Télédétection, 1999, vol. 1, p. 19-46
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 1999 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous license par
Gordon and Breach Science Publishers
Imprimé en Malaisie

Analyse des effets atmosphériques sur les indices de végétation en milieu urbain

ABDERRAZAK BANNARI[a*], DENIS MORIN[b†] et DRISS HABOUDANE[b]

[a]Laboratoire de télédétection et géomatique, Département de géographie, Université d'Ottawa, C.P. 450, Succ. A, Ottawa (Ontario) K1N 6N5 et [b]Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1

(soumis le 21 avril 1998 ; accepté le 14 juillet 1998 ; révisé le 8 octobre 1998)

L'impact des effets atmosphériques sur la sensibilité des indices de végétation pour la détection des couverts végétaux en milieu urbain et l'intérêt de la résolution spectrale étroite pour minimiser ces effets sont analysés dans cette étude. Seuls les indices conçus dans le but de minimiser les effets perturbateurs et pour mieux rehausser le signal issu de la végétation ont été retenus. Le modèle de transfert radiatif 5S a été utilisé pour nos simulations en considérant les bandes spectrales appropriées aux capteurs MEIS-II (*Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner*) et TM de Landsat de résolutions spectrales étroite et large, respectivement. Les résultats obtenus montrent que le MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) est l'indice le plus sensible aux effets atmosphériques. Dans des conditions d'observation défavorables il diminue de 26 % par rapport à la vraie valeur au sol. Les indices GEMI (*Global Environment Monitoring Index*), PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) et SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) viennent au deuxième rang avec une sensibilité de 20 % et 17 %, pour TM et MEIS-II, respectivement. Alors que l'erreur moyenne sur les indices TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) et NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est de 15% pour TM et 12 % pour MEIS-II. Quel que soit le type d'atmosphère, le taux de couverture végétale ou la résolution spectrale du capteur, la détermination du coefficient d'auto-correction atmosphérique *a priori* permet aux indices ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) et TSARVI (*Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index*) de minimiser adéquatement les effets atmosphériques. Une approximation de ce coefficient qui s'éloigne de la vraie valeur induit un bruit additif notamment sur le ARVI. Pour un meilleur ajustement des effets atmosphériques en milieu urbain et périurbain nous recommandons une valeur égale à 0,5 pour ce coefficient. Finalement, l'apport de la résolution spectrale étroite pour minimiser les effets atmosphériques en milieu urbain reste très modeste et ne dépasse pas 3 % pour les conditions les plus dégradées.

Mots-clefs : indice de végétation, atmosphère, urbain, résolution spectrale

* Téléphone : (613) 562–5800 Ext. 1042 ; télécopieur : (613) 562–5145 courrier électronique : abannari@uottawa.ca

† Téléphone : (819) 821–7180 ; télécopieur : (819) 821–7944.

Analysis of Atmospheric Effects on Vegetation Indices in the Urban Environment

This study analyses the impact of atmospheric effects on the sensitivity of vegetation indices for sensing urban vegetation cover and the use of narrow spectral resolution to minimize such effects. We considered only indices designed to minimize upsetting effects and increase the signal received from vegetation. The 5S atmospheric code was used for our simulations, taking into account the spectral bands applicable to the MEIS-II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner) and TM sensors, with narrow and broad spectral resolutions, respectively. The results obtained show that the Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) is the most sensitive index to atmospheric effects; in bad sensing conditions, it decreases by 26 % compared to the true ground value. The Global Environment Monitoring Index (GEMI), the Perpendicular Vegetation Index (PVI) and the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) came in second with 20 % and 17 % sensitivity for TM and MEIS-II respectively, while the average error on the Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is 15 % for TM and 12 % for MEIS-II. Whatever type of atmosphere, vegetation cover or spectral resolution of the sensor, establishing first the atmospheric self-correction factor allows the Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) and Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index (TSARVI) to adequately eliminate atmospheric effects. An approximation of this factor insufficiently close to the real value introduces additional noise, particularly on the ARVI. To better correct the atmospheric effects in a urban or urban-fringe environment, we recommend a factor of 0.5. Finally, the contribution of narrow spectral resolution to minimizing the atmospheric effects in an urban environment is very low and does not exceed 3 % in the worst conditions.

Keywords: vegetation indices; atmosphere; urban; spectral resolution

1. INTRODUCTION

La télédétection est une importante source d'information pour la gestion des couverts végétaux et la cartographie des changements survenus dans les différents écosystèmes de la planète à l'échelle régionale, continentale ou globale (Teillet, 1995). Les indices de végétation dérivés des données radiométriques de télédétection sont largement utilisés dans les programmes de surveillance de la dynamique de la végétation à l'échelle du globe. Ces programmes ne peuvent exclure de leur champ d'intérêt l'étude de l'environnement végétal urbain qui est sensible aux changements continus à cause des activités humaines. Ainsi, l'indice de végétation est un indicateur de l'état de l'environnement végétal urbain et constitue une information potentielle originale et utile aux urbanistes et aux aménageurs responsables de la protection des milieux naturels (Bannari, 1996).

L'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île de France (IAURIF) est l'une des rares institutions qui s'intéresse à la télédétection satellitaire et aux indices de végétation pour étudier l'environnement urbain (IAURIF, 1986). Dans l'optique d'établir un « cadastre vert » sur la

ville de Paris, l'IAURIF découvre, dans l'indice NDVI, un outil efficace et peu coûteux comparativement aux méthodes traditionnelles de gestion et d'évaluation des couverts végétaux urbains. Forster (1983) est l'un des pionniers de l'utilisation des données de télédétection spatiale pour déterminer les caractéristiques socio-économiques des quartiers urbains. En utilisant des données issues du capteur MSS de Landsat sur la ville de Sydney, en Australie, il définit un indice de qualité résidentielle basé sur le pourcentage de végétation déterminé à partir d'un indice de végétation de type rapport : RVI (*Ratio Vegetation Index*). En France, sur la ville de Strasbourg, le RVI donne satisfaction pour séparer le domaine urbain construit du domaine végétal (CNES, 1982). Dans le même sens, Nicoloyanni (1990) utilise l'indice PVI comme information de base pour une analyse diachronique sur l'agglomération urbaine d'Athènes, en Grèce. D'après lui, cette méthode permet la mise à jour des surfaces de changement de façon très précise. Selon Collet et Abednego (1987), cet indice caractérise bien la végétation de faible densité en milieu urbain. Sur la ville de Genève, en Suisse, le PVI a été utilisé pour la différenciation des tissus résidentiels (Terrettaz et Collet, 1997). Calculé à partir des données AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), le PVI montre une bonne corrélation entre les îlots de chaleur en milieu urbain et la densité du couvert végétal (Gallo *et al.*, 1993). Le TSAVI sert à cartographier la qualité phytosanitaire des espaces naturels en milieu urbain et présente une bonne corrélation avec les températures de surface (Charbonneau *et al.*, 1991). Les rares travaux dans la littérature sur l'utilisation des indices de végétation en milieu urbain nous réfèrent seulement à quatre indices : NDVI, RVI, PVI et TSAVI. Toutefois, aucun de ces travaux n'analysait l'impact des effets atmosphériques sur l'utilisation de l'un ou l'autre de ces indices dans cet environnement.

Dans la littérature, une quarantaine d'indices de végétation ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien spécifiques (Bannari *et al.*, 1995). En particulier, les indices de deuxième génération (NDVI, PVI, SAVI, TSAVI, MSAVI, ARVI, TSARVI et GEMI) sont conçus dans le but de minimiser les effets extérieurs et pour mieux rehausser le signal issu de la végétation. Or, bien que ces indices soient basés sur des hypothèses plausibles pour minimiser les effets extérieurs, l'utilisation de l'un ou l'autre pour caractériser les couverts végétaux peut être limitée par un certain nombre de facteurs d'ordre physique qui contrôlent le processus d'interactions entre le rayonnement élec-

tromagnétique, l'atmosphère, le couvert végétal et le sol sous-jacent. Dans la présente étude, nous ne nous intéressons qu'aux effets atmosphériques sur la sensibilité des indices de végétation pour la détection des couverts végétaux dans un environnement urbain. En effet, l'atmosphère des régions « urbano-industrielles » est contaminée par divers gaz et par une quantité de poussières très élevée. Elle intensifie jusqu'à un certain point les confusions dans les analyses multitemporelles (Deschamps *et al.*, 1984). Elle provoque un mélange des signatures spectrales de cibles voisines surtout pour des régions hétérogènes comme le milieu urbain dont les éléments sont de faibles dimensions (Deschamps *et al.*, 1981; Kaufman and Fraser, 1984). Elle contamine de manière différente les bandes spectrales et affecte toute combinaison de calcul des indices de végétation. Dans la littérature ces effets ont été discutés par certains chercheurs (Dave, 1980; Kaufman and Sendra, 1988; Kaufman and Tanré, 1992; Teillet, 1994; Myneni and Asrar, 1994), mais en considérant seulement un ou deux indices et dans des applications autres que le milieu urbain. Dans cette étude, nous analysons l'impact des effets atmosphériques sur la sensibilité des indices de deuxième génération pour la détection des couverts végétaux en milieu urbain, ainsi que l'intérêt de la résolution spectrale étroite pour minimiser ces effets. Le modèle de transfert radiatif 5S (Simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire) a été utilisé pour nos simulations en considérant les bandes spectrales appropriées aux capteurs MEIS-II, du Centre canadien de télédétection, et TM de Landsat de résolutions spectrales étroite et large, respectivement.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Modèle de transfert radiatif

Le modèle de transfert radiatif 5S (Tanré *et al.*, 1990) dans une version améliorée par Teillet et Santer (1991) a été utilisé dans cette recherche. Comparativement à d'autres modèles de transfert radiatif (Dom, Dave, Lowtran 6, Tuner et Smart), le 5S montre une formulation analytique simple et relativement adéquate, et un meilleur compromis entre précision et de rapidité de calcul (Royer *et al.*, 1988; Chartier *et al.*, 1989; Moran *et al.*, 1992). Le modèle 5S a été mis au point par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de Lille, France, pour étudier l'influence de

l'atmosphère sur le signal mesuré au niveau des capteurs satellitaires. C'est un modèle uni-couche qui approxime la solution de l'équation du transfert radiatif en supposant une atmosphère homogène horizontalement, sans nuage et un sol lambertien sans relief. Il tient compte de la diffusion par les molécules, de la diffusion par les aérosols et de l'absorption par les gaz (ozone, vapeur d'eau, oxygène, dioxyde de carbone) et les aérosols. Il repose sur l'hypothèse de base que les phénomènes d'absorption par les gaz et ceux de diffusion par les aérosols et les molécules sont indépendants. Il a la particularité de modéliser l'effet de l'environnement dans le cas des sols hétérogènes comme en milieu urbain. Pour tenir compte de l'altitude du capteur et de l'élévation de la surface du sol au-dessus du niveau moyen de la mer, Teillet et Santer (1991) ont modifié le modèle 5S, ce qui permet son utilisation pour la télédétection aéroportée. Récemment, il a été transformé en 6S (Seconde Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) par Vermote *et al.,* (1997) pour tenir compte de l'absorption par d'autres éléments atmosphériques (CH_4, N_2O, CO), de la diffusion d'ordre multiple, des cibles non lambertiennes, du pas d'échantillonnage de la résolution spectrale qui a été améliorée de 5 à 2,5 nm, de l'altitude du capteur et de la surface du sol.

