

Thèse
présentée à la faculté des études supérieures comme exigence partielle
en vue de l'obtention du diplôme
de
maîtrise ès sciences (M.Sc.)

**Analyse de sensibilité des indices de végétation
au-dessus d'un couvert forestier de sapin:
Étude comparative à partir des données de simulation
entre
MODIS-EOS, VEGETATION-SPOT
&
AVHRR-NOAA**

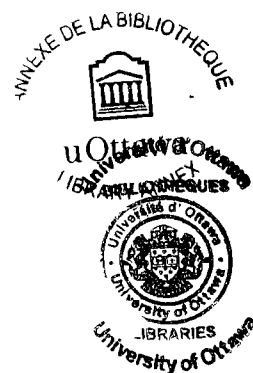
Par

Asalhi Hayatte

Université d'Ottawa
Faculté des Arts
Département de Géographie
Laboratoire de Télédétection et de Géomatique de l'Environnement

Mars 2003

© Droits réservés à H.Asalhi



UMI Number: EC56081

INFORMATION TO USERS

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleed-through, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

UMI[®]

UMI Microform EC56081
Copyright 2011 by ProQuest LLC
All rights reserved. This microform edition is protected against
unauthorized copying under Title 17, United States Code.

ProQuest LLC
789 East Eisenhower Parkway
P.O. Box 1346
Ann Arbor, MI 48106-1346

*À mes parents,
À mon mari,
Mes frères et sœurs
Et à toute ma grande famille*

Remerciements

Avant tous, Je voudrais tout d'abord témoigner ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Abdelrazak Bannari qui a guidé mes premiers pas dans la recherche. Je le remercie d'avoir encadré ce travail avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et d'optimisme. Je lui présente toute ma gratitude pour son appui scientifique, technique, financier et moral, ainsi que pour sa disponibilité, ses conseils, et pour m'avoir encouragée à prendre des initiatives et à développer mes idées. J'ai beaucoup appris et j'apprends encore... Merci Abdou pour la confiance que tu m'as accordée au cours de ces années.

Je tiens également à remercier D^R Philippe Teillet du Centre canadien de télédétection pour sa collaboration bienveillante durant cette recherche et je suis reconnaissante pour ses données précieuses.

Je tiens également à remercier Monsieur Daniel Lagarec d'avoir accepté de faire partie du jury. Et je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance aux professeurs André Desrochers du département des sciences de la terre et Douglas King de l'Université de Carleton pour m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury. Mes remerciements vont également à l'Université d'Ottawa pour le soutien financier, grâce au programme de la bourse internationale dont j'étais bénéficiaire.

Enfin, j'exprime mes sincères remerciements à tous les membres, permanents et temporaires, du département de géographie de l'Université d'Ottawa et à tous mes collègues du laboratoire qui ont contribué, chacun à leur manière, à créer une ambiance amicale et chaleureuse.

Résumé

Au Canada, la forêt couvre environ 42 % du territoire et représente 10 % des forêts de la planète. Les défis de la planification, la supervision et la gestion de ces surfaces immenses sont désormais une priorité internationale. Actuellement, la nouvelle génération des capteurs satellitaires semble prometteuse pour une surveillance et une gestion efficace des couverts et de leurs changements à l'échelle locale et aussi globale. Par ailleurs, les indices de végétation sont des modèles empiriques ou semi-empiriques robustes, conçus pour rehausser le signal de la végétation mesuré par les capteurs de télédétection. Ils permettent dans un environnement forestier de mener des études à différentes échelles dans le temps et dans l'espace pour localiser les changements les plus importants. Dans la littérature, plusieurs indices de végétation ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien particulières. L'utilisation de l'un ou de l'autre de ces indices pour caractériser les couverts forestiers peut être limitée par plusieurs facteurs d'ordre physique qui dominent le signal au capteur. Bien entendu, ces facteurs entraînent un accroissement ou une diminution des réflectances dans le visible et le proche infrarouge et, par conséquent, ils engendrent des limitations assez sévères pour la détection des couverts à l'aide des indices ce qui cause des erreurs dans l'interprétation et l'analyse des résultats. Le but de cette thèse vise deux points fondamentaux. Le premier consiste à faire la mise au point sur l'indice spectral optimal pour caractériser la dynamique d'un couvert forestier de sapin indépendamment des facteurs perturbateurs internes (sol sous-jacent, topographie, saturation et linéarité) et externes (BRDF et atmosphère) aux couverts à partir des données de simulation. Le second point permet de comparer pour la première fois le potentiel de trois résolutions spectrales différentes (fine, moyenne et large) des capteurs MODIS-EOS, VEGETATION-SPOT et AVHRR-NOAA pour minimiser les effets perturbateurs sur les indices de végétation en milieu forestier. Les résultats obtenus montrent qu'en général, l'influence des effets perturbateurs sur les indices de végétation sont complexes. Il n'y a pas une seule composante qui domine les variations rencontrées, mais plutôt des influences combinées de plusieurs facteurs. Par conséquent, l'interaction complexe de tous ces facteurs doit être considérée simultanément. Ces résultats soulignent également, l'apport significatif de la fine résolution spectrale, notamment du capteur MODIS, pour minimiser les effets atmosphériques et les variations topographiques sur la plupart des indices de végétation. Indépendamment du degré de défoliation ou de la densité du couvert, le MSAVI peut être généralisé pour le suivi et la gestion des couverts forestiers à condition que les données images soient corrigées des effets atmosphériques et de la dérive radiométrique du capteur. Bien qu'il ne soit pas linéaire, c'est un indice qui ne sature pas vite au moment de la présence d'une forte densité du couvert et montre toujours un potentiel et une sensibilité permettant la distinction entre les différents taux de couvertures et la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un environnement forestier.

Abstract

In Canada, the forest covers approximately 42% of the territory and accounts for 10% of the forests of the planet. The challenges of planning, the supervision and the management of these immense surfaces are from now on an international priority. Currently, the new generation of the satellite sensors seems promising for monitoring and effective management of covers and of their changes on a local and also overall scale. In addition, the indexes of vegetation are empirical or semi-empirical robust, designed models to raise the signal of vegetation measured by the remote sensing sensors. They make it possible in a forestry environment to undertake studies to various scales in the time and in space to locate the most important changes. In literature, several indexes of vegetation were developed for various applications and under quite special conditions. The use of the one or of the other of these indexes to characterise forestry covers can be limited by several physical nature factors which dominate the signal to the sensor. Of course, these factors involve an increase or a reduction in reflectances in the visible and the infra-red close relation and, consequently, they generate strict enough limitations for the detection of covers using the indexes what causes errors in interpretation and the analysis of the results. The goal of this thesis aims two fundamental points. The first consists in making the development on the optimal spectral index to characterize the dynamics of a forest cover of a fir tree independently of the internal (underlying soil, topography, saturation and linearity) and external disturbing factors (BRDF and atmosphere) to covers starting from the data of simulation. The second point makes it possible to compare for the first time the potential of three spectral resolutions different (fine, average and broad) from sensors MODIS-EOS, VEGETATION-SPOT and AVHRR-NOAA to minimize the disturbing effects on the indices of vegetation in forest medium. The results obtained show that in general, the influence of the disturbing effects on the indexes of vegetation are complex. There is not only one component which dominates the met variations, but rather, of the combined influences of several factors. Consequently, the complex interaction of all these factors has to be considered simultaneously. These results also underline, the significant contribution of the fine spectral resolution, in particular of the MODIS sensor, to minimise the atmospheric effects and the topographical variations on the majority of the indexes of vegetation. Independently of the degree of defoliation or of the density of cover, the MSAVI can be generalised for the follow-up and the management of forestry covers in condition that the data on images is corrected of the atmospheric effects and of the radiometric drift of the sensor. Although it is not linear, it is an index which does not saturate quickly at the time with the presence with a strong density of cover and always shows a potential and a sensitivity allowing the distinction between the various cover rates and the detection of the temporal changes which can take place in a forestry environment.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des acronymes.....	ix

Chapitre I : Introduction générale

1.1 Problématique de la recherche.....	1
1.2 Objectifs et hypothèses de la recherche.....	3
1.2.1. Objectifs.....	3
1.2.2. Hypothèses de la recherche.....	4
1.3 Organisation de la thèse.....	4

Chapitre II : Les indices de végétation : étude bibliographique

2.1 Introduction.....	6
2.2 Les indices de végétation.....	7
2.2.1. Les indices de type combinaison linéaire.....	8
2.2.2. Les indices de type rapport.....	9
2.2.3. Les indices de type perpendiculaire.....	10
2.3. Les problèmes des indices de végétation.....	11
2.3.1. Les effets des propriétés optiques des sols sous-jacents.....	12
2.3.1.1. <i>Couleur et brillance des sols</i>	12
2.3.1.2. <i>L'humidité et la texture du sol</i>	14
2.3.2 Effets de l'atmosphère.....	15
2.3.2.1. <i>Diffusion par les aérosols et par les molécules</i>	16
2.3.2.2. <i>Absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone</i>	19
2.3.3. Les problèmes d'étalonnage radiométrique du capteur.....	19
2.3.4. Les effets de la topographie.....	21
2.3.5. Les effets bidirectionnels.....	22
2.3.6. Les résolutions spatiale et spectrale du capteur.....	24
2.3.6.1. <i>La résolution spectrale du capteur</i>	24
2.3.6.2. <i>La résolution spatiale du capteur</i>	24
2.3.7. Les problèmes de la saturation et de la linéarité.....	25
2.4. Conclusion.....	26

Chapitre III : Méthodologie et données de la recherche

3.1. Introduction.....	28
3.2. La méthodologie de la recherche.....	28
3.2.1. Le site d'étude.....	31
3.2.2. Données spectroradiométriques du couvert végétal.....	31
3.2.3. Données spectroradiométriques des sols nus.....	33
3.2.4. Les capteurs satellitaires.....	36
3.2.4.1. Le capteur MODIS-EOS.....	36
3.2.4.2. Le capteur VEGETATION-SPOT.....	37
3.2.4.3. Le capteur AVHRR.....	39
3.5. Le modèle de transfert radiatif 6S.....	42
3.5.1. Conditions de simulation.....	43
3.5.2. Choix des indices de végétation.....	46

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction.....	48
4.2. Analyse des résultats.....	48
4.2.1. Analyse de l'impact des propriétés optiques des sols nus sous-jacents.....	48
4.3.2. Analyse des effets atmosphériques.....	59
4.3.2.1. La diffusion par les aérosols.....	59
4.3.2.2. L'absorption par la vapeur d'eau.....	71
4.3.2.3. L'absorption par l'ozone.....	82
4.3.3. Analyse des effets de la topographie.....	94
4.3.4. Analyse des effets bidirectionnels.....	106
4.3.5. Analyse des problèmes de la saturation et de la linéarité.....	113
4.4. Conclusions.....	118

Chapitre V : Conclusions et recommandations

5.1. Conclusions.....	128
5.2. Recommandations.....	132

Références bibliographiques.....	128
---	------------

Annexe A.....	138
Annexe B.....	140
Annexe C.....	147

Liste des figures

Figure 2.1 : Courbe générale de réflectance des végétaux	8
Figure 2.2 : Répartition et description des composantes atmosphériques affectant le signal dans le visible et l'infrarouge.....	16
Figure 2.3 : Effet de l'étalonnage radiométrique et des corrections atmosphériques sur le NDVI déterminé à partir des images AVHRR	21
Figure 3.1 : Organigramme des étapes méthodologiques	30
Figure 3.2: Emplacement du site d'étude.....	32
Figure 3.3 : Spectres du couvert forestier de sapin baumier à différents degrés de défoliation cumulative.....	33
Figure 3.4 : Réponses spectrales des filtres de quatre canaux (rouge, bleu, vert et proche infrarouge) du capteur MODIS-EOS	36
Figure 3.5 : Réponses spectrales des filtres des canaux (bleu, rouge et proche infrarouge) du capteur VEGETATION de SPOT.....	38
Figure 3.6 : Réponses spectrales des filtres rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR de NOAA	40
Figure 3.7 : Comparaison des réponses spectrales des filtres spectraux bande par bande des capteurs MODIS, AVHRR et VEGETATION.....	41
Figure 4.1 : Spectres mesurés des échantillons du premier groupe de sol nu.....	49
Figure 4.2 : Spectres mesurés des échantillons du deuxième groupe de sol nu.....	49
Figure 4.3 : Spectres mesurés des échantillons du troisième groupe de sol nu.....	50
Figure 4.4 : Droite des sols nus dans l'espace spectral rouge proche infrarouge et rouge- bleu, proche infrarouge.....	51
Figure 4.5 : Sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois capteurs	56
Figure 4.6 : Erreur relative moyenne de la sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois capteurs	58
Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS.....	63
Figure 4.8 : Erreur relative moyenne de la sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques et des trois capteurs	70
Figure 4.9 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau	74
Figure 4.10 : Erreur relative moyenne de la sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau sous une concentration de 8g/cm^3 pour les trois capteurs.....	81
Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone	86
Figure 4.12 : Erreur relative moyenne de la sensibilité de tous les indices de végétation	

vis à vis de l'effet de l'absorption par l'ozone en fonction des capteurs AVHRR, VEGETATION & MODIS.....	93
Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité de 25 km pour les capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS.....	98
Figure 4.14 : Erreur moyenne de la sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie par km d'altitude pour une visibilité de 25 km et pour 100 % de défoliation en fonction des capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS.....	105
Figure 4.15 : Réponses spectrales des bandes du visible et du proche infrarouge en fonction de l'angle de visé et du capteur satellitaire.....	107
Figure 4.16 : Sensibilité des indices de végétation à la géométrie de visée pour les trois capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS en fonction de différents degrés de défoliation.....	110
Figure 4.17 : Réflectances dans les bandes des trois capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS en fonction de la densité du couvert.....	113
Figure 4.18 : Sensibilité des indices de végétation en fonction de la densité du couvert : Cas du capteur AVHRR.....	117
Figure 4.19 : Sensibilité des indices de végétation en fonction de la densité du couvert : Cas du capteur VEGETATION.....	117
Figure 4.20 : Sensibilité des indices de végétation en fonction de la densité du couvert : Cas du capteur MODIS.....	117

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Résumé des caractéristiques et des conditions de surfaces du premier groupe de sols utilisées.....	34
Tableau 3.2 : Résumé des caractéristiques du deuxième groupe de sols utilisées.....	34
Tableau 3.3 : Résumé des caractéristiques du troisième groupe de sols utilisées.....	35
Tableau 3.4 : Résumé des caractéristiques du capteur MODIS-EOS.....	37
Tableau 3.5 : Résumé des caractéristiques du capteur VEGETATION-SPOT.....	38
Tableau 3.6 : Résumé des caractéristiques du capteur AVHRR-NOAA.....	40
Tableau 3.7 : Conditions de simulations des effets atmosphériques.....	44
Tableau 3.8 : Conditions de simulations des effets topographiques.....	45
Tableau 3.7 : Conditions de simulations des effets de la BRDF.....	46
Tableau 4.1 : Résumé des paramètres de la droite des sols nus.....	51
Tableau 4.2 : Résumé de la performance des indices de végétation par rapport aux différents effets perturbateurs.....	121

Liste des acronymes

APAR	: Rayonnement Photosynthétiquement Actif Absorbé
ARVI	: Atmospherically Resistant Vegetation Index
AVHRR	: Advanced Very High Resolution Radiometer
BRDF	: Bidirectional Reflectance Distribution Function
CN	: Compte Numérique
CNES	: Centre National des Études Spatiales
EOS	: Earth Observing System
EVI	: Enhanced Vegetation Index
GARI	: Green Atmospherically Resistant Vegetation Index
GEMI	: Global Environment Monitoring Index
GVI	: Green Vegetation Index
LAI	: Indice de surface foliaire
LOA	: Laboratoire d'Optique Atmosphérique
MODIS	: Moderate resolution imaging spectroradiometer
MSAVI	: Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MSR	: Modified Simple Ratio
MSS	: Multispectral Scanner
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	: National Oceanographic and Atmospheric Administration
OSAVI	: Optimized Soil Adjusted Vegetation Index
PIR	: Proche Infrarouge
PVI	: Perpendicular Vegetation Index
R	: Rouge
RDVI	: Renormalized Difference Vegetation Index
RVI	: Ratio Vegetation Index
SAVI	: Soil Adjusted Vegetation Index
TSARVI	: Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index
TSAVI	: Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
5S	: Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire
6S	: Seconde Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire

Chapitre I : Introduction Générale

1.1 Problématique de la recherche

La forêt est l'un des écosystèmes majeurs de la biosphère terrestre, dans lequel la composition des espèces végétales est en constante mutation. Au Canada, la forêt a un rôle économique de premier ordre, elle couvre 42 % du territoire et représente 10 % des forêts de la planète. Elle joue également un rôle important dans la fixation du gaz carbonique de l'atmosphère, dans la régénération d'oxygène, la régulation climatique et dans le maintien de la biodiversité (Goïta, 1995). Compte tenu de ces facteurs majeurs, les écosystèmes forestiers occupent une position centrale dans les programmes des changements à l'échelle du globe. Malheureusement, à long terme la forêt est soumise à des attaques naturelles et humaines ce qui provoque la dégradation et la destruction de notre patrimoine naturel. Bien entendu, l'inventaire, le suivi de l'évolution temporelle et l'extraction précise des paramètres biophysiques s'avèrent nécessaires afin d'acquérir des meilleures connaissances des écosystèmes forestiers et de contribuer à une gestion rationnelle et durable. En outre, l'accès à ces informations peut aider à initier des modèles climatiques et/ou écosystémiques afin de mieux comprendre le fonctionnement global des écosystèmes forestiers. En effet, pour faire avancer la compréhension de ces écosystèmes à long terme, des observations complètes et globales sur une série de paramètres biophysiques doivent être recueillies, archivées et analysées (Bannari *et al.*, 1999a). En raison de l'échelle des investigations nécessaires pour accéder à des territoires immenses, les données de télédétection sont devenues la principale source d'information pour la gestion et la cartographie des couverts forestiers (Ustin *et al.*, 1997).

Durant la dernière décennie, les données du capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) du satellite NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) couvrant la totalité de la planète sur une base hebdomadaire ont constitué le seul moyen d'observation et de gestion globale, répétitive et continue. Actuellement, le capteur MODIS

(*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) forme le point de départ d'une nouvelle technologie d'un programme ambitieux de la NASA, EOS (*Earth Observing System*). MODIS est un spectromètre imageur électro-optique mis au point pour prendre la relève des capteurs AVHRR de la série NOAA (NASA, 1986). Avec ses riches caractéristiques spatiales et spectrales, il aidera à mieux comprendre le fonctionnement des différents écosystèmes de l'environnement végétal et il répondra à une préoccupation croissante de compréhension des échanges du système atmosphère-biosphère à l'échelle de la planète (Salmonson, 1989; Running *et al.*, 1994). En compétition avec le programme américain de l'observation de la terre, le programme français a mis en orbite le capteur VEGETATION à bord du satellite SPOT-4. Ce capteur est dédié spécialement pour le suivi de la végétation, notamment dans les domaines de l'agriculture, de la foresterie et de la surveillance de l'environnement terrestre à l'échelle mondiale.

Par ailleurs, les indices de végétation (qu'on appelle également indices spectraux) constituent une approche simple et commode pour extraire l'information utile à partir des données de télédétection. Ils constituent une source d'information potentielle originale susceptible d'aider à un meilleur suivi de l'état des couverts végétaux. Leur intérêt réside dans l'évaluation de la densité du couvert végétal et la détection des changements dans l'utilisation du sol survenue dans le temps (Bariou *et al.*, 1985; Baret, 1986; Bannari *et al.*, 1995). Dans la littérature, différents travaux ont montré l'utilité et l'intérêt des indices spectraux pour l'étude de l'évolution des couverts forestiers (Chen, 1996; Huete *et al.*, 1996, 1997; Illera *et al.*, 1996; Kasischke and French, 1997; Royer *et al.*, 1997; Teillet *et al.*, 1997; Bannari *et al.*, 1999a). Toutefois, plusieurs indices ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien particulières (Bannari *et al.*, 1995). D'ailleurs, l'utilisation de l'un ou de l'autre des indices pour caractériser les couverts forestiers peut être limitée par différents facteurs perturbateurs d'ordre physique qui dominent le signal au capteur, à savoir : l'étalonnage radiométrique du capteur (D'Iorio et Cihlar, 1991; Bannari *et al.*, 1999b), les caractéristiques spatiales et spectrales propres aux capteurs (Bannari, 1996; Teillet *et al.*, 1997), l'effet de la topographie (Teillet et Staenz, 1992; Burgess *et al.*, 1995), les effets atmosphériques (absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone, et la

diffusion par les molécules et par les aérosols) (Kaufman *et al.*, 1997), la couverture nuageuse (King *et al.*, 1992), les effets des sols sous-jacents au couvert (couleur, brillance, rugosité et humidité) (Huete, 1984; Guyot, 1989; Baret *et al.*, 1993; Bannari *et al.*, 1996), les effets de la géométrie d'éclairage et d'observation, connus sous le nom anglais "*Bidirectional Reflectance Distribution Function*" (BRDF) (Chen et Leblanc, 1997), et finalement, les problèmes de la saturation et de la linéarité (Huete *et al.*, 1997). Ces facteurs entraînent un accroissement ou une diminution des réflectances dans les canaux rouge et proche infrarouge et, par conséquent, ils engendrent des limitations assez sévères pour la détection des couverts végétaux à l'aide des indices spectraux ce qui cause des erreurs dans l'interprétation et l'analyse des résultats. Dans la littérature, le nombre et la diversité des indices de végétation proposés jusqu'à date, sont attribués en partie aux différentes recherches pour réduire l'impact de ces effets perturbateurs.

1.2 Objectifs et hypothèses de la recherche

1.2.1. Objectifs

Le but de cette recherche vise deux points fondamentaux. Le premier consiste à faire la mise au point d'un indice de végétation optimal capable de caractériser la dynamique d'un couvert forestier de sapin à différents degrés de défoliation indépendamment des différents effets perturbateurs. Autrement dit, il s'agit d'étudier le potentiel de chacun des indices sélectionnés dans cette étude pour minimiser les effets atmosphériques (absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone et la diffusion par les aérosols et par les molécules), les effets de la topographie, les propriétés optiques des sols nus sous-jacents, les problèmes de la géométrie d'éclairage et d'acquisition, ainsi que l'analyse des problèmes de la linéarité et de la saturation. Le second point permet de comparer pour la première fois le potentiel de trois résolutions spectrales différentes (fine, moyenne et large) des capteurs MODIS-EOS, VEGETATION-SPOT et AVHRR-NOAA pour minimiser ces effets perturbateurs et extraire les paramètres biophysiques avec précision au-dessus d'un couvert forestier de sapin à différents degrés de défoliation.

1.2.2. Hypothèses de la recherche

Dans le cadre de cette recherche, nous formulons les quatre hypothèses suivantes :

1. Les indices de végétation sont des modèles empiriques et semi-empiriques bien adaptés pour caractériser la dynamique des couverts forestiers dans l'espace et dans le temps de façon rapide, économique et efficace.
2. La résolution spectrale fine permet de minimiser les effets perturbateurs et de maximiser le signal issu des couverts forestiers,
3. L'intégration du canal bleu permet une autocorrection des effets atmosphériques sur les indices de végétation,
4. L'intégration du canal vert permet une amélioration du problème de la saturation des indices notamment lorsque le couvert devient dense.

1.3 Organisation de la thèse

La présente thèse est organisée en cinq chapitres. Le présent chapitre soulève la problématique du sujet et fixe les hypothèses et les objectifs visés par notre recherche. Le deuxième chapitre est une revue des principaux indices de végétation utilisés dans le cadre de notre étude. En outre, il discute des différents effets perturbateurs qui affectent les indices de végétations en milieu forestier. Dans le troisième chapitre, nous développons les différentes étapes de la méthodologie, nous discutons le modèle de transfert radiatif utilisé pour la réalisation des simulations et nous présentons les données exploitées dans cette recherche. Le quatrième chapitre permet la mise au point d'un indice de végétation qui caractérise le mieux la dynamique d'un couvert forestier de sapin. Autrement dit, il s'agit d'analyser le potentiel de chacun des indices de végétation pour minimiser l'impact des propriétés optiques des sols nus sous-jacents, des effets atmosphériques (la diffusion par les aérosols, l'absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone), des effets de la topographie, des effets de la résolution spectrale, des effets bidirectionnels et finalement analyser

les problèmes de la saturation et de la linéarité. En outre, dans ce chapitre, nous analysons et nous comparons le potentiel des résolutions spectrales large, moyenne et fine des capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS, respectivement, afin de minimiser les effets perturbateurs internes et externes aux couverts sur les indices sélectionnés. Quant au dernier chapitre, il dégage les principales conclusions de cette recherche et formule les perspectives et les recommandations pour les travaux futurs.

Chapitre II

Les indices de végétation : étude bibliographique

2.1 Introduction

Les indices spectraux dérivés des données de télédétection sont des modèles empiriques (sans facteurs de correction) ou semi-empiriques (avec au moins un facteur de correction) simples développés pour rehausser le signal issu des couverts végétaux. Ils montrent une meilleure sensibilité que les bandes spectrales individuelles pour la détection de la biomasse. Ils permettent de mener des études à différentes échelles de temps et d'espace pour identifier les couverts végétaux, évaluer leur développement, déterminer l'indice de surface foliaire (LAI), le pourcentage du couvert végétal, le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (APAR), l'évapotranspiration, le rendement, etc. (Asrar *et al.*, 1984). Dans divers domaines d'application de la télédétection, les chercheurs ont développé plusieurs indices basés généralement sur la combinaison (somme, addition, rapport, etc.) des canaux rouge et proche infrarouge. Dans une première phase du développement, les indices ont été calculés à partir des comptes numériques (CN) bruts sans aucune considération pour les facteurs extérieurs qui entrent en interaction avec le signal issu de la cible. Une deuxième phase de conception est basée sur la prise en compte des phénomènes physiques qui expliquent les interactions entre le rayonnement électromagnétique, l'atmosphère, le capteur, le couvert végétal et le sol nu sous-jacent au couvert (Baret *et al.*, 1993; Bannari *et al.*, 1995).

L'analyse bibliographique nous montre que l'utilisation de l'un ou de l'autre des indices de végétation pour caractériser les couverts forestiers peut être limitée par différents facteurs perturbateurs d'ordre physique qui dominent le signal au capteur (Bannari *et al.*, 1999). Par exemple, les réflectances dans le visible et le proche infrarouge varient d'un endroit à l'autre, selon le type de sol, sa couleur, sa brillance, sa rugosité et son humidité qui change temporellement. Il s'agit dans ce cas des facteurs internes aux couverts (Huete, 1984; Huete et Jackson, 1987; Guyot *et al.*, 1989; Baret *et al.*, 1993; Bannari *et al.*, 1996). Quant aux facteurs externes, ils sont causés par les variations atmosphériques, le vieillissement du capteur satellitaire, les caractéristiques spatiales et spectrales propres au capteur, la topographie et la

géométrie d'acquisition et de visée (Huete, 1989; Bannari *et al.*, 2000). Bien entendu, ces facteurs entraînent un accroissement ou une diminution des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge et, par conséquent, ils engendrent des limitations assez sévères pour la détection des couverts végétaux à l'aide des indices spectraux. Dans ce chapitre, nous discutons de différents indices de végétation et des conditions de leur développement.

2.2 Les indices de végétation

Les indices de végétation dérivés des données de télédétection sont des modèles empiriques ou semi-empiriques. Leurs principes s'appuient essentiellement sur la différence des propriétés optiques de la végétation dans le rouge (600 à 700nm) et le proche infrarouge (700 à 1300 nm). En effet, les radiations dans le rouge sont absorbées par la chlorophylle, tandis que dans le proche infrarouge elles sont fortement réfléchies par la structure cellulaire du couvert. Si l'on examine la courbe générale de la réflectance des végétaux (figure 2.1) on constate que l'écart entre le rouge et le proche infrarouge constitue une variable sensible à la présence et à la densité de la végétation. La réponse spectrale de la végétation dans le rouge est fortement corrélée avec la concentration en chlorophylle, alors que la réponse spectrale dans le proche infrarouge l'est avec l'indice foliaire et la densité du couvert. Par conséquent, l'utilisation conjointe de ces deux domaines spectraux permet de différencier la végétation des sols et de déterminer la biomasse photosynthétiquement active par la voie de la densité du couvert végétal (Rousse *et al.*, 1974; Deering *et al.*, 1975). Dans un environnement forestier, ils permettent de mener des études à différentes échelles de temps et d'espace pour localiser les changements les plus importants, tels que: le suivi de la croissance et de la productivité, l'évaluation des dommages causés par les feux, les maladies, les épidémies d'insectes, etc. Différents travaux ont montré l'utilité et l'intérêt des indices spectraux pour l'étude de l'évolution des couverts forestiers (Chen, 1996; Huete *et al.*, 1996, 1997; Illera *et al.*, 1996; Kasischke and French, 1997; Royer *et al.*, 1997; Teillet *et al.*, 1997). Toutefois, dans la littérature, plusieurs indices ont été développés pour différentes applications et dans des conditions bien particulières (Bannari *et al.*, 1995) et qui peuvent être non convenables pour caractériser les couverts forestiers. Dans les sections qui

suivent, nous discutons seulement les indices qui sont basés sur l'hypothèse plausible de minimiser les effets perturbateurs internes et externes aux couverts et qui sont d'intérêt pour les applications en milieux forestiers.

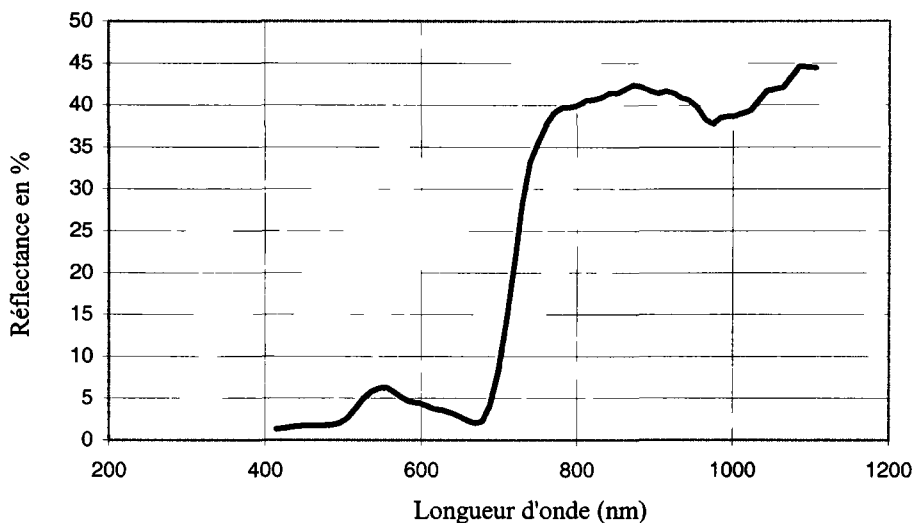


Figure 2.1 : Allure générale de la réflectance des végétaux (Huete, A.R., 1987)

2.2.1. Les indices de type combinaison linéaire

Les indices de type linéaire ont été développés durant les années 70 afin de satisfaire des applications bien particulières en télédétection, comme la prédiction des rendements de culture, l'exploitation forestière, la détection de la végétation dans les régions inondées, etc. Ils sont basés sur des méthodes purement empiriques, où les perturbations atmosphériques et les variations radiométriques propres au capteur ne sont pas prises en compte. Toutefois, pour un état donné de la végétation et de l'atmosphère, les interactions entre le rayonnement électromagnétique, l'atmosphère et le couvert végétal peuvent avoir des influences non négligeables lors du calcul de ces indices. Afin de minimiser ou de normaliser les variations causées par les facteurs perturbateurs, certains chercheurs ont proposé une combinaison de plusieurs canaux spectraux au lieu de l'utilisation des deux canaux rouge et proche infrarouge.

Comme exemple, nous présentons ici l'indice *Green Vegetation Index* (GVI)(équation 2.1) développé par Kauth et Thomas (1976) spécialement pour les données du capteur MSS (*MultiSpectral Scanner*) de Landsat. Toutefois, pour un état donné de la végétation, les propriétés optiques des sols nus peuvent avoir une influence non négligeable sur le GVI (Huete *et al.*, 1984; Bariou *et al.*, 1985; Baret, 1986).

$$GVI = -0,283MSS_4 - 0,660MSS_5 + 0,388MSS_6 + 0,500MSS_7 \quad (\text{eq.2.1})$$

Où:

MSS₄ : Réflectance moyenne dans le canal vert du capteur MSS de LANDSAT,

MSS₅ : Réflectance moyenne dans le canal rouge du capteur MSS de LANDSAT,

MSS₆ : Réflectance moyenne dans le canal proche infrarouge du capteur MSS de LANDSAT,

MSS₇ : Réflectance moyenne dans le canal moyen infrarouge du capteur MSS de LANDSAT.

2.2.2. Les indices de type rapport

Généralement, les indices de type rapport sont basés sur un rapport de bandes rouge et proche infrarouge. Ils permettent de normaliser et de minimiser de façon relative les effets relatifs à l'atmosphère, au capteur et à la topographie (Baret, 1986; Bannari, 1996). Parmi les indices de types rapport, les plus populaires et les plus utilisés, on note le RVI (*Ratio Vegetation Index*) et le NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) (équations 2.2 et 2.3 respectivement). Le RVI développé par Pearson et Miller (1972) est l'un des premiers indices de type rapport, il permet une bonne discrimination entre le sol et la végétation. Toutefois, il montre une forte dépendance à la géométrie d'acquisition (Huete, 1988) et une médiocre discrimination de la végétation dont la densité est inférieure à 50 % (Bannari, 1996). Le NDVI développé par Rouse *et al.* (1974) est l'indice le plus populaire et le plus utilisé par la communauté scientifique. Il occupe une place importante pour la détection des changements de la végétation à l'échelle du globe (Huete et Liu, 1994). Toutefois, malgré sa popularité, le NDVI reste sensible aux effets de l'atmosphère, à l'étalonnage radiométrique du capteur, aux propriétés optiques des sols nus sous-

jacents et aux conditions d'observation et de visée, ce qui limite sa capacité pour caractériser avec précision la végétation lors des études multitemporelles (Huete et Jackson, 1987). Le NDVI a fait l'objet de plusieurs transformations dans la perspective de corriger les effets des sols sous-jacents aux couverts et les effets atmosphériques (Huete, 1984; Kaufman et Tanré, 1992). Ces transformations vont être discutées plus tard dans la section 2.3.

$$RVI = \frac{\rho_R}{\rho_{PIR}} \quad (\text{eq.2.2})$$

$$NDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R)} \quad (\text{eq.2.3})$$

Où:

ρ_{PIR} : réflectance moyenne dans le proche infrarouge,

ρ_R : réflectance moyenne dans le rouge.

2.2.3. Les indices de type perpendiculaire

Les indices de type perpendiculaire (ou orthogonaux), sont des indices qui font intervenir la droite des sols nus qui permet la séparation entre le sol et le couvert végétal (Huete, 1988). Le concept de cette droite a été adopté par Kauth et Thomas (1976). Ces auteurs ont analysé les spectres des sols nus dans un espace à quatre dimensions correspondant aux quatre bandes spectrales du capteur MSS de Landsat. Ils ont remarqué que la plus grande variabilité dans le signal des sols peut être attribuée à leur clarté, étant donné que presque toutes les données spectrales relatives aux sols nus se trouvaient sur une droite partant de l'origine et qui suit l'allure de la première bissectrice. Cette droite a été nommée droite des sols nus et représentée dans l'espace spectral bidimensionnel rouge et proche infrarouge par l'équation 2.4 (Richardson et Wiegand, 1977). La quantité de végétation dans le cas des indices de type perpendiculaire est déterminée par la distance perpendiculaire entre le point qui représente un pixel et la droite des sols nus dans l'espace spectral rouge et proche infrarouge.

