variation de la teneur en pigments photosynthétique marquée par une réflectance plus élevée dans la bande rouge que dans la bande bleue. [27] attestent que la réflectance des feuilles dans le rouge est plus contrôlée par la chlorophylle tandis que les caroténoïdes absorbent fortement dans le bleu. En outre, selon [28], la teneur en chlorophylle a tendance à diminuer plus rapidement que celle en caroténoïdes lorsque les plantes subissent un stress.

La densité des stomates (DS) est faible à proximité de la route et augmente avec la distance. La tendance contraire est observée avec l'indice de stress (SI). Ces observations pourraient être liées à une atmosphère polluée en bordure de route [29]. En outre, la variation de la DS et de SI serait vraisemblablement due à un contrôle de l'absorption des polluants [8] ou à une obstruction des stomates par les matières particulaires [30] conduisant ainsi à la réduction de la photosynthèse [12] à proximité de la route. En effet, [4] attestent que les distances entre 0 et 5 m de la route sont les plus vulnérables à la pollution en matières particulaires dans la ville d'Abidjan.

Les corrélations négatives qui existent entre la densité des stomates et la réflectance des faces abaxiale et adaxiale dans les différentes bandes spectrales au niveau des routes, laisse supposer une influence de la densité des stomates sur l'apparition de modification physiologique au niveau des feuilles de *F. polita*. Ainsi la significativité des corrélations au niveau de la face abaxiale dans les bandes rouge et verte pourrait suggérer qu'en période de stress, le rendement photosynthétique au niveau de la face abaxiale des feuilles décroît plus que celle du côté de la face adaxiale [31] et [32]. Cet état serait lié à une plus grande sensibilité du parenchyme spongieux aux polluants gazeux après leur diffusion à travers les stomates contrairement au parenchyme palissadique [33].

#### **5 CONCLUSION**

La présente étude a permis de déterminer et comparer les réflectances des feuilles de *Ficus polita* issues de deux milieux contrastés à partir d'indices radiométriques, d'un indice de stress et de la densité des stomates en fonction de la distance de prélèvement de la plante à la route. En général, les résultats présentent des valeurs élevées de réflectance, du NDAI et de SI au niveau des axes routiers par opposition aux parcs confirmant la typologie de notre milieu d'étude selon laquelle les axes routiers sont plus pollués que les parcs. Les valeurs élevées de SI et DS ont été observées à proximité des voies suggérant l'influence de la distance sur la réaction des feuilles à la qualité de l'environnement routier.

En somme, cette étude a montré qu'il est possible de réaliser un biomonitoring de la pollution urbaine à partir de la réflectance et de la densité des stomates des feuilles de *F. polita* en milieu urbain tropical.

## REMERCIEMENTS

Le deuxième auteur est bénéficiaire d'une bourse de mobilité de la Politique scientifique fédérale belge (BELSPO), co-financée par les Actions Marie Curie de la Commission européenne. Cette étude a bénéficié de l'aide de la Fondation David et Alice Van Buuren (Université Libre de Bruxelles) pour l'acquisition de l'appareil photo numérique de précision, du microscope nécessaire à l'observation et l'analyse des stomates ainsi que de l'Université de Antwerp (Prof. Roeland Samson) et du "Vlaamse Interuniversitaire Raad" pour la confection du box de réflectance. Nous sommes également reconnaissants au District d'Abidjan pour avoir facilité les travaux sur le terrain. Enfin nous remercions le PASRES (Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire) pour son appui financier.

## REFERENCES

- [1] S. Fraenzle, B. Markert and S. Wünschmann, *Introduction to Environmental engineering*, Wiley-VCH, Weinheim, New York, Tokyo, 2012.
- [2] WHO, *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide*. Global update 2005. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, ISBN 9289021926, 2006.
- [3] M. Adon, C. Galy-Lacaux, C. Delon, V. Yoboué, K. Pienaar, C. Liousse, H. Al Ourabi, B. Diop, L. Dungall, L. Sigha, A. Akpo, J.P. Tathy, F. Lavenu, E. Gardrat and P. Castera, "Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers", *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, pp. 7467-7487, 2010.
- [4] Y.S.S. Barima, D.M. Angaman, K.P. N'Gouran, N.A. Koffi, F. Kardel, C. De Cannière and R. Samson, "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*, vol. 471, pp. 975-982, 2014.
- [5] D. Dias, O. Tchepel, A. Carvalho, A.I. Miranda and C. Borrego, "Particulate matter and health risk under a changing climate: assessment for Portugal", *Science World Journal*, vol. 2012, pp. 1-10, 2012.
- [6] K.P. Beckett, P.H. Freer-Smith and G. Taylor, "Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and wind speed", *Global Change Biology*, vol. 6, pp. 995-1003, 2000.
- [7] A. Pourkhabbaz, N. Rastin, A. Olbrich, R. Langenfeld-Heyser and A. Polle, "Influence of environmental pollution on leaf properties of urban plane trees", *Platanus orientalis L., Bulletin of Environmental Contamination of Toxicology*, vol. 85, pp. 251-255, 2010.
- [8] A. Verma and S. Singh, "Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution", *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 120, pp. 585-602, 2006.
- [9] P. Joshi and A. Swami, "Physiological responses of some tree species. Under road sides automobile pollution stress around city of Haridwar, India", *The Environmentalist*, vol. 27, pp. 365-374, 2007.
- [10] M.G. Alaimo, B. Lipani, M.G. Lombardo, S. Orecchio, M. Turano and M.R. Melati, "The mapping of stress in the predominant plants in the city of Palermo by lead dosage", *Aerobiologia*, vol. 16, pp. 47-54, 2000.
- [11] G. Baycu, D. Tolunay, H. Özden and S. Günebakan, "Ecophysiological and seasonal variations in Cd, Pb, Zn, and Ni concentrations in the leaves of urban deciduous trees in Istanbul", *Environmental Pollution*, vol. 143, pp. 545-554, 2006.
- [12] J.R. Thompson, P.W. Mueller, W. Flückler and A.J. Rutter, "The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants", *Environmental Pollution*, vol. 34, pp. 171-190, 1984.
- [13] P.K.E. Campbell, E.M. Middleton, J.E. Mc Murtrey, L.A. Corp and E.W. Chappelle, "Assessment of vegetation stress using reflectance or fluorescence measurements", *Journal of Environmental Quality*, vol. 36, pp. 832-845, 2007.
- [14] F. Kardel, K. Wuyts, M. Babanezhad, U.W.A. Vitharana, T. Wuytack, G. Potters and R. Samson, "Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L.", *Environmental Pollution*, vol. 158, pp. 788-794, 2010.
- [15] A.R. Khavanin Zadeh, F. Veroustraete, K. Wuyts, F. Kardel and R. Samson, "Dorsi-ventral leaf reflectance properties of *Carpinus betulus* L.: An indicator of urban habitat quality", *Environmental Pollution*, vol. 162, pp. 332-337, 2012.
- [16] B.L.W.K. Balasooriya, R. Samson, F. Mbikwa, W.A.U. Vitharana, P. Boeckx and M. Van Meirvenne, "Bio-monitoring of urban habitat quality by anatomical and chemical leaf characteristics", *Environmental and Experimental Botany*, vol. 65, pp. 386-394, 2009.