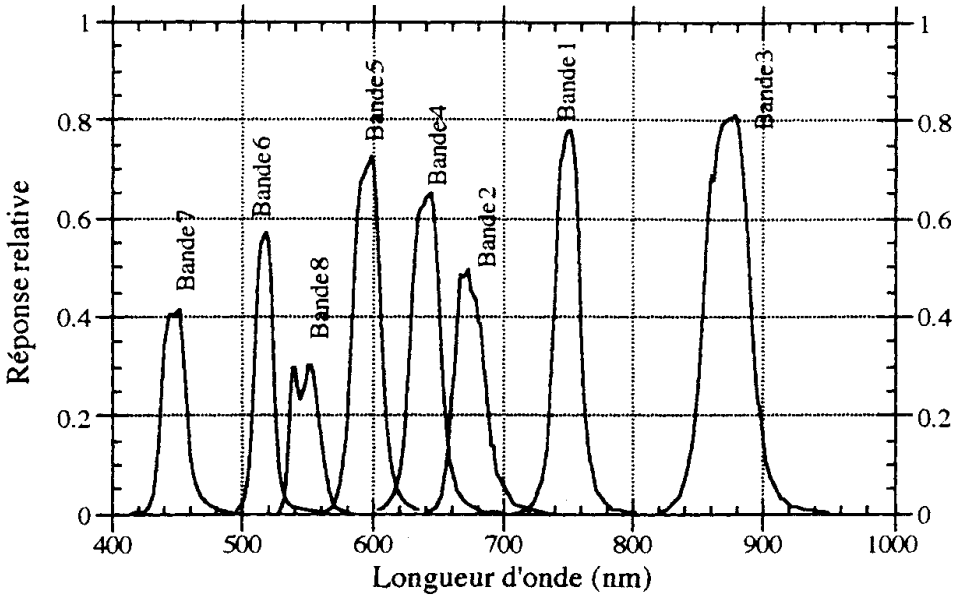


FIGURE 1 Réponse spectrale des filtres du capteur MEIS-II. *MEIS-II spectral bands response profiles*

2.2. Conditions de simulation

Nous avons fixé l'angle d'observation dans la direction du nadir, alors que celui de l'éclairement correspond à un angle solaire rasant de 50°. Quant aux conditions spectrales, nous avons sélectionné les bandes appropriées aux capteurs MEIS-II et TM de résolutions spectrales étroite et large, respectivement. Parmi les huit bandes du capteur MEIS-II (figure 1), trois bandes dans le visible et le proche infrarouge ont été retenues: bleu (433–463 nm), rouge (655–685 nm) et proche infrarouge (847–901 nm). En outre, les trois bandes homologues du capteur TM (figure 2) ont été sélectionnées: bleu (450–520 nm), rouge (630–690 nm) et proche infrarouge (760–900 nm). Le modèle atmosphérique standard US-1962 et le modèle d'aérosols urbain dont la concentration des aérosols est exprimée en terme de visibilité ont été retenus. Les visibilités considérées sont égales à 5, 20 et 40 km, ainsi qu'une atmosphère purement moléculaire. Nous avons entrepris nos simulations en variant simultanément la visibilité atmosphérique et le pourcentage du couvert végétal au sol. Ces derniers correspondent à un sol dépourvu de végétation et un couvert végétal à différents taux de couverture (20, 40, 50, 75 et 100 %). On a cherché à mettre en évidence uniquement les effets atmosphériques, en admettant que tous les autres effets sont nuls.

2.3. Indices de végétation : état de la question

Malgré le développement de plusieurs nouveaux indices adaptés aux comportements des sols, le NDVI, proposé par Rouse *et al.* (1974), reste l'indice le plus utilisé. En exploitant la philosophie de la droite des sols nus (pente et origine), Richardson et Weigand (1977) développent le PVI. Huete (1988) démontre qu'il existe une certaine contradiction dans la façon dont les indices NDVI et PVI décrivent le comportement spectral de la végétation et du sol nu. Par conséquent, il a développé un nouvel indice de végétation appelé SAVI, qui est un compromis entre les indices de type rapport (NDVI) et les indices de type orthogonal (PVI). Par ailleurs, Qi *et al.* (1994a) montrent que le facteur d'ajustement L du SAVI n'est pas une constante égale à 0,5, mais plutôt une fonction qui varie inversement avec la présence de la végétation. Afin de minimiser l'effet du sol nu sur le SAVI et d'augmenter sa sensibilité aux couverts végétaux, ils proposent une version modifiée de l'indice, le MSAVI. À partir d'une approche ana-

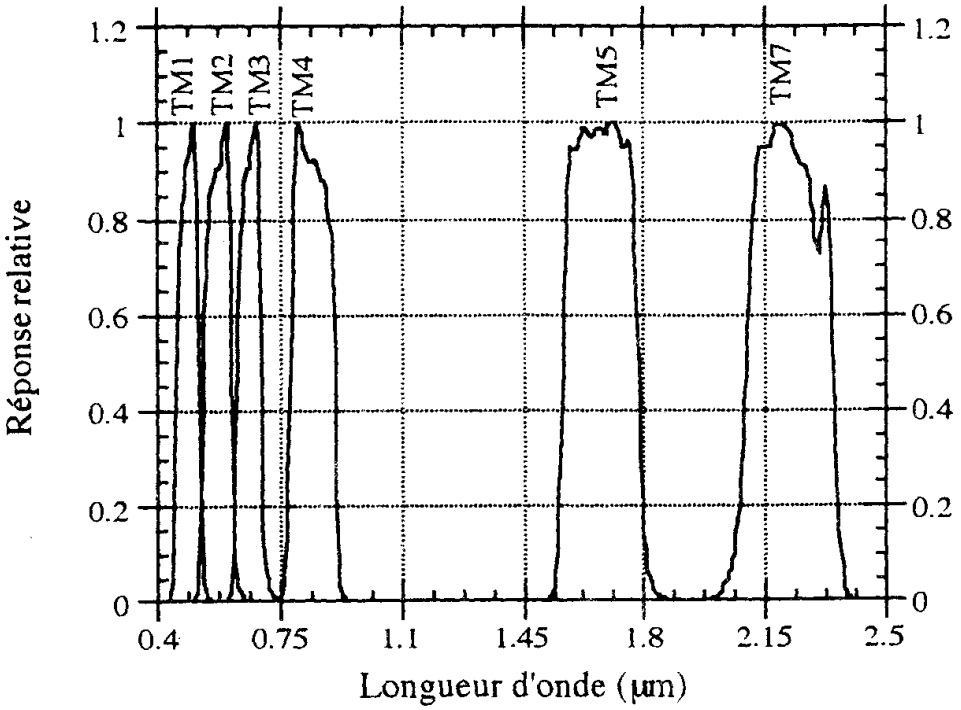


FIGURE 2 Réponse spectrale des filtres du capteur TM de Landsat. *Landsat-TM spectral bands response profiles*

logue à celle du PVI, Baret *et al.* (1989) transforment le SAVI en TSAVI. Cette première version du TSAVI fut réajustée afin de minimiser les effets de la brillance du sol par un facteur additif de 0,08 (Baret and Guyot, 1991). Kaufman et Tanré (1992) ont développé un nouvel indice de végétation, appelé le ARVI. Celui-ci est une version améliorée de l'indice NDVI pour mieux raffiner la diffusion atmosphérique. Le degré de résistance de celui-ci dépend du succès de la détermination du coefficient d'auto-correction atmosphérique « γ ». En se basant sur le modèle de transfert radiatif 5S, ces chercheurs montrent que la valeur unité ($\gamma = 1{,}0$) permet un meilleur ajustement pour la plupart des applications en télédétection, à moins que le modèle des aérosols ne soit connu *a priori*. Récemment, pour minimiser l'effet de l'atmosphère sur le TSAVI, Bannari *et al.* (1997a) proposent le TSARVI. Cette transformation se base, d'une part, sur la substitution du canal rouge par le canal « hybride » rouge-bleu, proposé par Kaufman et Tanré (1992) et, d'autre part, sur le calcul de la pente et l'origine (a_{rb} et b_{rb}) de la droite des sols nus dans l'espace spectral apparent rouge-bleu/proche infrarouge (équation 11). Afin de minimiser à

la fois l'effet du sol et de l'atmosphère sur le NDVI, Pinty et Verstraete (1992) proposent un indice de végétation non linéaire propre au capteur AVHRR de NOAA pour une gestion globale de la végétation, le GEMI. Bien que cet indice soit développé précisément et spécialement pour AVHRR, nous trouvons très intéressant d'analyser son comportement dans les bandes des capteurs TM et MEIS-II. Les formules de ces indices sont les suivantes :

$$\mathrm{NDVI} = \frac{(\rho_{\mathrm{pir}} - \rho_{\mathrm{r}})}{(\rho_{\mathrm{pir}} + \rho_{\mathrm{r}})} \qquad \text{(eq.1)}$$

$$\mathrm{PVI} = \frac{(\rho_{\mathrm{pir}} - \mathrm{a}\rho_{\mathrm{r}} - \mathrm{b})}{\sqrt{\mathrm{a}^2 + 1}} \qquad \text{(eq.2)}$$

$$\rho_{\mathrm{pir}} = \mathrm{a}\rho_{\mathrm{r}} + \mathrm{b} \qquad \text{(eq.3)}$$

$$\mathrm{SAVI} = \frac{(\rho_{\mathrm{pir}} - \rho_{\mathrm{r}})}{(\rho_{\mathrm{pir}} + \rho_{\mathrm{r}} + \mathrm{L})}(1 + \mathrm{L}) \qquad \text{(eq.4)}$$

$$\mathrm{MSAVI} = \frac{[2\rho_{\mathrm{pir}} + 1 - \sqrt{(2\rho_{\mathrm{pir}} + 1)^2 - 8(\rho_{\mathrm{pir}} - \rho_{\mathrm{r}})}]}{2} \qquad \text{(eq.5)}$$

$$\mathrm{TSAVI} = \frac{[\mathrm{a}(\rho_{\mathrm{pir}} - \mathrm{a}\rho_{\mathrm{r}} - \mathrm{b})]}{[\rho_{\mathrm{r}} + \mathrm{a}\rho_{\mathrm{pir}} - \mathrm{ab} + 0,08(1 + \mathrm{a}^2)]} \qquad \text{(eq.6)}$$

$$\mathrm{ARVI} = \frac{[\rho^*_{\mathrm{pir}} - \rho^*_{\mathrm{rb}}]}{[\rho^*_{\mathrm{pir}} + \rho^*_{\mathrm{rb}}]} \qquad \text{(eq.7)}$$

$$\rho^*_{\mathrm{rb}} = \rho^*_{\mathrm{r}} - \gamma[\rho^*_{\mathrm{b}} - \rho^*_{\mathrm{r}}] \qquad \text{(eq.8)}$$

$$\gamma = [\rho_{\mathrm{a-r}}]/[\rho_{\mathrm{a-b}} - \rho_{\mathrm{a-r}}] \qquad \text{(eq.9)}$$

$$\mathrm{TSARVI} = \frac{[\mathrm{a}_{\mathrm{rb}}(\rho^*_{\mathrm{pir}} - \mathrm{a}_{\mathrm{rb}}\rho^*_{\mathrm{rb}} - \mathrm{b}_{\mathrm{rb}})]}{[\rho^*_{\mathrm{rb}} + \mathrm{a}_{\mathrm{rb}}\rho^*_{\mathrm{pir}} - \mathrm{a}_{\mathrm{rb}}\mathrm{b}_{\mathrm{rb}} + 0,08(1 + \mathrm{a}^2_{\mathrm{rb}})]} \qquad \text{(eq.10)}$$

$$\rho^*_{\mathrm{pir}} = \mathrm{a}_{\mathrm{rb}}\rho^*_{\mathrm{rb}} + \mathrm{b}_{\mathrm{rb}} \qquad \text{(eq.11)}$$

$$\mathrm{GEMI} = \eta(1 - 0,25\eta) - \frac{(\rho^*_{\mathrm{r}} - 0,125)}{(1 - \rho^*_{\mathrm{r}})} \qquad \text{(eq.12)}$$

$$\eta = [2(\rho^{*2}_{\mathrm{pir}} - \rho^{*2}_{\mathrm{r}}) + 1,5\rho^*_{\mathrm{pir}} + 0,5\rho^*_{\mathrm{r}}]/(\rho^*_{\mathrm{pir}} + \rho^*_{\mathrm{r}} + 0,5)$$

où

ρ_r : réflectance dans le canal rouge,

ρ_{pir} : réflectance dans le canal proche infrarouge

$\rho_{a\text{-}r}$: réflectance intrinsèque de l'atmosphère dans le canal rouge,

$\rho_{a\text{-}b}$: réflectance intrinsèque de l'atmosphère dans le canal bleu,

ρ_r^* : réflectance apparente dans le canal rouge,

ρ_b^* : réflectance apparente dans le canal bleu,

ρ_{rb}^* : réflectance apparente dans le canal « hybride » rouge-bleu,

ρ_{pir}^* : réflectance apparente dans le canal proche infrarouge,

a : pente de la droite des sols nus, dans l'espace ρ_r / ρ_{pir},

b : ordonnée à l'origine de la droite des sols nus, dans l'espace ρ_r / ρ_{pir},

a_{rb} : pente de la droite des sols nus, dans l'espace spectral apparent ρ_{rb}^*/ρ_{pir}^*,

b_{rb} : ordonnée à l'origine de la droite des sols nus, dans l'espace spectral apparent ρ_{rb}^*/ρ_{pir}^* ;

γ : facteur d'auto-correction atmosphérique qui dépend du type d'aérosol,

L : facteur d'ajustement des sols nus, il est égal à 0,5.