Le concept de la droite des sols est devenu largement accepté dans le domaine de l'analyse et de l'interprétation des images de télédétection spatiales et aéroportées (Baret *et al.*, 1992). Cependant, la diversité des sols nus ou des conditions de surface cause une large variation dans les valeurs de la pente (a) et de l'origine (b) de la droite des sols ce qui affecte, par conséquent, la précision de l'indice de végétation. Pour que l'indice soit insensible à différents types de sols et à leurs conditions de surface, les paramètres de la droite des sols doivent être la moyenne de plusieurs échantillons (Bannari, 1996). En exploitant le principe de la droite des sols nus, Jackson *et al.* (1980) ont développé le PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) dans la perspective de tenir compte de l'effet du sol nu. D'après Bannari *et al.* (1996), pour un sol nu dépourvu de la végétation, le PVI (équation 2.5) montre une valeur nulle indépendamment de la nature du sol et de son état de surface.

$$\rho_{PIR} = a \rho_R + b \quad (\text{eq.2.4})$$

Où:

a : pente de la droite des sols nus calculée dans l'espace spectral rouge/proche infrarouge,

b : ordonnée à l'origine de la droite des sols nus calculée dans l'espace spectral rouge/proche infrarouge.

$$PVI = \frac{\rho_{PIR} - a \rho_R - b}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (\text{eq.2.5})$$

2.3. Les problèmes des indices de végétation

Une analyse complète des données de télédétection dans une ou plusieurs bandes spectrales exige une pleine compréhension des divers processus physiques qui sont responsables de la diffusion du rayonnement solaire dans la direction du capteur. Ces processus se produisent au-dessus de la surface terrestre, lors de la traversée de l'atmosphère : soleil-terre et terre-capteur. Dans cette section nous présentons une synthèse bibliographique des effets perturbateurs sur le

rayonnement électromagnétique, dans le domaine du rouge et du proche infrarouge et, par conséquent, sur les indices spectraux.

2.3.1. Les effets des propriétés optiques des sols sous-jacents

L'étude du comportement spectral de la végétation est largement liée aux propriétés optiques du sol sous-jacent. En effet, la réponse spectrale d'un couvert végétal est déterminée par les processus physiologiques de la plante et de son environnement qui interagissent de façon plus ou moins complexe. En règle générale, les courbes de réflectance des sols nus dans les bandes du rouge et du proche infrarouge sont uniformes, continues et croissantes. Elles ne montrent pas de pics ou de zone d'absorption nette, si ce n'est pour l'eau (autour de 1,4 μm et 1,9 μm). Par ailleurs, la réponse spectrale est influencée par plusieurs paramètres de surface tels que: la couleur, la brillance, l'humidité et la texture du sol (Escadafal *et al.*, 1989; Bannari *et al.*, 1996). Dans le milieu forestier, ces paramètres de surface sont importants lorsque l'état phénologique du couvert est peu avancé ou lorsque le couvert est épars et moyennement dense ou lorsque le degré de défoliation est plus ou moins fort. Dans le cas des couverts relativement denses, les effets des propriétés optiques des sols peuvent se manifester à cause du vent qui peut couvrir une portion plus ou moins importante des tiges et des sols nus sous-jacents en agitant les arbres ou en les couchant (Guyot, 1984; Bannari *et al.*, 2000).

2.3.1.1. Couleur et brillance des sols

Les spectres des sols ont été étudiés dès les débuts de la télédétection et la forme générale en a été bien décrite par Condit (1970) à partir de mesures en laboratoire sur une grande série d'échantillons de sols américains. Les résultats obtenus par ce chercheur ont été corroborés par d'autres travaux qui ont été réalisés sur des sols africains et européens (Stoner *et al.*, 1980; Guyot, 1984; Escadafal et Huete, 1991). Généralement, les sols clairs réfléchissent fortement le rayonnement solaire (sable, calcaire, gypse, etc.), alors que les sols foncés absorbent la majorité du rayonnement solaire (argile ou sol riche en matière organique). En plus de la couleur et la

brillance des sols, la présence de minéraux clairs ou sombres est aussi un autre facteur qui peut influencer l'intensité du signal. D'après Guyot (1989), lorsqu'un sol est très brillant et de couleur très claire sa réflectance peut dépasser celle d'un couvert végétal en pleine croissance.

Par ailleurs, l'effet des propriétés optiques des sols nus sur les indices de végétation a été soulevé par plusieurs auteurs. Afin de remédier à ce problème le PVI a été développé en considérant la droite des sols nus. Toutefois, bien que celui-ci soit l'indice le plus performant pour réduire l'effet des propriétés optiques des sols nus, c'est un indice qui sature très rapidement et souffre d'un sérieux problème de la linéarité. En outre, Huete (1988) a constaté une certaine contradiction entre le NDVI et le PVI dans les façons qu'ils décrivent le comportement spectral de la végétation et celui du sol nu sous-jacent. Par conséquent, il a développé le SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) qui est un compromis entre les indices de type rapport et ceux de type orthogonal. L'originalité de cette transformation réside au niveau de l'établissement d'un modèle simple qui permet de décrire adéquatement le système sol-végétation. Afin de raffiner l'effet de la couleur, de la brillance et de l'humidité des sols sur le SAVI, Baret *et al.*, (1989) ont exploité le concept de droite des sols et ont proposé un nouvel indice de végétation, le TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*). Le but de cette transformation est de donner au TSAVI un caractère de globalité. Autrement dit, l'utilisation d'un seul indice dans différentes applications au lieu d'un indice spécifique à chaque application.

Malgré les efforts de Huete (1988) et de Baret *et al.* (1989) pour que les indices SAVI (équation 2.6) et TSAVI (équation 2.7) normalisent correctement les effets des sols, ces indices ne montrent pas une linéarité parfaite et saturent lorsque le couvert devient relativement dense (Qi *et al.*, 1994; Bannari *et al.*, 2000). Pour améliorer la sensibilité du SAVI à la présence de la végétation et augmenter son potentiel pour discriminer les sols nus, Qi *et al.* (1994) ont proposé une version modifiée de l'indice, MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) (équation 2.8). D'autres chercheurs ont développé le OSAVI (*Optimized Soil Adjusted Vegetation Index*) (équation 2.9) qui n'est qu'un cas particulier du TSAVI lorsque la pente (a) et l'origine (b) de la droite du sol nu sont égal à 1 et 0, respectivement (Rondeaux *et al.*, 1996).

$$SAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} * (1+L) \quad (\text{eq.2.6})$$

$$TSAVI = \left[\frac{a(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)}{(\rho_R + a\rho_{PIR} - ab + 0,08(1+a^2))} \right] \quad (\text{eq.2.7})$$

$$MSAVI = \frac{[2\rho_{PIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{PIR} + 1)^2 - 8(\rho_{PIR} - \rho_R)}]}{2} \quad (\text{eq.2.8})$$

$$OSAVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_R + \rho_{PIR} + 0,16)} \quad (\text{eq.2.9})$$

Où:

L : facteur d'ajustement du sol sous-jacent qui est égale à 0,5.

2.3.1.2. L'humidité et la texture du sol

Bien que la teneur en eau affecte tout le domaine spectral, les bandes d'absorption de l'eau sont situées à 1,4 µm et 1,9 µm. Plus le sol est humide plus la réflectance spectrale est faible, alors qu'elle augmente plus le sol est sec et brillant. Quant à l'effet de la rugosité de surface, il est du essentiellement aux ombres portées par les éléments grossiers de la surface du sol. Ainsi, si les particules sont fines, on aura peu d'aspérité et donc une élévation de la réflectance. Par contre, si les particules sont grosses, on aura des macro-aspérités qui piègent la lumière et par conséquent la réflectance diminue (Guyot, 1989; Bannari *et al.*, 1996). Cet effet affecte beaucoup plus un sol clair qu'un sol brun ou sombre. À l'échelle macroscopique, la présence des irrégularités de surface introduit aussi une variation de la réflectance en fonction de la pente et de son orientation.

2.3.2 Effets de l'atmosphère

Dans l'atmosphère, on peut distinguer : la vapeur d'eau, les gaz, les aérosols et les nuages. Il s'agit d'un milieu stratifié où les gradients de température, de pression, et d'humidité relative, ainsi que la concentration, la taille et la nature des particules varient avec l'altitude (figure 2.2). Le diamètre des particules en suspension dans l'air varie entre une fraction de micron et quelques dizaines de microns (Turner et Spencer, 1972). Les particules qui jouent le rôle le plus important du point de vue radiatif ont des dimensions comprises entre 0,1 et 1 μm . Elles sont en suspension dans l'air et se trouvent notamment dans les basses couches de l'atmosphère (Colwell, 1983). La variation de la concentration des particules dans l'atmosphère, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques, se traduisent par une variation des caractéristiques optique de l'atmosphère, ce qui perturbe ainsi le rayonnement solaire tout au long de son parcours à travers l'atmosphère (Turner *et al.*, 1971; Turner et Spencer, 1972; Tanré *et al.*, 1983; Deschamps *et al.*, 1984; Kaufman, 1988)

L'air est composé de différents gaz (N_2 , O_2 , CO_2 et O_3) dont les concentrations sont considérées comme stables lors de la conception du modèle de transfert radiatif 6S. La teneur en ozone (situé entre 20 et 50 km d'altitude) varie dans le temps et dans l'espace, mais elle est bien définie à un endroit et un moment donné. Les nuages sont constitués de gouttelettes d'eau (10 à 100 μm) ou de cristaux de glace. Cette dernière composante peut être négligée car les images satellitaires optiques ne sont utilisables que lorsque le ciel est parfaitement dégagé ou lorsque l'influence des nuages est négligeable. Quant à la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, elle résulte de l'évaporation des surfaces d'eau, de la transpiration des plantes et de la respiration des êtres vivants; elle est plus forte à la surface de la terre et décroît exponentiellement en fonction de l'altitude (figure 2.2). Cependant, la variabilité des composantes de l'atmosphère d'une façon globale est extrêmement variable dans le temps et dans l'espace (Shaw, 1983).

Par ailleurs, dans le domaine spectral qui s'étend du visible à l'infrarouge moyen, l'atmosphère perturbe le rayonnement électromagnétique qui le traverse par deux processus bien distincts: l'absorption par les gaz, la vapeur d'eau et les aérosols atmosphériques et la diffusion par les

aérosols et les molécules (Kaufman, 1984). Toutefois, l'effet des nuages est généralement négligé dans la mesure où on prend des images lorsque le ciel est clair. L'effet de l'atmosphère entraîne, d'une part, une diminution du contraste des données unidates et, d'autre part, intensifie les confusions dans l'analyse des images multidates (Bannari, 1998). Ces variations peuvent réduire considérablement la précision dans l'interprétation des données de télédétection et spécialement la détection de la dynamique des couverts végétaux à l'aide des indices de végétation.

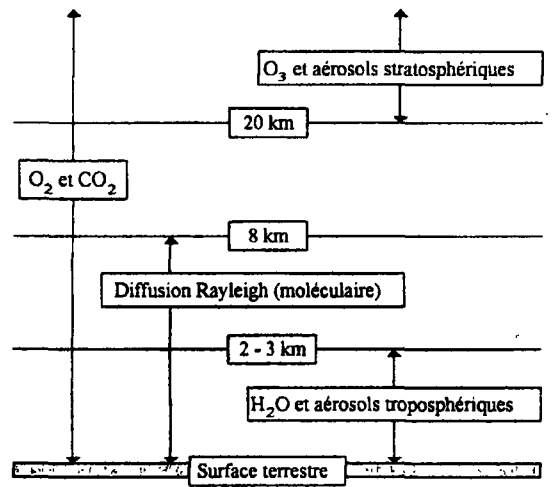


Figure 2.2 : Répartition et description des composantes atmosphériques affectant le signal dans le visible et l'infrarouge (d'après Vermote *et al.*, 1996)

2.3.2.1. Diffusion par les aérosols et par les molécules

La diffusion atmosphérique est due à l'interaction des photons avec les molécules (diffusion de Rayleigh) et les aérosols (diffusion de Mie) en suspension dans l'air. Elle génère une composante du signal non réfléchi par la surface terrestre et qui est nuisible par rapport à la composante directe et utile du signal reçu par le capteur. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont discuté de l'influence de l'effet de la diffusion atmosphérique sur les indices de végétation. Cet effet est en fonction de l'indice lui-même, de la turbidité atmosphérique et de la densité de la végétation (Vermote *et al.*, 1997; Bannari *et al.*, 1998). Afin de corriger l'effet de la diffusion

atmosphérique sur le NDVI, Kaufman et Tanré (1992) ont développé un nouvel indice de végétation appelé le ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*). Celui-ci est basé sur la combinaison des canaux rouge et bleu dans un seul canal hybride 'rouge-bleu'. Le degré de résistance du ARVI (équation 2.10) aux variations atmosphériques dépend du succès de la détermination du coefficient d'autocorrection atmosphérique ' γ '. En se basant sur le modèle de transfert radiatif 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*), Kaufman et Tanré (1992) préconisent que la valeur unité du coefficient d'autocorrection ($\gamma = 1$) permet un meilleur ajustement pour la plupart des applications en télédétection, à moins qu'il ne soit connu *a priori*.

Développé spécialement pour le capteur AVHRR de NOAA, en exploitant uniquement les réflectances apparentes en haut de l'atmosphère, le GEMI (*Global Environnement Monitoring Index*) est un indice non-linéaire qui permet une gestion globale des couverts végétaux en minimisant à la fois les effets des sols et des effets atmosphériques (Pinty et Verstraete, 1992). Toutefois, plusieurs auteurs (Plummer *et al.*, 1994; Bannari *et al.*, 1995) confirment que le GEMI (équation 2.11) est très sensible à la brillance des sols nus sous-jacent et ne peut caractériser des couverts épars ou moyennement denses.

Pour corriger le TSAVI des effets atmosphériques, Bannari *et al.* (1997) ont proposé le TSARVI (*Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index*)(équation 2.12). Cette transformation se base, d'une part sur la substitution du canal rouge par le canal hybride 'rouge-bleu', et d'autre part, sur le calcul de la droite des sols nus (pente et origine : a_{rb} et b_{rb}) dans l'espace spectral apparent 'rouge-bleu'/proche infrarouge. Dans la même perspective, Huete *et al.* (1996) ont proposé une nouvelle version du SAVI nommée EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (équation 2.13) qui permet une correction combinée des effets atmosphériques et des propriétés optiques des sols sous-jacents.

$$ARVI = \frac{(\rho_{PIR}^* - \rho_{RB}^*)}{(\rho_{PIR}^* + \rho_{RB}^*)} \quad (\text{eq.2.10})$$

$$\rho_{RB}^* = \rho_{RB} - \gamma (\rho_B^* - \rho_R^*) \quad (\text{eq.2.10a})$$

$$\gamma = \frac{\rho_{a-r}}{\rho_{a-b} - \rho_{a-r}} \quad (\text{eq.2.10b})$$

$$GEMI = \eta (1 - 0,25\eta) - \frac{(\rho_R^* - 0,125)}{(1 - \rho_R^*)} \quad (\text{eq.2.11})$$

$$\eta = \frac{[2(\rho_{PIR}^{*2} - \rho_R^{*2}) + 1,5\rho_{PIR}^* + 0,5\rho_R^*]}{(\rho_{PIR}^* + \rho_R^* + 0,5)} \quad (\text{eq.2.11a})$$

$$TSARVI = \frac{[a_{rb}(\rho_{PIR}^* - a_{rb}\rho_{RB}^* - b_{rb})]}{[\rho_{RB}^* + a_{rb}\rho_{PIR}^* - a_{rb}b_{rb} + 0,08(1 + a_{rb}^2)]} \quad (\text{eq.2.12})$$

$$\rho_{PIR}^* = a_{rb}\rho_{RB}^* + b_{rb} \quad (\text{eq.2.12a})$$

$$EVI = \frac{2,5(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(L + \rho_{PIR} + 6\rho_R - 7,5\rho_B)} \quad (\text{eq.2.13})$$

Où:

ρ_B^* : réflectance apparente dans le canal bleu,

ρ_R^* : réflectance apparente dans le canal rouge,

ρ_{RB}^* : réflectance apparente dans le canal hybride 'rouge-bleu',

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

ρ_{a-r} : composante de la réflectance intrinsèque à l'atmosphère dans le canal rouge,

ρ_{a-b} : composante de la réflectance intrinsèque à l'atmosphère dans le canal bleu,
 a_{rb} : pente de la droite des sols nus, dans l'espace spectral RB/PIR,
 b_{rb} : ordonnée à l'origine de la droite des sols nus, dans l'espace spectral RB/PIR.

2.3.2.2. Absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone

La vapeur d'eau est le principal absorbant atmosphérique. La concentration en vapeur d'eau est très variable et se situe dans les basses couches de l'atmosphère entre 2 et 3 km (figure 2.2). L'effet de la vapeur d'eau se manifeste à partir de 0,7 μm et limite l'observation dans les domaines du proche infrarouge dans des fenêtres définie autour de 1,06 ; 1,22 ; 1,6 et 2,2 μm (Deschamps *et al.*, 1982). Par contre, la concentration en ozone est relativement stable dans l'atmosphère, elle varie surtout suivant la latitude. Les profils de densité montrent que la couche d'ozone est localisée en haute altitude dans les couches supérieures de l'atmosphère. Pour des détections à basse altitude, on néglige habituellement cette absorption. L'effet de l'absorption par l'ozone est variable suivant la bande spectrale choisie, mais son effet est plus important dans les bandes du proche infrarouge. La couche d'ozone élimine toute possibilité d'observation aux très courtes longueurs d'onde (inférieure à 0,32 μm) et présente une faible bande d'absorption autour de 0,6 μm (Tanré *et al.*, 1983). Quant à l'absorption moléculaire, elle se manifeste par une diminution du signal dans le proche infrarouge ce qui rend sombre une surface brillante. D'après Bannari *et al.* (1999a), la sensibilité des indices de végétation à l'absorption par la vapeur d'eau diminue remarquablement au fur et à mesure que l'effet de l'absorption augmente, notamment lorsque les couverts sont relativement denses.

2.3.3. Les problèmes d'étalonnage radiométrique du capteur

Le capteur satellitaire optique a pour fonction de transformer le rayonnement électromagnétique reçu à l'entrée de l'instrument en compte numérique (CN) brut à la sortie. Entre l'entrée et la sortie du capteur, le signal lumineux subit une atténuation due aux pertes de transmission dans l'optique, une transformation en énergie électrique, une amplification du signal électrique par

une chaîne analogique d'amplification et enfin la transformation du signal électrique analogique en compte numérique. Les CN sont envoyés par télémesure vers la station de réception au sol. L'exploitation de ces données dans leur forme brute, sans étalonnage radiométrique et sans correction atmosphérique introduira des erreurs grossières dans toutes les opérations subséquentes de traitement d'image, à savoir : les indices de végétation, la confection et l'analyse des mosaïques, les analyses multitemporelles, les techniques de classification, etc. (Teillet, 1994; Bannari *et al.*, 1999b).

La figure (2.3) illustre clairement les améliorations rendues possibles à l'aide d'une correction combinée des effets atmosphériques et par l'étalonnage radiométrique du capteur sur l'indice de végétation NDVI déterminé à partir des images AVHRR-NOAA acquises en 1991 au-dessus des cibles végétales typiques. La zone de couleur gris foncé présente les valeurs du NDVI calculées à partir des comptes numériques bruts. La zone blanche montre les valeurs du NDVI qui ont augmenté à la suite d'un étalonnage radiométrique absolu du capteur. La zone gris-clair présente les valeurs du NDVI qui ont augmenté avec une correction atmosphérique combinée à un étalonnage radiométrique. La ligne horizontale montre la valeur du NDVI au sol d'un végétal typique (0,64), non ajustée aux variations saisonnières, et mesurée dans les bandes spectrales 1 et 2 de AVHRR de NOAA (Teillet, 1994). Par ailleurs, Goward *et al.* (1991) présumant qu'un pauvre étalonnage radiométrique du capteur AVHRR peut introduire une erreur d'environ $\pm 50\%$ dans les valeurs du NDVI. Une autre étude a montré que les valeurs du NDVI sont sous-estimées lorsqu'elles sont calculées à partir des données brutes propres aux capteurs HRV de SPOT et TM de Landsat : l'erreur est deux fois plus grande pour HRV que pour TM, soit 18 % et 10 % respectivement, (Guyot et Gu, 1994).

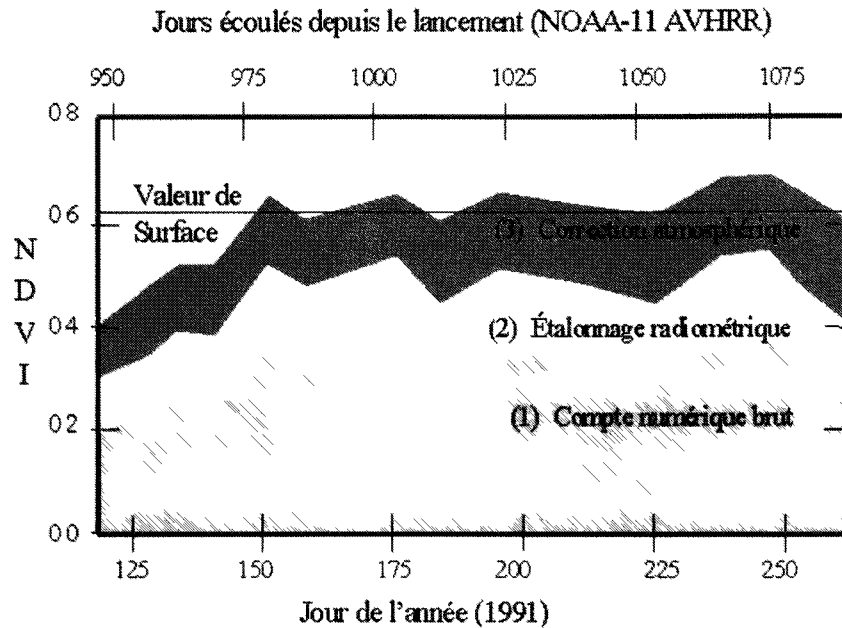


Figure 2.3 : Effet de l'étalonnage radiométrique et des corrections atmosphériques sur le NDVI déterminé à partir des images AVHRR (Teillet, 1994)

2.3.4. Les effets de la topographie

L'effet de la topographie est défini comme étant la variation de la réponse d'une surface inclinée comparé à une surface horizontale. En d'autres termes, c'est le résultat de la différence radiométrique déterminée par la pente et l'orientation de la surface visée. Dans un territoire plat vu et illuminé sous les mêmes conditions avec une atmosphère uniforme au-dessus de la scène observée, les réflectances mesurées par le capteur satellitaire dans les différentes bandes spectrales sont directement liées à la réflectance des divers types de couverture du sol. Par conséquent, ces mesures peuvent être utilisées sans problèmes majeurs pour caractériser spectralement les objets ou les territoires visés (Kaufman, 1984; Diner and Martonchik, 1985). Toutefois, le problème s'impose lorsque le terrain devient accidenté même si les conditions d'illumination et de visée et les conditions atmosphériques demeuraient constantes. Ainsi, les

réflectances mesurées pour une même cible au sol fluctuent en fonction de la direction de la normale au sol par rapport à la direction du soleil et à celle du capteur (Cavayas, 1984, Proy *et al.*, 1989). À partir des mesures de réflectance d'un couvert de conifère, Trotter (1998) a montré que la variation de la luminance relative à la topographie est dominée par l'angle d'observation plutôt que l'angle d'illumination, et que les effets de l'angle d'incidence et de visé semblent être en grande partie indépendants. Ainsi, pour une élévation moyenne du soleil, les fluctuations des luminances peuvent atteindre facilement 50 % (Holben *et al.*, 1979; Rochon *et al.*, 1979). En plus de la modification des propriétés des réflectances du terrain, l'effet de la topographie entraîne également des effets de l'ombre (Proy *et al.*, 1982), et des effets atmosphériques liés à la variation de l'altitude (Teillet et Staenz, 1992).

Teillet et Staenz (1992) et Burgess *et al.* (1995) ont montré l'influence de la topographie sur la dérivation du NDVI à partir des images de télédétection. Malgré la correction de celui-ci des effets atmosphériques, il dépend de l'effet bidirectionnel et de l'altitude du terrain qui engendrent, entre autres, des variations de la diffusion et de l'absorption dans l'atmosphère (Running *et al.*, 1992). Ces chercheurs ont montré que l'effet de la topographie augmente sur le NDVI au fur et à mesure que la densité du couvert diminue. Pour une végétation standard et des excellentes conditions atmosphériques, l'erreur moyenne causée par le relief sur le NDVI dérivé des données AVHRR est de 0,79 % par 100 mètres d'altitude, alors que pour une végétation éparse l'erreur moyenne est de l'ordre de 2,7 % par 100 mètres d'altitude (Teillet et Staenz, 1992). D'après (Burgess *et al.*, 1995), l'erreur causée par l'effet de la topographie sur le NDVI peut atteindre 16 % sous un angle d'éclairement solaire de 55°.

2.3.5. Les effets bidirectionnels

La géométrie d'éclairement et de visée des capteurs satellitaires et aéroportés exerce un effet bidirectionnel remarquable sur les mesures de réflectance des surfaces naturelles, surtout pour les capteurs à grand angle de visée (Asrar *et al.*, 1985; Qi, 1993). Cette variation de la géométrie d'acquisition et d'éclairement est appelée la fonction de réflectance bidirectionnelle ou en

anglais la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Puisque les surfaces terrestres ne sont pas des surfaces lambertiennes, les effets bidirectionnels sur le calcul des indices de végétation doivent être pris en considération. Entre autres, la combinaison des effets de la BRDF aux effets atmosphériques et topographiques engendre de fortes distorsions radiométriques (Staenz *et al.*, 1983 et 1995; Kaufman *et al.*, 1997). Dans la littérature il existe différents modèles pour la correction des effets bidirectionnels (Suits, 1972; Franklin et Turner, 1992; Pinty et Verstraete, 1992; Roujean *et al.*, 1992), mais ceux-ci nécessitent des informations sur les couverts végétaux qui ne sont pas disponibles à partir des mesures de télédétection (hauteur du couvert par exemple). Toutefois, la prise en compte des effets de la BRDF lors des corrections radiométriques est très difficile du fait qu'ils impliquent la connaissance des objets présents sur l'image (Chen et Leblanc, 1997) alors qu'en général, c'est justement cette information que l'on désire tirer de l'image. Selon Bannari (1996), pour corriger ces effets sur les indices de végétation, il faut considérer les angles zénithal et azimutal du capteur. Mais puisque l'indice de végétation est symétrique autour du nadir (forme concave), seulement l'angle zénithal de visée est nécessaire (Qi, 1993). Lorsque ce dernier devient grand, la valeur de l'indice de végétation subit une grande variation, la valeur optimale de l'indice sera calculée pour un angle de visée dans une position nadirale (Qi *et al.*, 1994). L'indice de végétation pourra donc être corrigé des effets bidirectionnels d'une façon empirique par une simple considération du cosinus de l'angle de visée (Bannari, 1996). Néanmoins, cette correction empirique n'est pas valable pour les indices de type rapport, comme le NDVI, qui ne sont pas symétriques par rapport au nadir (Jackson et Huete, 1991). En outre, cette correction empirique reste valable seulement pour les capteurs à petits angles de visée et non pour les capteurs à grands angles de visée comme MODIS, AVHRR et VEGETATION. Bien entendu, ce problème n'est corrigible que de façon approximative car les effets bidirectionnels sont différents pour chaque type de couvert et qu'une scène est le plus souvent hétérogène. Toutefois, il est nécessaire au moins de réduire ces effets (Yuan, 1993) même si le défi est de taille compte tenu de l'état de l'avancement de la recherche dans ce type de correction.

2.3.6. Les résolutions spatiale et spectrale du capteur

2.3.6.1. La résolution spectrale du capteur

En télédétection, selon le domaine spectral utilisé, le rayonnement apporte différents renseignements sur la cible observée. Par exemple, les domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge informent surtout sur la structure physique du couvert ainsi que sur la composition chimique et la teneur hydrique du couvert, tandis que, l'infrarouge thermique et les micro-ondes passives apportent une connaissance sur les propriétés thermiques (Zagolski, 1994). En plus, dans un intervalle spectral donné, les filtres et les détecteurs sont uniques pour chaque instrument. Par conséquent, la réponse spectrale typique pour une bande spectrale particulière est fonction de la longueur d'onde, du détecteur et de la réponse du filtre.

Calculés à partir des données acquises sur la même cible avec des capteurs différents, les indices de végétation sont différents car les réponses des bandes sont différentes. Généralement, la valeur des indices de végétation diminue avec l'augmentation des largeurs de bandes du rouge et du proche infrarouge (Bannari *et al.*, 1995). D'après Teillet *et al.* (1997), la majeure partie du changement est attribuée à la largeur de la bande rouge. Plusieurs chercheurs ont démontré que les fines résolutions spectrales apportent un grand avantage pour le calcul et l'analyse des indices de végétation. Elles présentent un double avantage: d'une part, lorsqu'un couvert est moyennement dense les indices deviennent moins sensibles aux bruits des sols et de l'atmosphère et, d'autre part, lorsque le couvert est dense, ils augmentent significativement le signal issu du couvert végétal (Teillet et Staenz, 1992; Bannari *et al.* 1997).

2.3.6.2. La résolution spatiale du capteur

La capacité de détecter, identifier et surveiller les phénomènes à la surface de la terre avec les satellites de télédétection dépend en partie de la relation entre la résolution spatiale du capteur et la taille de la cible visée. Actuellement, une grande diversité de capteur est disponible. Ceux à haute résolution spatiale, présentent l'avantage d'avoir des pixels dont la dimension est souvent

compatible avec la taille des objets au sol. Ils sont utiles pour cartographier et surveiller en détail des petites surfaces. Cet avantage est contre balancé par une faible résolution temporelle ce qui limite le suivi des phénomènes rapidement variables comme la dynamique des couverts végétaux. Par contre, les instruments à faible résolution spatiale présentent l'avantage d'une couverture globale de notre planète une fois par jour (Kong et Vidal-Madjar, 1988). Ils permettent une acquisition continue d'un ensemble de données cohérentes et comparables entre elles et cela sur de longues périodes. Calculé à partir des données acquises au-dessus de la même cible mais avec des capteurs différents, l'indice de végétation ne peut avoir la même valeur. En effet, la nature du détail observé par chaque résolution spatiale est différente et, par conséquent, le degré de complexité de la mixture spectrale dans chaque pixel est variable en fonction de la résolution spatiale propre à chaque capteur. En outre, cet effet dépend de la nature de la couverture au sol et en particulier de l'ampleur spatiale des peuplements (Teillet *et al.*, 1997).

2.3.7. Les problèmes de la saturation et de la linéarité

Théoriquement, l'indice optimal doit fixer ses valeurs entre 0 et 1, respectivement, pour des sols nus et des couverts complètement denses. Or, du fait de toutes les perturbations discutées auparavant et à cause des problèmes soulevés, la linéarité n'est obtenue par aucun indice. Ce problème est partiellement attribué à une grande sensibilité à l'absorption de la chlorophylle dans le rouge qui sature très rapidement avec un couvert dense. Il risque d'être plus accentué dans le cas des indices de végétation développés pour des capteurs à bandes étroites comme MODIS (Huete *et al.*, 1999). Gitelson *et al.* (1996) montrent que la sensibilité mise en valeur sur les indices de végétation pourrait être réalisée en remplaçant une partie du canal rouge par le canal vert, qui demeure sensible à la chlorophylle à des concentrations élevées. Afin de combiner, les corrections de la saturation et ceux de l'atmosphère, ces auteurs ont proposé le GARI (*Green Atmospherically Resistant Vegetation Index*) (équation 2.14), qui utilise les réflectances apparentes des trois canaux du visible (bleu, rouge et vert) et celui du proche infrarouge. Afin d'établir une relation linéaire avec les paramètres biophysiques de surface, Roujean et Breon (1995), ont réalisé une simple renormalisation du NDVI en RDVI (*Renormalized Difference*

Vegetation Index)(équation 2.15). Quant au MSR (*Modified Simple Ratio*)(équation 2.16), c'est une version améliorée du RDVI pour l'extraction des paramètres biophysiques de la forêt boréale (Chen,1996).

$$GARI = \frac{\left\{ \rho_{PIR}^* - \left[\rho_{Vert}^* - \lambda (\rho_B^* - \rho_R^*) \right] \right\}}{\left\{ \rho_{PIR}^* - \left[\rho_{Vert}^* + \lambda (\rho_B^* - \rho_R^*) \right] \right\}} \quad (\text{eq.2.14})$$

$$RDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{\sqrt{\rho_{PIR} + \rho_R}} \quad (\text{eq.2.15})$$

$$MSR = \frac{\frac{\rho_{PIR} - 1}{\rho_R}}{\sqrt{\frac{\rho_{PIR}}{\rho_R} + 1}} \quad (\text{eq.2.16})$$

2.4. Conclusion

Les indices de végétation sont des modèles empiriques ou semi-empiriques simples. Ils n'exigent aucune information supplémentaire autre-que les images corrigées et standardisées. Ils sont conçus pour mettre en évidence le signal du couvert végétal tout en réduisant au minimum la réponse des divers effets perturbateurs: effets atmosphériques, géométrie d'acquisition, étalonnage de capteur, propriétés optiques des sols sous-jacents, topographie de surface, linéarité et saturation, résolutions spatiale et spectrale propres au capteur.

À la lumière de cette étude bibliographique, nous remarquons que les effets perturbateurs internes et externes aux couverts, forment la principale source de leur variabilité. En raison de ces limitations, plusieurs nouveaux indices ont été proposés dans le but d'une meilleure

surveillance de la dynamique globale de la végétation. Afin d'atteindre cet objectif, les indices de végétation développés doivent satisfaire aux critères suivants :

- Pour une comparaison spatiale et temporelle standardisée, l'indice devrait normaliser ou éliminer les effets externes, tels que la géométrie d'observation et de visée, les effets atmosphériques (absorption et diffusion), les effets liés aux propriétés radiométriques des capteurs d'observations (étalonnage);
- L'indice devrait normaliser les variations des propriétés optiques des sols nus sous-jacents aux couverts;
- L'indice devrait être global pour une comparaison précise et uniforme des états de surface;
- Afin d'améliorer le degré de sensibilité des indices pour les différents taux de couverture au sol et pour faciliter leur validation, l'indice devrait être linéaire.

Chapitre III

Méthodologie et données de la recherche

3.1. Introduction

Le but de cette recherche est de faire la mise au point sur l'indice de végétation qui caractérise le mieux les couverts forestiers indépendamment des effets perturbateurs internes et externes aux couverts. Pour atteindre notre objectif, deux types de données ont été utilisés. Il s'agit de données spectroradiométriques acquises, d'une part, au-dessus d'un couvert forestier à différents degrés de défoliation cumulatives (0, 30, 50, 75 et 100%) et, d'autre part, au-dessus de plusieurs sols nus à différentes propriétés optiques (couleur, brillance et degré d'humidité). Ces données ont été intégrées dans le modèle de transfert radiatif 6S (*Seconde Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*) pour la simulation des réflectances apparentes en haut de l'atmosphère en considérant les différents effets perturbateurs. Dans ce chapitre, nous exposons les différentes étapes de la méthodologie de notre étude, nous résumons les caractéristiques de chacun des trois capteurs considérés, nous présentons le modèle de transfert radiatif 6S, ainsi que les données spectro-radiométriques utilisées.

3.2. La méthodologie de la recherche

La figure 3.1 décrit les différentes étapes de la méthodologie de la recherche. Dans une première étape, toutes les données spectro-radiométriques ont été rééchantillonnées dans les bandes spectrales homologues, visible et proche infrarouge, des trois capteurs MODIS, VEGETATION et AVHRR. Cette étape permet d'analyser le potentiel de la sensibilité des différents indices aux couverts forestiers à différents degrés de défoliation (problèmes de la linéarité et de la saturation), ainsi que leur pouvoir discriminant des propriétés optiques des sols nus sous-jacents. Les réflectances rééchantillonnées ont été intégrées dans le modèle de transfert radiatif 6S. En outre, celui-ci a été alimenté par les réponses spectrales des filtres propres à chacune des bandes spectrales des trois capteurs.