- [17] A.R. Khavanin Zadeh, F. Veroustraete, J.A.N. Buytaert, J. Dirckx and R. Samson, "Assessing urban habitat quality using spectral characteristics of *Tilia* leaves", *Environmental Pollution*, vol. 178, pp. 7-14, 2013.
- [18] A.R. Khavanin Zadeh, *Biomonitoring urban habitat quality based on tree leaf reflectance*, Ph.D. thesis, University of Antwerp, Antwerp, Belgium, p. 159, 2013.
- [19] G. Carter and A. Knapp, "Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration", *Journal of Botany*, vol. 88, pp. 677-684, 2001.
- [20] T.D. Sharkey, "Photosynthesis in intact leaves of C3 plants: physics, physiology and rate limitations", *Bot Rev*, vol. 51, pp. 53-105, 1985.
- [21] W.K. Smith, T.C. Vogelmann, E.H. Delucia, D.T. Bell and K.A. Shepherd, "Leaf form and photosynthesis: do leaf structure and orientation interact to regulate internal light and carbon dioxide?" *Bioscience*, vol. 47, pp. 785-793, 1997.
- [22] T.C. Vogelmann, J.N. Nishio and W.K. Smith, "Leaves and light capture: light propagation and gradients of carbon fixation within leaves", *Trends in Plant Science*, vol. 1, pp. 65-71, 1996.
- [23] J. R. Evans, "Leaf anatomy enables more equal access to light and CO<sub>2</sub> between chloroplasts", *New Phytologist*, vol. 143, pp. 93-104, 1999.
- [24] T.C. Vogelmann, J. F. Bornman and S. Jossierand, "Photosynthetic light gradients and spectral regime within leaves of *Medicago sativa*", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 323, pp. 411-421, 1989.
- [25] M. Cui, T.C. Vogelmann and W.K. Smith, "Chlorophyll and light gradients in sun and shade leaves of *Spinacia oleracea*", *Plant, Cell and Environnement*, vol. 14 pp. 493-500, 1991.
- [26] O.C. Taylor, C.R. Tompson, D.T. Tingey and R.A. Reinert, *Oxides of nitrogen*. In: J.B. Mudd, and A. Kozlowski, (Eds.), Responses of plants to air pollution, Academic Press: University of California, pp. 121-139, 1975.
- [27] D.A. Sims and J.A. Gamon, "Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages", *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, pp. 337-354, 2002.
- [28] A.A. Gitelson and M.N. Merzlyak, "Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves", *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, vol. 22, pp. 247- 252, 1994.
- [29] G.K. Sharma, "Plant cuticular complex in response to highway pollution". *The Science of the Total Environment*, vol. 59, pp. 303-307, 1987.
- [30] D. Auclair, "Influence des polluants particulaires sur la photosynthèse du Pin sylvestre et du Peuplier", *Annales des Sciences Forestières*, vol. 34, no.1, pp. 47-57, 1977.
- [31] P.M. Li, P. Fang, B. Wang, H. Gao and T. Pent, "The higher resistance to chilling stress in adaxial side of *Rumex K-1* leaves is accompanied with higher photochemical and non-photochemical quenching", *Photosynthetica*, vol. 45, no. 4, pp. 496-502, 2007.
- [32] J. Javier, P. Peguero, E. Gil-Pelegri and F. Morales, "Photosystem II efficiency of the palisade and spongy mesophyll in *Quercus coccifera* using adaxial/abaxial illumination and excitation light sources with wavelengths varying in penetration into the leaf tissue", *Photosynth Research*, vol. 99, pp. 49-61, 2009.
- [33] F. Rashidi, A. Jalili, S. Kafaki and A. Babaie, "Anatomical responses of leaves of black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to urban pollutant gases and climatic factors", *Trees-Structure and function*, vol. 26, pp. 363-375, 2012.