3. ANALYSE ET DISCUSSION

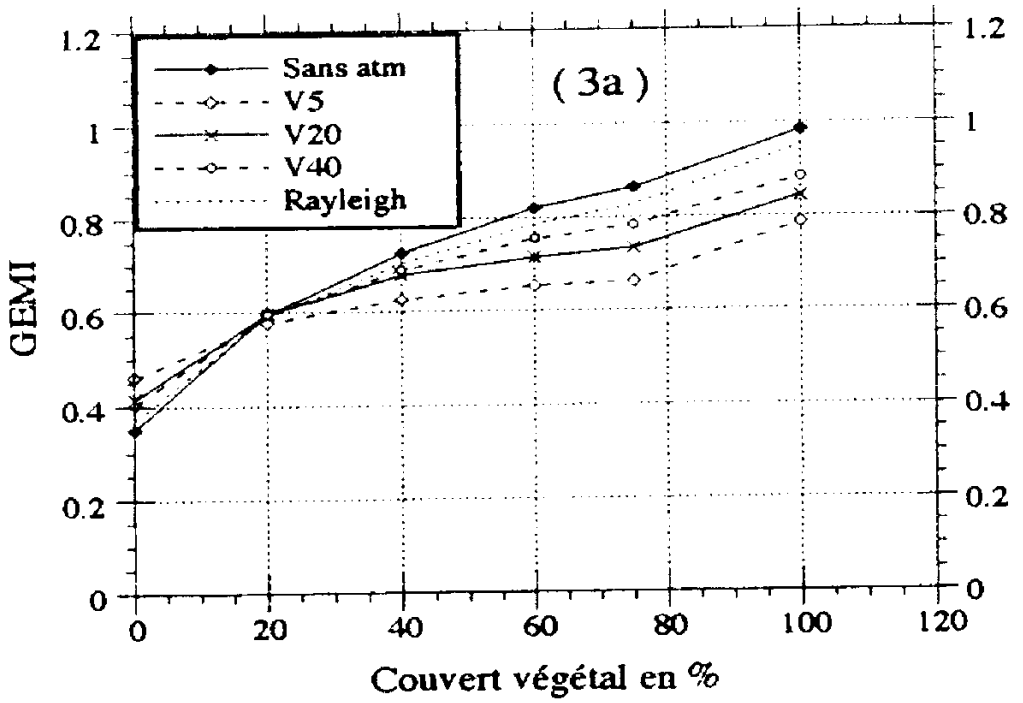
La sensibilité des indices de végétation aux effets atmosphériques en milieu urbain est illustrée graphiquement pour les deux résolutions spectrales large et étroite des capteurs TM et MEIS-II, respectivement (figures 3 et 4). La première constation dégagée de ces courbes réside dans la différence du comportement de ces indices vis-à-vis des effets atmosphériques en fonction de la présence de la végétation. Lorsque les sols sont nus, tous les indices sont indépendants des effets atmosphériques excepté le GEMI et le ARVI qui montrent une certaine sensibilité. Toutefois, au fur et à mesure que le pourcentage du taux de couverture augmente et que la

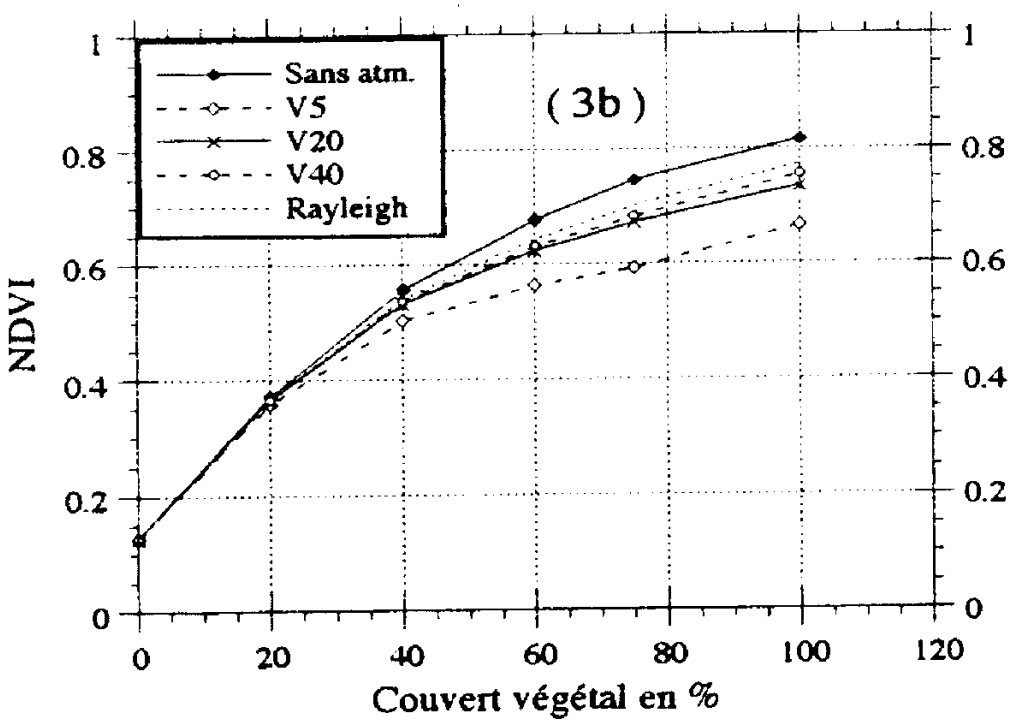
concentration d'aérosols s'intensifie, les indices deviennent de plus en plus sensibles aux perturbations atmosphériques. Ces effets augmentent le signal au-dessus des couverts dans les courtes longueurs d'ondes (rouge) et le réduisent dans les ondes moyennes (proche infrarouge); par conséquent ils diminuent la valeur de l'indice de végétation par rapport à la vraie valeur au sol.

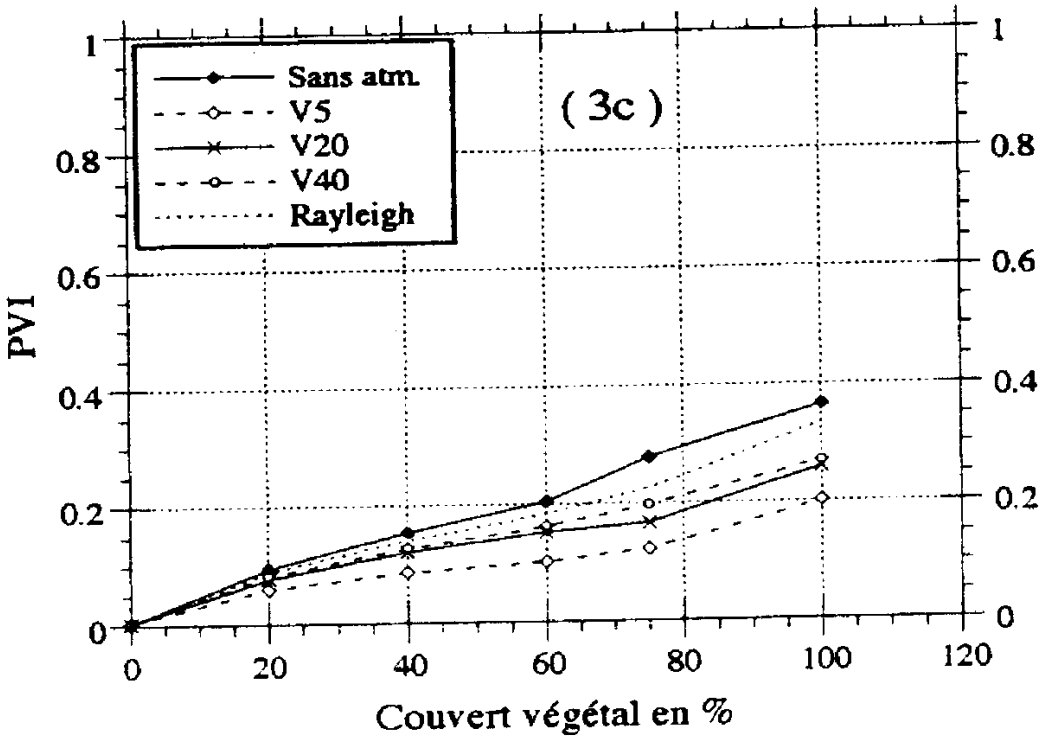
La seconde constatation, c'est qu'une atmosphère Rayleigh affecte moins fortement les indices de végétation qu'une atmosphère Mie. Ainsi, son impact est légèrement plus prononcé dans les indices dérivés de la résolution spectrale large du TM que dans la résolution spectrale étroite de MEIS-II. Cependant, les effets d'une atmosphère Mie demeurent sensiblement identiques dans tous les indices indépendamment de la résolution spectrale. En effet, l'apport de la résolution spectrale étroite pour minimiser les effets atmosphériques en milieu urbain reste très modeste et ne dépasse pas 3 % pour l'indice le plus sensible et les conditions les plus dégradées.

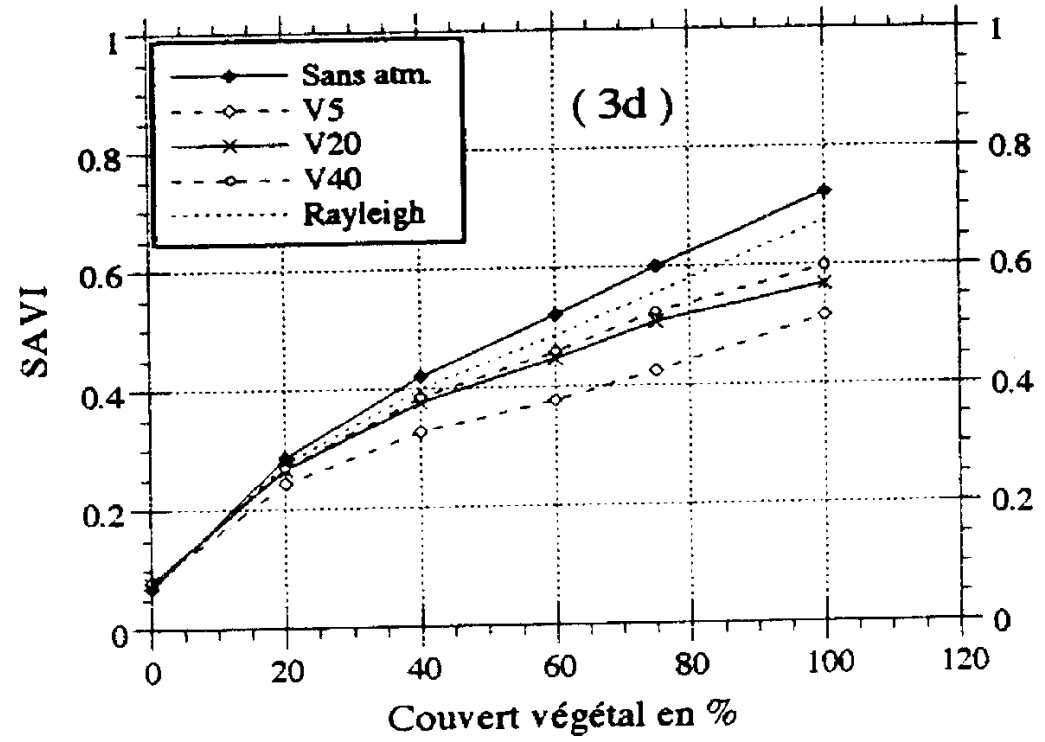
En particulier, le MSAVI est l'indice le plus sensible aux effets atmosphériques (figures 3e et 4e), dans des conditions d'observation défavorables sa valeur diminue par rapport à la vraie valeur au sol de 26 % pour TM et 24 % pour MEIS-II. Pour une atmosphère Rayleigh, la magnitude de l'erreur est d'environ 6 % et 3 %, respectivement, sur TM et MEIS-II (figures 3e et 4e). La dépendance atmosphérique de cet indice a été mise en évidence dans les milieux aride et semi-aride par Qi *et al.* (1994b). Par ailleurs, si les données sont corrigées des effets atmosphériques, le MSAVI peut être un bon descripteur de l'environnement végétal urbain. Cet indice se caractérise par un bon potentiel pour minimiser les propriétés optiques des sols nus. Bien qu'il ne soit pas linéaire, il ne sature pas au moment de la présence d'une forte densité végétale ce qui permettra la distinction entre les différentes classes d'occupation du sol.