L'étape suivante consiste à simuler les réflectances apparentes aux capteurs dans les différentes bandes spectrales en considérant différentes densités du couvert forestier et en variant les conditions de simulation de l'atmosphère, de la géométrie d'acquisition et de visée, de la résolution spectrale et de la topographie (figure 3.1). Quant à la dernière étape, elle a pour but d'analyser le potentiel de chacun des indices de végétation vis-à-vis des effets mentionnés ci-dessus.

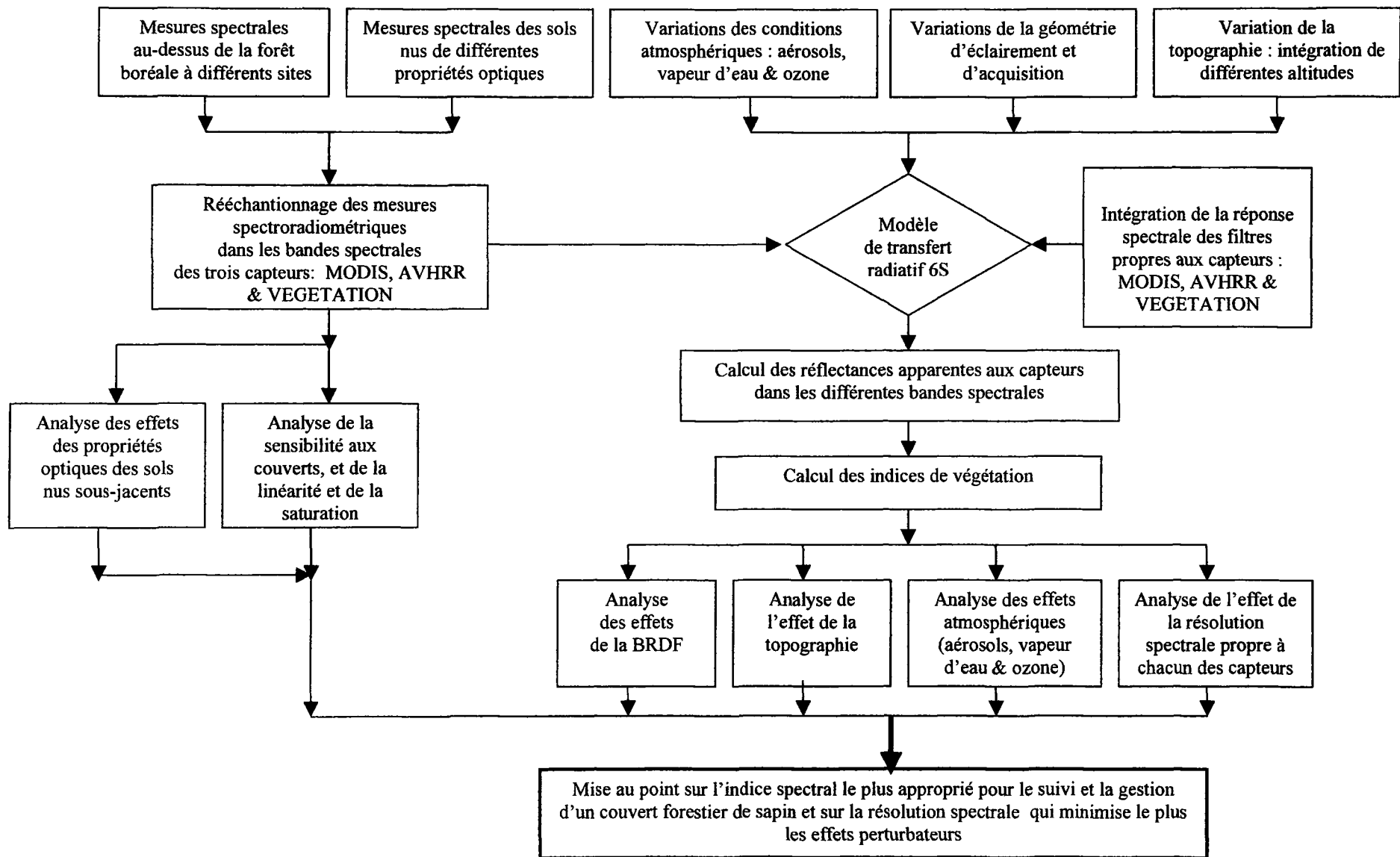


Figure 3.1 : Organigramme des étapes méthodologiques

3.2.1. Le site d'étude

L'étude est réalisée dans une région forestière de l'île du Cap Breton en Nouvelle-Écosse (46°44'N, 60°40'O) (Figure 3.2). Le site est de 130 kilomètres par 90 kilomètres de large autour de Prince Albert. La partie occidentale du site est dans le Parc National du Prince Albert et la région orientale fait partie de la forêt provinciale. Le site d'étude est une zone expérimentale utilisée depuis 1976 par le centre canadien de télédétection pour la mise au point de techniques de télédétection servant à évaluer la défoliation due à la tordeuse des bourgeons d'épinette (Teillet *et al.*, 1985; Leckie *et al.*, 1988). Le site se compose principalement de peuplements purs de sapin baumier (*Abies balsamea*) à différents stades de maturité. Le climat est de type maritime et humide, les températures assez variables, la présence du brouillard et assez variable d'une saison à l'autre durant l'année. La couleur du sol varie du gris au noir et l'altitude de la région varie entre 550 m et 730 m.

3.2.2. Données spectroradiométriques du couvert végétal

Dans cette étude, nous avons utilisé des spectres mesurés, au nadir, au-dessus des sapins baumiers à différents degrés de défoliation cumulative : 0, 30, 50, 75 et 100 % (Figure 3.3). L'âge des arbres considérés varie de 30 à 35 ans, la hauteur de sept à huit m, et le diamètre de la couronne varie de 2 à 3 m. Les spectres ont été mesurés en septembre, quand la végétation herbacée sous-jacente au couvert forestier est en phase de sénescence. Ainsi, toute végétation photo-synthétique active a été enlevée au-dessous des arbres mesurés. Les données ont été acquises à cinq m au-dessus des arbres à l'aide d'un spectroradiomètre portable GER-2100. Celui-ci opère dans les domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge, soit des longueurs d'onde allant de 0,39 à 2,5 μm . Les mesures ont été effectuées avec une résolution spectrale de 10 nm entre 0,39 et 1,0 μm et de 24 nm dans l'intervalle 1,0 – 2,5 μm . Pour tenir compte de l'effet bidirectionnel de la réflectance de la cible, les mesures ont été effectuées autour de l'heure zénithale suivant une direction de visée verticale. Du fait que le GER mesure la luminance de la cible et qu'on ne connaît pas l'éclairement (direct et diffus) reçu par cette cible, pour chaque mesure les luminances totale et diffuse ont été mesurées simultanément, la cible et

la surface de référence (spectralon). Cela a permis de calculer le facteur de réflectance de la cible conformément à la méthode décrite par Jackson *et al.* (1980).

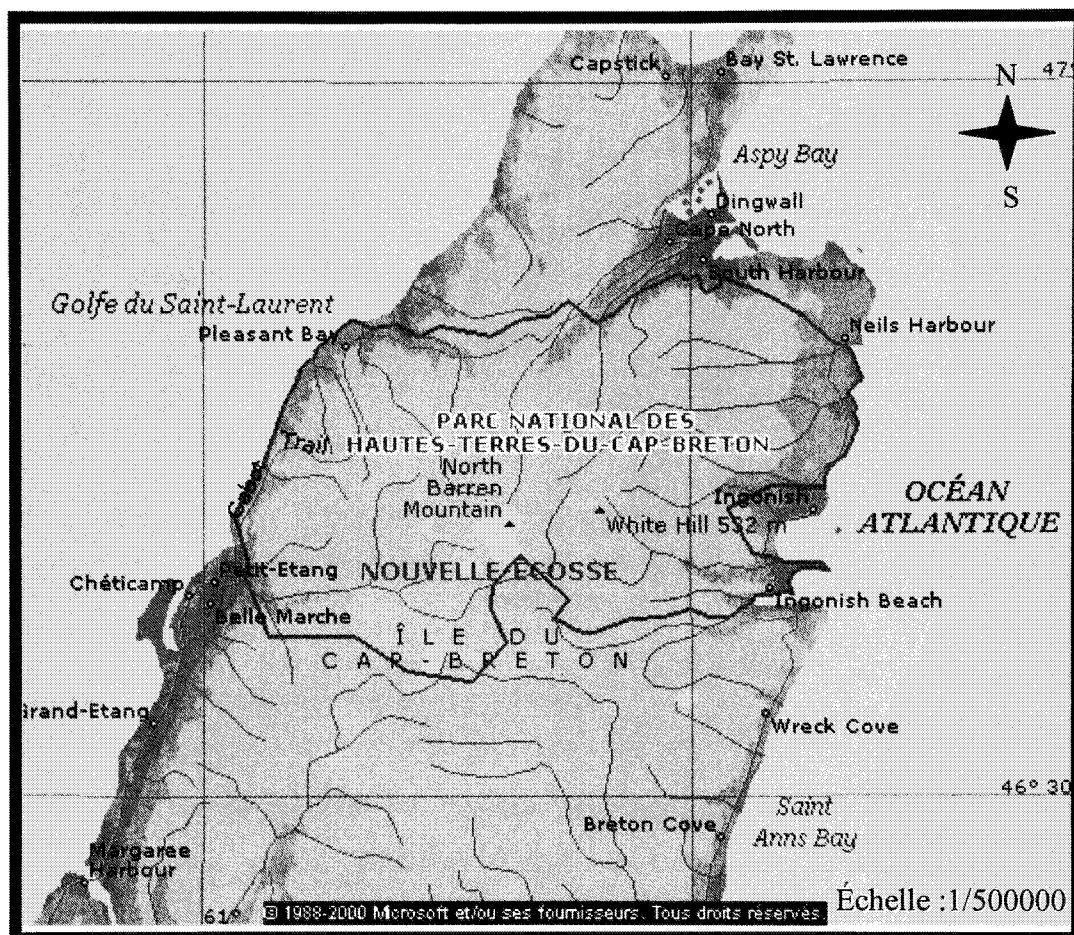


Figure 3.2 : Emplacement du site d'étude (Atlas mondial Encarta 2001)

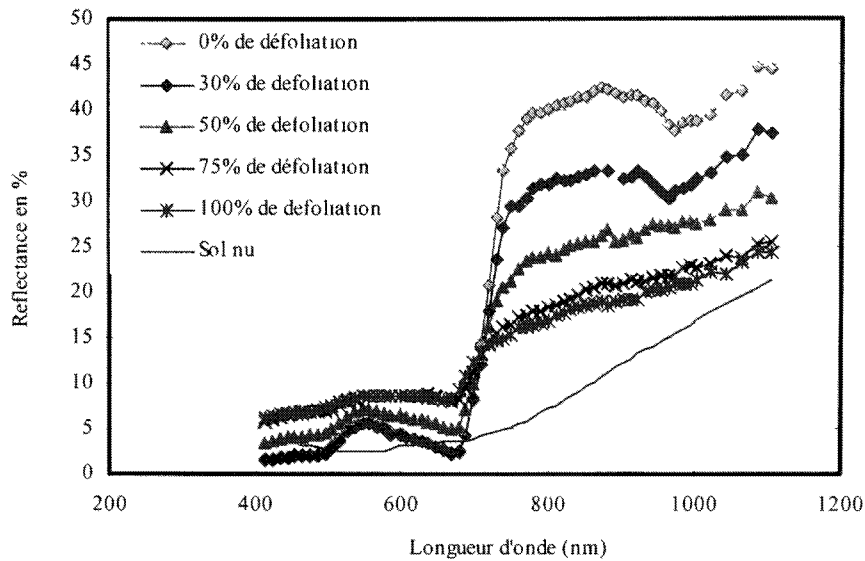


Figure 3.3 : Spectres du couvert forestier de sapin baumier à différents degrés de défoliation cumulative

3.2.3. Données spectroradiométriques des sols nus

Par ailleurs, nous avons exploité les spectres de plusieurs sols nus mesurés au-dessus de différents types de sols (argile, sable fin) de couleurs et brillances différentes, et à différents degrés d'humidité (humide, moyennement humide, sec et très sec) et de rugosité (rugueux, moyennement rugueux et lisse). Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 résument les caractéristiques des différents échantillons retenus. Les mesures ont été effectuées au nadir autour de l'heure zénithale à l'aide du GER-2100. Le spectroradiomètre était installé sur une potence à une hauteur de 1,5 m du sol permettant d'observer, en visée verticale, une surface d'environ 25x13 cm². Comme nous avons expliqué ci-dessus, le facteur de réflectance a été calculé selon la méthode de Jackson *et al.* (1980).

Tableau 3.1 : Résumé des caractéristiques et des conditions de surface du premier groupe de sols utilisés avec une forte brillance (voir signatures spectrales à la figure 4.1)

Numéro de l'échantillon	Type de sol	Conditions de surfaces	
		Humidité	rugosité
1	Argile	Humide	Rugueux
2			Moyenne
3			Lisse
4		Moyenne	Rugueux
5			Moyenne
6			Lisse
7		Sèche	Rugueux
8			Moyenne
9			Lisse
10	Sable fin	Humide	Rugueux
11			Lisse
12		Moyenne	Rugueux
13			Lisse
14		Sèche	Rugueux
15			Lisse

Tableau 3.2 : Résumé des caractéristiques du deuxième groupe de sols utilisés avec une brillance moyenne (voir signatures spectrales à la figure 4.2)

Numéro de l'échantillon	Type de sol	Degré d'humidité
16	Argile	Très humide
17		Humide
18		Moyennement humide
19		Peu humide
20		Sec
21		Très sec
22	Argile + sable	Humide
23		Moyennement humide
24		Sec
25		Très sec
26	Sable	Très humide
27		Humide
28		Moyennement humide
29		Peu humide
30		Sec
31		Très Sec

Tableau 3.3 : Résumé des caractéristiques du troisième groupe de sols utilisés avec une faible brillance (voir signatures spectrales à la figure 4.3)

Numéro de l'échantillon	Type de sol	Conditions de surfaces	
		Humidité	Rugosité
32	Argile	Humide + sombre	rugueux
33	Argile	Humide + sombre	Moyennement rugueux
34	Grés	Humide	rugueux
35	Grés	Humide	Lisse
36	Grés	Sec	Moyennement rugueux
37	Sable	Moyennement humide	Lisse
38	Sable	Humide	Rugueux
39	Argile	Peu humide	Rugueux
40	Argile	Peu humide	Lisse
41	Argile + sable	Moyennement humide	lisse
42	Argile + sable	Sec	Rugueux
43	Silice	Sec	Rugueux
44	Silice	Sec	Lisse

3.2.4. Les capteurs satellitaires

3.2.4.1. Le capteur MODIS-EOS

Installé à bord du satellite TERRA par la NASA, MODIS-EOS est un spectroradiomètre imageur électro-optique qui a été mis au point pour prendre la relève des capteurs AVHRR de la série NOAA (NASA, 1986). Le but de ce capteur est de fournir des informations précises sur les interactions entre le rayonnement électromagnétique, la chimie de l'atmosphère, les surfaces océaniques et les couverts végétaux afin de bien comprendre l'impact des changements climatiques sur les différents écosystèmes de notre planète. Chaque jour, MODIS couvre la totalité de la planète dans 36 bandes spectrales (de 0,4 à 14 μm) sous trois résolutions spatiales différentes (250, 500 et 1000 m) en couvrant une trace au sol de 2330 km, et avec des angles d'observation qui varient entre $\pm 55^\circ$ (NASA, 2000). Parmi ces 36 canaux, seulement ceux du visible (bleu, vert et rouge) et du proche infrarouge ont été considérés dans cette étude. Comparativement aux deux autres capteurs (AVHRR et VEGETATION) ses quatre canaux se caractérisent par une fine résolution spectrale, 20 et 30 nm dans le visible et l'infrarouge, respectivement (Tableau 3.4). La figure 3.4 illustre les fonctions de réponses spectrales typiques des filtres des quatre canaux (visible et proche infrarouge) du capteur MODIS-EOS.

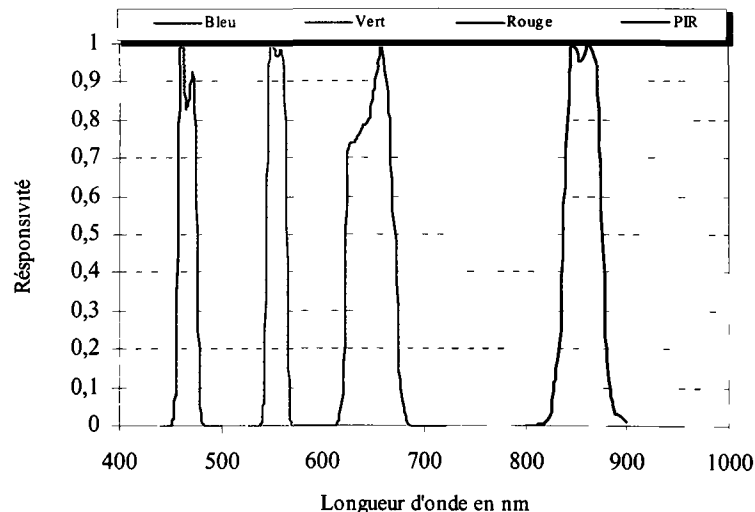


Figure 3.4 : Réponses spectrales des filtres de quatre canaux (rouge, bleu, vert et proche infrarouge) du capteur MODIS-EOS (NASA, 2000)

Tableau 3.4 : Résumé des caractéristiques du capteur MODIS-EOS

Caractéristiques spectrales			
Capteur	Bandes spectrales	Longueur d'onde en nm	$\Delta\lambda$ en nm
MODIS	Bleu	459-479	20
	Vert	545-565	20
	Rouge	620-670	50
	Proche infrarouge	841-876	35
Autres caractéristiques			
Altitude nominale	: 700 km		
Inclinaison	: $\pm 55^\circ$		
Résolution spatiale	: 250,500 & 1000 m au nadir		
Trace au sol	: 2330 km		

3.2.4.2 Le capteur VEGETATION-SPOT

Sous la supervision du Centre national des études spatiales (CNES), le capteur VEGETATION a été développé dans le cadre d'un partenariat entre la France, la Belgique, la Suède et la Commission européenne. L'instrument VEGETATION est destiné spécialement au suivi de la végétation, notamment dans les domaines de l'agriculture, de la foresterie et de la surveillance de l'environnement terrestre à l'échelle du globe. Il permet d'assurer un suivi continu, régional et global de la biosphère continentale et des cultures. Avec un angle maximal d'observation de $\pm 50,5^\circ$, VEGETATION assure une résolution spatiale d'environ 1,15 km au nadir et permet d'obtenir une trace au sol d'environ 2250 km (CNES, 1995) ce qui lui permet un accès quasi quotidien à l'ensemble du globe (plus de 90 %, les 10 % restant étant couverts le lendemain). Afin d'améliorer la caractérisation des couverts végétaux, le capteur VEGETATION est doté d'une bande du moyen infrarouge et d'une bande dans le bleu qui permet une autocorrection des effets atmosphériques. Parmi ces bandes, nous allons utiliser celles du visible (rouge, bleu) et du proche infrarouge. Le tableau 3.5 résume les caractéristiques spectrales des trois bandes qui seront considérées dans l'étude et expose les principales caractéristiques du capteur. Contrairement au capteur MODIS, la résolution spectrale des bandes de VEGETATION est

moyenne dans le visible et large dans le proche infrarouge. La figure 3.3 illustre l'allure des réponses spectrales typiques des filtres des trois canaux sélectionnés du système VEGETATION.

Tableau 3.5 : Résumé des caractéristiques du capteur VEGETATION-SPOT

Caractéristiques spectrales			
Capteur	Bandes spectrales	Longueurs d'onde en nm	$\Delta\lambda$ en nm
VEGETATION	Bleu	430-470	40
	Rouge	610-680	70
	Proche infrarouge	780-890	110
Altitude nominale		: 851km	
Inclinaison		: $\pm 50.5^\circ$	
Résolution spatiale		: 1.15 km au nadir	
Trace au sol		: 2250 km	

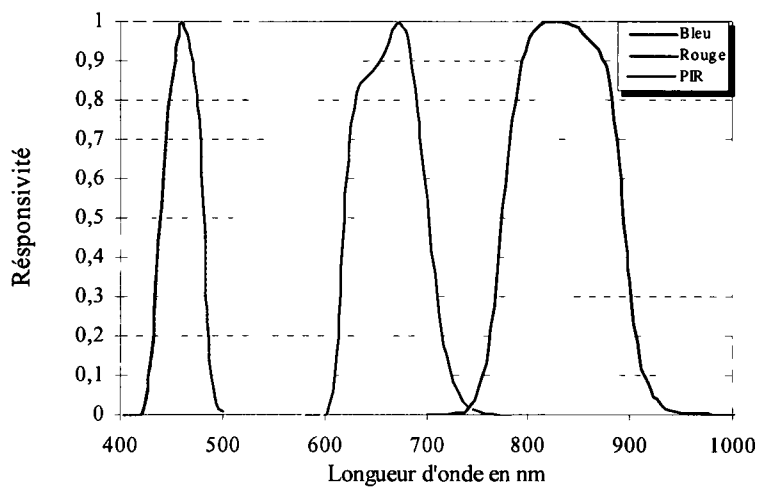


Figure 3. 5 : Réponses spectrales des filtres des canaux (bleu, rouge et proche infrarouge) du capteur VEGETATION de SPOT(CNES, 1995)

3.2.4.3 Le capteur AVHRR

L'instrument "*Advanced Very High Resolution Radiometer*" est embarqué sur le satellite NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*), sur une orbite héliosynchrone quasi-polaire (inclinaison d'environ 100°) à une altitude nominale de 870 km. Le capteur AVHRR couvre la totalité de la planète sur une base hebdomadaire. Son objectif est de fournir des informations sur la couverture nuageuse (localisation, température et réflectance) et d'estimer la température de la surface de la mer. Entre autres, il est utilisé pour le suivi et la cartographie des ressources naturelles terrestres à l'échelle du globe. Il opère dans cinq bandes spectrales (rouge, proche infrarouge et infrarouge thermique). Avec un grand angle d'observation de $\pm 50,5^\circ$, le capteur assure une résolution spatiale de 1,1 km au nadir et une trace au sol d'environ 2500 km. Contrairement aux deux autres capteurs, AVHRR se caractérise par une large résolution spectrale de 100 et 375 nm dans le visible et l'infrarouge, respectivement (Tableau 3.6). La figure 3.4 montre les réponses spectrales typiques des filtres rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR.

Rappelons ici que l'indice de végétation calculé à partir des données obtenues sur la même cible, mais par des capteurs différents, ne peut avoir une valeur unique et standard à cause de la différence entre les fonctions de réponse spectrale propre à chaque bande et pour chaque instrument. En effet, les détecteurs et les filtres utilisés pour mesurer le rayonnement électromagnétique sont propres à chaque longueur d'onde et à chaque capteur. La fonction de réponse spectrale de chacune des bandes spectrales est une combinaison de la réponse du filtre et de celle des détecteurs. Par exemple, chacun des capteurs, MODIS, VEGETATION et AVHRR possède une bande dans le rouge et une bande dans le proche infrarouge, mais avec des réponses spectrales différentes. Par conséquent, cette différence entraîne un impact sur le calcul des indices de végétation (Slater, 1980 ; Jackson et Huete, 1991 ; Bannari *et al.*, 1999b). La figure 3.5 illustre la comparaison des bandes spectrales homologues (rouge, bleu et proche infrarouge) entre les trois capteurs : MODIS-EOS, VEGETATION-SPOT et AVHRR-NOAA.

Tableau 3.6 : Résumé des caractéristiques du capteur AVHRR-NOAA

Caractéristiques spectrales			
Capteur	Bandes spectrales	Longueurs d'onde en nm	$\Delta\lambda$ en nm
AVHRR	Rouge	580-680	100
	Proche infrarouge	725-1100	375
Autres caractéristiques			
Altitude nominale	: 851 km		
Inclinaison	: $\pm 50^\circ$		
Résolution spatiale	: 1,1 km au nadir		
Trace au sol	: 2000 km		

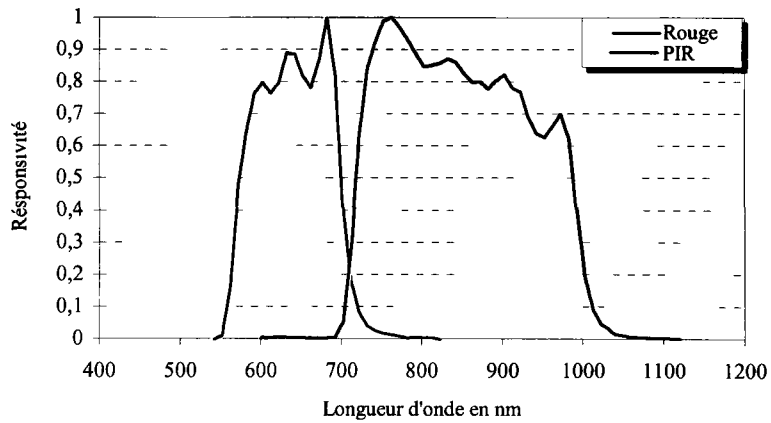


Figure 3.6 : Réponses spectrales des filtres rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR de NOAA (NASA, 2000)

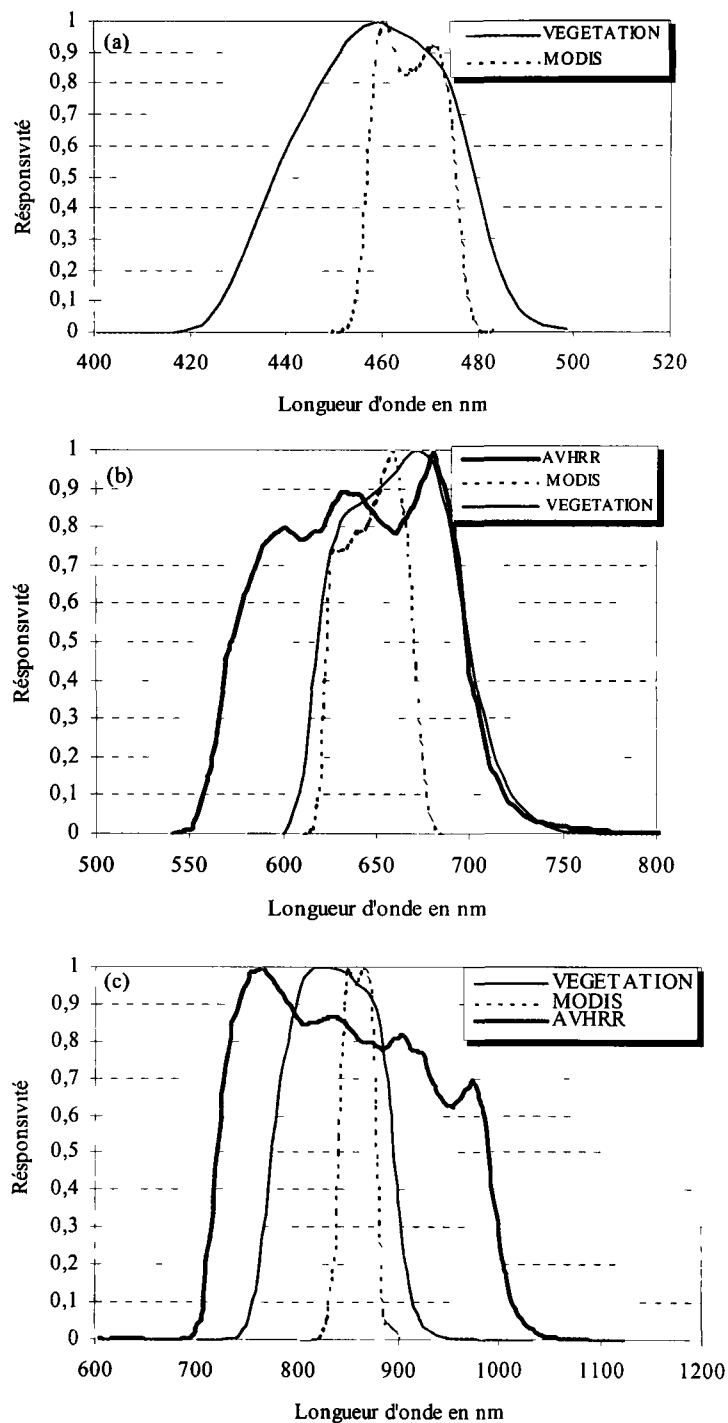


Figure 3.7 : Comparaison des réponses spectrales des filtres spectraux bande par bande des capteurs MODIS, AVHRR et VEGETATION (a: bleu, b: rouge, c: proche infrarouge)

3.5. Le modèle de transfert radiatif 6S

Mis au point par le Laboratoire d'optique atmosphérique (LOA) de Lille, France, le modèle de transfert radiatif 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*) a été développé pour étudier l'influence de l'atmosphère et de l'environnement sur le signal mesuré par les capteurs satellitaires (Tanré, 1982). C'est un modèle qui repose sur la supposition que l'atmosphère est homogène horizontalement et sans nuage et que le sol est lambertien et sans relief. Il tient compte de la diffusion par les molécules (Rayleigh), de la diffusion par les aérosols (Mie), et de la diffusion par les gaz (ozone, vapeur d'eau, oxygène, dioxyde de carbone) et par les aérosols. Il repose sur l'hypothèse que les phénomènes d'absorption par les gaz et ceux de la diffusion par les aérosols et les molécules sont indépendants (Royer *et al.*, 1988). Suite à de nombreuses études comparatives effectuées à l'aide de différents modèles de transfert radiatif (DOM, Dave, Lowtran-6, Turner, SMART et 5S) dans des conditions d'éclairement et de visées différentes et à plusieurs longueurs d'onde, Royer *et al.* (1988) et Chartier *et al.* (1989) recommandent fortement le modèle 5S pour la simulation et le calcul des paramètres atmosphériques en télédétection des ressources naturelles. Pour tenir compte de l'altitude du capteur et de la topographie de la surface du sol par rapport au niveau de la mer, Teillet et Santer (1991) ont modifié le modèle 5S en H5S, 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 gaz (CH₄, N₂O, CO), de la diffusion d'ordre multiple et des cibles non lambertiennes; ainsi que le 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. Le modèle 6S est utilisable pour différentes conditions géométriques, spectrales, atmosphériques et de surface. L'utilisateur choisit lui-même les paramètres d'entrée de façon à restituer au mieux la réalité qu'il souhaite simuler. Actuellement, 6S est le modèle de transfert radiatif le plus utilisé par la NASA et par le CNES pour la conception de nouveaux capteurs optiques, et pour l'étude et l'analyse de l'impact des effets atmosphériques et topographiques sur les données de télédétection (Vermote *et al.*, 1997).

3.5.1 Conditions de simulation

Le modèle de transfert radiatif 6S a été utilisé pour toutes les simulations. Chaque fois que nous cherchons à mettre en évidence l'impact d'un effet, nous considérons nuls tous les autres effets. En outre, pour chaque simulation, nous avons considéré les trois capteurs et les différentes conditions de surface : un sol nu et un couvert forestier à différents degrés de défoliation cumulative (0, 30, 50, 75 et 100 %).

Pour mettre en évidence l'effet de la diffusion atmosphérique, nous avons fixé l'angle d'observation dans la direction du nadir, alors que celui d'éclairement correspond à un angle solaire de 45° avec un angle azimutal relatif de 30° . Le modèle atmosphérique US-standard 1962 et le modèle d'aérosol continental dont la concentration est exprimée en terme de visibilité ont été retenus pour le modèle 6S. Les visibilités considérées sont égales à 10, 15, 25, 50 et 100 km. Pour simuler les effets de l'absorption, nous avons retenu le même modèle atmosphérique mais sans aérosol en variant séparément la concentration en vapeur d'eau (0,5; 3; 6 et 8 g.cm^{-2}) et en ozone. Les concentrations d'ozone utilisées sont relatives aux zones suivantes : tropicale (0,247 g.cm^{-2}), subarctique d'été (0,346 g.cm^{-2}), latitude moyenne en hiver (0,395 g.cm^{-2}) et subarctique en hiver (0,48 g.cm^{-2}). Nous avons cherché à mettre en évidence uniquement les effets de la diffusion et d'absorption atmosphériques en admettant que tous les autres effets étaient nuls (tableau 3.7). L'annexe A montre un exemple de out-put du modèle de simulation 6S.

L'effet de la topographie a été simulé en considérant la même géométrie d'acquisition et d'observation et les mêmes modèles d'atmosphère et d'aérosols. Nous avons varié d'une part, la visibilité atmosphérique (10, 25 et 100 km) et, d'autre part, la topographie en considérant différentes altitudes par rapport au niveau moyen de la mer : 500, 700, 1000, 1500, 2000 et 2500 m (tableau 3.8). En conservant les mêmes conditions de simulation et en fixant l'altitude du terrain à 500 m, nous avons quantifié l'effet de la géométrie d'acquisition (en variant l'angle de visée entre $+50^\circ$ et -50°) en fonction de trois visibilités atmosphériques (10, 25 et 100 km) (tableau 3.9).

**Tableau 3.7 : Conditions de simulation des effets atmosphériques
(absorption (O₃ et H₂O) et diffusion)**

Données d'entrée au modèle de transfert radiatif 6S	
Élévation du terrain	0,5 km
Angle zénithal solaire	45°
Angle zénithal d'observation	0°
Angle azimutal relatif	30°
Modèle atmosphérique	US standard 1962
Modèle des aérosols	Continental (sans aérosol pour l'absorption)
Conditions atmosphériques de diffusion	Visibilité variable (10, 15, 25, 50 et 100 km)
Conditions atmosphériques d'absorption par H ₂ O	Concentration variable (0,5; 3; 6 et 8 g.cm ⁻²)
Conditions atmosphériques d'absorption par O ₃	Concentration variable (0,247; 0,346; 0,395 et 0,48 g.cm ⁻²)
Bandes spectrales	Bandes 1 et 2 de AVHRR Bandes 1, 2 et 3 de VEGETATION Bandes 1, 2, 3 et 4 de MODIS
Conditions de surface	0 % (sol nu), 30, 50, 75 et 100 % de défoliation

Tableau 3.8 : Conditions de simulation des effets topographiques

Données d'entrée au modèle de transfert radiatif 6S	
Élévation du terrain	Variable en m (0, 250, 500, 700, 1000, 1500, 2000 et 2500)
Angle zénithal solaire	45°
Angle zénithal d'observation	0°
Angle azimutal relatif	30°
Modèle atmosphérique	US standard 1962
Modèle des aérosols	Continental
Conditions atmosphériques de diffusion	Variable (10, 25 et 100 km)
Bandes spectrales	Bandes 1 et 2 de AVHRR Bandes 1, 2 et 3 de VEGETATION Bandes 1, 2, 3 et 4 de MODIS
Conditions de surface	0 % (sol nu), 30, 50, 75 et 100 % de défoliation

Tableau 3.9 : Conditions de simulation des effets de la BRDF

Données d'entrée au modèle de transfert radiatif 6S	
Élévation du terrain	0,5 km
Angle de visée	-50, -40, -20, 0, 20, 40 et 50 (en degrés)
Angle solaire	45°
Longitude	60°40' ouest
Latitude	46°44' nord
Modèle atmosphérique	US standard 1962
Modèle d'aérosol	Continental dans le 6S
Bandes spectrales	Bandes 1 et 2 de AVHRR Bandes 1, 2 et 3 de VEGETATION Bandes 1, 2, 3 et 4 de MODIS
Conditions de surface	0 % (sol nu), 30, 50, 75 et 100 % de défoliation

3.5.2 Choix des indices de végétation

D'après Jackson *et al.*, (1983), l'indice de végétation '*idéal*' devait être sensible aux couverts végétaux, insensible aux propriétés optiques des sols nus sous-jacents (couleur, brillance, humidité et rugosité), indépendant des caractéristiques spatiales et spectrales propres aux capteurs, ne sature pas assez rapidement, peu affecté par les effets atmosphériques (absorption par les gaz et par la vapeur d'eau, et la diffusion par les aérosols et par les molécules), normalise bien la dégradation radiométrique du capteur, l'effet de l'environnement ainsi que les conditions d'éclairage et d'observation. Ces effets interviennent simultanément au cours des mesures *in situ* et au moment de l'acquisition des images satellitaires et aéroportées. Bien qu'il existe plus de cinquante modèles d'indice de végétation dans la littérature (Bannari *et al.*, 1995), 13 ont été choisis dans cette thèse. Ce sont des indices de végétation basés sur des hypothèses plausibles de minimiser les effets perturbateurs et de mieux rehausser le signal issu du couvert végétal. Il s'agit

du NDVI comme étant l'un des premiers indices de végétation développés, et l'indice à partir duquel tous les autres indices de végétation ont été développés. Les indices PVI, TSAVI, SAVI, MSAVI et OSAVI ont été choisis pour minimiser les effets des propriétés optiques des sols nus. Les indices ARVI et GEMI pour minimiser les effets atmosphériques. Quant aux indices EVI et TSARVI, ils combinent la correction des effets atmosphériques et celle des variations des propriétés optiques des sols nus. Alors que les indices GARI, MSR et RDVI, ont été mis au point pour résoudre les problèmes de la saturation et de la linéarité.