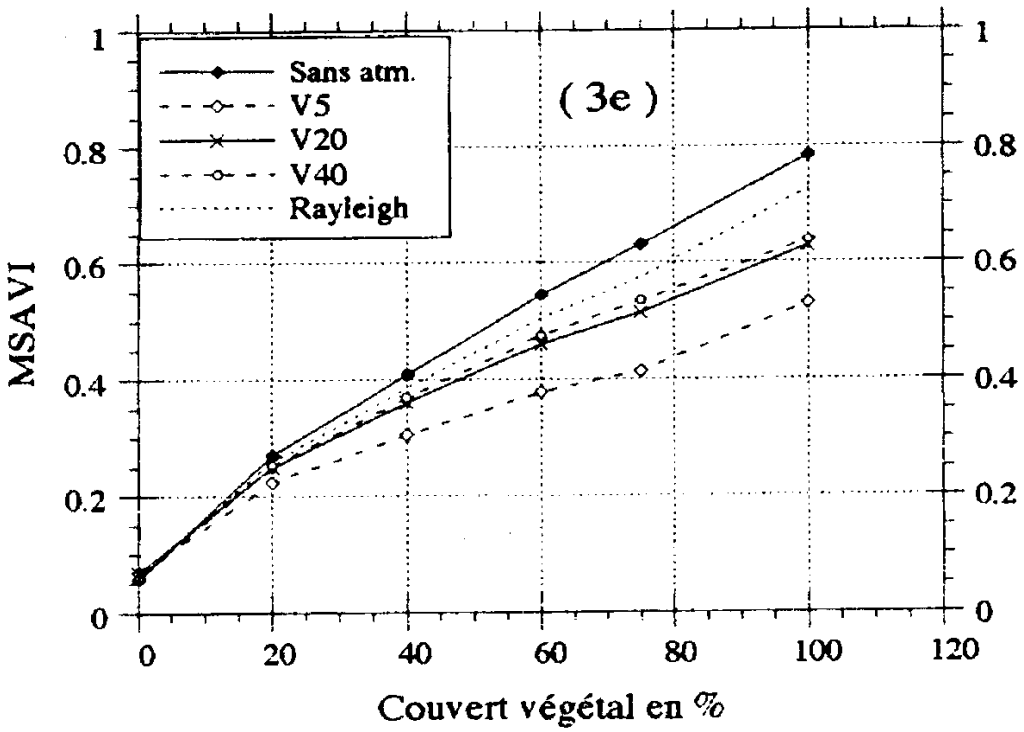
Contrairement aux résultats de Pinty et Verstraete (1992) qui présentent GEMI comme un indice plus résistant aux effets des sols nus et de l'atmosphère que le NDVI, dans cette étude nous démontrons le contraire. Pour une atmosphère urbaine le potentiel du NDVI reste supérieur de 5 % à celui du GEMI pour minimiser les effets atmosphériques (figures 3a et b, 4a et b). Calculé à partir de TM ou de MEIS-II, il montre toujours une sensibilité assez significative aux effets atmosphériques. Dans des conditions d'observation favorables (visibilité de 25 km), GEMI et NDVI présentent une erreur moyenne de 8 % et 6 %, respectivement, pour TM et MEIS-II.

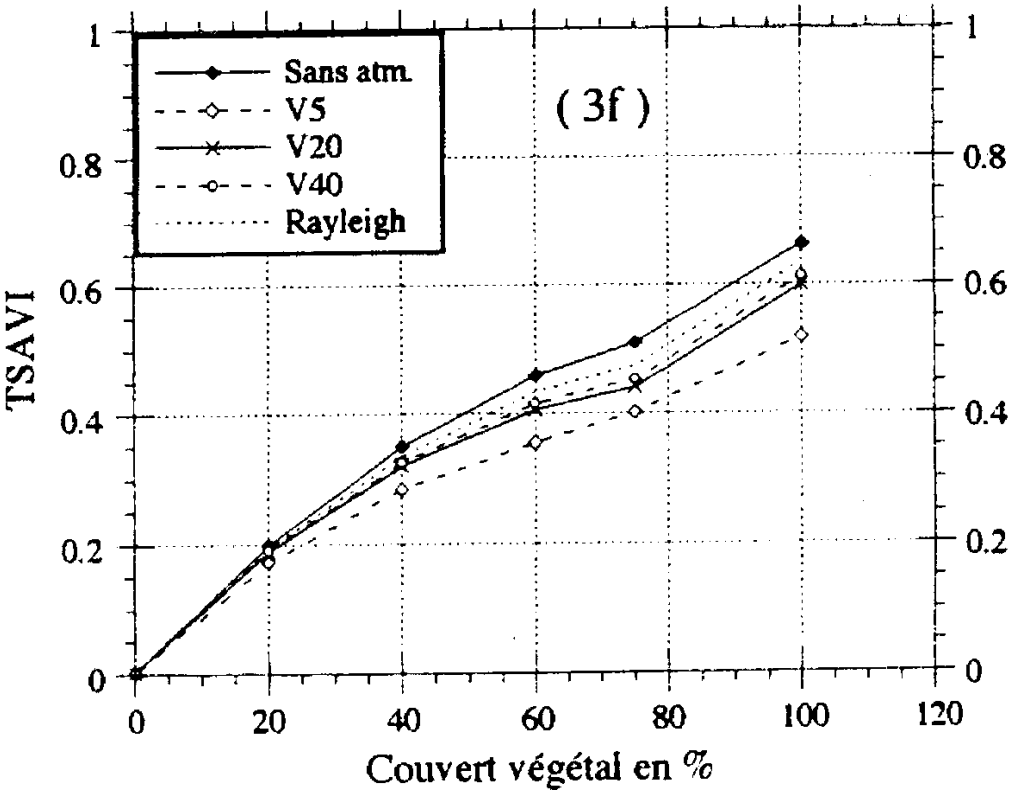

Sans atm
V5
V20
V40
Rayleigh
(3a)
GEMI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
0
20
40
60
80
100
120

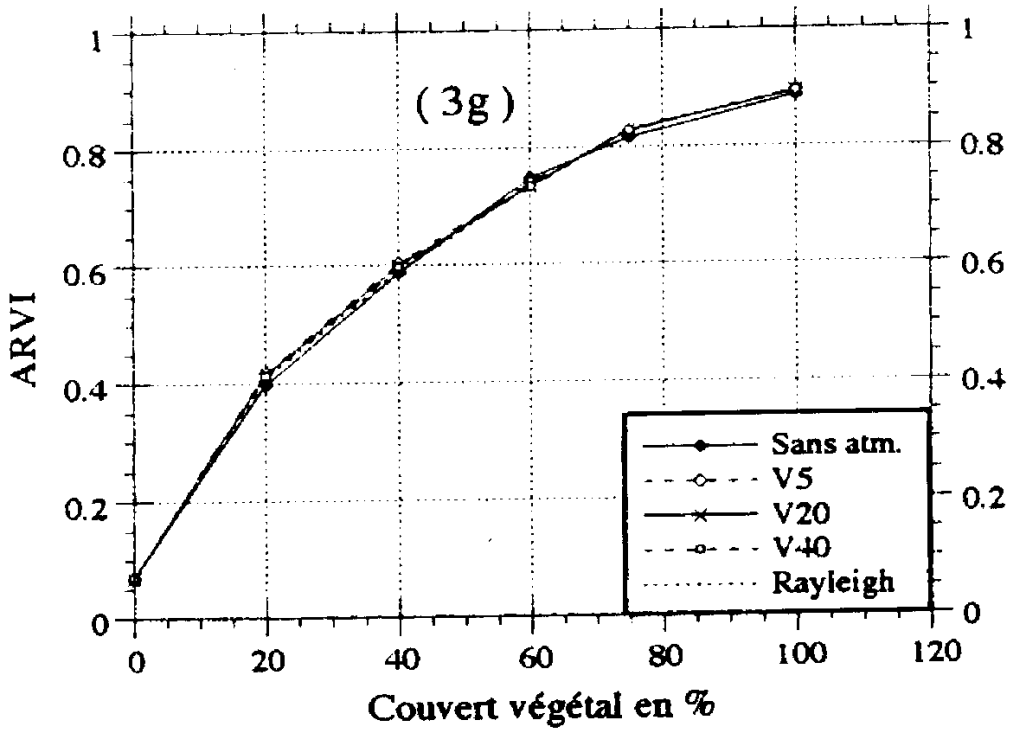

Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
(3b)
NDVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120

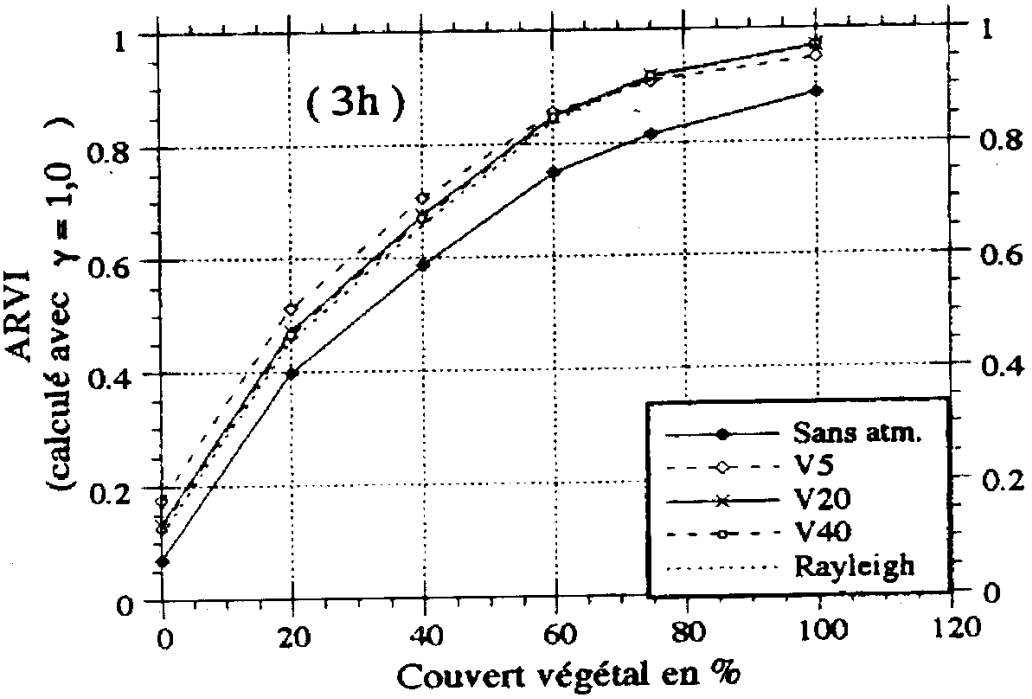

Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
(3c)
PVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120

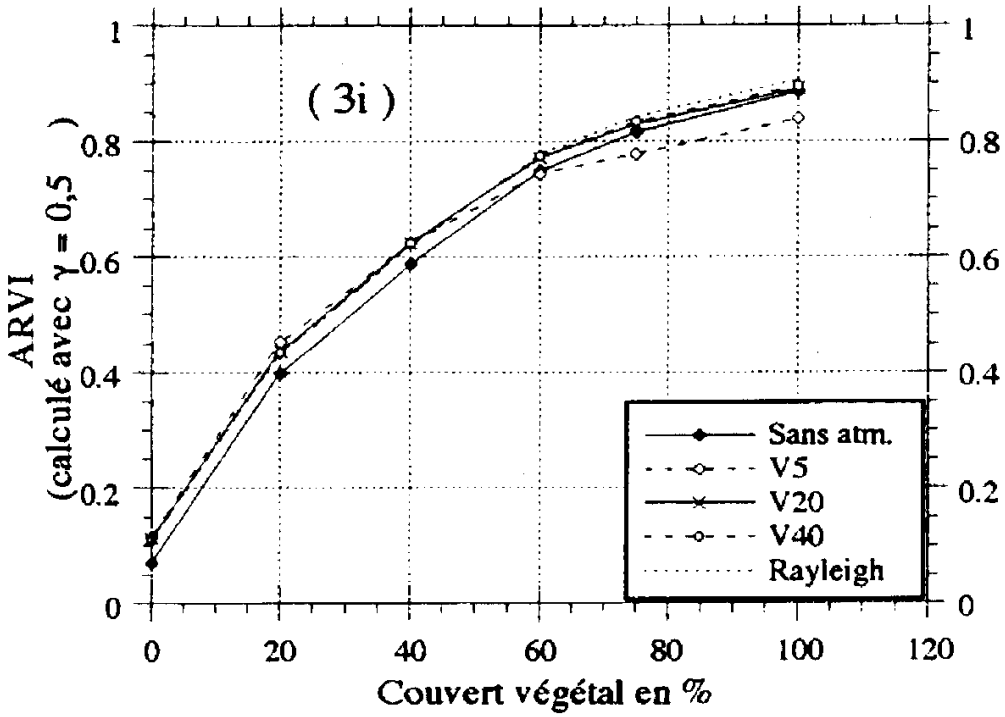

Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
(3d)
SAVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120

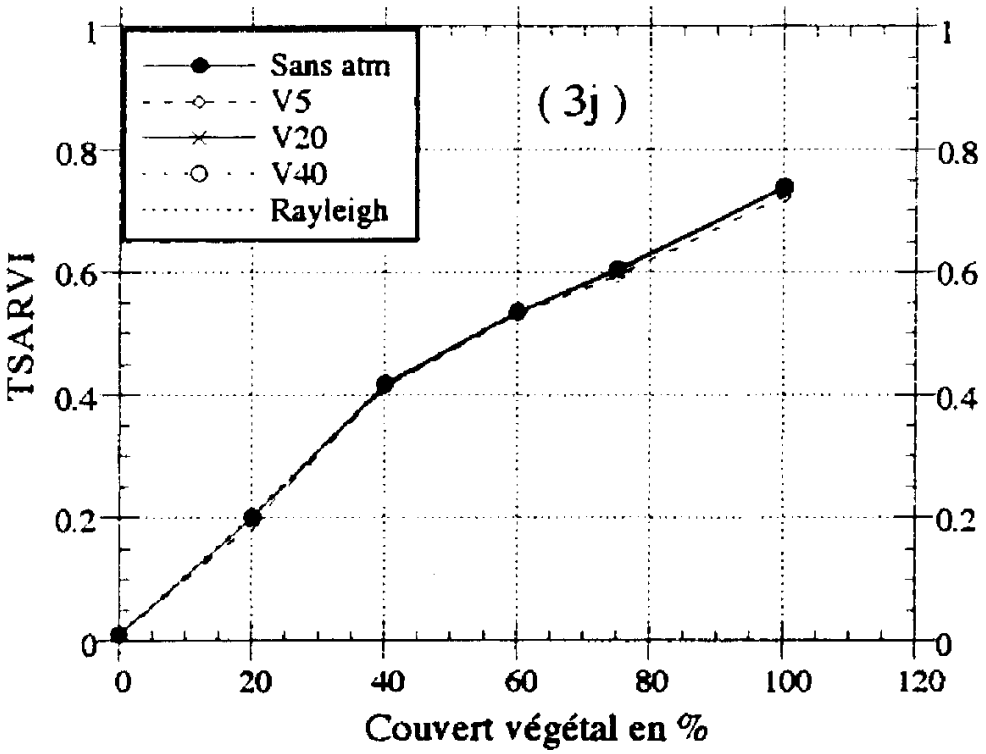

(3e)
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
MSAVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


(3f)
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
TSAVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


(3g)
ARVI
Couvert végétal en %
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


(3h)
ARVI
(calculé avec γ = 1,0)
Couvert végétal en %
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


(3i)
ARVI
(calculé avec γ = 0,5)
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
Couvert végétal en %


(3j)
TSARVI
Sans atm
V5
V20
V40
Rayleigh
Couvert végétal en %

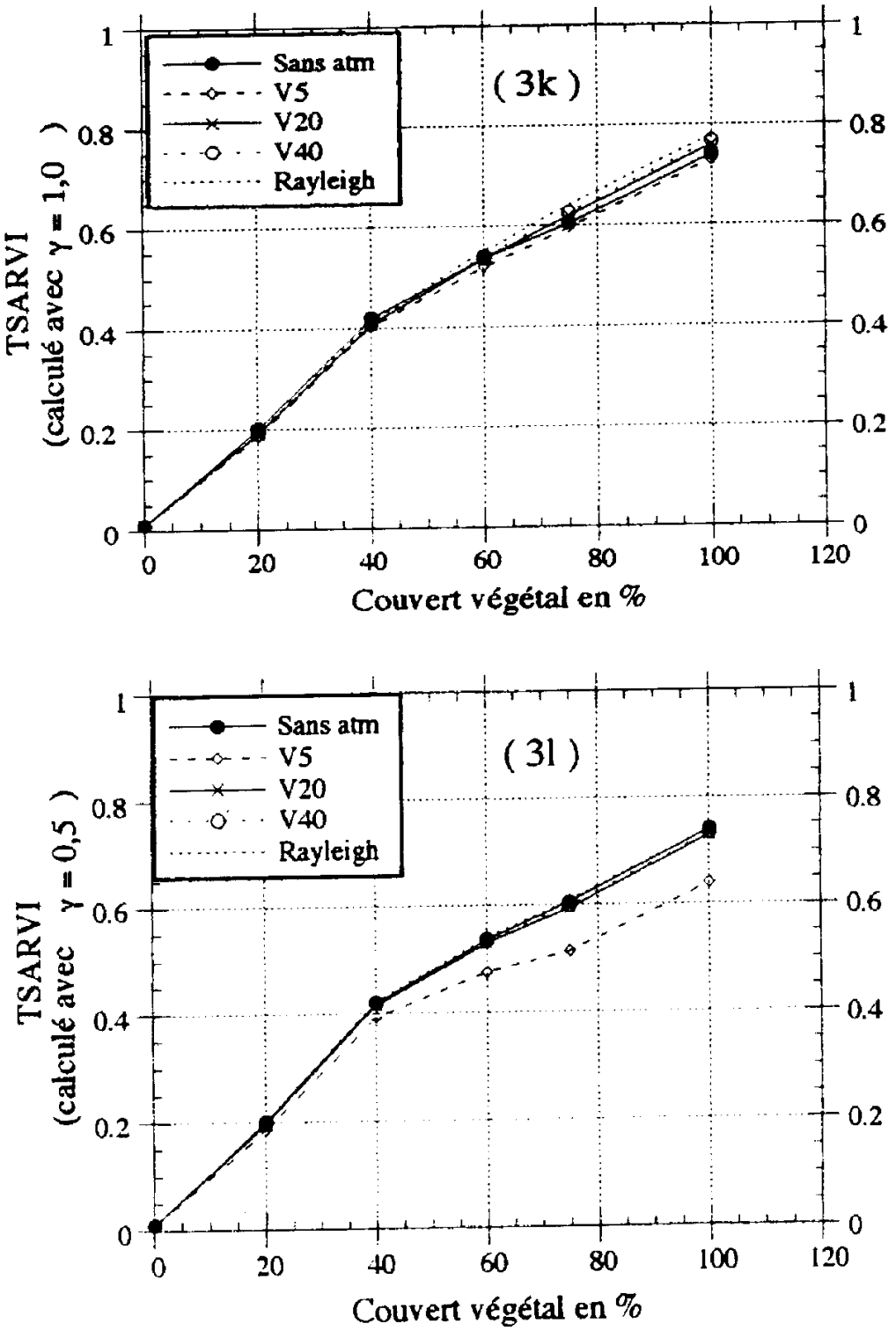
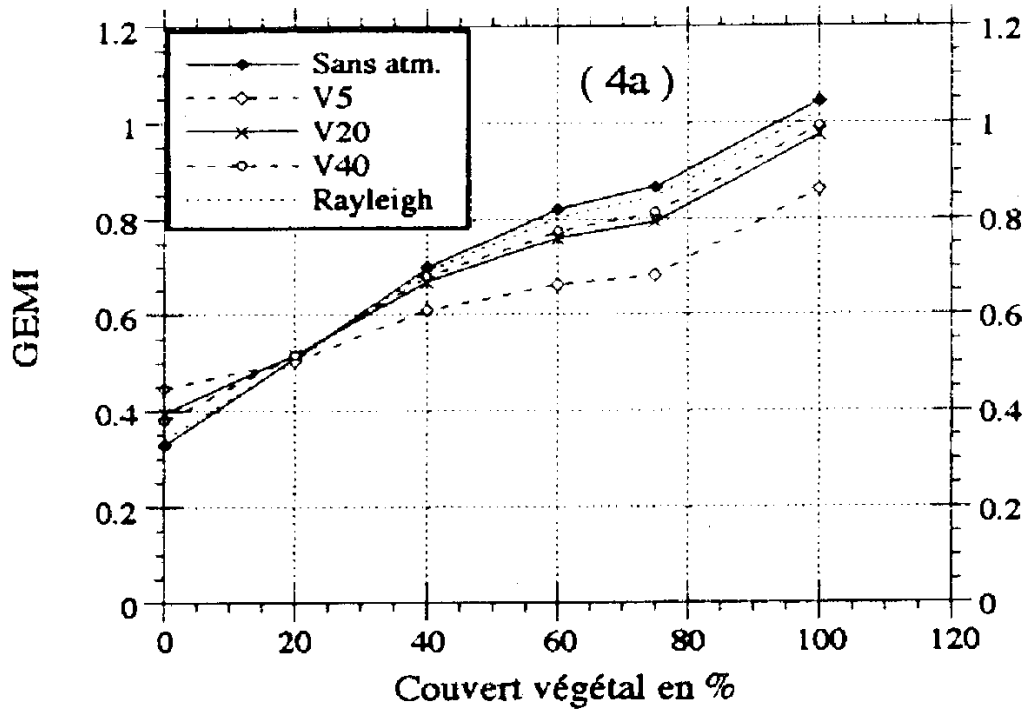


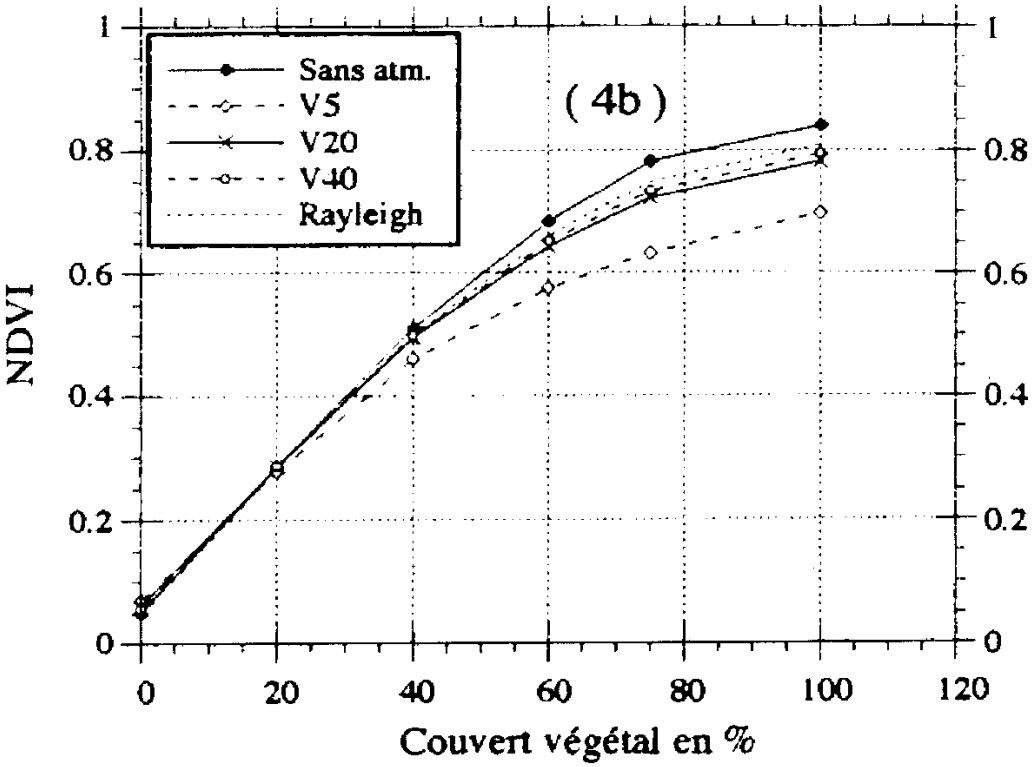
FIGURE 3 Effets atmosphériques sur les indices de végétation dérivés du capteur TM de Landsat dans un environnement urbain. *Atmospheric effects on vegetation indices derived from Landsat-TM sensor in the urban environment*

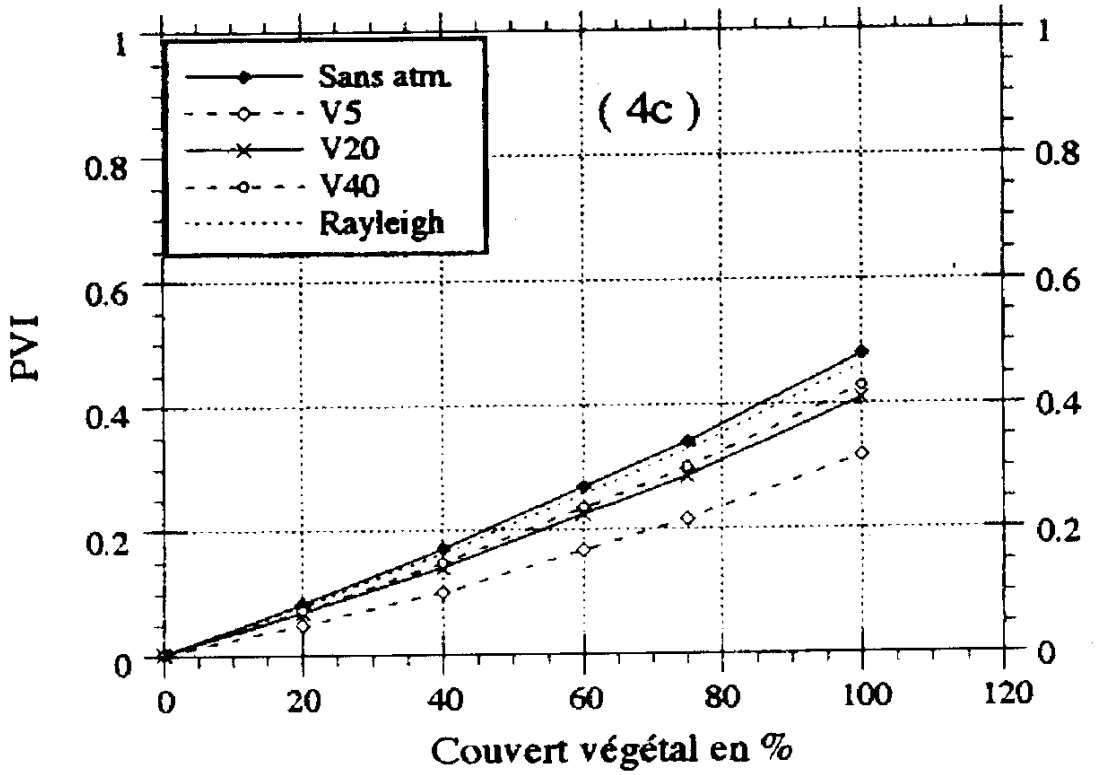
Notons ici que même lorsque GEMI est dérivé à partir des images AVHRR de NOAA, ces faiblesses sont soulevées par Leeuwen *et al.* (1994) dans le cadre du projet HAPEX-Sahel, par Rondeaux *et al.* (1996) dans un milieu agricole et par Bannari *et al.* (1998) dans un environnement forestier. Cependant, même en cas de correction des images des effets atmosphériques, le GEMI n'est pas recommandable au milieu urbain à cause de sa forte sensibilité aux propriétés optiques des sols nus (Bannari *et al.*, 1997b), situation qui caractérise l'occupation du sol de l'environnement urbain.