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de faire la mise au point sur l'indice de végétation qui caractérise le mieux le couvert forestier indépendamment des perturbations internes (couleur, brillance et humidité des sols nus sous-jacents au couvert) et externes d'ordre physique (topographie, atmosphère, géométrie de visée, résolution spectrale et les problèmes de la saturation et de la linéarité). En outre, nous analysons l'apport de la fine résolution spectrale pour minimiser ces effets perturbateurs et bien rehausser le signal issu du couvert végétal. Seuls les indices conçus dans le but de minimiser les effets perturbateurs ont été retenus. L'analyse des résultats est basée sur l'erreur relative qui est calculée par rapport à la vérité du terrain (mesures au sol) en considérant l'effet de chacun des éléments perturbateurs.

4.2. Analyse des résultats

4.2.1. Analyse de l'impact des propriétés optiques des sols nus sous-jacents

Afin d'analyser la sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des 44 échantillons de sol nus sélectionnés, nous avons rééchantonné les données spectrales de sols dans les bandes appropriées pour les trois capteurs AVHRR, VEGETATION & MODIS. Le premier groupe comprend des sols très brillants; alors que le deuxième et troisième groupes regroupent des sols de brillance moyenne et faible, respectivement. Les courbes des figures 4.1, 4.2 et 4.3 illustrent les différentes signatures spectrales des échantillons étudiés. L'examen de ces spectres montre que la réflectance des sols croît progressivement du visible au proche infrarouge, avec une petite inflexion dans le vert et une forte absorption dans le bleu. Nous constatons également, dans le visible comme dans le proche infrarouge, une différence nette et significative entre les formes de ces courbes. Cette différence est attribuée à la forte différence entre les propriétés optiques des paramètres de surface (couleur, brillance, rugosité, humidité et composition minéralogique). Nous remarquons, que les sols secs et de couleur claire sont plus réfléchissants que ceux humides et sombres, ce qui concorde avec les travaux de Escadafal et Huete (1991), Baret *et al.* (1993), et Bannari (1996).

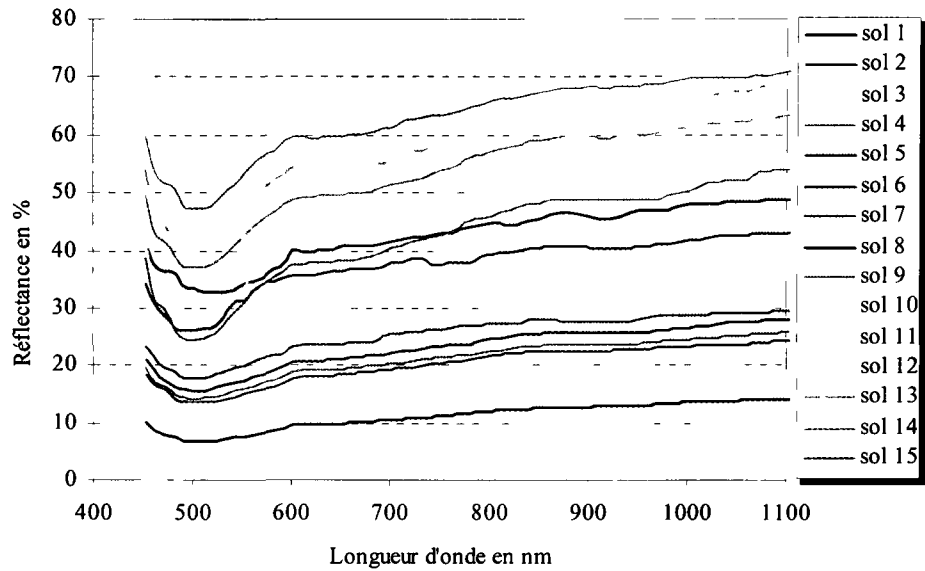


Figure 4.1 : Spectres mesurés des échantillons du premier groupe de sol nu à forte brillance

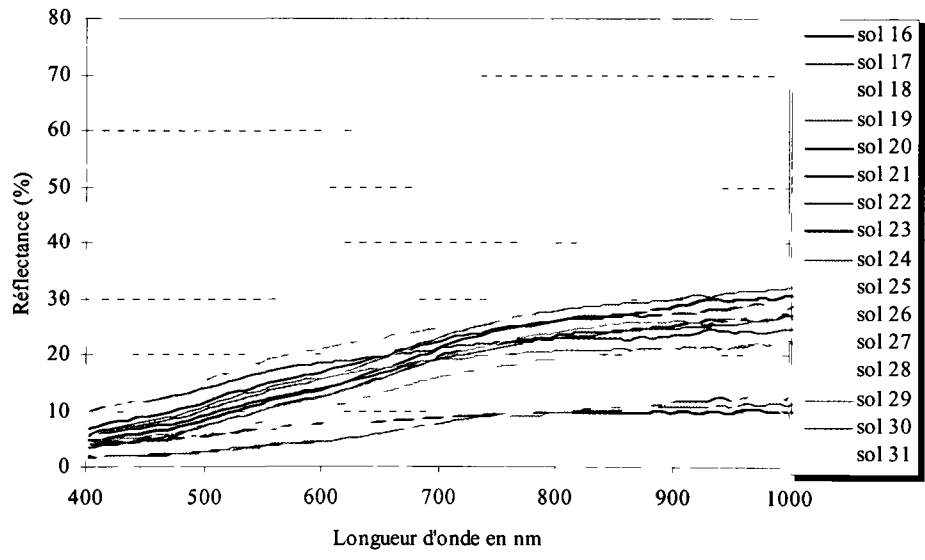


Figure 4.2 : Spectres mesurés des échantillons du deuxième groupe de sol nu à brillance moyenne

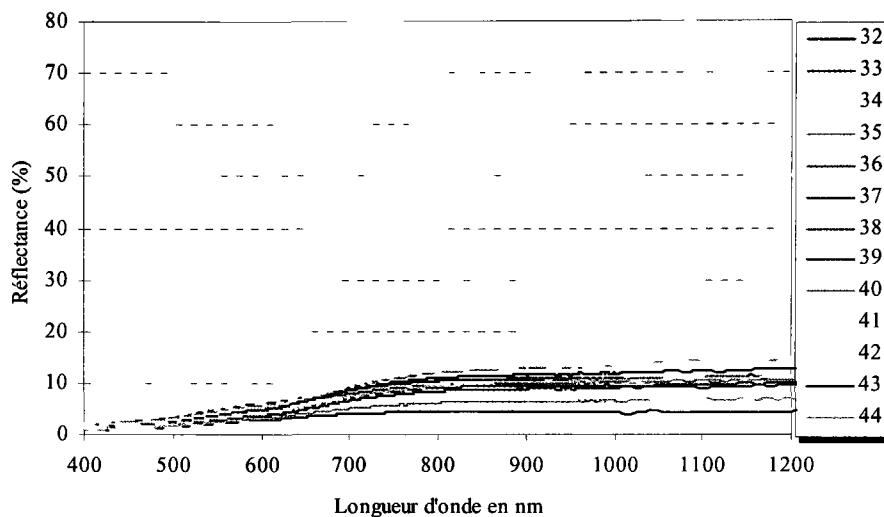


Figure 4.3 : Spectres mesurés des échantillons du troisième groupe de sol nu à faible brillance

Théoriquement l'indice de végétation mesure la densité du couvert végétal indépendamment des propriétés optiques des sols nus. Selon cette hypothèse, en l'absence de végétation, l'indice doit avoir une valeur nulle indépendamment de la nature, de la couleur et de la brillance du sol. Graphiquement, dans un espace rouge versus indice de végétation, cette condition est remplie lorsque le nuage de points s'approche de la ligne théorique des sols nus (Bannari *et al.*, 1996). En effet, le degré de sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus peut être évalué par la distance entre ce nuage de points et cette ligne théorique : un indice est d'autant plus efficace que la distance est faible.

Pour calculer la pente et l'origine de la droite des sols nus nécessaires pour les indices PVI, TSAVI nous avons considéré tous les échantillons étudiés, dans un espace spectral rouge proche infrarouge (R-PIR) (figure 4.4.a, b et c). Alors que pour le TSARVI, nous avons considéré tous les échantillons de sols nus dans un espace spectral rouge-bleu proche infrarouge (RB-PIR) (figure 4.4.d). Le tableau 4.1 résume les paramètres de la droite des sols nus, pente et ordonnée à l'origine, calculés pour chaque capteur.

Tableau 4.1 : Résumé des paramètres de la droite des sols nus pour chacun des capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS

	AVHRR	VEGETATION		MODIS	
	R-PIR	R-PIR	RB-PIR	R-PIR	RB-PIR
Pente	1,1236	1,0942	1,0559	1,1140	1,0585
Ordonnée à l'origine	0,0399	0,0335	0,0119	0,0350	0,0231

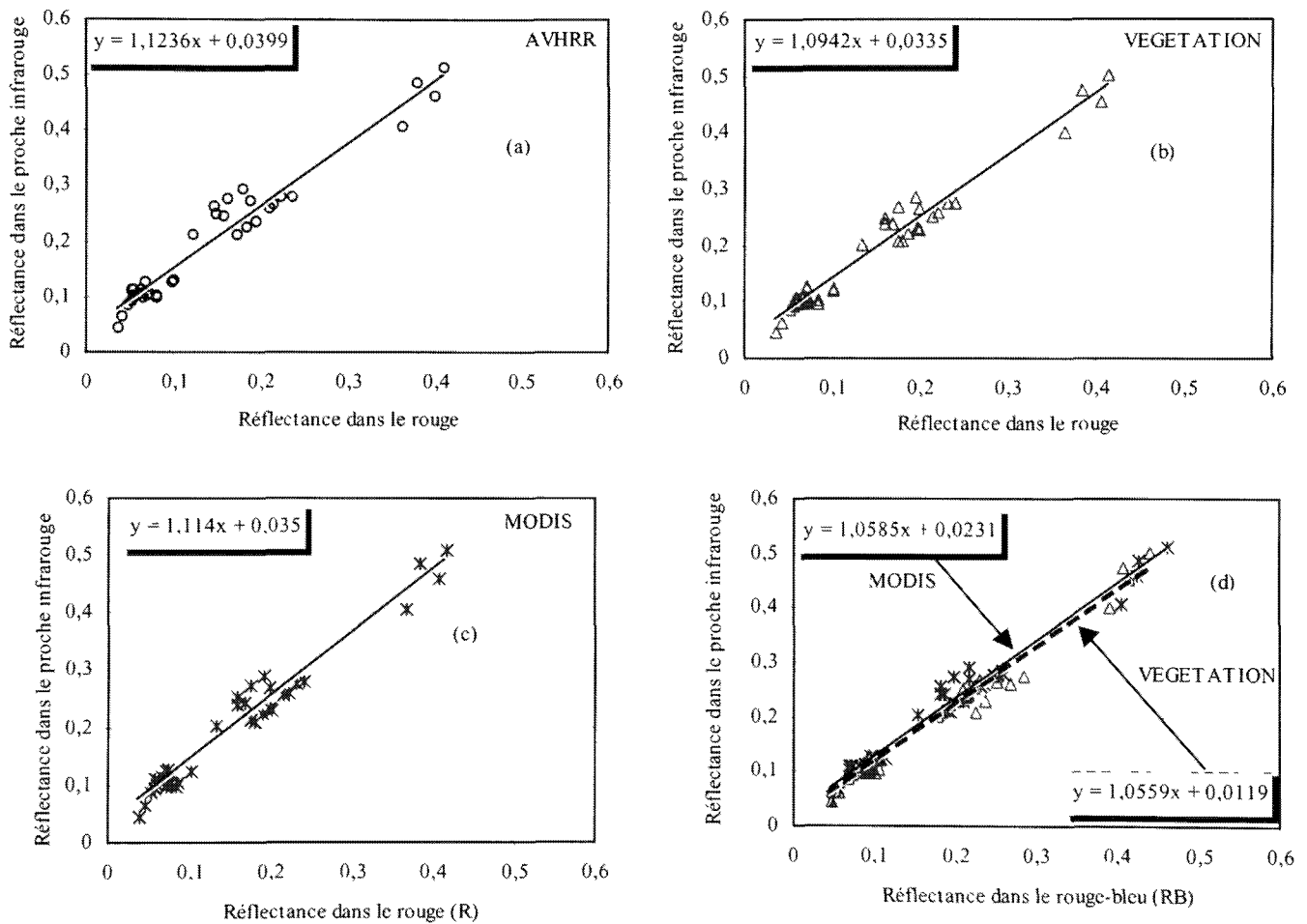


Figure 4.4 : Droite des sols nus dans l'espace spectral Rouge/Proche InfraRouge et Rouge-Bleu/Proche InfraRouge

Bien qu'il soit mis au point spécialement pour le capteur AVHRR, nous trouvons très intéressant dans cette étude d'analyser le potentiel de l'indice GEMI pour la normalisation de l'effet des sols

en utilisant les données issues des capteurs MODIS et VEGETATION. L'analyse des résultats montre que le GEMI est l'indice le plus sensible aux propriétés optiques des sols nus (figure 4.5.a). Pour AVHRR, l'erreur relative causée par le bruit des sols est de l'ordre de 36 %. Cette erreur reste relativement la même pour les deux autres capteurs. Comme déjà mentionné dans différents travaux antérieurs (Qi et *al.*, 1994; Rondeaux et *al.*, 1996; Bannari et *al.*, 1996, 1997 et 2000), dans le cas d'un sol sec, brillant et de couleur claire l'erreur sur cet indice peut atteindre 60 % indépendamment de la résolution spectrale du capteur.

L'indice MSR présente aussi une grande sensibilité aux propriétés optiques des sols nus (figure 4.5.b), qui est presque similaire à celle du GEMI. Dans le cas du capteur AVHRR, l'erreur moyenne causée par les artefacts des sols étant de l'ordre de 33 %. Cette valeur est relativement moins forte pour les résolutions spectrales moyenne et fine de VEGETATION et MODIS, soit une erreur moyenne de 27 % et 29 %, respectivement, pour les deux capteurs. Dans le cas d'un sol brillant et sec, l'erreur peut atteindre également 60 %. L'analyse de la figure 4.5.b montre que la fine résolution spectrale minimise relativement l'effet des sols sur cet indice. En effet, lorsque les sols sont clairs et secs, nous constatons un apport significatif de la contribution de la fine résolution spectrale de MODIS par rapport à la large résolution de AVHRR du fait que l'erreur relative diminue d'environ 15 % dans le cas du MSR.

Quant à l'indice le plus populaire et le plus utilisé dans la littérature, le NDVI, lorsque nous considérons les 44 sols, l'erreur relative moyenne est de l'ordre de 20 %, 18 % et 17%, respectivement, pour AVHRR, MODIS et VEGETATION (Figure 4.5.c). Comparativement aux données issues du capteur AVHRR, l'erreur relative diminue d'environ 3 % lors de l'exploitation des données du capteur MODIS ou VEGETATION, ce que nous jugeons insignifiant comme amélioration. Notons ici que si nous considérons seulement les données relatives aux sols humides et sombres, l'erreur relative moyenne sur le NDVI ne dépasse pas 10 %. En exploitant les données images du capteur TM de Landsat, Bannari (1996) a souligné une erreur du même ordre de grandeur et presque les mêmes conclusions. Toutefois, si nous tenons compte uniquement des sols brillants, cette erreur atteint facilement 40 % à cause de la couleur claire et de la forte brillance des sols.

Étant donné que parmi les trois capteurs, seul le capteur MODIS possède le canal vert, l'indice GARI est considéré seulement dans le cas de ce capteur. Calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique " $\gamma = 1,7$ " comme décrit par ses auteurs (Gitelson et *al.*, 1996), cet indice présente une bonne amélioration par rapport au NDVI, tout en demeurant sensible aux propriétés optiques des sols nus, avec une erreur relative de 10 % (figure 4.4.d). Cependant, si cet indice est calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique " $\gamma = 1$ " ou " $\gamma = 0,5$ " comme suggéré par Gitelson et *al.* (1996), sa sensibilité aux propriétés optiques des sols nus dépasse largement celle du NDVI. Par ailleurs, quelle que soit la valeur du coefficient d'autocorrection atmosphérique, le GARI et le NDVI ne permettent pas de normaliser correctement les artefacts causés par les variations des propriétés optiques des sols nus. En effet, les sols de couleur très claire sont considérés comme de la végétation et l'erreur relative atteint facilement 40 %. Lorsque la couleur est foncée, ces indices deviennent moins sensibles et l'erreur diminue jusqu'à 5 %. Bien entendu, dans un milieu où les sols sont de couleur contrastée et la forêt est moins dense, la caractérisation du couvert forestier par l'un ou l'autre des deux indices introduira un bruit additionnel considérable.

Bien que le ARVI soit un indice qui corrige les effets atmosphériques, il est intéressant d'analyser son comportement à l'égard des bruits causés par les sols nus. Notons ici que puisque le capteur AVHRR ne possède pas de canal bleu, il sera exclu lors de l'analyse du comportement des indices ARVI, TSARVI et EVI qui utilisent le canal hybride 'rouge-bleu'.

Pour un coefficient d'autocorrection atmosphérique égal à 0,5, le ARVI présente une erreur moyenne de 10 % pour MODIS et 7 % pour VEGETATION (Figure 4.5.e). L'apport de la fine résolution spectrale pour cet indice n'est que de 3 %, ce qui est insignifiant. Dans le cas des sols de couleur claire, les erreurs deviennent maximales et peuvent atteindre 28 %. Quant à l'indice EVI qui est une simple transformation du ARVI pour améliorer sa sensibilité à la présence d'un dense couvert, il normalise les artefacts causés par les sols nus mieux que le ARVI. Indépendamment de la résolution spectrale du capteur, l'erreur moyenne sur cet indice est d'environ 8 %; ce qui concorde avec les résultats de Schowengerdt et *al.* (2000). Malgré

l'introduction du canal bleu dans sa conception et l'absence des paramètres de la droite des sols nus dans sa modélisation, le EVI normalise l'effet des sols mieux que les indices NDVI, SAVI, MSAVI et GEMI (Figure 4.5.f).

Quant aux indices qui ont été développés dans la perspective de minimiser l'effet des sols nus sous-jacents et maximiser le signal issu du couvert végétal (OSAVI, SAVI, MSAVI et RDVI), ils montrent une sensibilité presque similaire (Figures 4.5.g, 4.5.h, 4.5.i et 4.5.j). Le OSAVI présente une erreur relative de 12 %, 11 % et 10 %, respectivement pour AVHRR, MODIS et VEGETATION. Par contre, les erreurs sont similaires pour les indices SAVI et RDVI, elles sont de l'ordre de 10 % pour AVHRR, 9 % pour MODIS, et 8 % pour VEGETATION. Comparativement à ces trois indices, le MSAVI montre une légère résistance aux bruits des sols. L'erreur relative moyenne est d'environ 9 %, 8 % et 7 %, respectivement, pour AVHRR, MODIS et VEGETATION. Dans le cas des sols clairs et secs les erreurs sur ces quatre indices peuvent atteindre 20 %. Dans le cas des sols sombres et humides ces valeurs diminuent pour atteindre 2 %. Toutefois, l'apport de fine résolution spectrale ne dépasse pas en général 2 % en faveur du capteur VEGETATION.

Par ailleurs, les indices qui intègrent les paramètres de la droite des sols nus, PVI, TSAVI et TSARVI, présentent l'avantage de minimiser l'effet des sols nus indépendamment de leurs propriétés optiques et de la résolution spectrale du capteur considéré. Ces indices montrent un alignement exemplaire des nuages de points avec la ligne théorique des sols nus notamment le PVI dont l'erreur est toujours inférieure à $\pm 2\%$. L'erreur relative moyenne est négligeable sur ces indices, elle est inférieure à 1 % pour les trois capteurs (Figure 4.5.k, 4.5.l, et 4.5.m). Dans les cas extrêmes de couleur et de brillance des sols, l'erreur moyenne est de 10 % et 8 % sur les indices TSAVI et le TSARVI, respectivement. Alors que pour les sols sombres et humides, l'erreur relative moyenne ne dépasse pas 5 % sur le TSAVI et 2 % sur le TSARVI.

La figure 4.6 résume de façon globale la sensibilité des indices considérés aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois résolutions spectrales différentes. Nous constatons que, tous les indices montrent une certaine sensibilité aux comportements spectraux des sols nus

sous-jacents surtout lorsque nous considérons les larges bandes spectrales de AVHRR. Quant aux bandes spectrales étroites, notamment celles de VEGETATION, elles normalisent mieux les artefacts des sols. Globalement, les indices GEMI, MSR, GARI et NDVI sont les plus sensibles aux artefacts des sols nus dont l'erreur relative moyenne dépasse 20 % indépendamment de la résolution spectrale du capteur utilisé. Tandis que les indices ARVI, OSAVI, SAVI, RDVI, EVI et MSAVI, ils se caractérisent par une légère résistance à cet effet, avec une erreur qui varie entre 7 % et 12 %. Bien entendu, ceux qui se basent sur le concept de la droite des sols nus (TSAVI, TSARVI et PVI) offrent la meilleure exactitude avec des erreurs relatives moyennes qui ne dépassent pas 2 %.

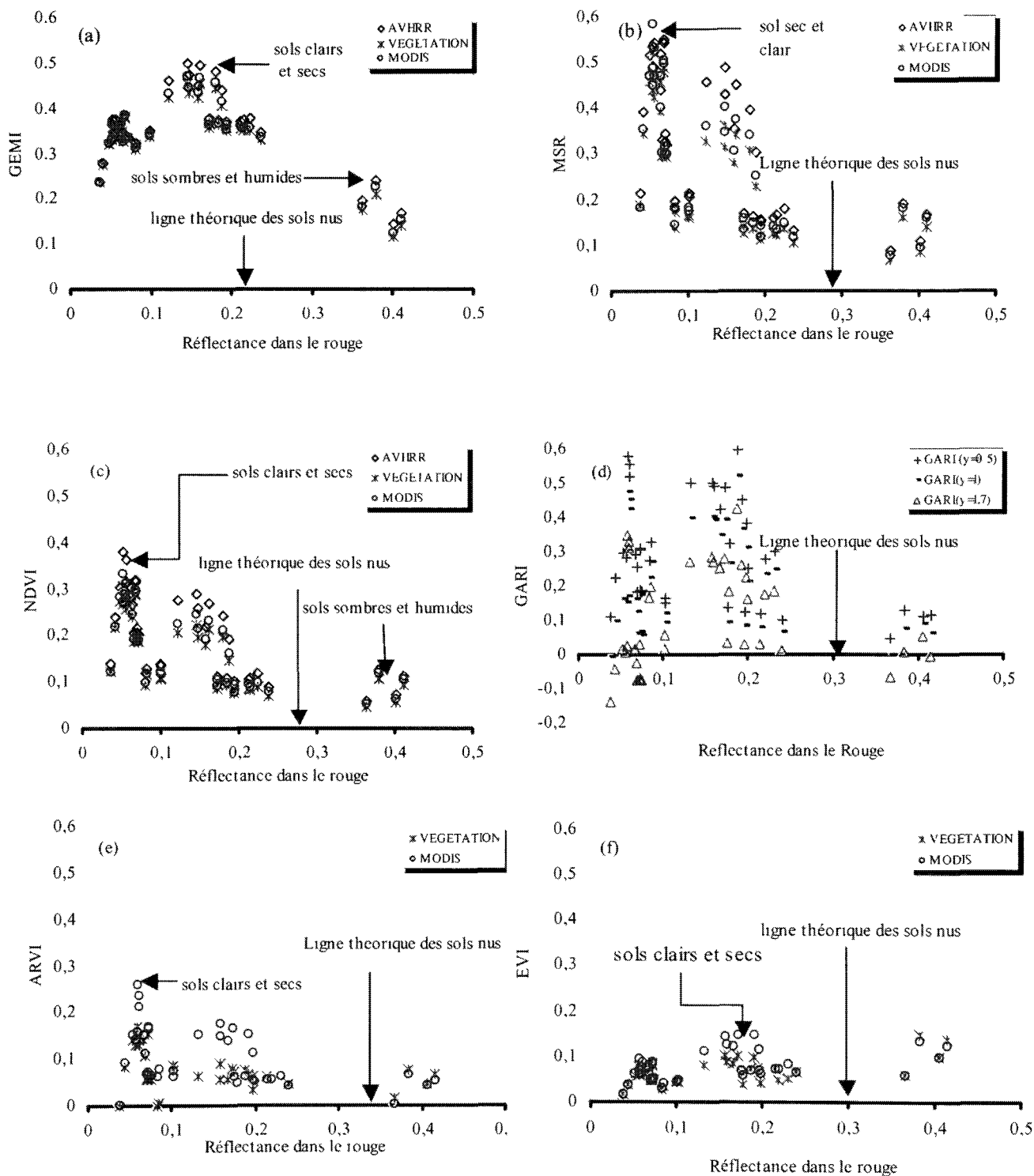


Figure 4.5 : Sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois capteurs : AVHRR, MODIS et VEGETATION

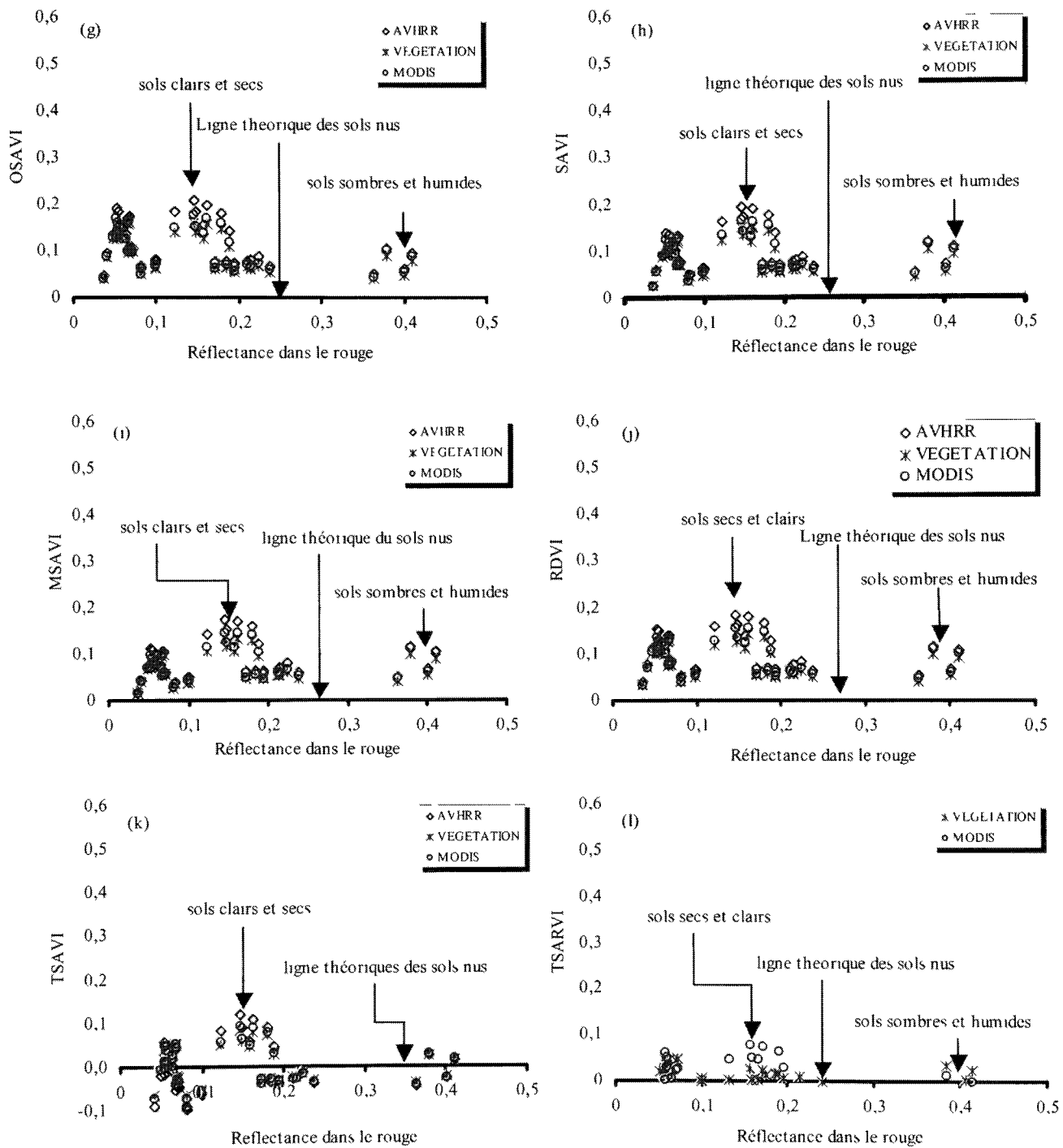


Figure 4.5 : Sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois capteurs : AVHRR, MODIS et VEGETATION (suite)

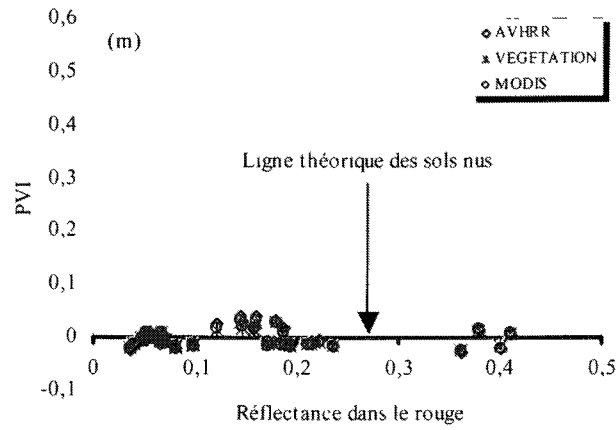


Figure 4.5 : Sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois capteurs : AVHRR, MODIS et VEGETATION (suite)

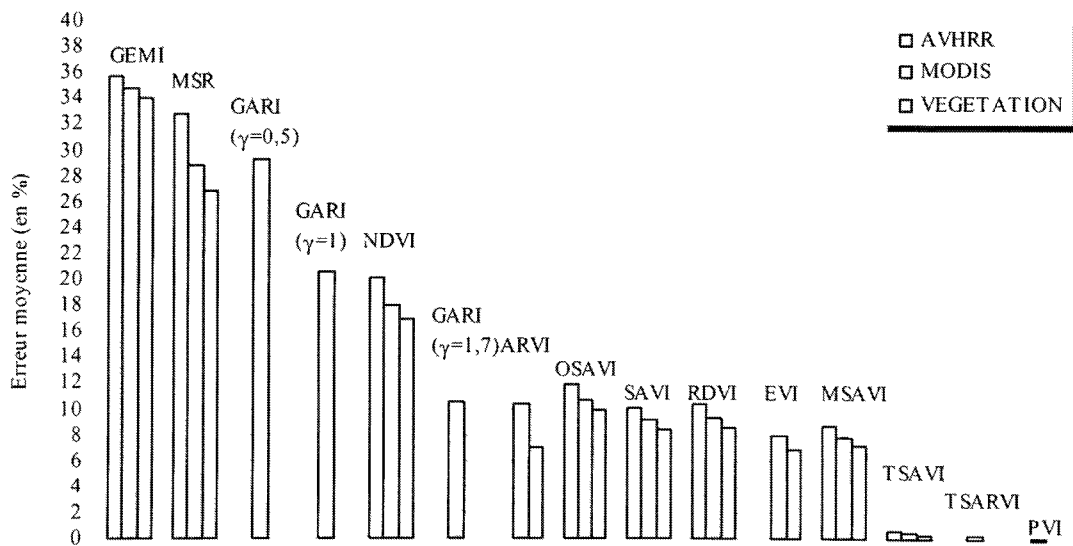


Figure 4.6 : Erreur relative moyenne de la sensibilité des indices de végétation aux propriétés optiques des sols nus en fonction des trois capteurs : AVHRR, MODIS et VEGETATION

4.3.2. Analyse des effets atmosphériques

4.3.2.1. La diffusion par les aérosols

Pour l'analyse de l'effet de la diffusion atmosphérique sur les indices de végétation, nous avons choisi un sol nu et un couvert à différents degrés de défoliation, et nous avons varié uniquement les conditions de la visibilité atmosphérique, à savoir la concentration en aérosols. La présence de ces derniers dans l'atmosphère augmente le signal au-dessus des couverts dans les courtes longueurs d'onde (visible), ce qui, par conséquent, diminue la valeur de l'indice de végétation.

La sensibilité des indices de végétation aux effets de la diffusion atmosphériques en milieu forestier est illustrée par les différents graphiques de la figure 4.7. Afin de faciliter la notation des graphiques, les caractères a, b et c réfèrent aux capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS, respectivement. Cette notation se maintient le long de nos analyses pour les effets de l'atmosphère (absorption et diffusion) et aussi pour les analyses des effets de la topographie. La première constatation dégagée des différents graphiques, réside au niveau de la différence du comportement entre les différents indices et la différence entre les valeurs d'un même indice en fonction de la résolution spectrale propre à chaque capteur et aussi en fonction de la concentration des aérosols dans l'atmosphère. En l'absence du couvert forestier, tous les indices montrent une bonne indépendance des effets de la diffusion. Par contre, en présence de la végétation, une augmentation de la concentration des aérosols affecte la sensibilité des indices au fur et à mesure que le couvert devient dense. En outre, la fine résolution spectrale du capteur MODIS minimise les effets de la diffusion mieux que celles des deux autres capteurs sur les indices de végétation.

À la lumière des résultats, nous remarquons que, le MSR est l'indice le plus sensible aux effets de la diffusion atmosphérique (figures 4.7.a1, b1 et c1). En effet, pour une forte densité du couvert forestier et pour une faible visibilité (10 km), l'erreur relative peut atteindre 46 %, 41 % et 38 % pour AVHRR, VEGETATION et MODIS, respectivement. Autrement dit, une amélioration de 5 % pour VEGETATION et 8 % pour MODIS par rapport à AVHRR. Toutefois, lorsque la visibilité augmente (25 km) l'erreur sur le MSR diminue relativement pour atteindre 39 % pour AVHRR, 32 % pour VEGETATION et 31 % pour MODIS.

Bien qu'il soit développé pour minimiser les effets atmosphériques et ceux des propriétés optiques des sols nus, le EVI témoigne d'une très grande sensibilité aux effets de la diffusion (figures 4.7.b2, 4.7.c2). Contrairement aux résultats de Huete *et al.* (1999), indépendamment de la concentration des aérosols dans l'atmosphère l'erreur relative sur cet indice est de l'ordre de 40 % et 35 % pour VEGETATION et MODIS, respectivement. Comparativement aux autres indices, la forte sensibilité du EVI à l'augmentation de la concentration des aérosols cause une surestimation du couvert.

Malgré son pouvoir discriminant des bruits des sols nus, le PVI reste très sensible aux variations atmosphériques (figures 4.7.a2, b3 et c3). Pour une visibilité de 10 km, le PVI montre une sensibilité très élevée lorsque le couvert est dense, avec des erreurs relatives qui atteignent 38 %, 24 % et 19 %, respectivement pour dans AVHRR, VEGETATION et MODIS. Toutefois, bien que les conditions de visibilité atmosphérique s'améliorent (25 km), le PVI affiche une erreur relative de 32 % pour AVHRR, 19 % pour VEGETATION et 13 % pour MODIS.