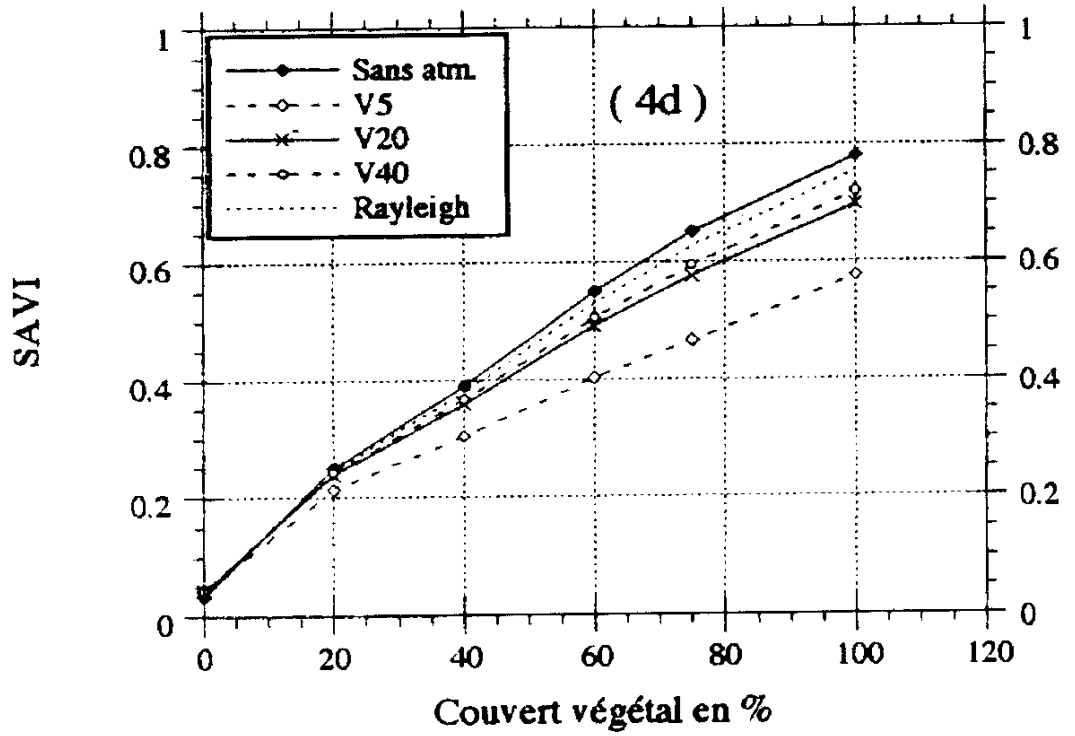
Le potentiel des indices NDVI, TSAVI, PVI et SAVI est significativement limité pour la détection des couverts végétaux à cause des effets atmosphériques. Le NDVI et le TSAVI sont les indices qui normalisent relativement mieux les perturbations atmosphériques lorsque la végétation est éparse ou moyennement dense (40 % >) (figures 3b et 3f, 4b et 4f). Par contre, lorsque la végétation est assez dense (> 50 %) et les conditions d'observation défavorables, l'erreur moyenne sur ces indices est d'environ 6 % alors que l'erreur maximale atteint 15 % pour TM et 12 % pour MEIS-II. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Holben (1986) et Huete et Tuker (1991). Calculés à partir des données TM et MEIS-II, respectivement, l'erreur maximale est de 20 % et 17 % sur les indices PVI et SAVI (figures 3c et d, 4c et d). En plus de sa sensibilité aux effets atmosphériques, le PVI souffre d'un problème de saturation. Autrement dit, il présente une faible dynamique et manque de vigueur pour une description précise des couverts végétaux. Par conséquent, à une même valeur de PVI peuvent correspondre des types d'occupation du sol d'aspect sensiblement différent. Selon Terrattaz et Collet (1997), cet indice s'avère insuffisant pour distinguer les différents tissus résidentiels urbains des autres catégories d'occupation du sol à cause de ce problème de saturation.

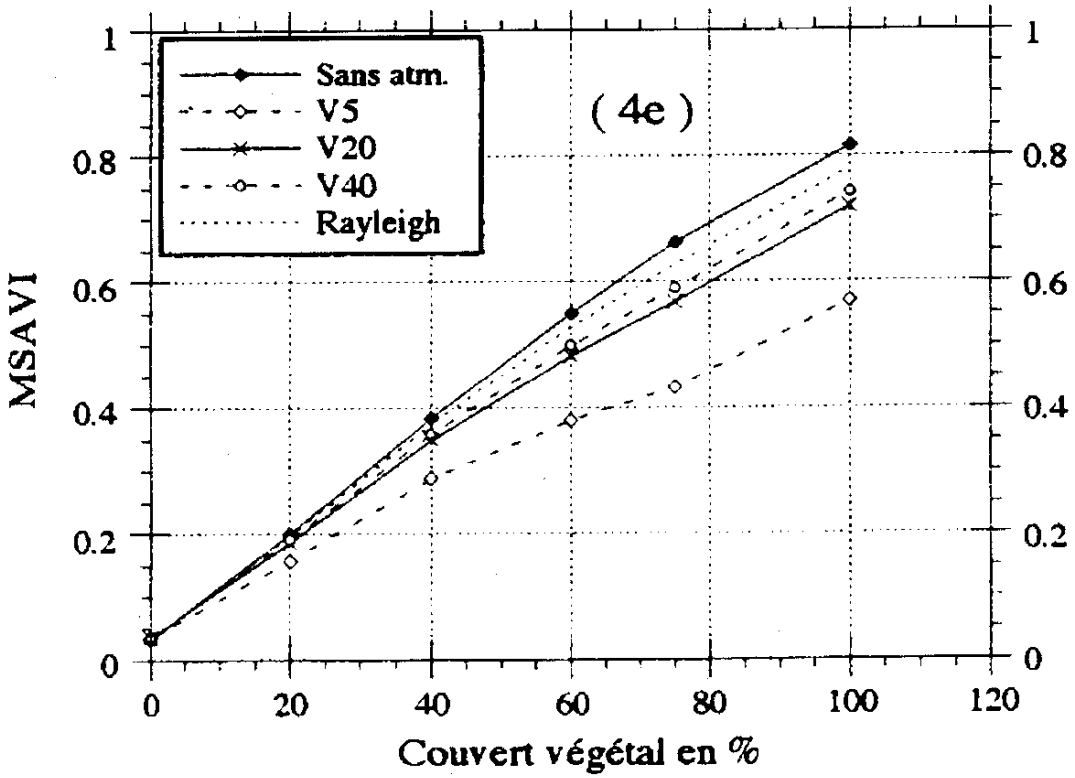
Les indices ARVI et TSARVI se comportent différemment des autres indices vis-à-vis des effets atmosphériques. Lorsque le coefficient d'auto-correction atmosphérique « γ » est déterminé avec précision, ces indices se distinguent par une excellente résistance aux effets atmosphériques.
Par exemple, pour les conditions les plus défavorables (visibilité de 5 km), indépendamment de la résolution spectrale, ils estiment le taux de couverture par rapport à la vraie valeur au sol avec une erreur insignifiante, 1 % (figures 3g et j, 4g et j). Le problème se pose quand on ne connaît pas la vraie valeur de γ, et qu'on est amené à utiliser le facteur unité préconisé par Kaufman et Tanré (1992). Ce facteur dépend de la concentration des

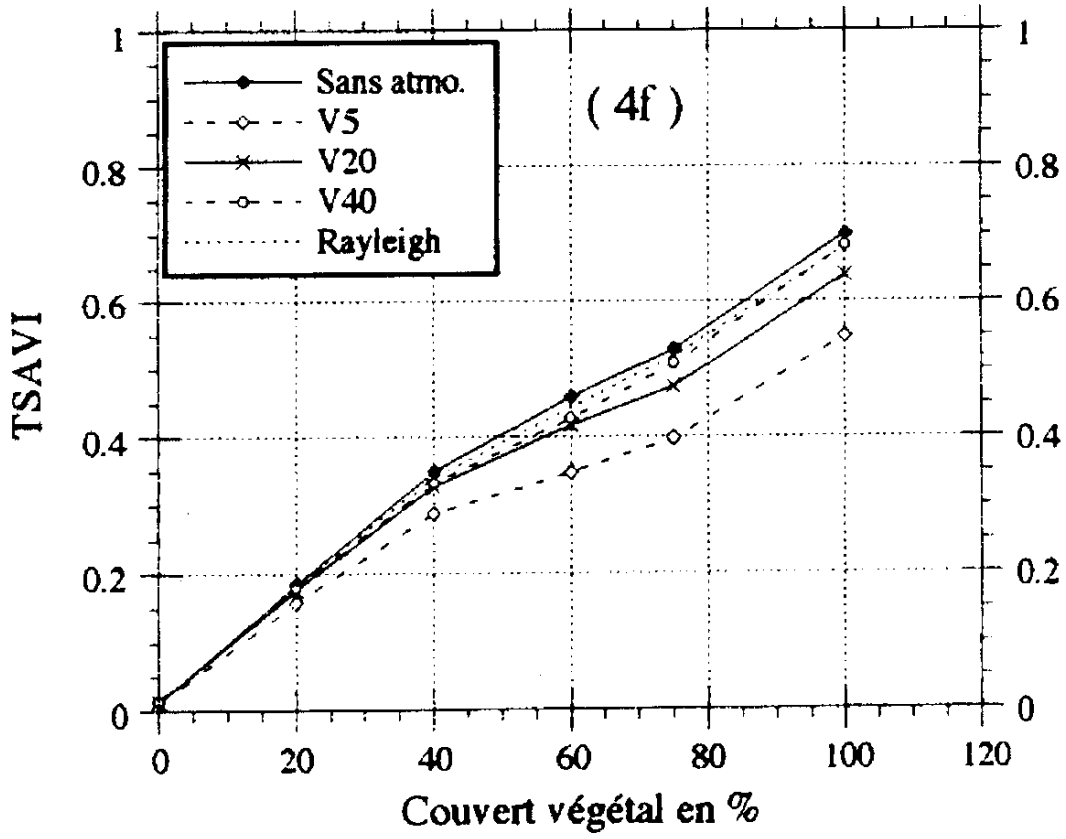

(4a)
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
GEMI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
0
20
40
60
80
100
120

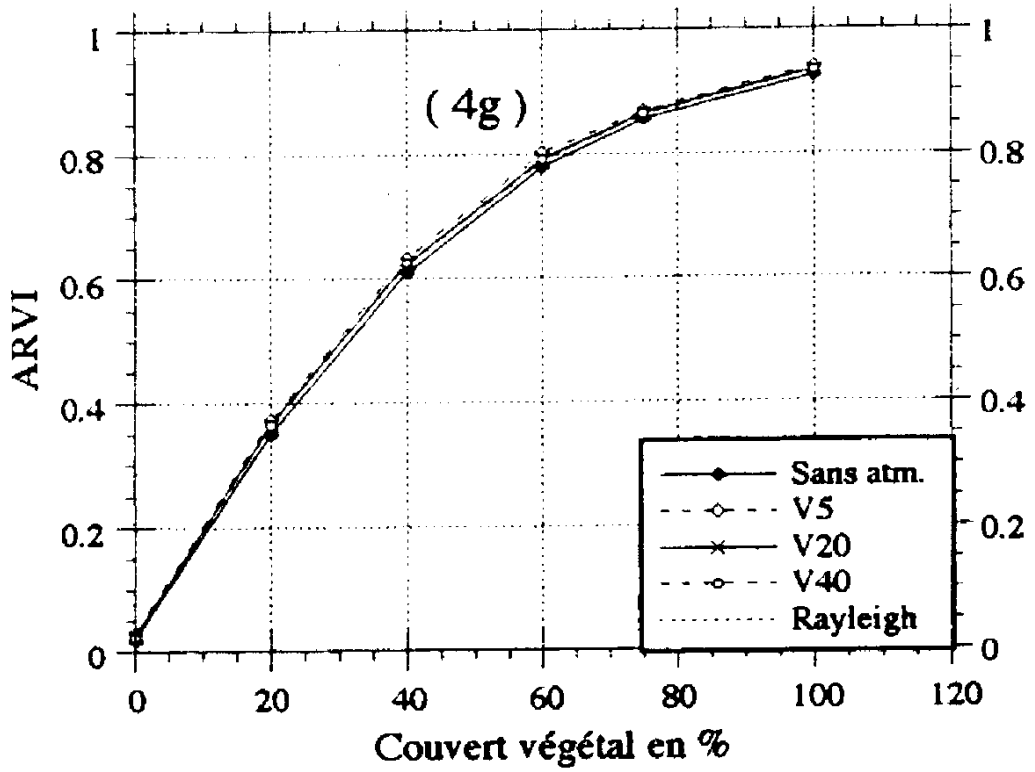

(4b)
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
NDVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120

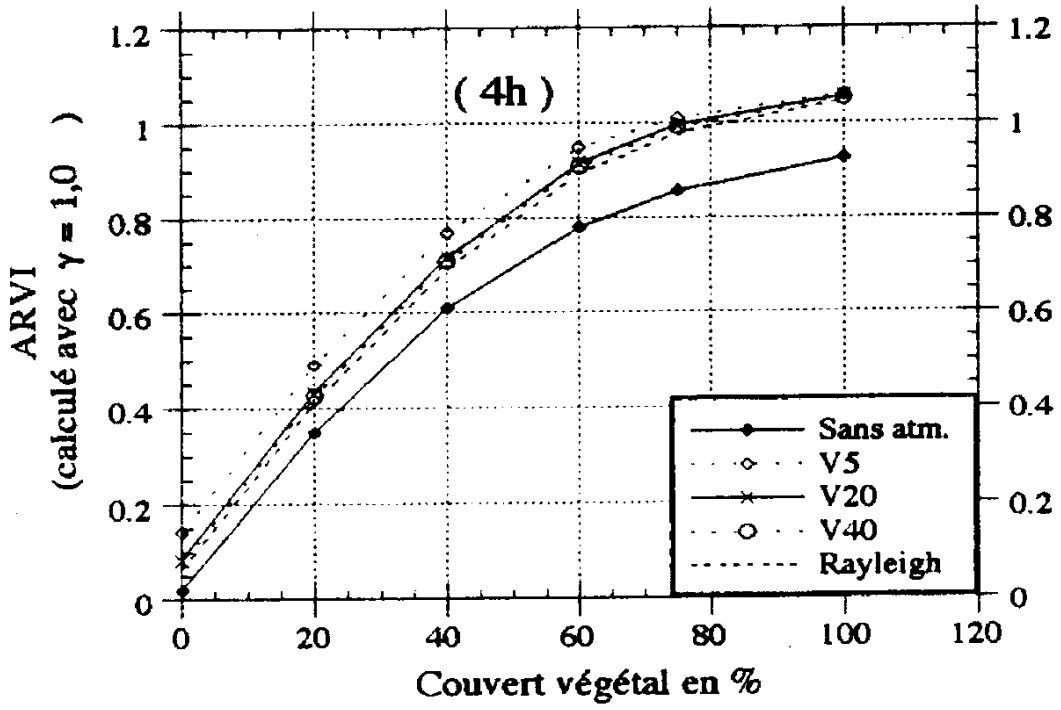

Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
(4c)
PVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120

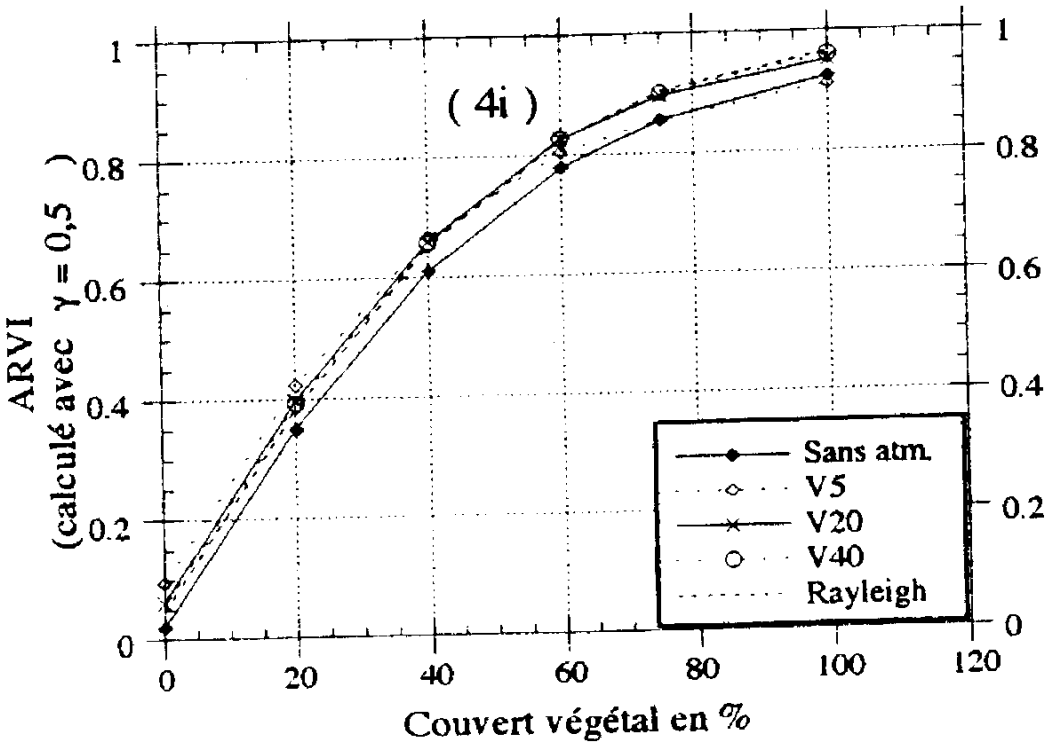

Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
(4d)
SAVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120

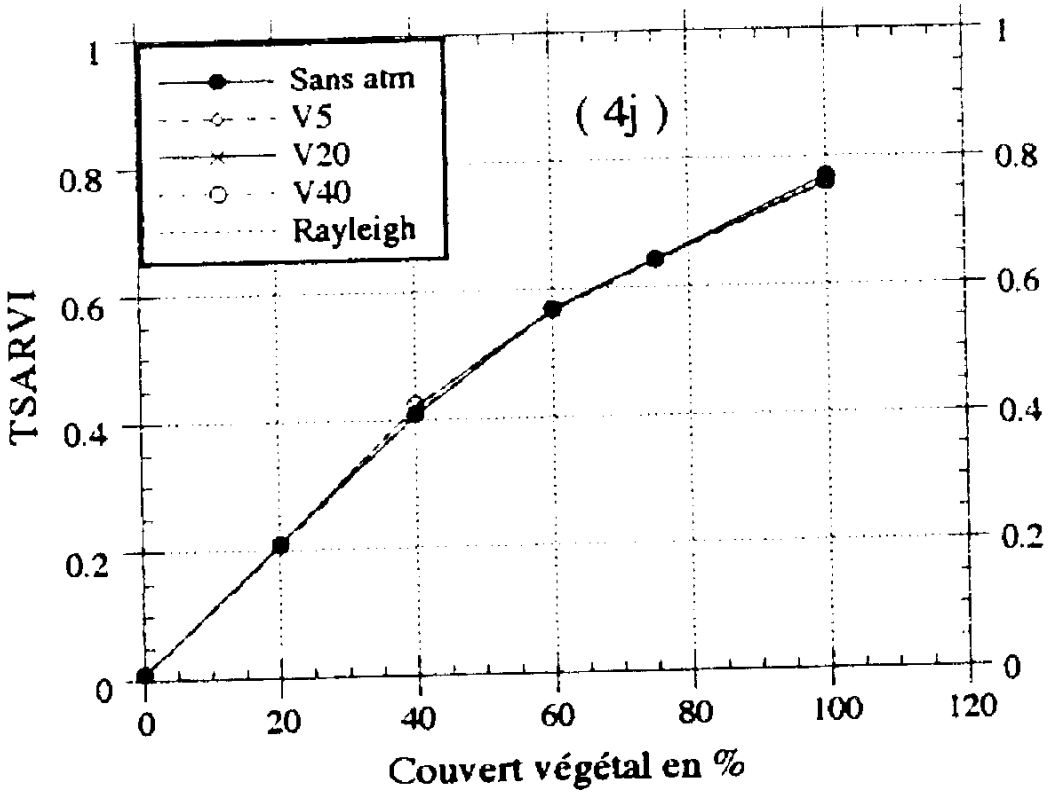

Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
(4e)
MSAVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


Sans atmo.
V5
V20
V40
Rayleigh
(4f)
TSAVI
Couvert végétal en %
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


(4g)
ARVI
Couvert végétal en %
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
0
20
40
60
80
100
120


(4h)
ARVI
(calculé avec γ = 1,0)
Couvert végétal en %
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
0
20
40
60
80
100
120


(4i)
ARVI
(calculé avec γ = 0,5)
Sans atm.
V5
V20
V40
Rayleigh
Couvert végétal en %


(4j)
TSARVI
Sans atm
V5
V20
V40
Rayleigh
Couvert végétal en %

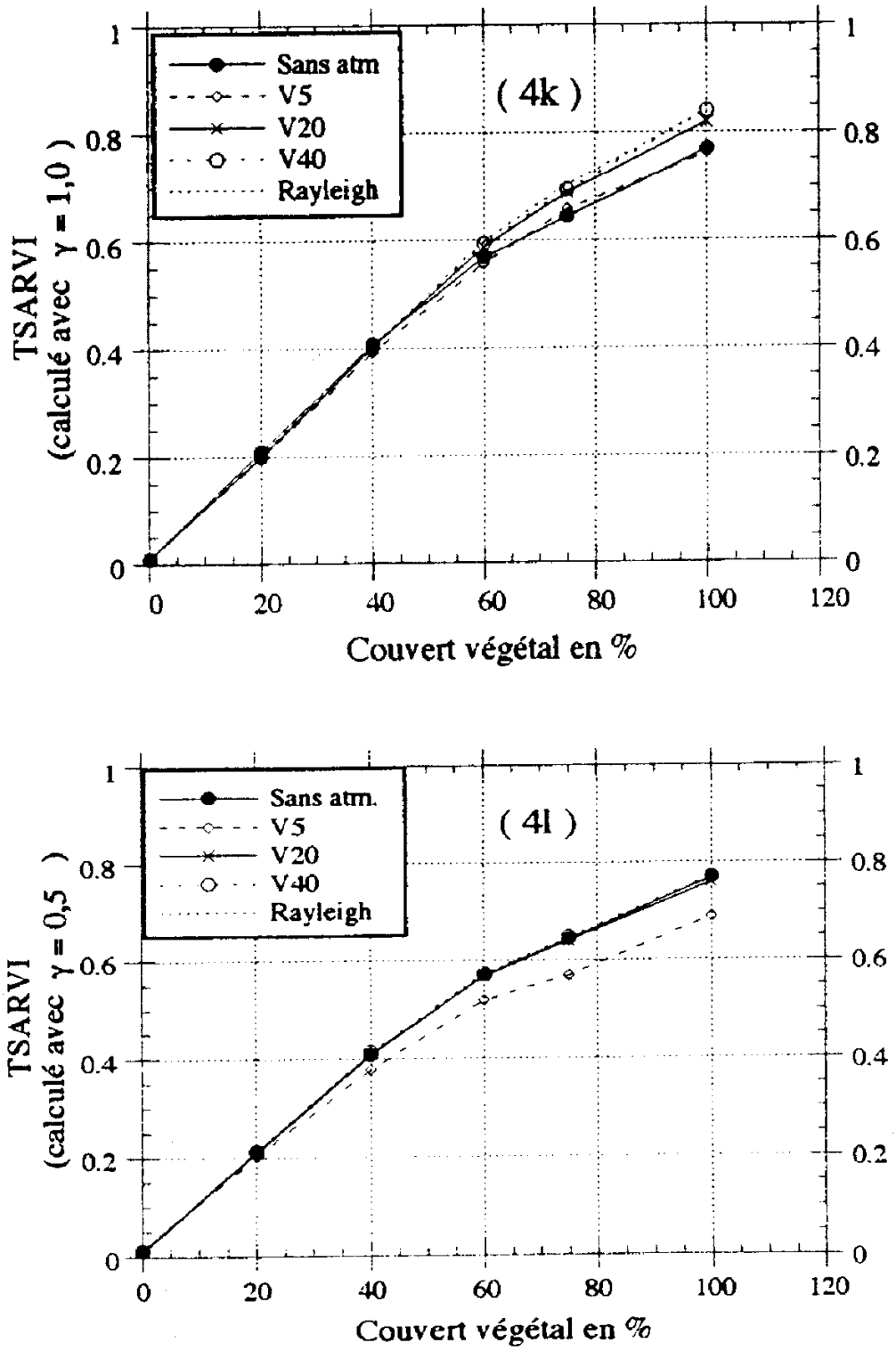


FIGURE 4 Effets atmosphériques sur les indices de végétation dérivés du capteur MEIS-II dans un environnement urbain. *Atmospheric effects on vegetation indices derived from MEIS-II sensor in the urban environment*

aérosols dans l'atmosphère, et il est très difficile de lui attribuer une valeur arbitraire et constante pour toutes les applications. Pour faire la mise au point sur ce problème, nous avons simulé ces deux indices avec trois valeurs différentes de γ : i) la vraie valeur déterminée pour chaque condition atmosphérique (tableau I), ii) la valeur unité et, iii) une valeur intermédiaire égale à 0,5.