Pour des conditions atmosphériques dégradées (visibilité de 10 km), le MSAVI montre une sensibilité qui est presque similaire à celle du PVI (figures 4.7.a3, b4 et c4). L'erreur relative moyenne sur cet indice est de 34 %, 24 % et 20 % pour AVHRR, VEGETATION et MODIS, respectivement. Évidemment, la simulation des meilleures conditions atmosphériques permet de minimiser l'impact de la diffusion sur le MASVI surtout dans la fine résolution spectrale de MODIS. En effet, pour une visibilité atmosphérique de 100 km, l'erreur relative sur le MSAVI est de 12 %. En considérant les mêmes conditions atmosphériques et les bandes spectrales de VEGETATION, l'erreur relative est d'environ 16 %. Ces résultats concordent avec les travaux de Qi *et al.* (1994) qui ont mis en évidence la forte sensibilité du MSAVI aux effets de la diffusion atmosphérique dans les milieux arides et semi-arides.

La sensibilité du TSAVI (figures 4.7.a4, b5 et c5) est moins prononcée que celle des indices précédents. En effet, l'erreur relative pour une visibilité de 10 km atteint 30 % dans le cas de AVHRR, 20 % dans le cas de VEGETATION et 18 % dans le cas de MODIS lorsque le couvert est dense. Toutefois, si le couvert est moins dense avec 30 % de défoliation par exemple, et les

conditions atmosphériques sont plus favorables avec 25 km de visibilité, l'erreur sur le TSAVI se réduit à 26 % pour AVHRR, 16 % pour VEGETATION et 13 % pour MODIS.

Par ailleurs, le RDVI (figure 4.7.a5, b6 et c6) et les indices qui s'ajustent par rapport aux sols nus, TSAVI (figures 4.7.a4, b5 et c5), SAVI (figures 4.7.a6, b7 et c7) et OSAVI (figures 4.7.a7, b8 et c8) sont relativement plus indépendants des effets de la diffusion atmosphérique. Entre les valeurs au sol et celles calculées en haut de l'atmosphère, l'écart augmente progressivement au fur et à mesure que les conditions d'observation deviennent dégradées et que le pourcentage de défoliation devient nul. La magnitude de l'erreur relative pour une visibilité de 10 km est d'environ 28 % pour les indices, TSAVI, RDVI et SAVI, et de 25 % pour le OSAVI dans les bandes de AVHRR. Si nous considérons le capteur VEGETATION, nous constatons une amélioration de 10 % par rapport à AVHRR dans le cas des quatre indices, soit une erreur relative de 18 %. Toutefois, dans le cas de MODIS l'erreur sur ses indices est d'environ 16 % dans les conditions atmosphériques les plus dégradées. Lorsque les conditions d'observation sont très favorables (visibilité de 50 km), l'erreur relative sur ces indices ne dépasse pas 10 % notamment lorsque nous considérons la fine résolution spectrale de MODIS. Par contre, cette erreur reste très significative si nous considérons les bandes spectrales de AVHRR, 22 %.

Les indices NDVI (figures 4.7.a8, b9 et c9) et GEMI (figures 4.7.a9, b10 et c10), sont moins sensibles aux effets atmosphériques que les autres indices discutés ci-dessus. Bien qu'il soit développé dans le but de minimiser les effets atmosphériques en le calculant à partir des réflectances apparentes, le GEMI reste sensible aux effets de la diffusion. Pour une large résolution spectrale et une visibilité de 10 km, les erreurs relatives sur le NDVI et le GEMI sont de 25 % et de 18 %, respectivement. Néanmoins, lors de l'utilisation de MODIS nous constatons une bonne amélioration significative du GEMI (erreur relative de 9 %) par rapport au NDVI.

Quant au GARI (figure 4.7.c11, c12 et c13), il se comporte de façon différente aux effets de la diffusion suivant la valeur de son coefficient d'autocorrection atmosphérique. Pour MODIS, il montre une faible sensibilité (erreur relative de 7 %) aux effets de la diffusion lorsqu'il est calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique γ égale à 0,5. Toutefois, lorsqu'il est

calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique γ égale à 1 ou 1,7 comme décrit par Gitelson *et al.* (1996), l'erreur sur cet indice devient très large et atteint 18 % et 56 %, respectivement.

Calculés avec un coefficient d'autocorrection intermédiaire ($\gamma = 0,5$), les deux indices ARVI (figures 4.7.b11 et c11) et TSARVI (figures 4.7.b12 et c12), se distinguent par une excellente résistance aux effets de la diffusion atmosphérique. Ces deux indices estiment le taux de couverture avec une erreur qui ne dépasse pas 3 %. La combinaison du canal bleu avec le rouge, permet à ces deux indices une meilleure autocorrection des effets de la diffusion. Généralement, le ARVI et le TSARVI sont 4 à 5 fois moins sensibles aux effets de la diffusion atmosphérique que le NDVI ce qui concorde avec les résultats de Kaufman et Tanré (1992) et Bannari *et al.* (2000).

Le comportement des indices de végétation aux variations de la concentration en aérosol atmosphérique en fonction des trois résolutions spectrales est récapitulé dans la figure 4.8. Nous constatons clairement le bon apport de la moyenne résolution spectrale de VEGETATION et l'excellent apport de MODIS par rapport à AVHRR, pour minimiser les effets de la diffusion atmosphérique. Indépendamment de la résolution spectrale du capteur, l'erreur relative moyenne dépasse 20 % sur les indices MSR, EVI, PVI et MSAVI. Quant aux indices TSAVI, RDVI, SAVI, OSAVI et NDVI, ils restent aussi sensibles aux effets de la diffusion. Toutefois, ils minimisent relativement les perturbations atmosphériques dans la fine résolution spectrale de MODIS. Par ailleurs, bien qu'il soit développé spécialement pour le capteur AVHRR dans le but de minimiser les effets atmosphériques, le GEMI est plus performant lorsqu'il est dérivé des données de MODIS et VEGETATION que AVHRR. Quant aux indices GARI ($\gamma=0,5$), ARVI et TSARVI, ils réduisent parfaitement les effets de la diffusion atmosphérique.

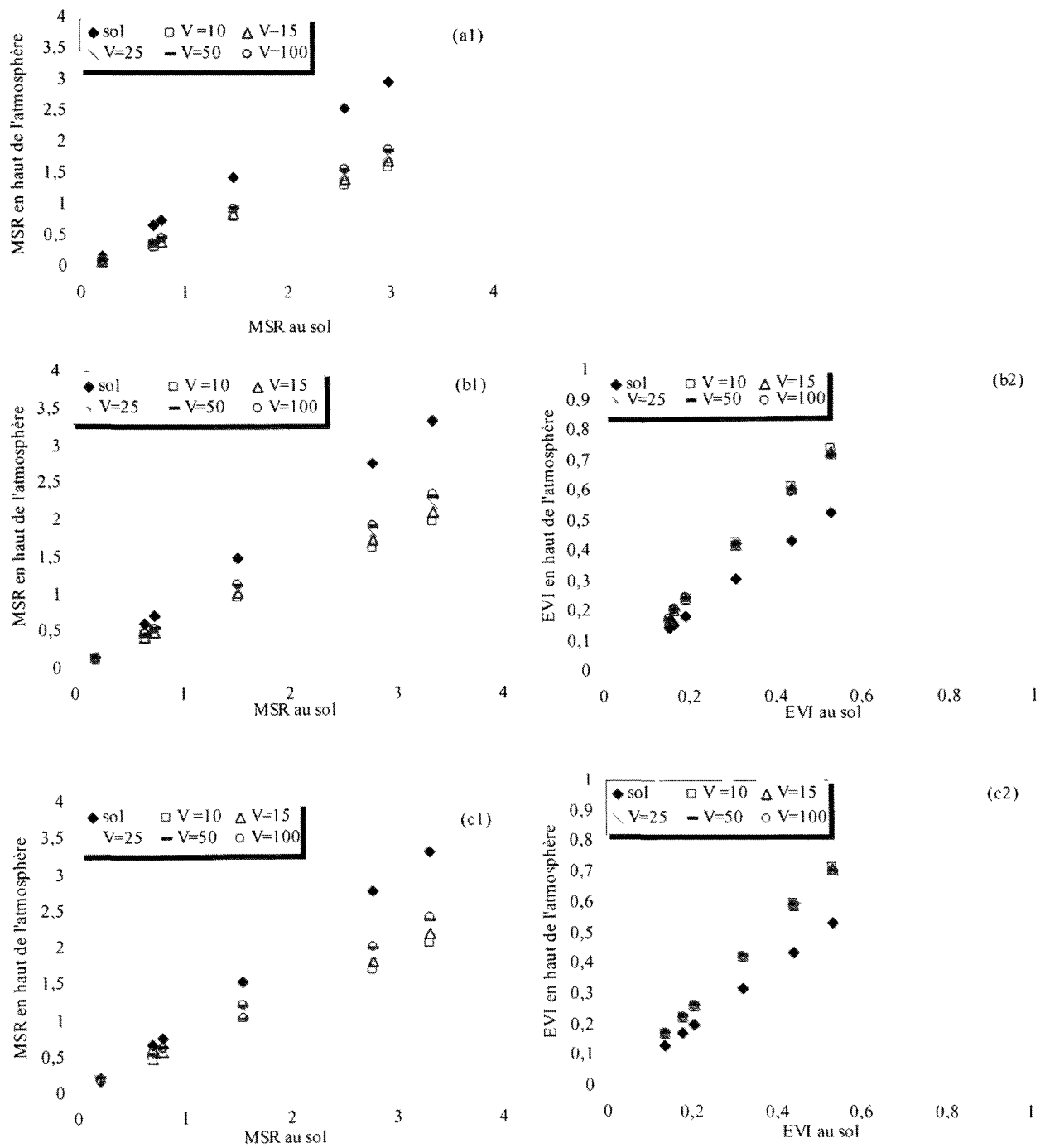


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS

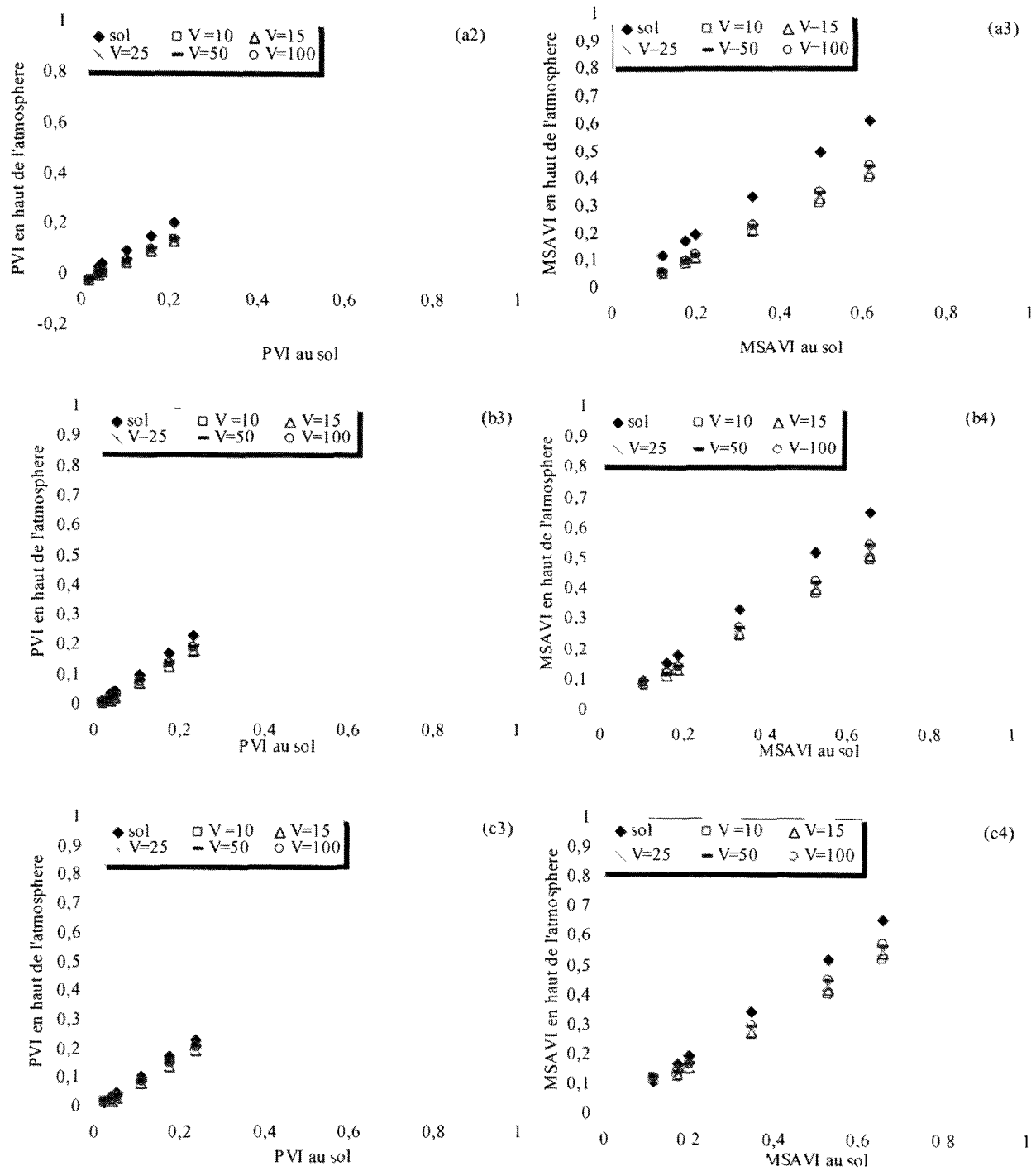


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

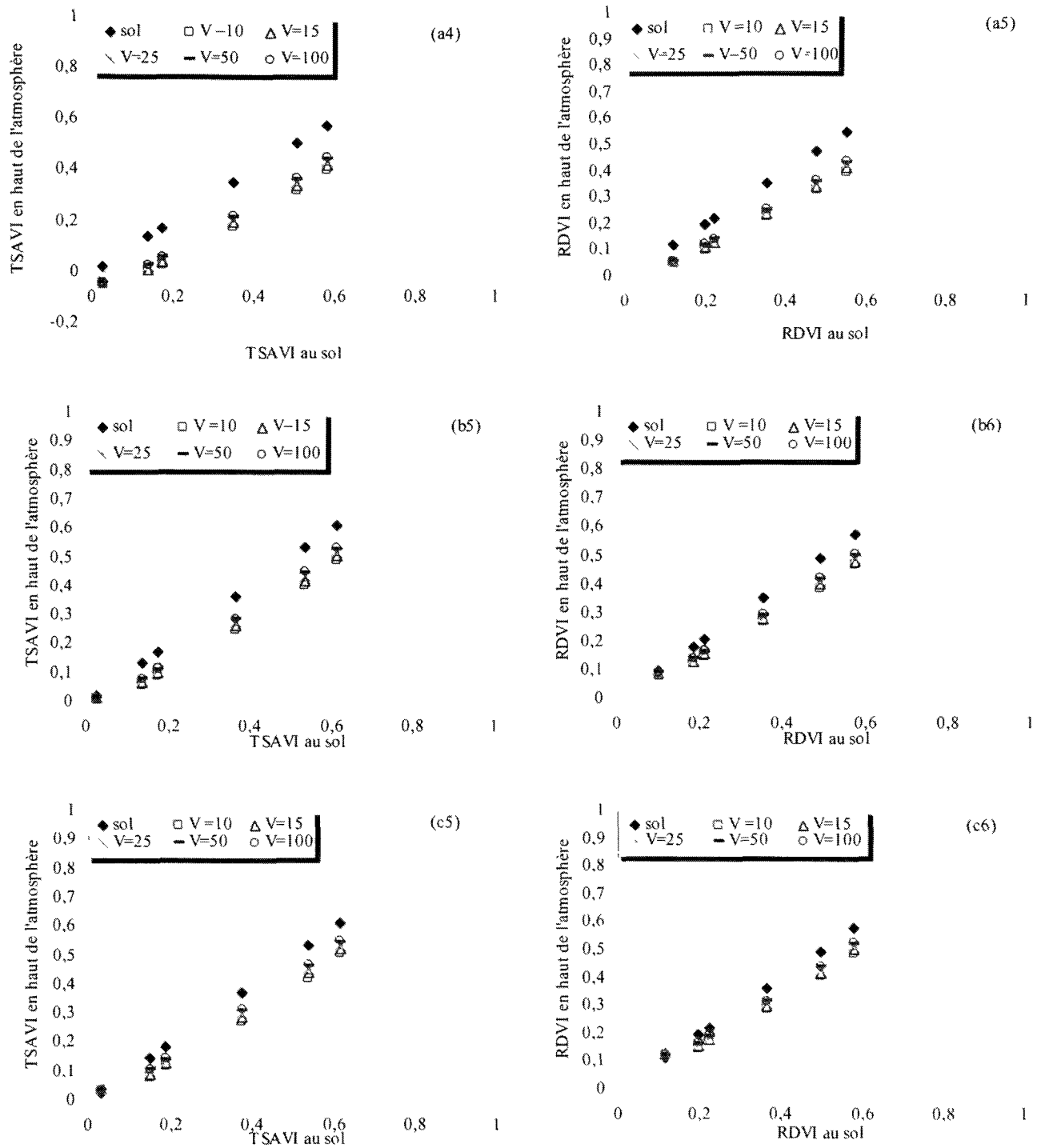


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

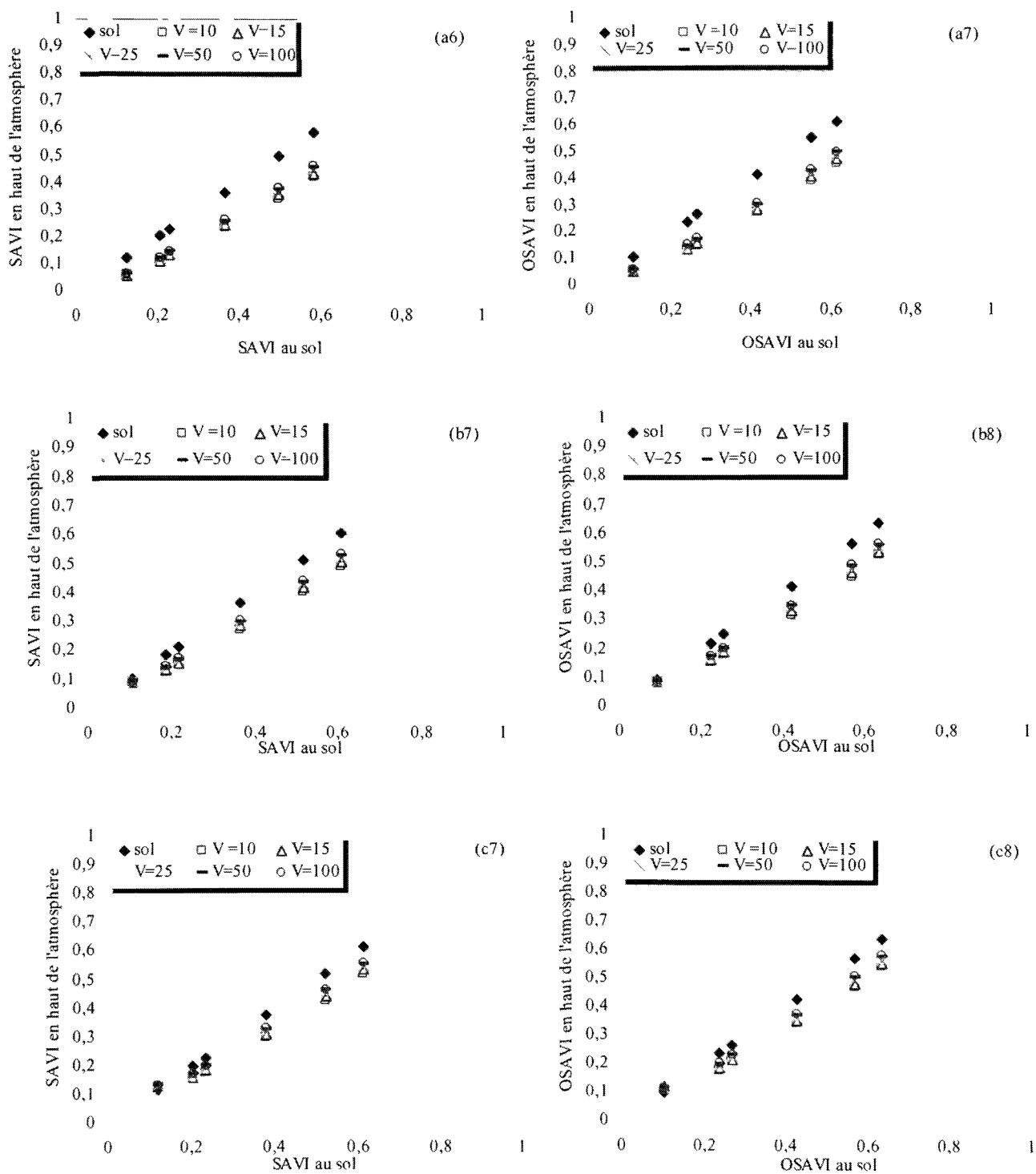


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

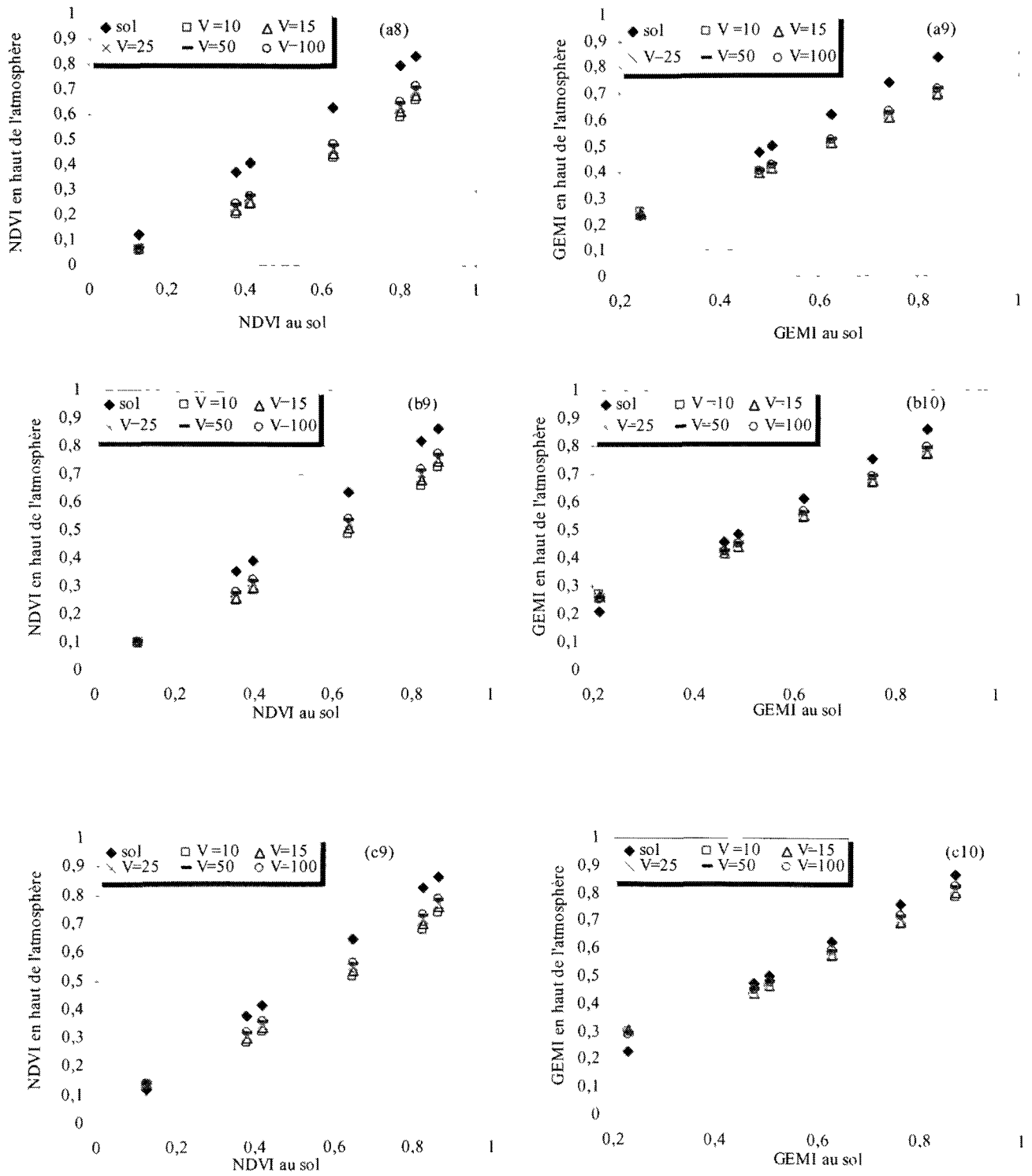


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

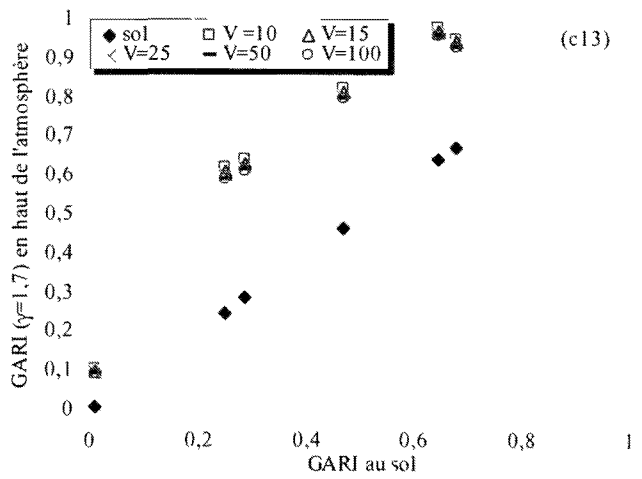
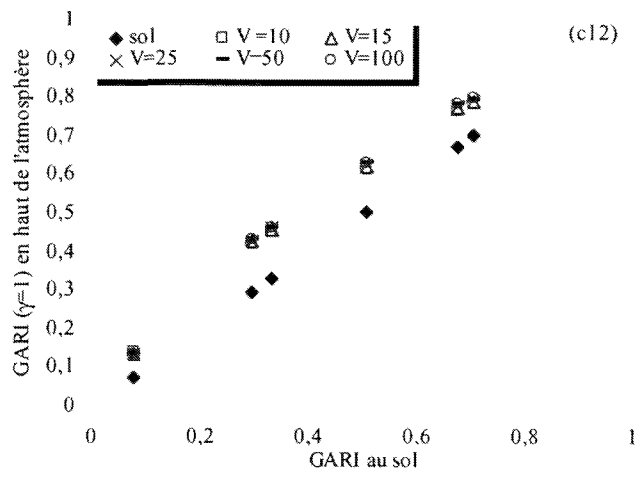
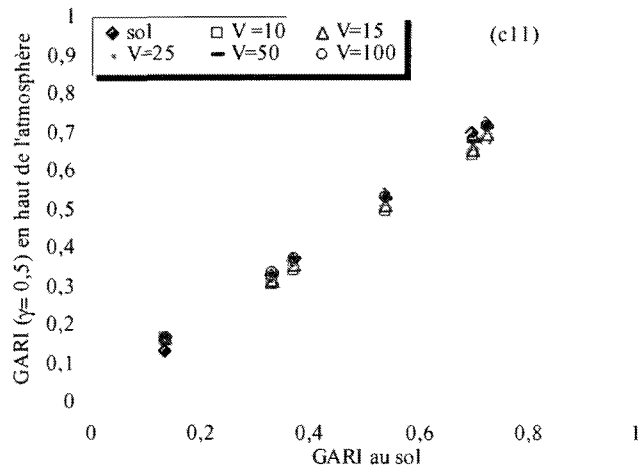


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

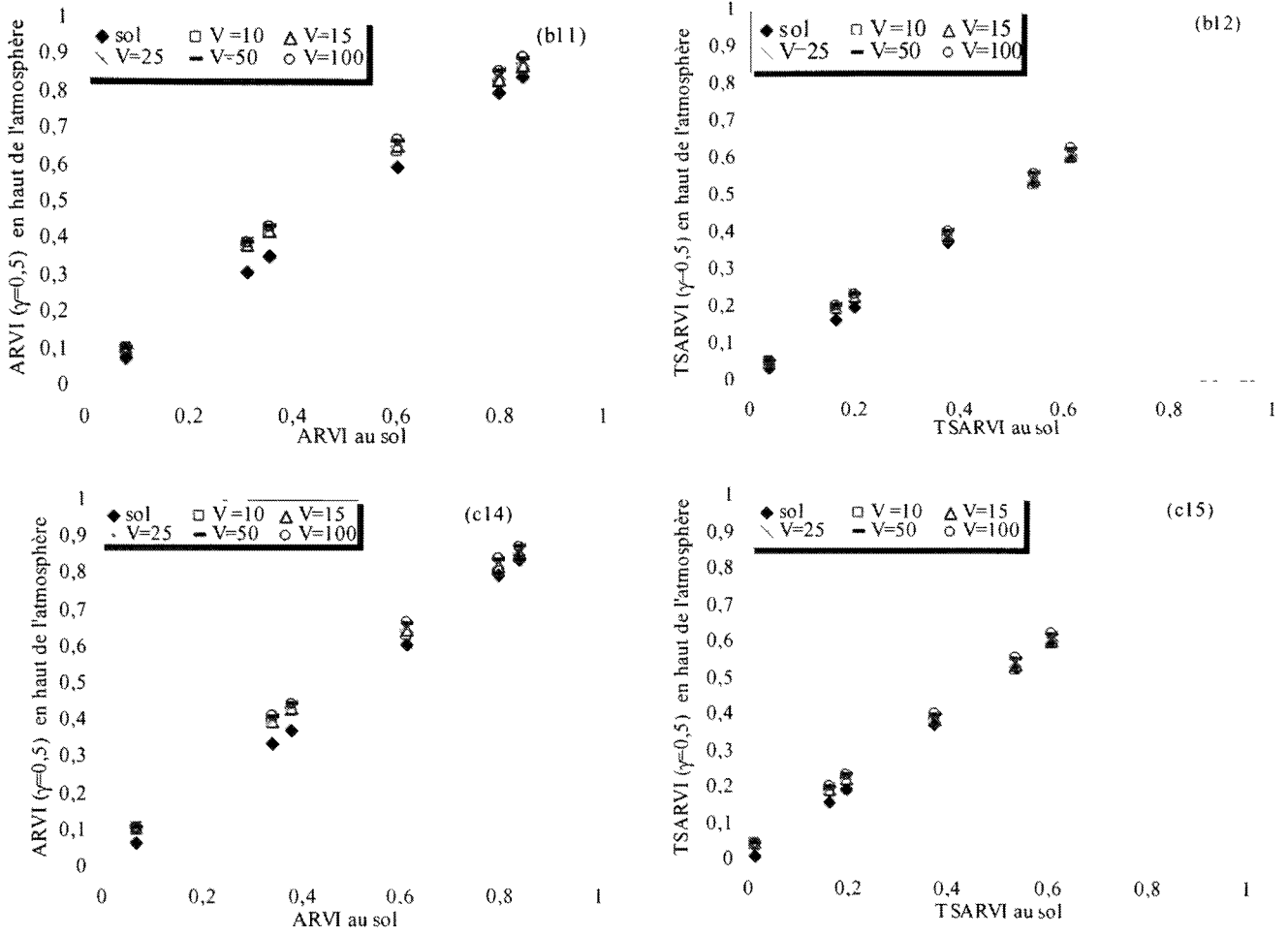


Figure 4.7 : Sensibilité des indices en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

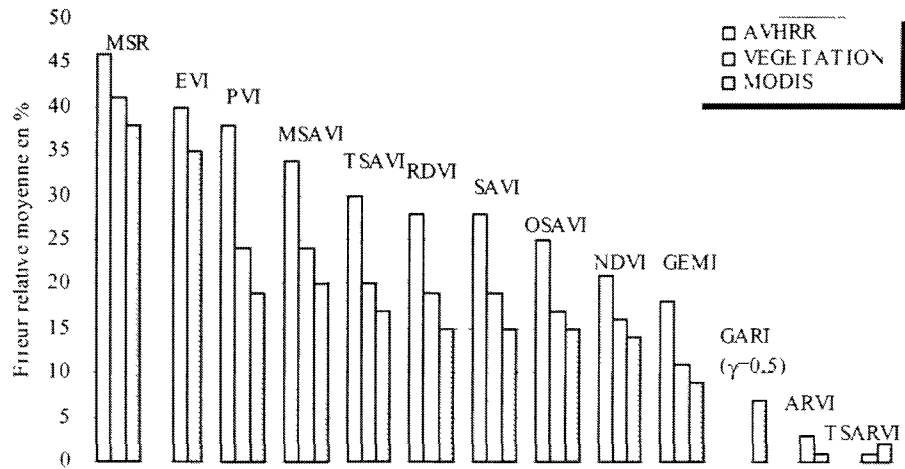


Figure 4.8 : L'erreur relative moyenne de la sensibilité des indices de végétation en fonction de la concentration en aérosols atmosphériques et des trois capteurs : AVHRR, VEGETATION et MODIS pour une visibilité de 25 km

4.3.2.2. L'absorption par la vapeur d'eau

Sous une atmosphère claire sans aérosol, nous avons fait varier seulement la concentration de la vapeur d'eau ($0,5\text{g}/\text{cm}^2$, $3\text{g}/\text{cm}^2$, $6\text{g}/\text{cm}^2$ et $8\text{g}/\text{cm}^2$), en fonction de la densité du couvert : 0%, 30%, 50%, 75% et 100% de défoliation. Nos simulations ont été réalisées dans les bandes spectrales des trois capteurs. Un premier examen de la réponse des bandes vert, rouge, bleu et proche infrarouge en fonction de l'absorption par la vapeur d'eau montre que cet effet agit en diminuant la réponse spectrale dans les canaux du proche infrarouge.

L'effet de l'absorption par la vapeur d'eau affecte tous les indices spectraux, l'erreur relative la plus faible est de l'ordre de 6 %. Toutefois, cet effet reste en général, moins prononcé que celui de la diffusion atmosphérique. En l'absence de végétation, et à l'exception du EVI et du GEMI, tous les indices se caractérisent par une excellente résistance à cet effet. Cependant, plus la végétation devient dense plus la sensibilité des indices à la concentration en vapeur d'eau augmente.

En plus d'être sensibles à la concentration en aérosol, les indices EVI (figures 4.9.b1 et c1) et MSR (figures 4.9.a1, b2 et c2) se caractérisent également, par une grande sensibilité vis-à-vis de la concentration en vapeur d'eau. En effet, dans un milieu de couvert dense et une forte concentration en vapeur d'eau ($8\text{g}/\text{cm}^2$), l'indice EVI affiche une erreur relative qui est de l'ordre de 34 % dans le cas du capteur VEGETATION (figure 4.9.b1) et de 32 % dans le cas du capteur MODIS (figures 4.10.c1). Sous les mêmes conditions et pour une concentration extrême ($8\text{g}/\text{cm}^2$), l'erreur sur le MSR est identique à celle du EVI, soit 34 % pour AVHRR. Alors que dans le cas de MODIS, à fine résolution spectrale, l'erreur sur cet indice n'est que de 21 %. Toutefois, quelque soit le capteur utilisé, sans aucune correction atmosphérique, ces deux indices ne peuvent caractériser la dynamique du couvert forestier.

En deuxième rang, les deux indices PVI (figures 4.9.a2, b3, c3) et MSAVI (figures 4.9.a3, b4, c4), montrent des erreurs relatives considérables de 29 % et 25 %, respectivement. La comparaison entre ces deux indices montre la contribution de la moyenne et la fine résolution de VEGETATION et MODIS dans la normalisation de l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau.

Dans le cas de MODIS par exemple, l'erreur relative sur le PVI et le MSAVI, ne dépasse pas 7 % et 9 %, respectivement, entre les deux indices pour une concentration de 8 g/cm^2 .

Bien que le ARVI (figure 4.9.b5, c5) soit un indice exemplaire pour la normalisation des effets de la diffusion atmosphérique, il est influencé par les effets de l'absorption dus à la vapeur d'eau. Indépendamment du capteur utilisé, le ARVI calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique ($\gamma = 0,5$), affiche, pour une concentration de vapeur d'eau de 8 g/cm^2 , une erreur relative de l'ordre de 10 %, ce qui concorde avec les résultats obtenus par Huete et *al.*(1994).

Quant aux indices destinés à la normalisation de l'effet des propriétés optiques des sols nus, ils montrent une sensibilité presque similaire. Bien entendu, il s'agit du TSAVI (figures 4.9.a4, b6, c6) et du SAVI (figure 4.9.a6, b8, c8). Ainsi, sous une concentration de 8 g/cm^3 , le premier indice montre une erreur qui varie considérablement entre les trois capteurs. L'erreur relative pour le TSAVI est de 20 % pour AVHRR, 11 % pour VEGETATION et 8 % pour MODIS. Comparativement au SAVI sous les mêmes conditions, l'erreur relative sur cet indice est de 18 % pour AVHRR, 10 % pour VEGETATION et 6 % pour MODIS.

L'indice RDVI (figures 4.9.a5, b7, c7) montre une fois de plus qu'il s'agit d'une parfaite réplique du SAVI. L'erreur relative sur cet indice, lorsque la concentration en vapeur d'eau est de 8 g/cm^3 , est de 18 %, 10 % et 6 %, respectivement, pour AVHRR, VEGETATION et MODIS. L'amélioration du SAVI en OSAVI (figures 4.9.a7, b9, c9) lui offre dans ce contexte forestier un petit avantage qui ne dépasse pas 3 %.

Comme dans le cas de la diffusion atmosphérique, les erreurs sur le NDVI (figures 4.9.a8, b10, c10) sont modérées. Cet indice occupe jusqu'ici une place intermédiaire entre les indices les plus sensibles et les indices qui se caractérisent par un comportement exemplaire. Calculé à partir des canaux de AVHRR, l'erreur sur cet indice atteint 15 %. Cependant, dans le cas du capteur MODIS ou de VEGETATION, le NDVI offre quand même une bonne exactitude. En effet, l'erreur relative sur cet indice est de 6 % pour MODIS et 9 % pour VEGETATION. De ce fait, le

NDVI peut être classé parmi les indices les moins sensibles à la variation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Le comportement exemplaire du TSARVI par rapport à l'effet de la diffusion atmosphérique est reproduit dans le cas de l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau, mais avec une exactitude moins forte. Indépendamment du capteur utilisé, l'erreur sur le TSARVI est de l'ordre de 8 % pour une concentration de 8 g/cm².

Par ailleurs, pour une concentration de 8 g/cm², le GEMI montre une erreur relative plus faible par rapport à tous les indices discutés ci-dessus. Dans le cas de MODIS et de VEGETATION, cette erreur est de 6 % et 7 %, respectivement. Alors que dans le cas de AVHRR, et sous les mêmes conditions atmosphériques, l'erreur augmente pour atteindre 14 %.

Quant au GARI ($\gamma = 0,5$), il montre un comportement similaire, vis-à-vis des effets de la diffusion par les aérosols atmosphériques et de l'absorption par la vapeur d'eau. L'erreur relative sur cet indice ne dépasse pas 6 % dans le cas du capteur MODIS. Or, calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique égale à 1 ou à 1,7 comme décrit par Gitelson et *al.* (1996), sa sensibilité à l'absorption par la vapeur d'eau devient trop élevée. Pour une végétation moyennement dense, l'erreur relative sur cet indice est de l'ordre de 36 % et 21 %, respectivement, pour un coefficient d'autocorrection (γ) égale à 1 ou 1,7 (figures 4.9.c14 et c15).

La figure (4.10) résume la situation de tous les indices, dans le cas d'une végétation très dense et une concentration en vapeur d'eau de 3g/cm². Nous constatons qu'à l'exception des indices EVI et MSR, tous les autres indices normalisent bien l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau notamment des données de MODIS. En revanche, excepté le TSARVI, l'erreur relative dépasse 15 % pour la large résolution spectrale du capteur AVHRR. Toutefois, le capteur VEGETATION occupe une position intermédiaire entre les deux autres capteurs. En général, nous remarquons le potentiel du TSARVI qui minimise l'effet combiné de la diffusion et de l'absorption.

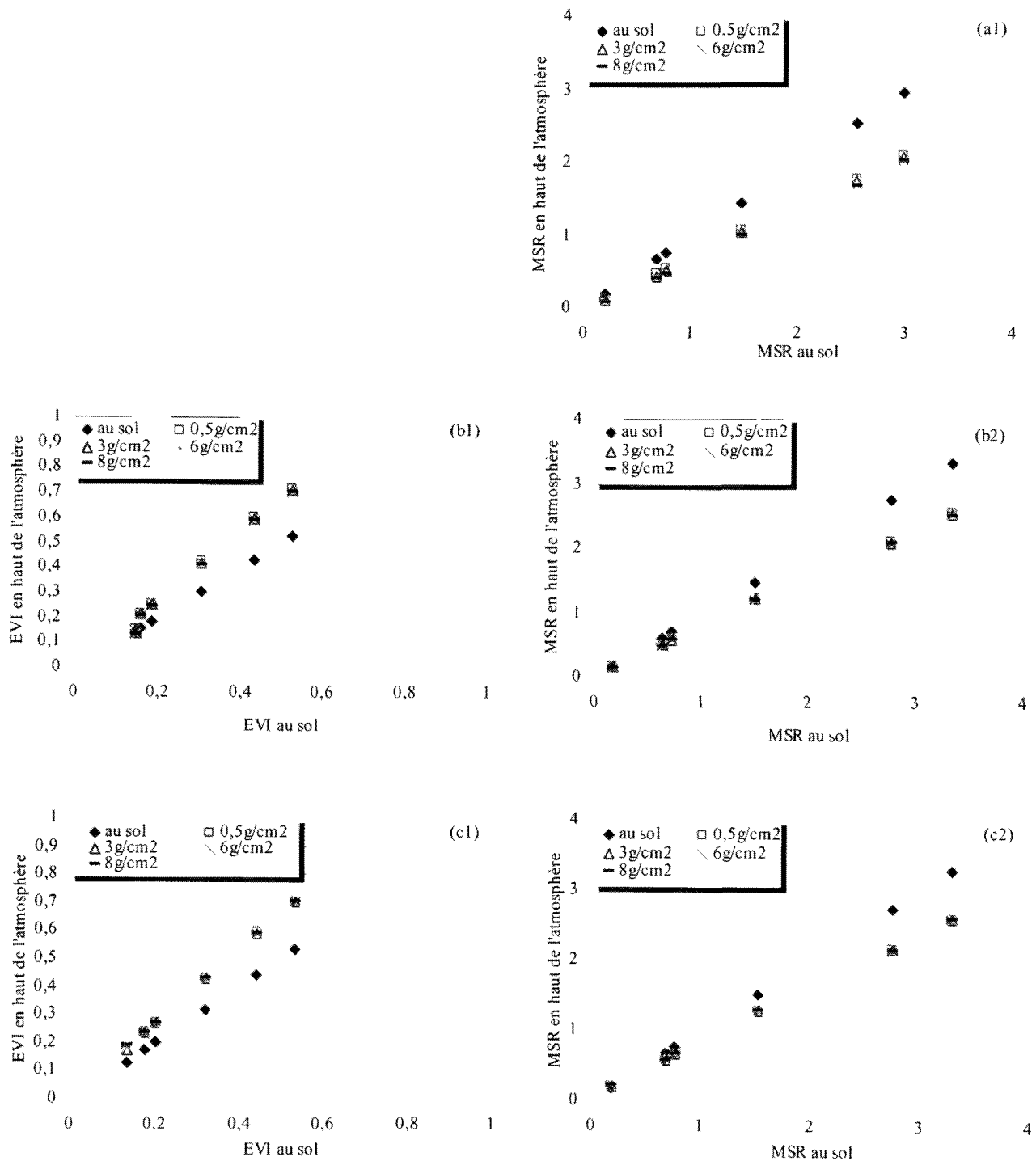


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS

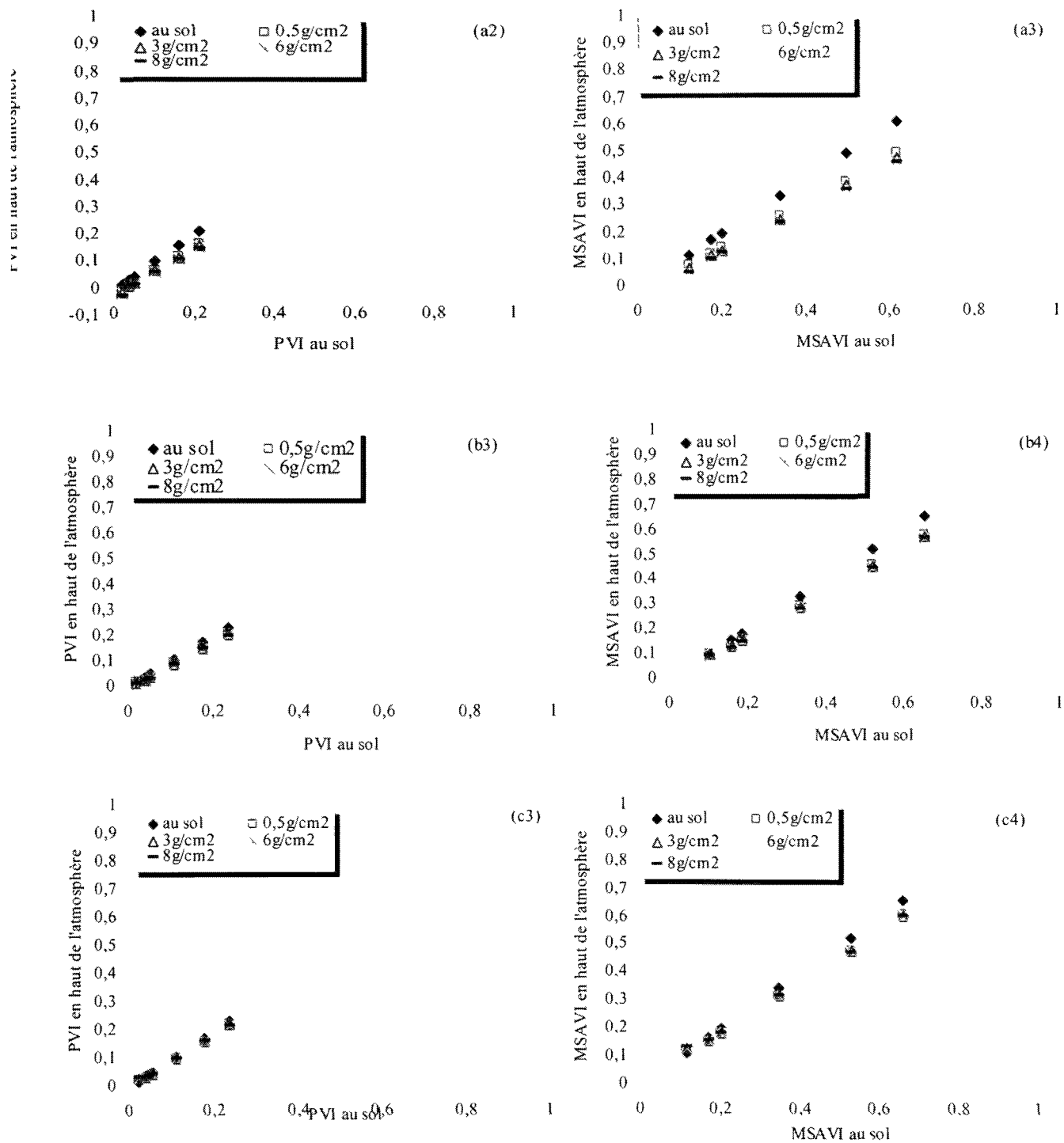


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

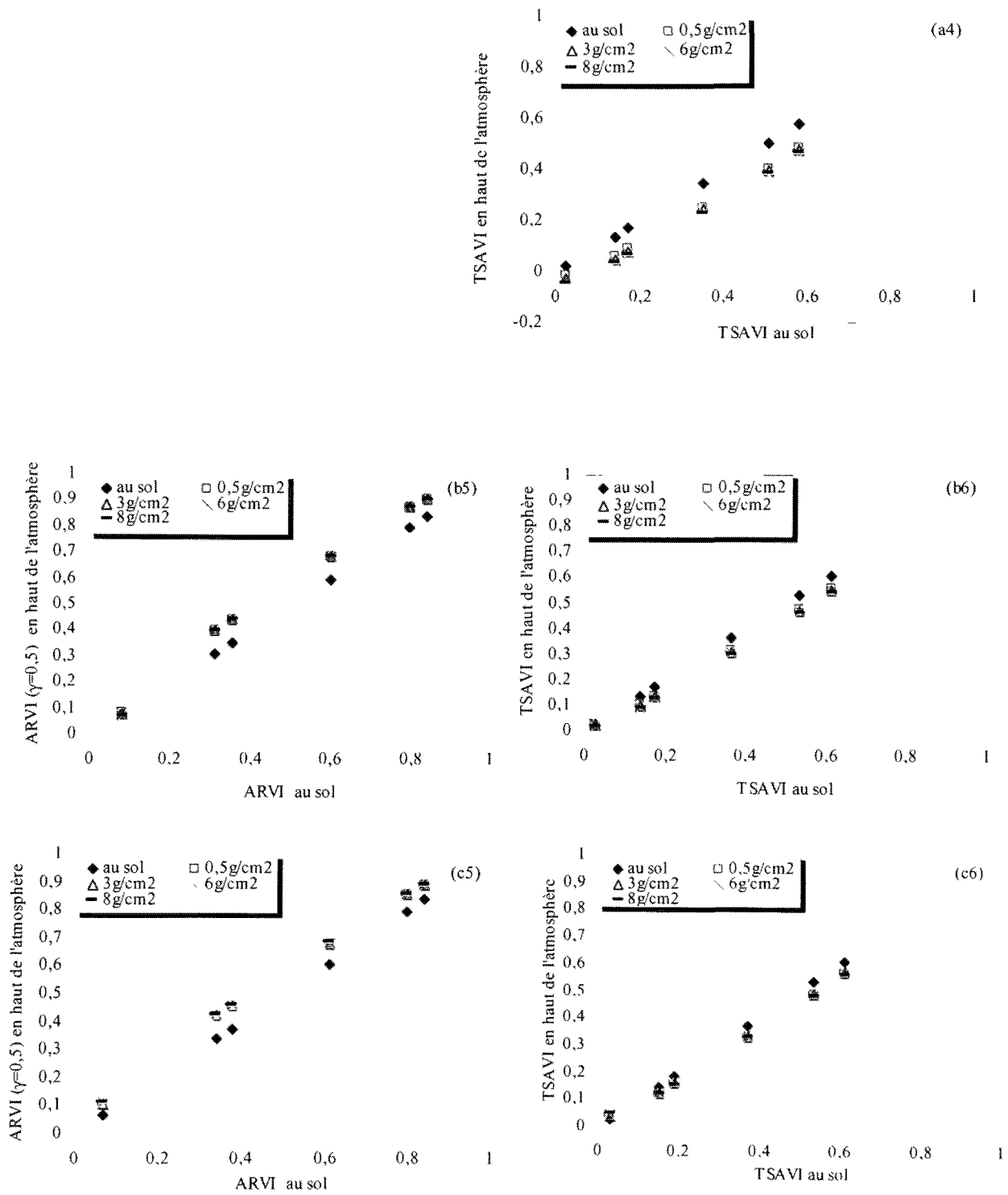


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

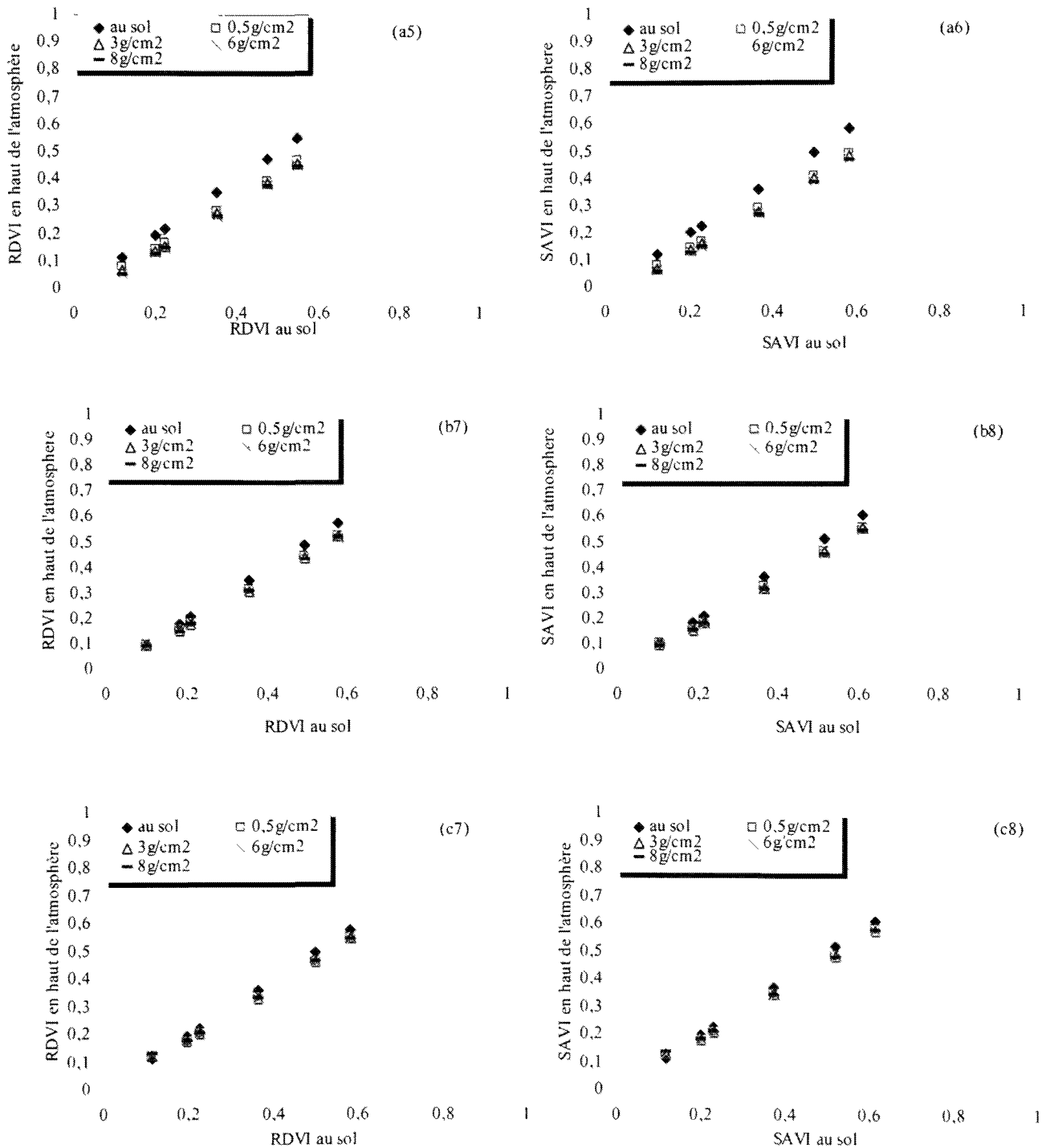


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

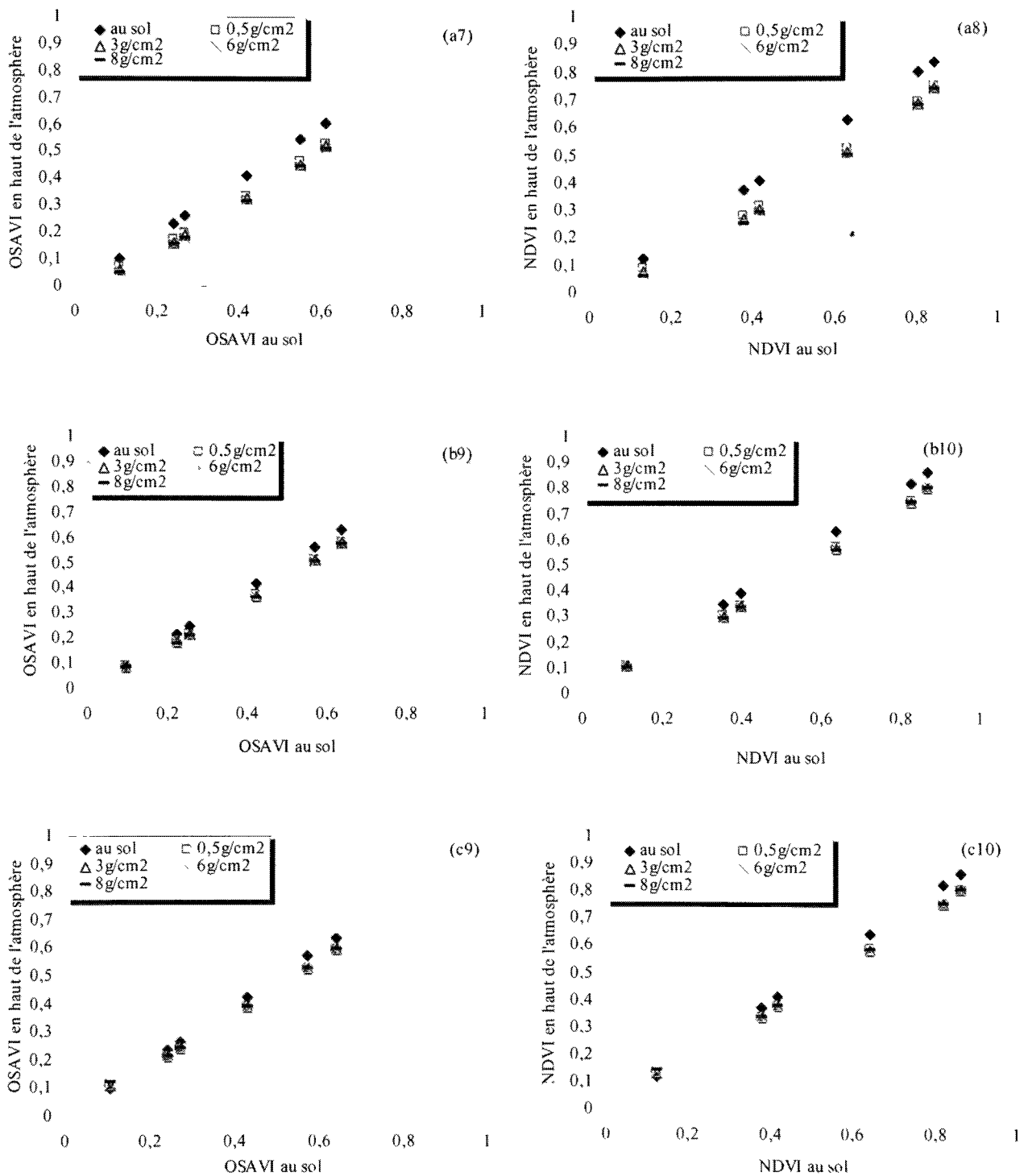


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

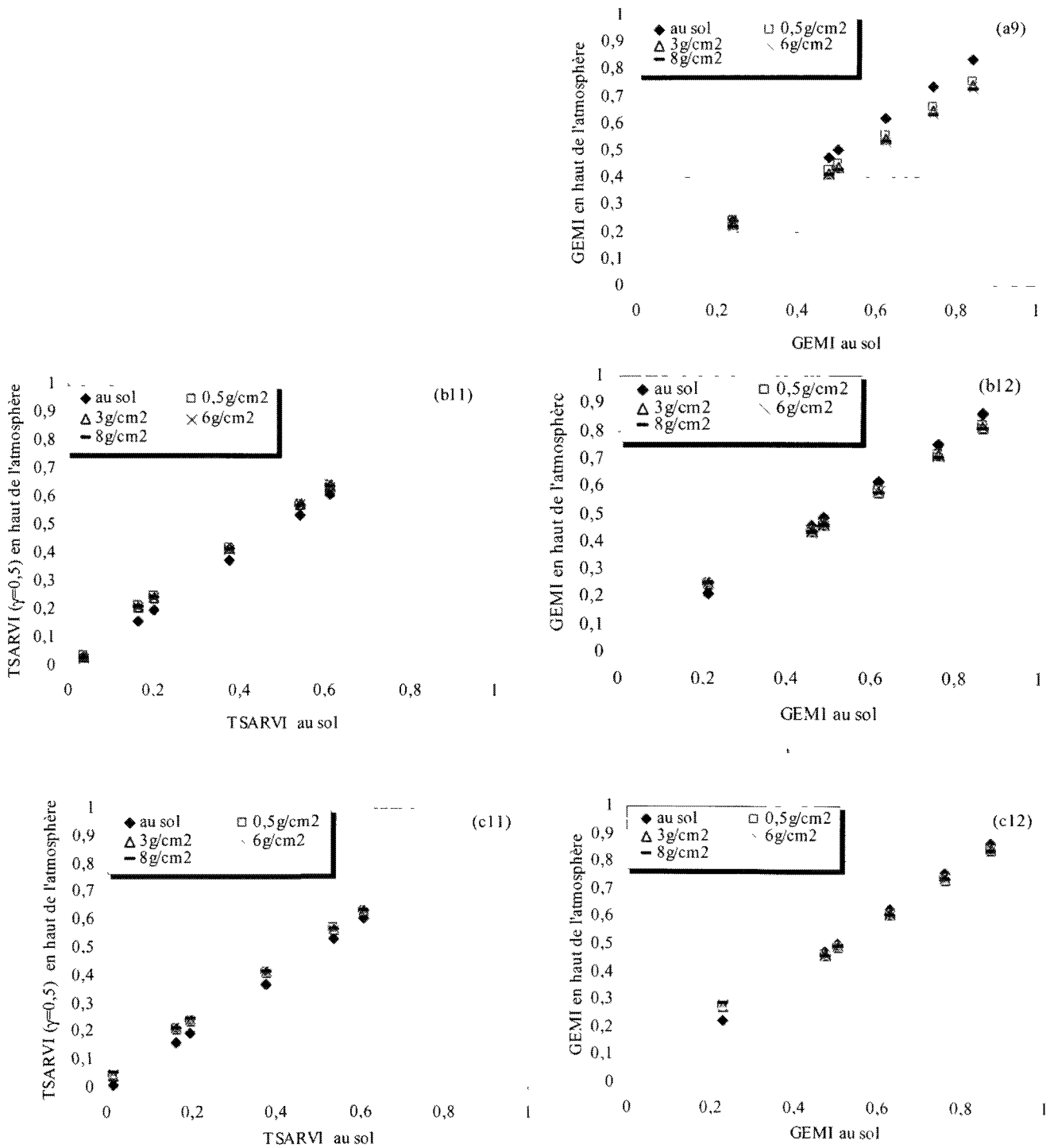


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

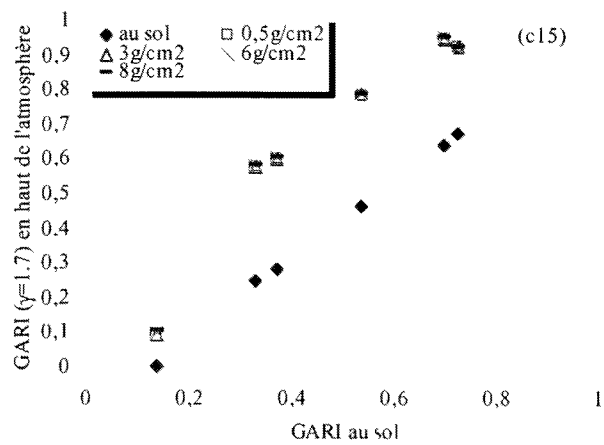
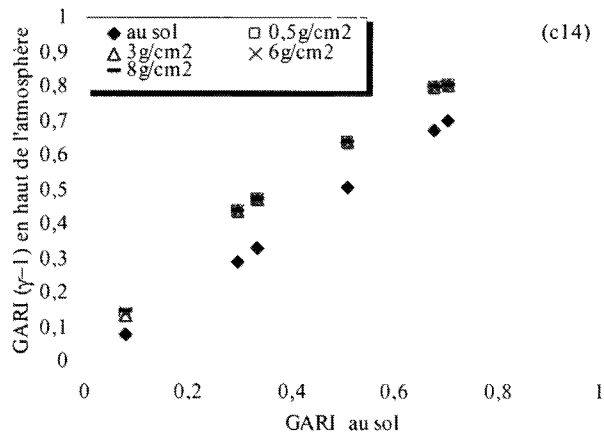
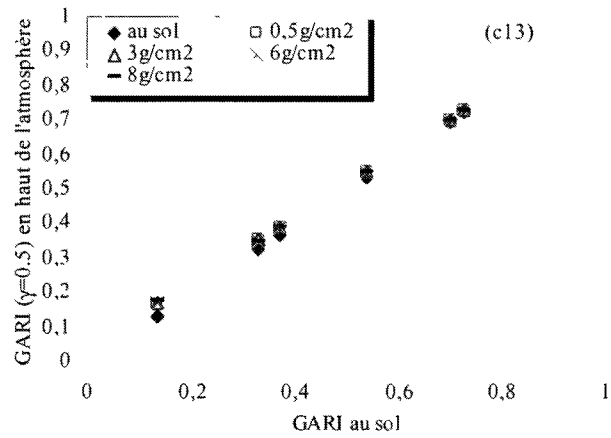


Figure 4.9 : Sensibilités des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau pour différents taux de couverture : (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

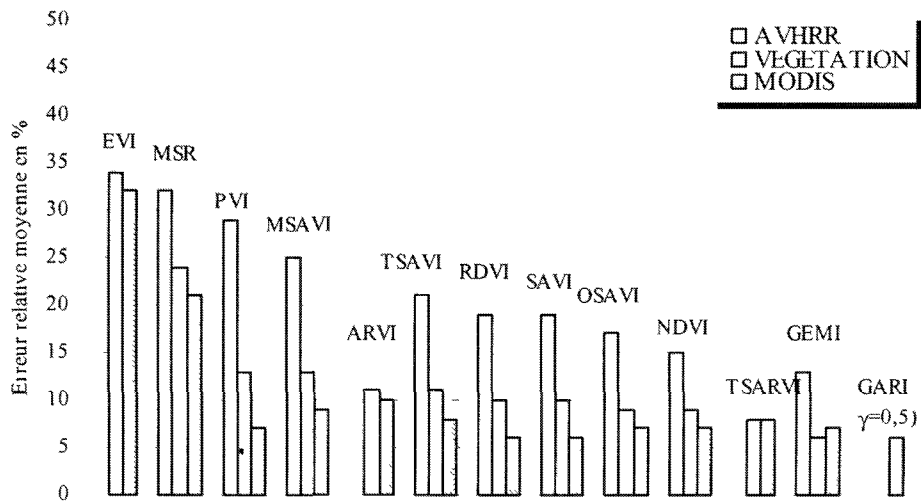


Figure 10 : L'erreur relative moyenne de la sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau sous une concentration de $3\text{g}/\text{cm}^2$ pour les trois capteurs : AVHRR, VEGETATION et MODIS

4.3.2.3. L'absorption par l'ozone

Bien que l'ozone soit une composante atmosphérique absorbant le rayonnement électromagnétique dans certaines longueurs d'ondes (inférieur à 0,3 μm et à 0,6 μm), la conception des indices de végétation ne considère jamais l'effet de ce paramètre atmosphérique. Afin d'analyser l'impact de l'absorption par l'ozone nous avons réalisé plusieurs simulations en variant la concentration en ozone sur les différentes couvertures au sol et en considérant une atmosphère sans aérosols. À l'aide du modèle de transfert radiatif 6S, on a choisi les concentrations correspondant aux valeurs 0,247 g/cm^2 , 0,346 g/cm^2 , 0,395 g/cm^2 , 0,48 g/cm^2 . On a utilisé également, deux valeurs extrêmes du contenu en ozone correspondant aux valeurs de 0,495 g/cm^2 et 0,959 g/cm^2 . L'analyse de la réponse spectrale pour les bandes du visible et du proche infrarouge pour les trois capteurs satellitaires montre que l'effet de l'absorption par l'ozone agit de la même façon à celui de l'absorption par la vapeur d'eau, autrement dit en diminuant la réflectance dans le proche infrarouge.

En ce qui concerne les indices de végétation, bien entendu leurs valeurs diminuent au fur et à mesure que la concentration de l'ozone augmente. En comparaison avec l'effet de l'absorption par la vapeur d'eau, les indices utilisés dans cette étude montrent une sensibilité beaucoup plus faible à l'absorption par l'ozone. Cependant, cet effet ne peut être négligé surtout pour les indices de végétation dérivés du capteur AVHRR. Comme dans les cas précédents, l'indice spectral MSR (figures 4.11.a1, 4.11.b1 et 4.11.c1) présente la dynamique la plus élevée et également l'erreur la plus grande. Pour cet indice, l'erreur relative atteint 23 % pour AVHRR, 20 % pour VEGETATION et 16 % pour MODIS. En plus de la grande sensibilité du MSR aux propriétés optiques des sols nus, de la diffusion atmosphérique, de l'absorption par la vapeur d'eau, sa sensibilité à la concentration en ozone vient confirmer que le MSR ne peut être utilisé pour la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans l'occupation du sol.

Parmi les indices les plus sensibles aussi à cet effet, on note le EVI (figures 4.11.b2 et 4.11.c2). La sensibilité de celui-ci à la concentration en ozone est beaucoup plus faible en comparaison avec sa sensibilité à la vapeur d'eau ou aux aérosols atmosphériques. Pour une concentration

d'ozone extrême ($U_{O_3} = 0,959 \text{ g.cm}^2$), l'erreur pour cet indice est de l'ordre de 19 % pour les deux capteurs VEGETATION et MODIS. Quant, au comportement du GARI (figure 4.11.c1/c15), il varie largement en fonction de la valeur du coefficient d'autocorrection atmosphérique. Il est vraiment difficile de juger son comportement si ce coefficient d'autocorrection atmosphérique n'est pas calculé avec sa vraie valeur. Toutefois, l'erreur la plus faible correspond à l'indice GARI calculé avec un coefficient γ égale à 0,5. Pour une végétation complètement dense l'erreur sur cet indice est de 7 %. Généralement, plus la quantité de la végétation diminue plus l'erreur augmente, pour atteindre une erreur de 15 % pour un sol complètement nu.

Lorsque nous considérons un couvert dense sous des conditions d'observation favorable mais avec une concentration extrême en ozone, l'erreur sur l'indice PVI (figure 4.11.a2, 4.11.b3 et 4.11.c3) atteint 15 % pour AVHRR et 8 % pour VEGETATION. Toutefois, avec la fine résolution spectrale de MODIS, l'erreur relative sur le PVI ne dépasse pas 4%. Par ailleurs, plus la végétation devient éparse, plus l'erreur devient faible. Ainsi, pour un couvert à 50 % de défoliation, l'erreur sur le PVI atteint 8 % pour AVHRR, 5 % pour VEGETATION, alors que pour MODIS l'erreur reste toujours inférieure à 1 %.

Le MSAVI montre une bonne résistance aux variations de la concentration de la vapeur d'eau et d'ozone notamment pour le capteur MODIS (figure 4.11.a3, 4.11.b4 et 4.11.c4). En effet, pour la large résolution spectrale de AVHRR, l'erreur sur le MSAVI est de 14% lorsque le couvert est très dense, alors qu'elle est de 7 % pour un couvert moyennement dense. Si nous considérons ces deux taux de couvertures et le capteur VEGETATION, l'erreur relative sur cet indice est de 10 % et 5 %. Par contre, la fine résolution spectrale de MODIS offre une meilleure précision, autrement dit l'erreur relative est de 6 % pour un couvert dense, et 2 % pour un couvert moyennement dense.