TABLEAU I Coefficient d'auto-correction atmosphérique (γ) pour différentes visibilités dans les bandes des capteurs TM et MEIS-II. *Atmospheric self-correction factor (γ) for different visibilities in the MEIS-II and TM sensors spectral bands*

	Coefficient d'auto-correction atmosphérique	
Visibilité	TM	MEIS-II
5 km	0,748	0,597
20 km	0,508	0,358
40 km	0,465	0,315
Rayleigh	0,367	0,236

Le fait de choisir un facteur d'auto-correction égal à l'unité (différent de la correction qu'il fallait apporter) cause un bruit additif aux deux indices. Le ARVI surestime le taux de couverture de 4 à 12 % pour les sols nus et de 6 à 14 % pour les couverts végétaux denses dépendamment des conditions atmosphériques (figures 3h et 4h). Le TSARVI offre une correction parfaite pour des conditions atmosphériques très défavorables (visibilité de 5 km), mais pour des conditions moyennes il engendre un bruit additif d'environ 6 % par rapport à la vraie valeur au sol (sans atmosphère) surtout pour les couverts très denses (figures 3k et 4k). Par ailleurs, pour une valeur intermédiaire($\gamma = 0,5$), le bruit devient moins fort sur ARVI et cause une erreur qui varie entre 2 et 8 % pour les sols nus et entre 2 et 4 % pour les couverts denses (figures 3i et 4i). Cela représente presque la moitié de l'erreur lorsque l'indice est calculé avec un coefficient d'auto-correction égal à un. Ainsi, le TSARVI permet une correction très acceptable pour une turbidité atmosphérique faible ou moyenne (moins de 2 % d'incertitude), mais une forte turbidité atmosphérique (visibilité de 5 km) entraîne une erreur qui sous-estime le couvert végétal dense d'environ 8 % indépendamment de la résolution spectrale (figures 31 et 41). Cependant,

puisque d'une part, les conditions atmosphériques défavorables (visibilité de 5 km) sont des cas très rares et, d'autre part, la valeur de « γ » ne dépasse jamais 0,75 pour ces conditions (tableau I), nous recommandons donc de calculer ces indices avec un facteur d'auto-correction égal à 0,5 pour les applications en milieu urbain et périurbain. Cette valeur reste évidemment à vérifier et à valider pour d'autres domaines d'applications de la télédétection. Toutefois, la consultation des stations météorologiques les plus proches du site d'étude pour avoir une idée de la visibilité au sol au moment de l'acquisition de l'image reste la solution optimale pour faire une estimation de ce coefficient qui se rapproche le plus possible de la réalité.

4. CONCLUSION

L'impact des effets atmosphériques sur la sensibilité des indices de végétation pour la détection des couverts végétaux en milieu urbain et l'intérêt de la résolution spectrale étroite pour minimiser ces effets ont été analysés dans cette étude. Les résultats obtenus montrent que l'apport de la résolution spectrale étroite pour minimiser les effets atmosphériques en milieu urbain reste très modeste et ne dépasse pas 3 % pour l'indice le plus sensible et les conditions les plus dégradées. La diffusion Rayleigh est relativement moins prononcée dans la résolution spectrale étroite et, généralement, elle affecte moins fortement les indices que la diffusion Mie. Quant à cette dernière, elle diminue remarquablement et différemment la sensibilité des indices de végétation au fur et à mesure que les concentrations d'aérosols augmentent, surtout lorsque les couverts sont denses ou moyennement denses. Le MSAVI est l'indice le plus sensible aux effets atmosphériques; dans des conditions d'observation défavorables, il sous-estime le couvert de 26 % par rapport à la vraie valeur au sol. Les indices GEMI, PVI et SAVI viennent au deuxième rang avec une sensibilité de 20 % et 17 %, pour TM et MEIS-II, respectivement. Alors que l'erreur moyenne sur les indices TSAVI et NDVI est de 15 % pour TM et 12 % pour MEIS-II. Quel que soit le type d'atmosphère, le taux de couverture végétale ou la résolution spectrale du capteur, la détermination du coefficient d'auto-correction atmosphérique *a priori* permet aux indices ARVI et TSARVI de se démarquer des autres indices par un comportement exemplaire en minimisant de manière adéquate les effets atmosphériques.

Une approximation de ce coefficient qui s'éloigne de la vraie valeur induit un bruit additif notamment sur le ARVI. Pour un meilleur ajustement des effets atmosphériques en milieu urbain et périurbain nous recommandons une valeur égale à 0,5 pour ce coefficient.

Remerciements

Les auteurs désirent remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada pour son support financier et Dr A. Royer (CARTEL) pour sa sincère collaboration.

Références

Bannari, A. (1996) La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparse et moyennement dense : cas de l'environnement urbain. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 235 p.

Bannari, A., Teillet, P.M., Richardson, G., Leckie, D.G. et Fedosejevs, G. (1998) Impact des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés de AVHRR. p. 169–174, in Compte rendu du 20e Symposium canadien sur la télédétection, Calgary, 10–13 mai 1998, Société canadienne de télédétection, Ottawa, 269 p.

Bannari, A., Royer, A. et Morin, D. (1997a) L'indice de végétation TSARVI : Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index. p. 677–684, in Compte rendu du 7e Colloque international sur les mesures physiques et signatures en télédétection, Courchevel, 7–11 avril 1997, Centre national d'études spatiales, Toulouse, 902 pages.

Bannari, A., Morin, D. et He, D.-C. (1997b) Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés des données de hautes résolutions spatiale et spectrale. p. 47–64, in Dubois, V.-M.M., Donnay, J.-P., Ozer, A., Boivin, F.T., Lavoie, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains, AUPELF, Montréal, 361 p.

Bannari, A., Morin, D., Huete, A.-R. and Bonn, F. (1995) A Review of Vegetation Indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95–120.

Baret, F., Guyot, G. and Major, D.-J. (1989) TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. p. 1355–1358, in Proceedings of the 12th Canadiar Symposium on Remote Sensing, Vancouver, July 10–14, Canadian Remote Sensing Society, Ottawa, 545 p.

Baret, F. and Guyot, G. (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, vol. 35, p. 161–173.

Charbonneau, L., Royer, A., Hinse, M., Coulombe, A. et Lambert A, E. (1991) Évaluation de la qualité des biotopes urbains par télédétection. vol. 2, p. 493–496, in Compte rendu du 5e Colloque international sur les mesures physiques et signatures en télédétection, Courchevel, Centre national d'études spatiales, Toulouse, 855 p.

Chartier, L., Côté, P., Hubert, L., Rochon, S., O'Neill, N.T. et Royer, A. (1989) Caractérisation des effets atmosphériques en télédétection satellitaire : modélisation et correction. p. 303–312, in Compte rendu du 6e congrès de L'Association québécoise de télédétection, Publication de L'Association québécoise de télédétection, 388 p.

CNES. (1982) Quelques formes urbaines et linéaments à travers SPOT-Simulé et Landsat-3. Rapport final, CNES no 81/0208 & ATP CNRS No 1080, 90 p.

Collet, C. et Abednego, B. (1987) L'évolution du paysage urbain étudiée à l'aide d'un indice de végétation. p. 3–16 in J.-P. Donnay (dir), Actes de la journée de recherches F.N.R.S du Groupe de géographie humaine théorique et quantitative : Télédétection satellitaire et espace urbain. Université de Liège, Société de géographie de Liège, notes de recherches no 9, 85 p.

Dave, J.-V. (1980) Effect of Atmospheric Conditions on Remote Sensing of Vegetation Parameters. Remote Sensing of Environment, vol. 10, p. 87–99.

Deschamps, P.-Y., Duhaut, P., Rouquet , M.-C. et Tanré, D.-C. (1984) Mise en évidence, analyse et correction des effets atmosphériques sur des données multispectrales de Landsat ou SPOT. p. 709–722, in Compte rendu du 2e Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, 12–16 septembre 1983, l'INRA, Avignon.

Deschamps, P.-Y., Herman, M. et Tanré, D.-C. (1981) Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres: Modélisation et possibilités de correction. p. 543–558, Compte rendu du 1er Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon, 8–11 septembre 1981, l'INRA, Avignon.

Forster, B. C. (1983) Some urban measurements from Landsat data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, no 12, p. 1693–1707.

Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J. and Tarpley, J. D. (1993) The use of vegetation index for assessment of the urban heat island effect. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no 11, p. 2223–2230.

Holben, B.-N. (1986) Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, p. 1417–1434.

Huete, A.-R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295–309.

Huete, A.-R. and Tucker, C.-J. (1991) Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, n° 6, p. 1223–1242.

IAURIF. (1986) Mesurer la végétation urbaine par télédétection : du satellite au terrain. Les éditions de l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île-de-France (IAURIF), Paris, 90 p.

Kaufman, Y.-J. and Fraser, R.-S. (1984) The Atmospheric effect on classification of finite fields. Remote Sensing of Environment, vol. 15, p. 95–118.

Kaufman, Y.-J. and Sendra, C. (1988) Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, no 8, p. 1357–1381.

Kaufman, Y.-J. and Tanré, D.-C. (1992) Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, no 2, p. 261–270.

Leeuwen, W.-J.-D., Huete, A.-R., Duncan, J. and Franklin, J. (1994) Radiative transfer in shrub savanna sites in Niger: preliminary results from HAPEX-Sahel. 3. Optical dynamics and vegetation index sensivity to biomass and plant cover. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 69, p. 267–288.

Moran, M.-S., Jackson, R.-D., Slater, P.-N. and Teillet, P.-M. (1992) Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. Remote Sensing of Environment, vol. 41, p. 169–184.

Myneni, R.-B. and Asrar, G. (1994) Atmospheric effects and spectral vegetation indices. Remote Sensing of Environment, vol. 47, p. 390–402.

Nicoloyanni, E. (1990) Un indice de changement diachronique appliqué à deux scènes Landsat MSS sur Athènes (Grèce). International Journal of Remote Sensing, vol. 11, no 9, p. 1617–1623.

Pinty, B. and Verstraete, M.-M. (1992) GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. Vegetatio, vol. 101, p.15–20.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.-R., Kerr, Y. and Sorooshian, S. (1994a) A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, vol. 47, p. 1–25.

Qi, J., Kerr, Y. and Chehbouni, A. (1994b) External factors consideration in vegetation index development. p. 723–730, in Proceedings of the Sixth International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, January 17–21 1994, Centre national d'études spatiales, Toulouse, 855 pages.

Richardson, A.J. and Weigand, C.L. (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, p. 1541–1552.

Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. (1996) Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, vol. 55, p. 95–107.

Rouse, J.-W., Haas, R.-W., Schell, J.-A., Deering, D.-W. and Harlan, J.-C. (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA / GSFCT Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 164 p.

Royer, A., O'Neill, N.-T., Davis, A. and Hubert, L. (1988) Comparative of radiative transfer models used to determine atmospheric optical parameters from space. p. 118–135, in Proceedings SPIE, Orlando, Florida, USA.

Tanré, D.-C., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.-J., Perbos, J. and Deschamps, P.Y. (1990) Description of a computer code to simulate satellite signal in the solar spectrum : The 5S Code. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no 4, p. 659–668.

Teillet, P.-M. (1995) The Role of Surface Observation in Support of Remote Sensing. p. 333–351 and 408–415 in E. LeDrew, M. Strome and F. Hegyi (réd.). The Canadian Remote Sensing Contribution to Understanding Global Change. Department of Geography, University of Waterloo, WaterlooPublication Series, no 38, 434 p.

Teillet, P.-M. (1994) Télédétection et indices de végétation : considérations d'ordre radiométriques. La télédétection au Canada, vol. 22, no 1, p. 8–9.

Teillet, P. -M. and Santer, R. P. (1991) Terrain elevation and sensor altitude dependence in a semi-analytical atmospheric code. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, no 1, p. 36–44.

Terrettaz, P. et Collet, C. (1997) Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse). p. 123–131, in Dubois, V.-M.M., Donnay, V.-P., Ozer, A., Boivin, F.T., Lavoie, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et périurbains, AUPELF, Montréal, 361 p.

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M. and Morcrette, J.J. (1997) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S : An Overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no 3, p. 675–686.