Quant aux indices qui s'ajustent par rapport aux sols nus (TSAVI, OSAVI, RDVI et SAVI) ils montrent presque la même sensibilité aux variations de la concentration d'ozone. Cette sensibilité diminue significativement lors de l'utilisation de la fine résolution spectrale de

MODIS (figures 4.11.a4/a7, 4.11.b5/b8 et 4.11.c5/c8). Pour le TSAVI, l'erreur relative est de 11 %, 9 % et 5 % pour AVHRR, VEGETATION et MODIS, respectivement. Toutefois, les trois indices RDVI, OSAVI et SAVI montrent une sensibilité presque similaire dans les bandes d'un même capteur. En effet, l'erreur relative est d'environ 9 % pour AVHRR, 7 % pour VEGETATION et 4 % pour MODIS.

À la différence des quatre indices précédents, le NDVI montre une erreur relative similaire entre AVHRR et VEGETATION (figures 4.11.a8, 4.11.b10, 4.11.c13). Dans le cas d'une concentration extrême en ozone et un couvert très dense, l'erreur relative sur le NDVI est de 8 %. Si nous considérons les mêmes conditions, nous remarquons que les bandes de MODIS normalisent mieux l'effet de l'absorption par l'ozone sur cet indice avec une erreur relative qui ne dépasse pas 4 %.

Les indices développés dans la perspective de corriger les effets atmosphériques (ARVI et TSARVI) normalisent très bien les variations de la concentration d'ozone dans l'atmosphère. Indépendamment du capteur considéré, le ARVI calculé avec un coefficient d'autocorrection atmosphérique égale à 0,5 surestime le couvert d'environ 4%. Dans le cas d'une concentration extrême ($0,959 \text{ g/cm}^2$) en ozone et pour un couvert très dense, l'erreur relative sur cet indice ne dépasse pas les 7 % (figures 4.12.b5 et 4.12.c5). Pour la même concentration d'ozone ($0,959 \text{ g/cm}^3$) et un couvert très dense, l'erreur relative sur le TSARVI ($\gamma = 0,5$) ne dépasse pas 5 % et 3 %, respectivement, pour VEGETATION (figure 4.11.b11) et MODIS (figure 4.11.c14). Nous pouvons donc conclure à ce niveau que le TSARVI est l'indice le moins affecté par les effets atmosphériques et les artefacts causés par les variations des propriétés optiques des sols nus sous-jacents.

Par ailleurs, l'indice GEMI présente également une faible sensibilité à l'effet de l'absorption par l'ozone. Pour un couvert dense, l'erreur relative sur cet indice est d'environ 6 %, 2 % et 1 % pour AVHRR, VEGETATION et MODIS, respectivement. Entre autres, comme nous avons discuté auparavant, le GEMI est un indice moins affecté par la vapeur d'eau. Toutefois, les effets

des propriétés optiques des sols et les effets dus à la diffusion atmosphérique exercent sur le GEMI une influence considérable (figures 4.11.a9, 4.11.b12, 4.11.c15).

La figure 4.12 résume l'impact de l'effet de l'absorption par l'ozone sur les indices de végétation pour une forte concentration de $0,959 \text{ g/cm}^2$ et un couvert complètement dense. Cette figure illustre clairement l'avantage de la fine résolution spectrale dans la normalisation de cet effet atmosphérique. En général, et à l'exception des trois premiers indices (EVI, MSR et GARI), tous les indices de végétation utilisés dans cette étude se caractérisent par une bonne résistance à l'effet de l'absorption par l'ozone notamment dans les canaux du capteur MODIS, soit une erreur relative maximale de 6 %. Ce capteur semble éviter à la perfection les bandes d'absorption d'ozone. Par contre, l'erreur est plus élevée (environ 10 %) dans le cas de VEGETATION, mais plus modérée que dans le cas de AVHRR. La large résolution spectrale de ce dernier cause des erreurs relatives qui varient entre 6 % et 15%, entre l'indice le plus sensible (PVI) et le plus résistant (GEMI). En outre, cette figure souligne également l'excellente résistance du TSARVI à l'effet de l'absorption par l'ozone.

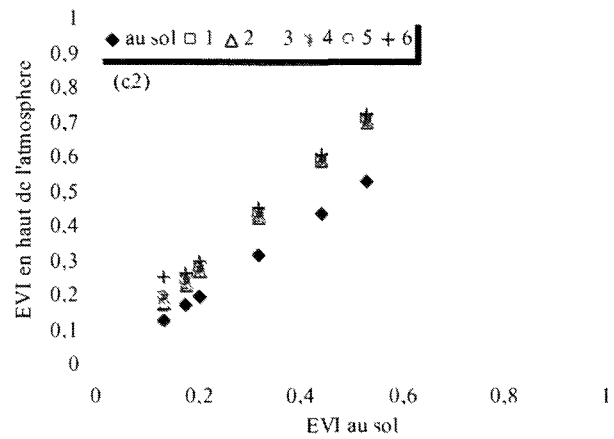
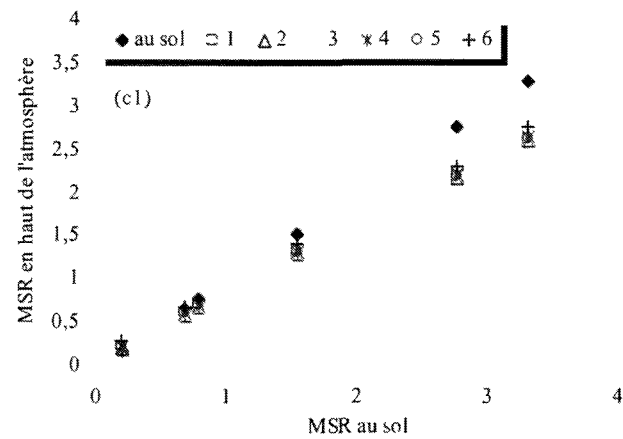
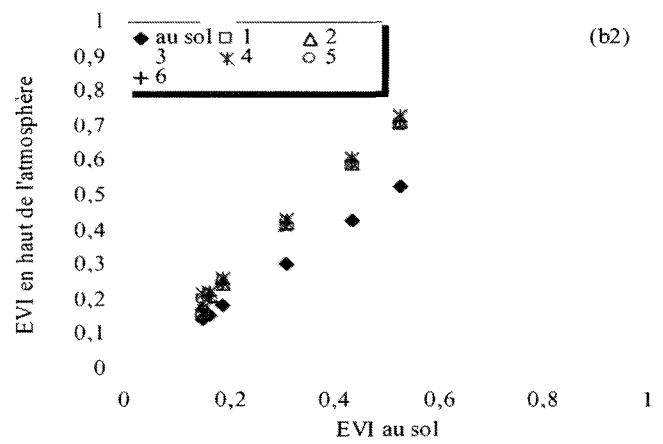
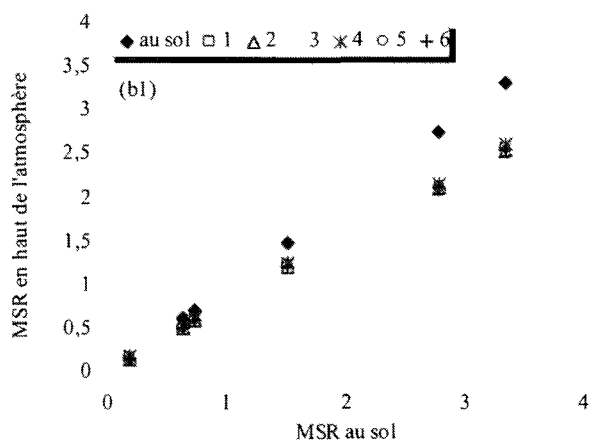
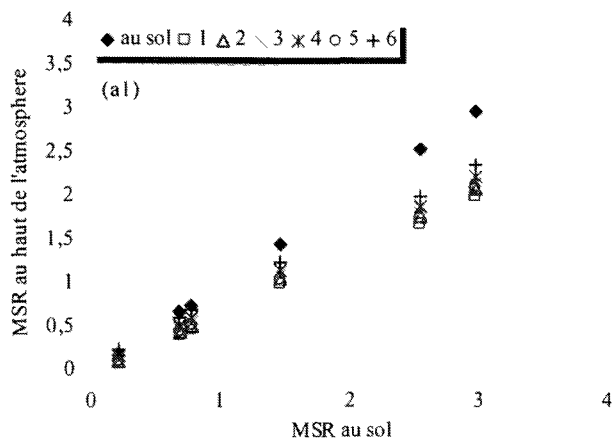


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone :
 (1 :0,247g/cm²); (2 :0,346g/cm²); (3 :0,395g/cm²); (4 :0,48g/cm²); (5 :0,495g/cm²);
 (6 :0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS

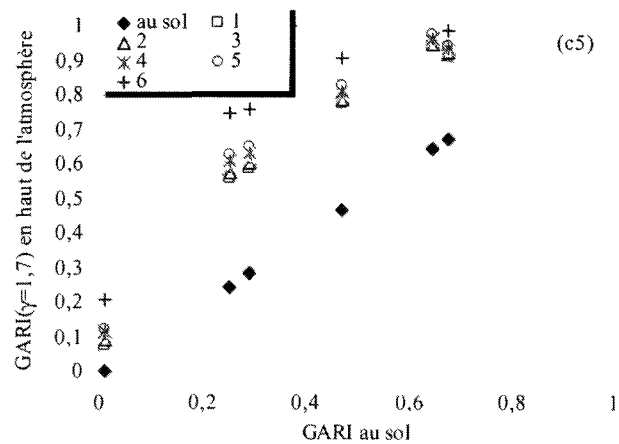
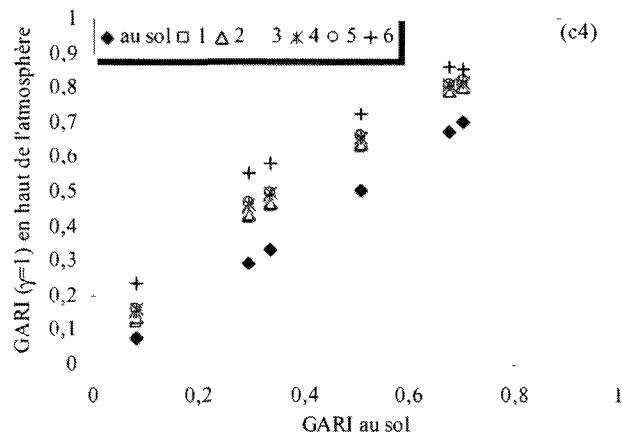
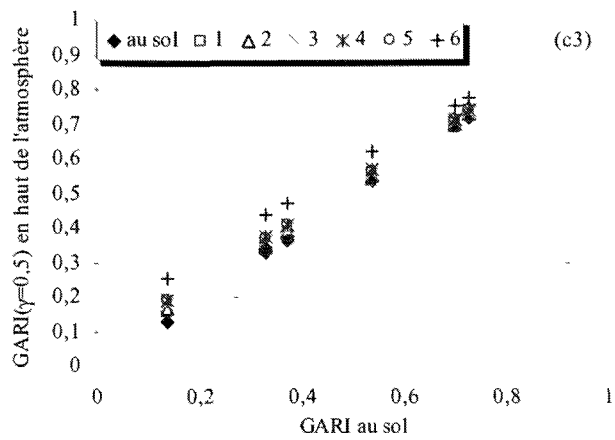


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone :
 (1 :0,247g/cm²); (2 :0,346g/cm²); (3 :0,395g/cm²); (4 :0,48g/cm²); (5 :0,495g/cm²);
 (6 :0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

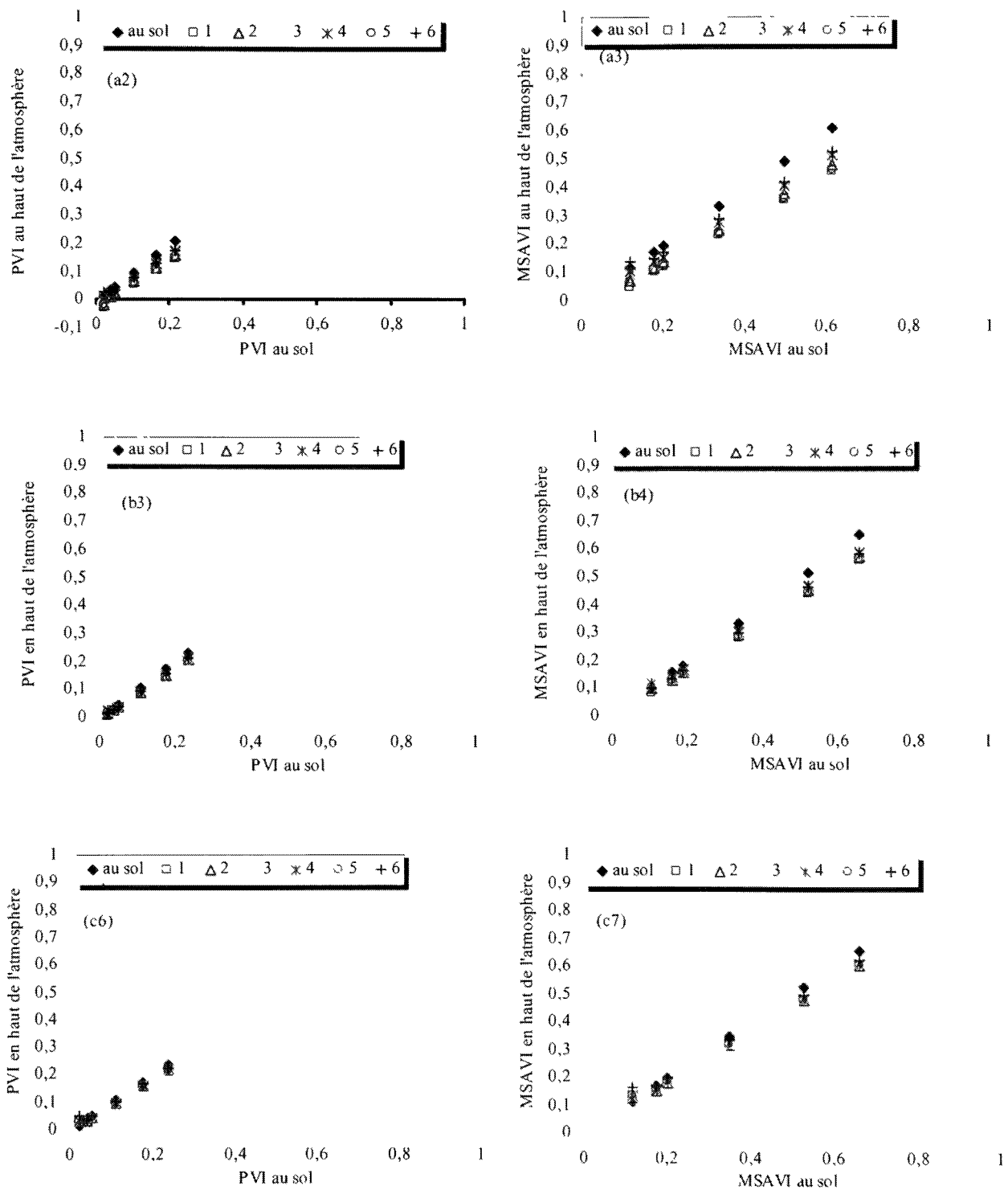


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone : (1 :0,247g/cm²); (2 :0,346g/cm²); (3 :0,395g/cm²); (4 :0,48g/cm²); (5 :0,495g/cm²); (6 :0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

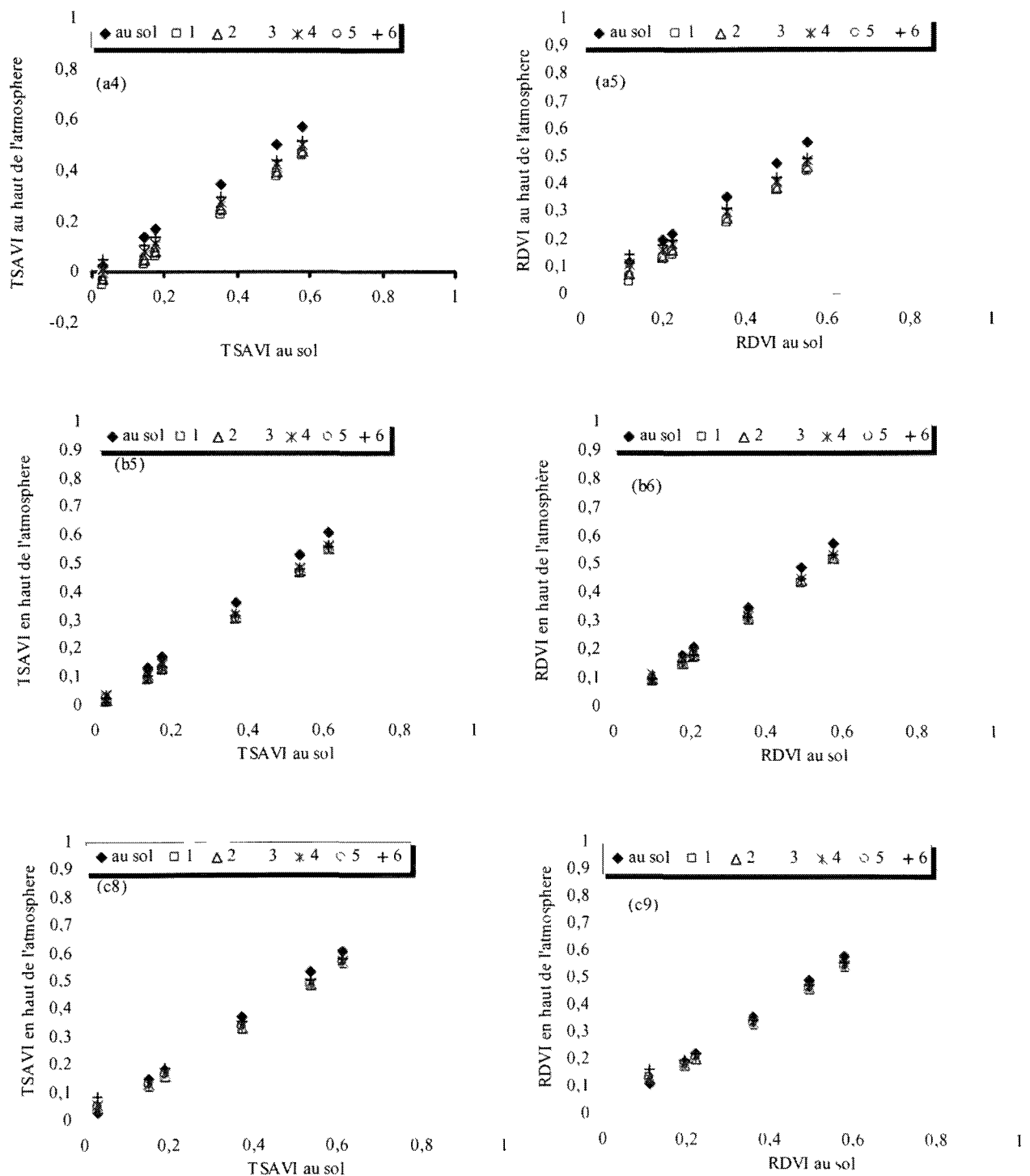


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone : (1 :0,247g/cm²); (2 :0,346g/cm²); (3 :0,395g/cm²); (4 :0,48g/cm²); (5 :0,495g/cm²); (6 :0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

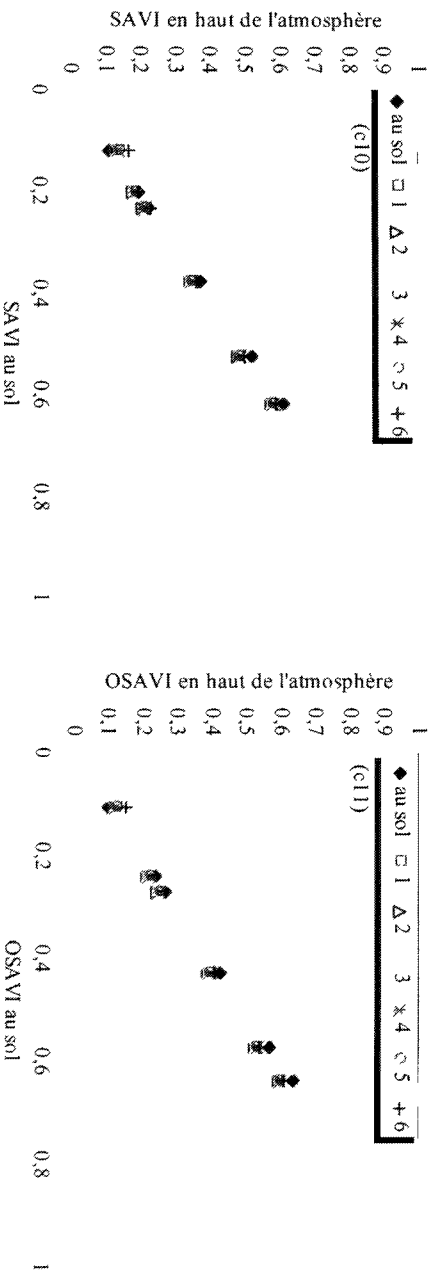
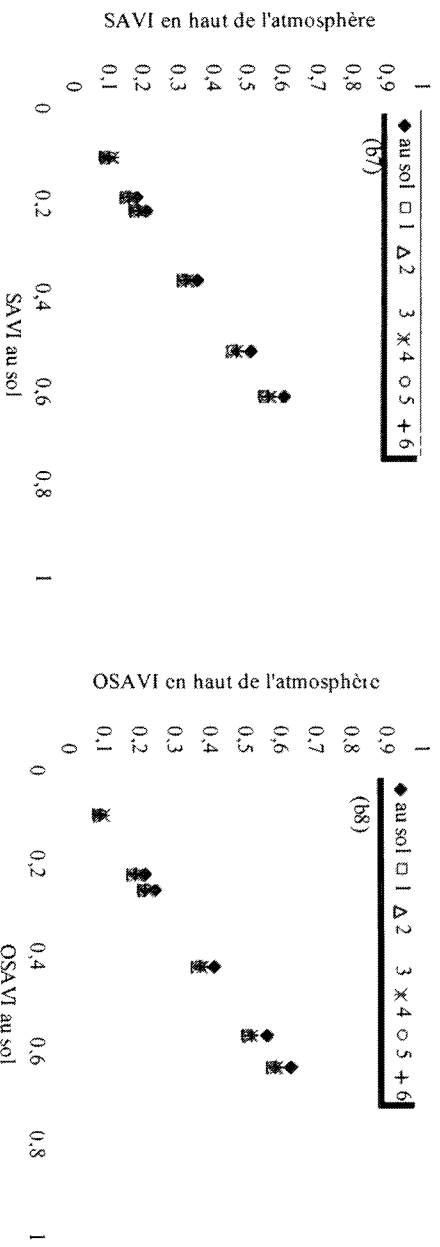
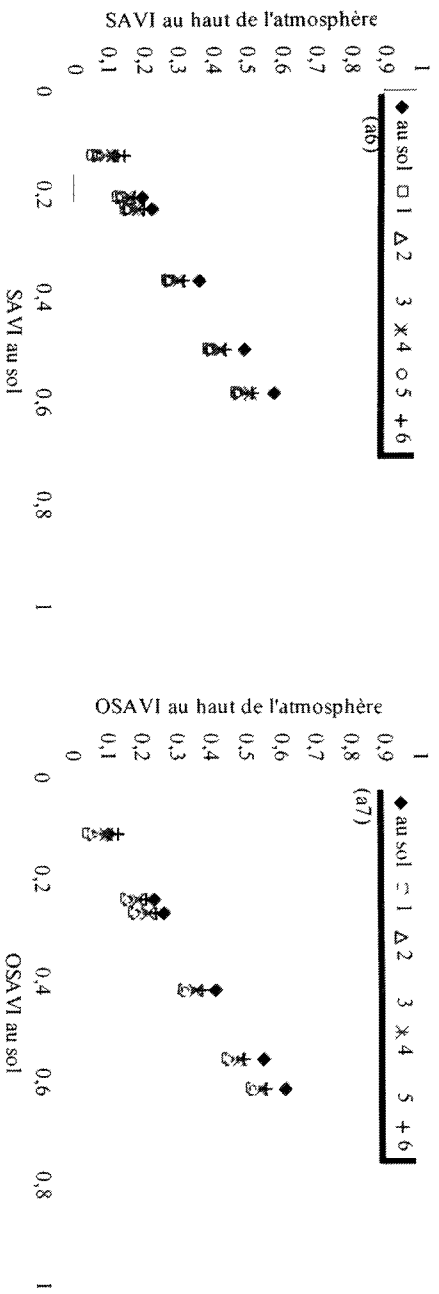


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone : (1 : 0,247g/cm²); (2 : 0,346g/cm²); (3 : 0,395g/cm²); (4 : 0,48g/cm²); (5 : 0,495g/cm²); (6 : 0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

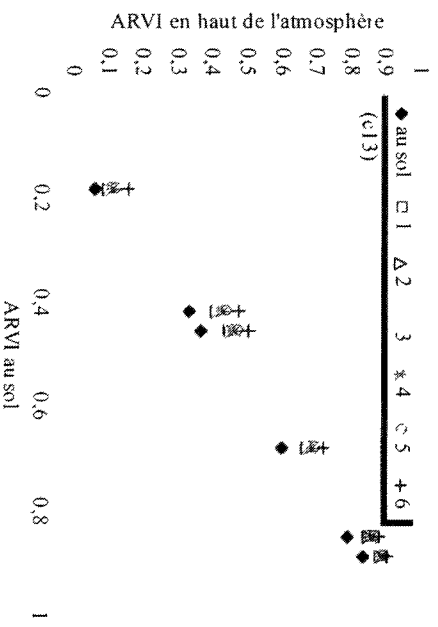
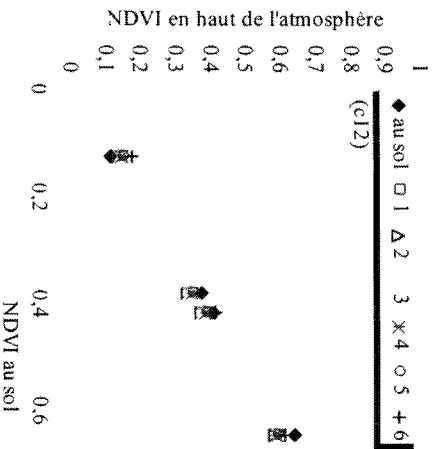
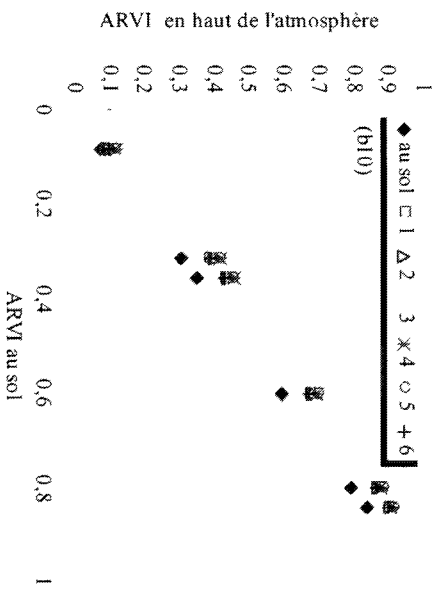
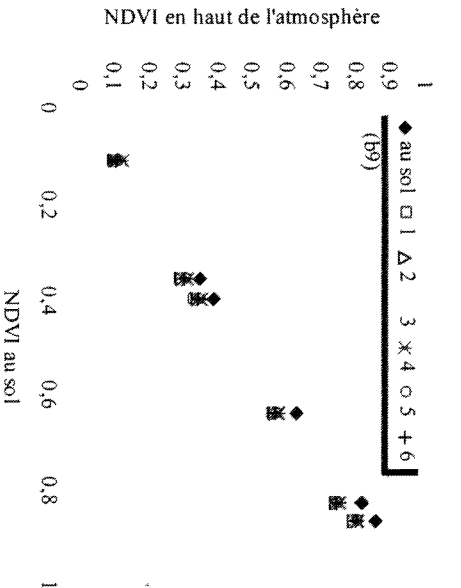
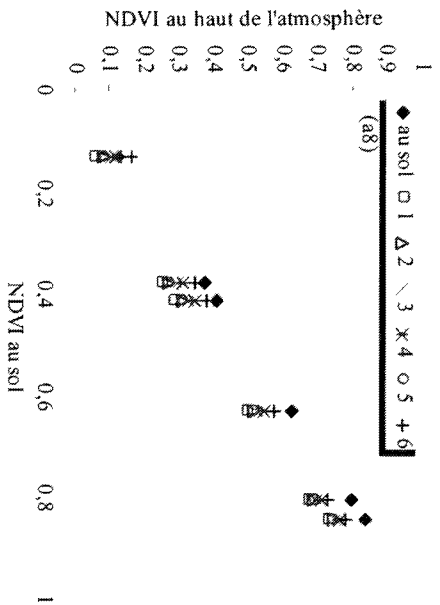


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone :
 (1 : 0,247g/cm²); (2 : 0,346g/cm²); (3 : 0,395g/cm²); (4 : 0,48g/cm²); (5 : 0,495g/cm²);
 (6 : 0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGTATION & (c) MODIS (suite)

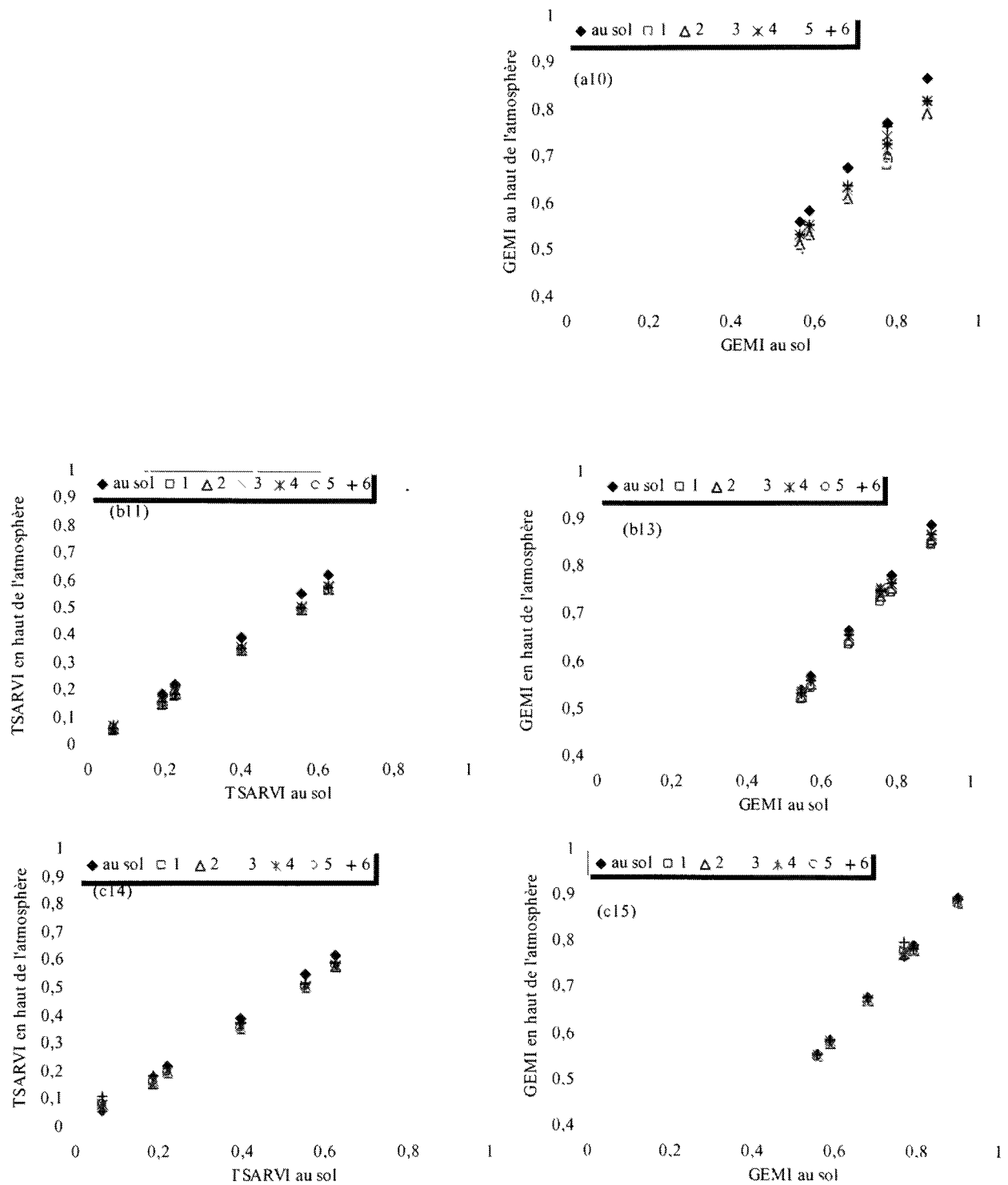


Figure 4.11 : Sensibilité des indices de végétation à l'effet de l'absorption par l'ozone :
 (1 :0,247g/cm²); (2 :0,346g/cm²); (3 :0,395g/cm²); (4 :0,48g/cm²); (5 :0,495g/cm²);
 (6 :0,959g/cm²) (a) AVHRR, (b) VEGETATION & (c) MODIS (suite)

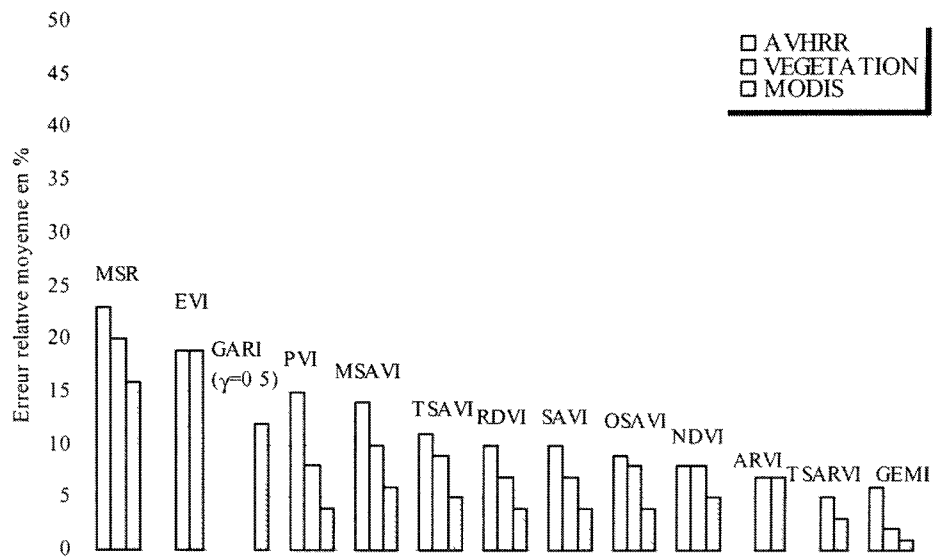


Figure 4.12 : Erreur relative moyenne de la sensibilité de tous les indices de végétation vis à vis de l'absorption par l'ozone en fonction des capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS

4.3.3. Analyse des effets de la topographie

Dans cette section nous analysons l'impact des variations topographiques sur les indices de végétation dérivés des données simulées dans les bandes spectrales de MODIS, VEGETATION et AVHRR. Pour ce faire nous avons comparé l'effet de la variation topographique sur chaque indice en considérant les trois capteurs et en fixant la visibilité atmosphérique en une valeur assez favorable en télédétection d'observation de la terre, soit une visibilité égale à 25 km. Par ailleurs, afin de satisfaire notre curiosité scientifique nous avons analysé l'effet de la topographie en considérant deux visibilités extrêmes. Soit une visibilité de 10 km qui exprime des conditions atmosphériques très défavorables en télédétection puisque à cette visibilité les images ne peuvent être exploitées. L'autre visibilité est égale à 100 km, elle exprime des conditions d'observation idéales en télédétection. Les annexes B et C résument les graphiques qui illustrent les effets de la topographie en considérant ces deux visibilités extrêmes.

Généralement, dans les canaux du visible la réflectance diminue avec l'augmentation de l'altitude du terrain surtout lorsque la densité du couvert est faible. Cet effet est plus important pour une faible visibilité (10 km) à cause de la forte concentration des aérosols dans l'atmosphère. Mais il est moins prononcé lorsque les conditions d'observation deviennent meilleures à 100 km de visibilité (faible concentration des aérosols dans l'atmosphère). En outre, les concentrations des différentes composantes atmosphériques varient dans l'atmosphère en fonction de l'altitude ce qui explique l'impact sur les valeurs des réflectances simulées aux capteurs. Quant au proche infrarouge, plus l'altitude du terrain augmente, plus la réflectance du proche infrarouge augmente à cause de l'effet de l'absorption qui devient minime.

Dans cette section nous considérons seulement le cas où la visibilité est égale à 25 km. Afin d'analyser l'effet de la topographie sur les indices de végétation, nous avons comparé les indices calculés à différentes altitudes à ceux calculés pour un terrain horizontal situé au niveau moyen de la mer. Les erreurs relatives ont été évaluées par km d'altitude. Les différents graphiques de la figure (4.13) illustrent clairement les variations dues à la topographie sur les indices de

végétation. Les valeurs de ces derniers augmentent en fonction de l'augmentation de l'altitude du terrain, surtout lorsque le couvert est partiellement ou moyennement dense. Également, on remarque qu'indépendamment de la résolution spectrale du capteur sélectionné, la variabilité des indices engendrée par une variation topographique s'amplifie lorsque les conditions atmosphériques deviennent défavorables (annexe B).

Parmi les indices de végétation les plus sensibles aux variations topographiques mentionnons le PVI (figures 4.13.a1) et le TSAVI (figures 4.13.a2) qui montrent des erreurs relatives qui sont de l'ordre de 32 % par km dans le cas du capteur AVHRR. Sous des conditions d'observation défavorables ces erreurs augmentent jusqu'à 58 % par km (visibilité de 10 km, annexe B). Si nous considérons le capteur VEGETATION, les erreurs relatives sur ces deux indices (figures 4.13.b1 et 4.13.b2) deviennent trois fois plus petites que celles calculées si nous considérons le capteur AVHRR. Pour une visibilité de 25 km et pour un faible pourcentage du couvert, l'erreur sur ces deux indices est d'environ 11 % par km. Évidemment, une diminution de la visibilité atmosphérique (10 km, annexe B) augmente cette erreur pour une valeur de 19 % par km. Généralement, les variations topographiques peuvent attribuer à ces deux indices des valeurs significativement différentes par rapport à leur vraie valeur au sol ce qui constitue une limite très sévère pour le PVI et le TSAVI, pour la caractérisation de la végétation dans des territoires accidentés. Toutefois, si nous considérons le capteur MODIS et des mauvaises conditions d'observations (visibilité de 10 km, annexe B) par exemple, l'erreur sur le PVI et le TSAVI est de 12 % par km. Tandis que pour une visibilité favorable de 25 km (figures 4.13.c1, 4.13.c2), cette erreur ne dépasse pas 6 %. Bien entendu, l'augmentation de la visibilité est en faveur d'une réduction d'erreur qui devient égale à 3 % par km (annexe C). Ceci nous permet de conclure que les bandes spectrales étroites de MODIS permettent de minimiser correctement les effets combinés de la topographie et de l'atmosphère.

Par ailleurs, l'erreur relative est presque similaire pour les deux indices MSR et MSAVI. Dans les canaux de AVHRR, cette erreur atteint 15 % par km pour une végétation à faible taux de couverture et sous des conditions d'observation moyennement favorables, cas d'une visibilité de 25 km (figures 4.13.a3 et les figures 4.13.a4). Sous les mêmes conditions atmosphériques et de

couverture au sol, cette incertitude est réduite à 8 % par km dans le cas du capteur VEGETATION (figures 4.13.b3 et 4.13.b4), et à 5 % par km dans le cas du capteur MODIS (figures 4.13.c3 et 4.13.c4). Cependant, lorsque les conditions d'observation deviennent défavorables, l'incertitude augmente à 23 % par km dans le cas de AVHRR, et 11 % dans le cas de VEGETATION (voir aussi l'annexe B). Par contre, dans les bandes de MODIS l'erreur sur ces deux indices ne dépasse pas 5 % indépendamment de l'épaisseur optique de l'atmosphère.

L'effort déployé pour rendre les indices SAVI, OSAVI et RDVI plus performant pour la caractérisation de la végétation reste insignifiant dans le cas des terrains à relief accidenté. La sensibilité des indices SAVI (figure 4.14.a5), RDVI (figure 4.13.a6) et OSAVI (figure 4.13.a7), est presque similaire avec une erreur relative moyenne ne dépassant pas 15 % par km dans les bandes de AVHRR. Dérivée des données VEGETATION, l'erreur sur ces indices occupe une position intermédiaire qui est de l'ordre de 7 %. Bien entendu, la fine résolution spectrale de MODIS offre toujours une meilleure précision qui est de l'ordre de 3 % par km (figure 4.13.c5, c6 et c7).

D'une façon similaire aux autres indices, le NDVI qui est l'indice le plus populaire et le plus utilisé montre aussi une sensibilité significative à la résolution spectrale. Autrement dit, l'erreur relative sur le NDVI dérivé des canaux de AVHRR (figure 4.13.a8) peut atteindre jusqu'à 14 % par km, alors qu'elle est de l'ordre de 4 % par km lors de l'exploitation de la fine résolution spectrale de MODIS (figure 4.13.c8). Bien entendu, les erreurs sur cet indice varient en fonction du taux de la couverture au sol. Or, au fur et à mesure que le couvert devient dense, l'erreur relative devient faible (figure 4.13.a8).

Quant au GARI, son comportement varie avec la valeur du coefficient d'autocorrection atmosphérique (γ). Calculé avec un coefficient d'autocorrection $\gamma = 0,5$ ou avec $\gamma = 1$, l'erreur sur cet indice ne dépasse pas 3 % par km d'altitude. Néanmoins, avec une valeur $\gamma = 1,7$; le GARI montre une erreur plus élevée que les cas précédents et qui peut atteindre 7 % par km (figures 4.13.c9, c10 et c11). Toutefois, bien qu'il soit développé pour être plus performant que le ARVI, le EVI montre une fois de plus ses faiblesses et ses limites. Comparativement aux

autres indices, le EVI est un indice peu sensible aux variations d'altitude du terrain. Quelle que soit la nature de la résolution spectrale du capteur, il affiche une erreur de 5 % par km d'altitude (figures 4.13.b9 et c12).

Du fait que le GEMI est développé pour normaliser les effets atmosphériques, cet indice minimise correctement les effets liés aux variations topographiques à cause de la relation étroite qui existe entre les effets atmosphériques et topographiques. En effet, indépendamment du taux de couverture au sol, le GEMI normalise correctement les effets topographiques. Par contre, nous constatons qu'il est sensible à la résolution spectrale propre au capteur. L'erreur relative est maximale dans les bandes de AVHRR (10 %), alors qu'elle est de l'ordre de 3 % dans les bandes de MODIS (figures 4.13.a9, b10 et c13).

Quant aux autres indices qui sont développés pour normaliser les effets atmosphériques (ARVI et TSARVI), ils normalisent aussi les effets relatifs aux variations de la topographie. On remarque que l'erreur sur le ARVI ($\gamma = 0,5$) est presque la même pour les deux capteurs VEGETATION et MODIS. Elle ne dépasse pas 3 % par km, et augmente graduellement avec la concentration en aérosols. Ainsi, pour une médiocre visibilité (10 km), l'erreur sur le ARVI peut atteindre 10 % par km d'altitude (annexe B). Calculé pour un coefficient d'autocorrection atmosphérique égale à 0,5 ($\gamma = 0,5$), le TSARVI montre une erreur relative très stable et qui varie autour de 2 % par km dans le cas de MODIS et VEGETATION (figures 4.13.b12 et c15).

La figure 4.14 permet une étude comparative entre tous les indices retenus dans cette étude et montre l'erreur relative moyenne causée par les variations topographiques en fonction de la résolution spectrale propre au capteur. Nous constatons que pour une atmosphère relativement claire (visibilité égale à 25 km) et pour une végétation très dense, la fine résolution spectrale permet de minimiser correctement les effets des variations topographiques. En outre, nous remarquons que les indices qui s'ajustent aux variations atmosphériques sont les plus performants de point de vue résistance aux variations du relief du terrain. La performance de ces indices s'explique par l'existence d'une relation très étroite entre la variation de la topographie et la concentration des aérosols dans l'atmosphère.

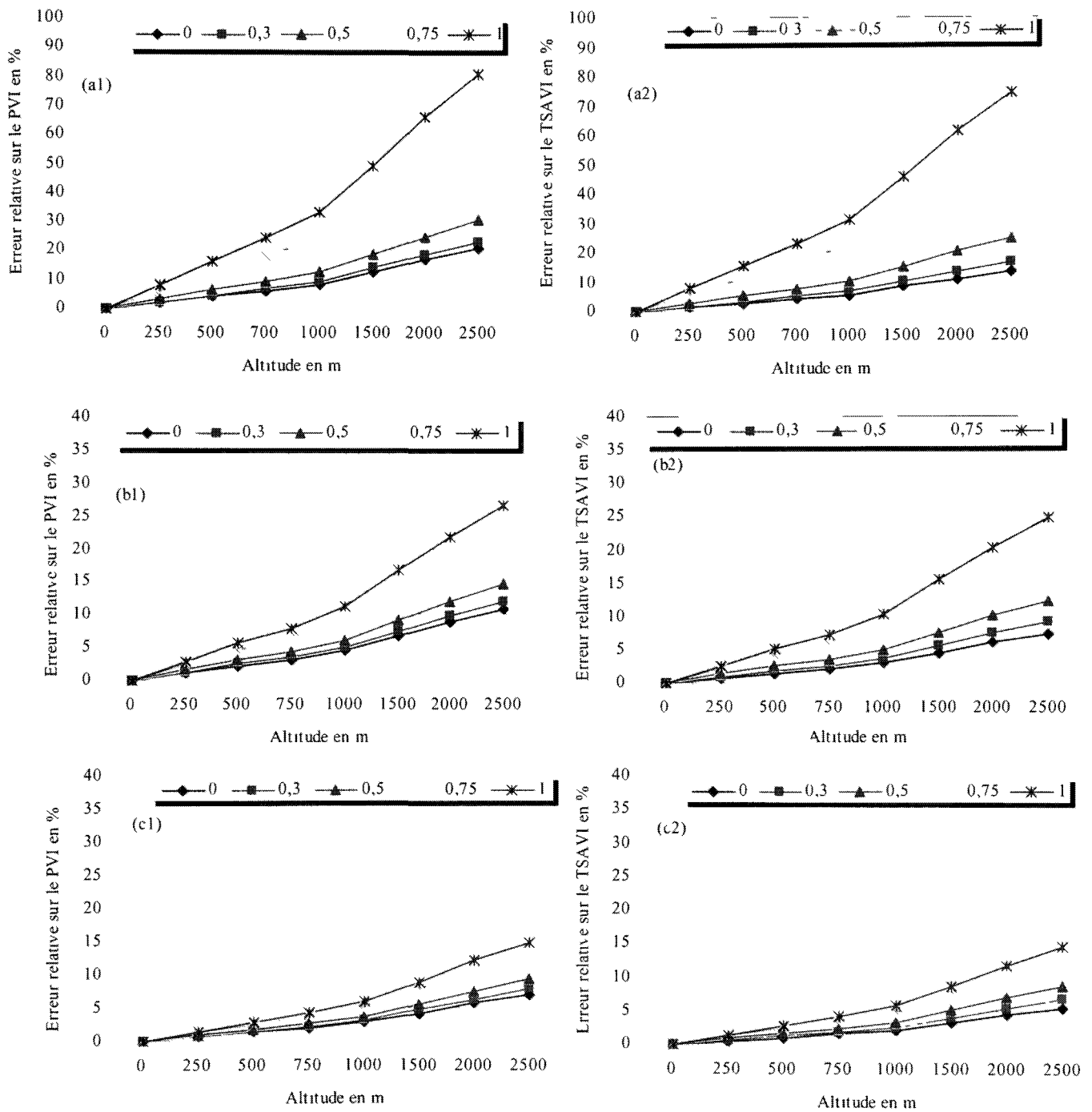


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS

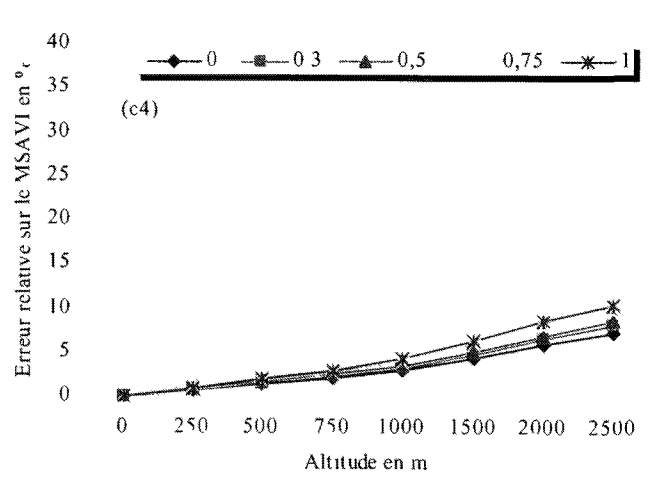
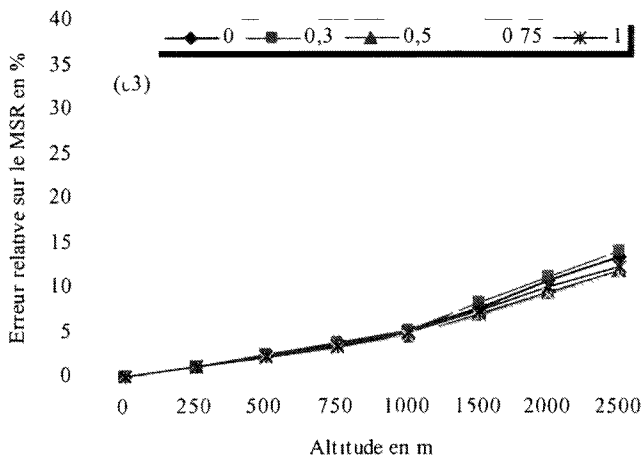
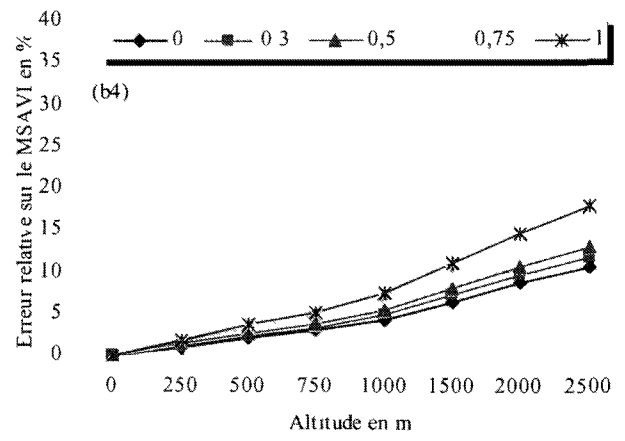
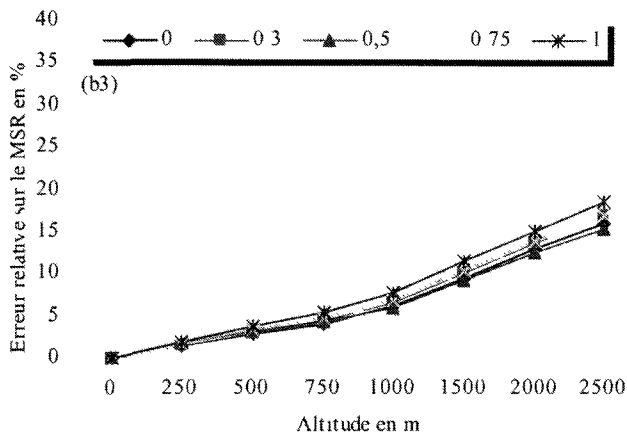
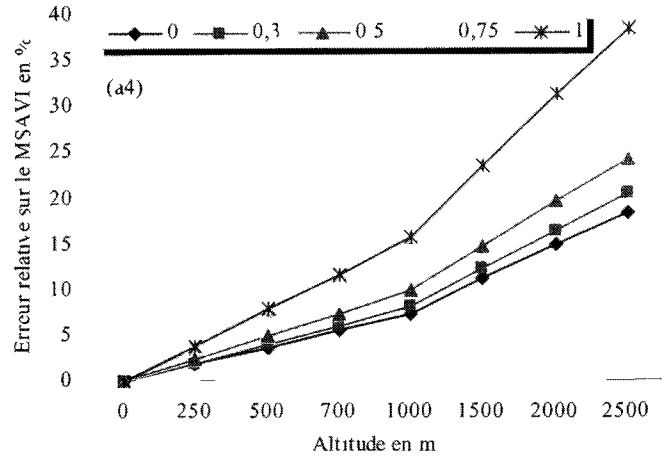
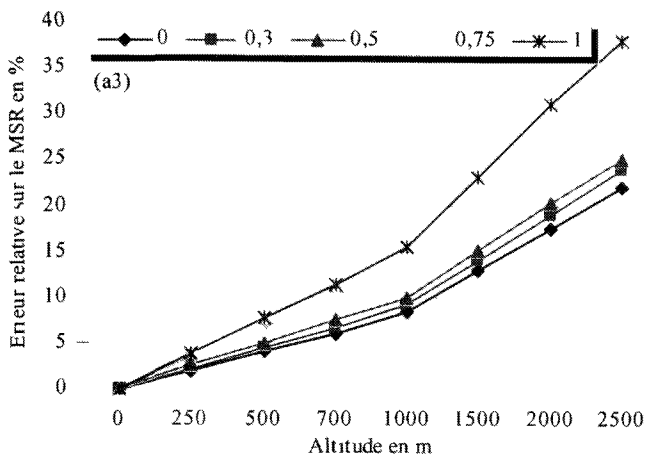


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite) (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite)

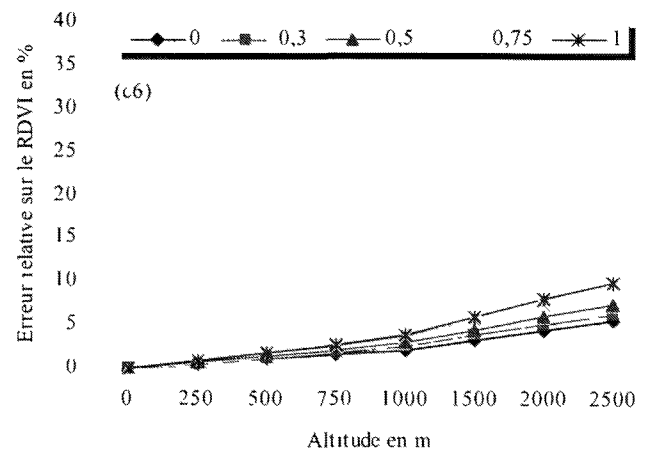
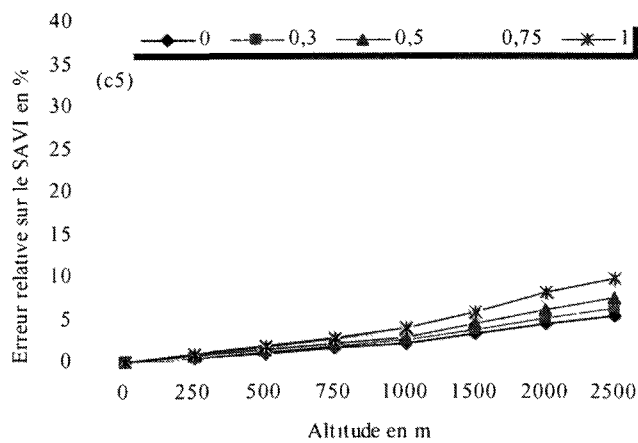
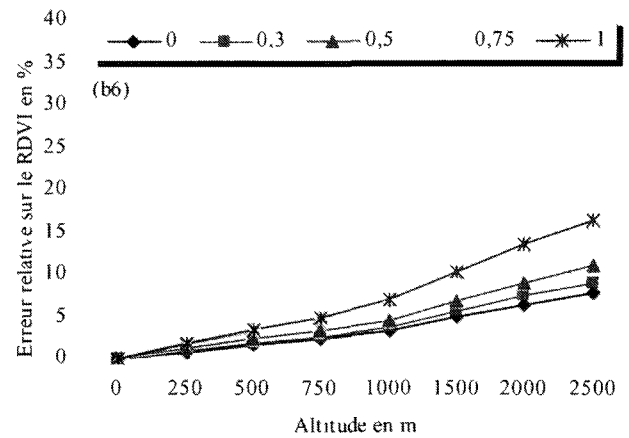
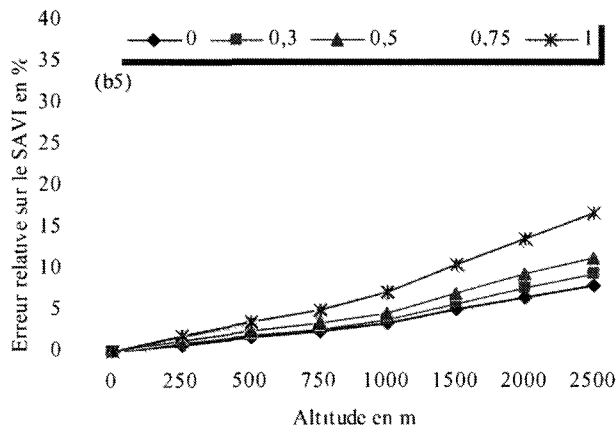
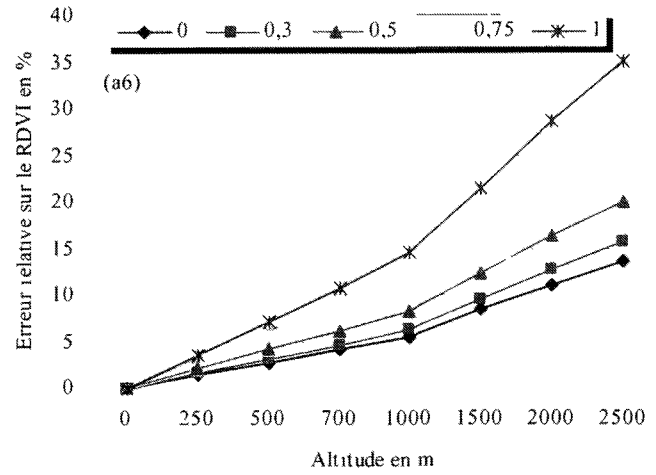
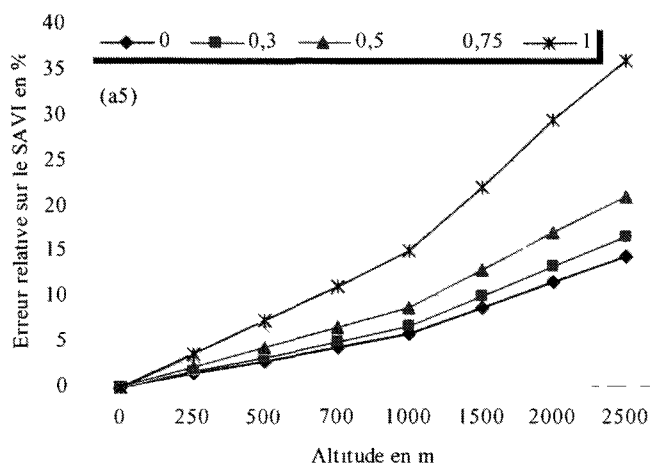


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite)

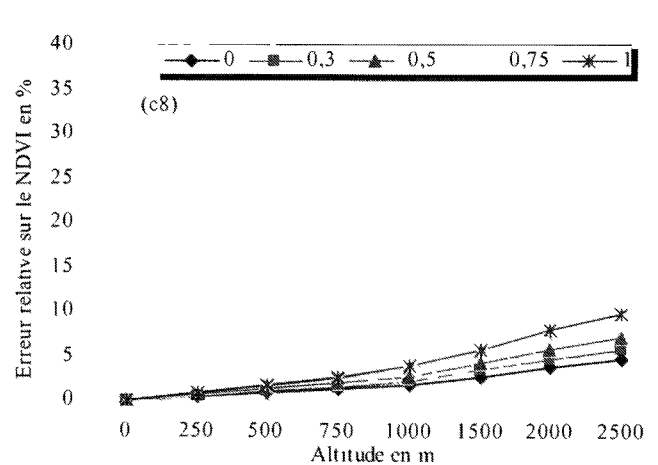
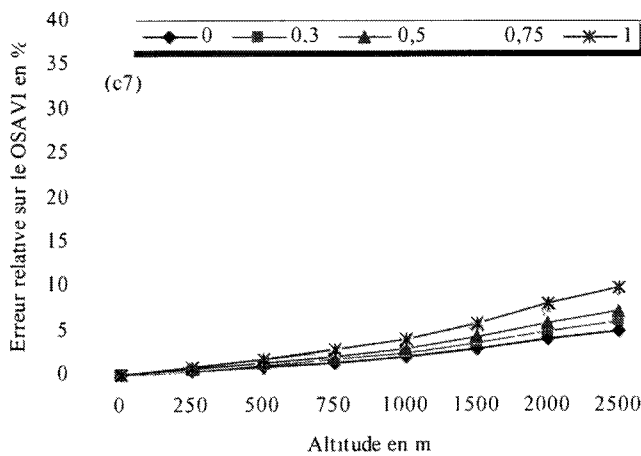
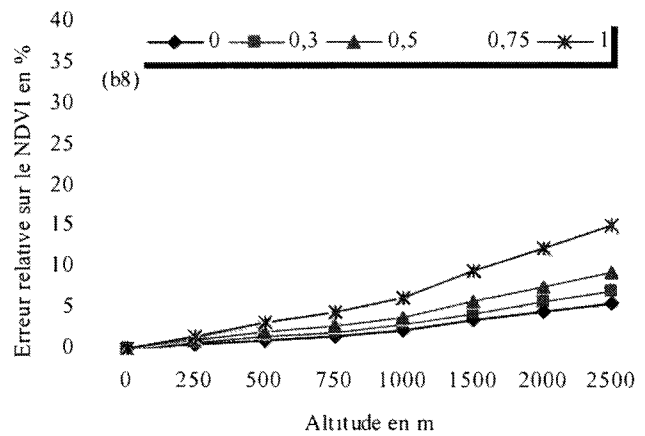
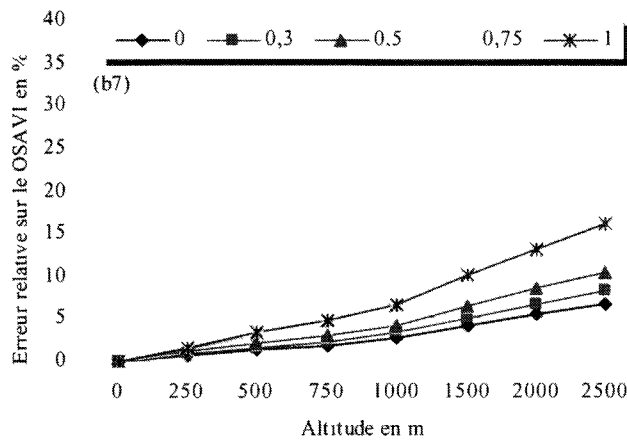
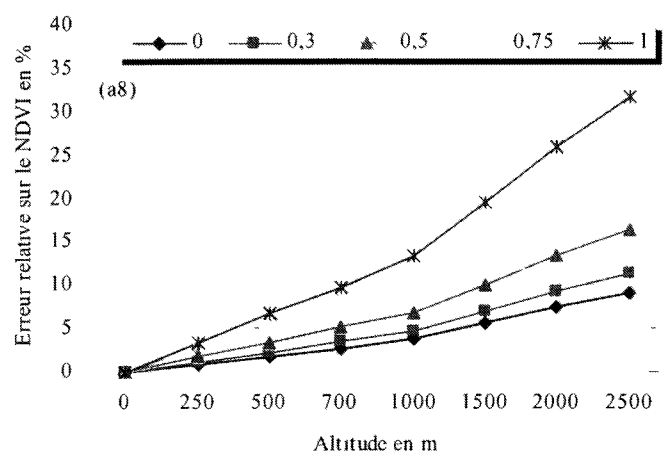
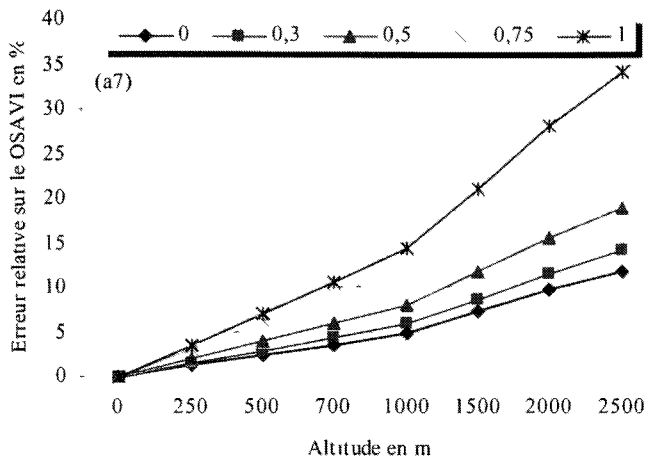


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite)

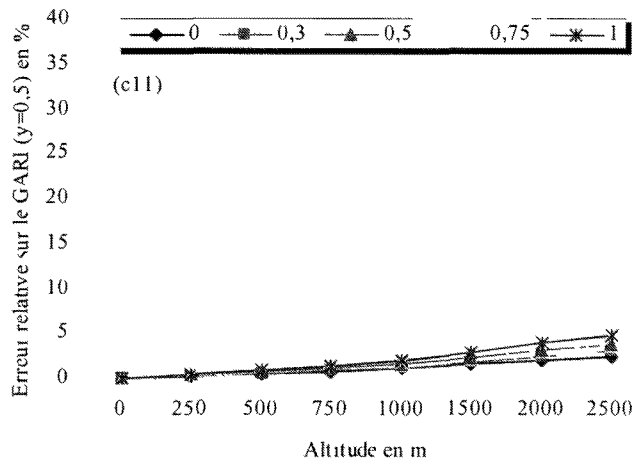
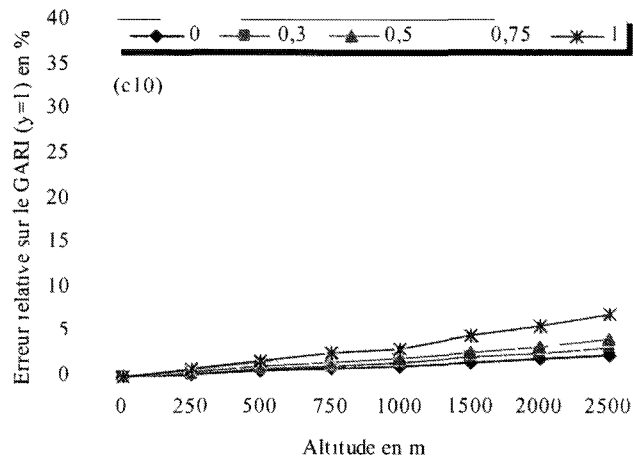
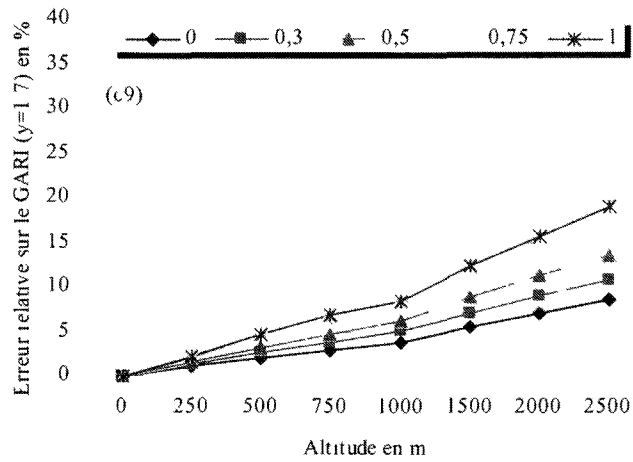


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite)

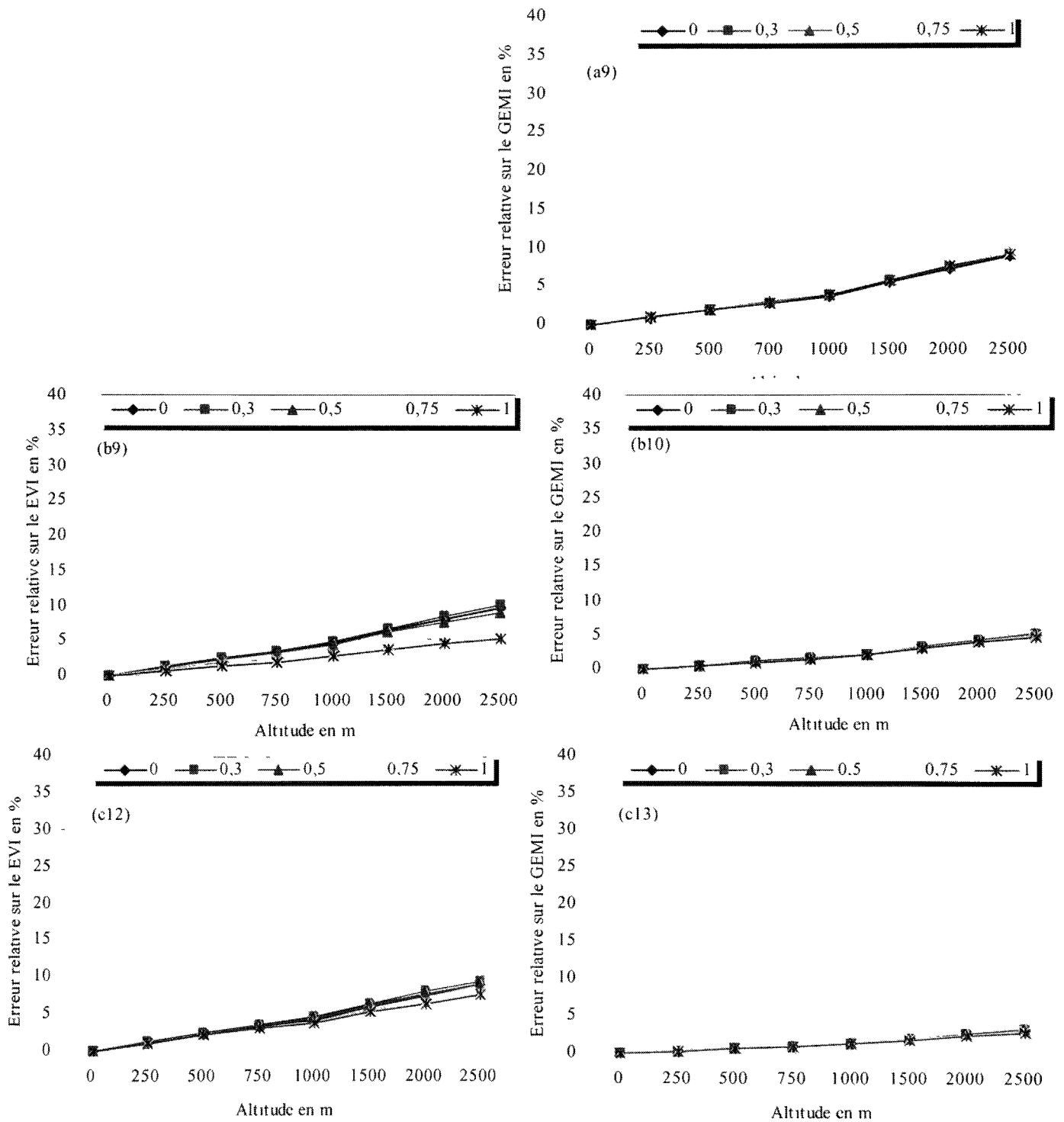


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite)

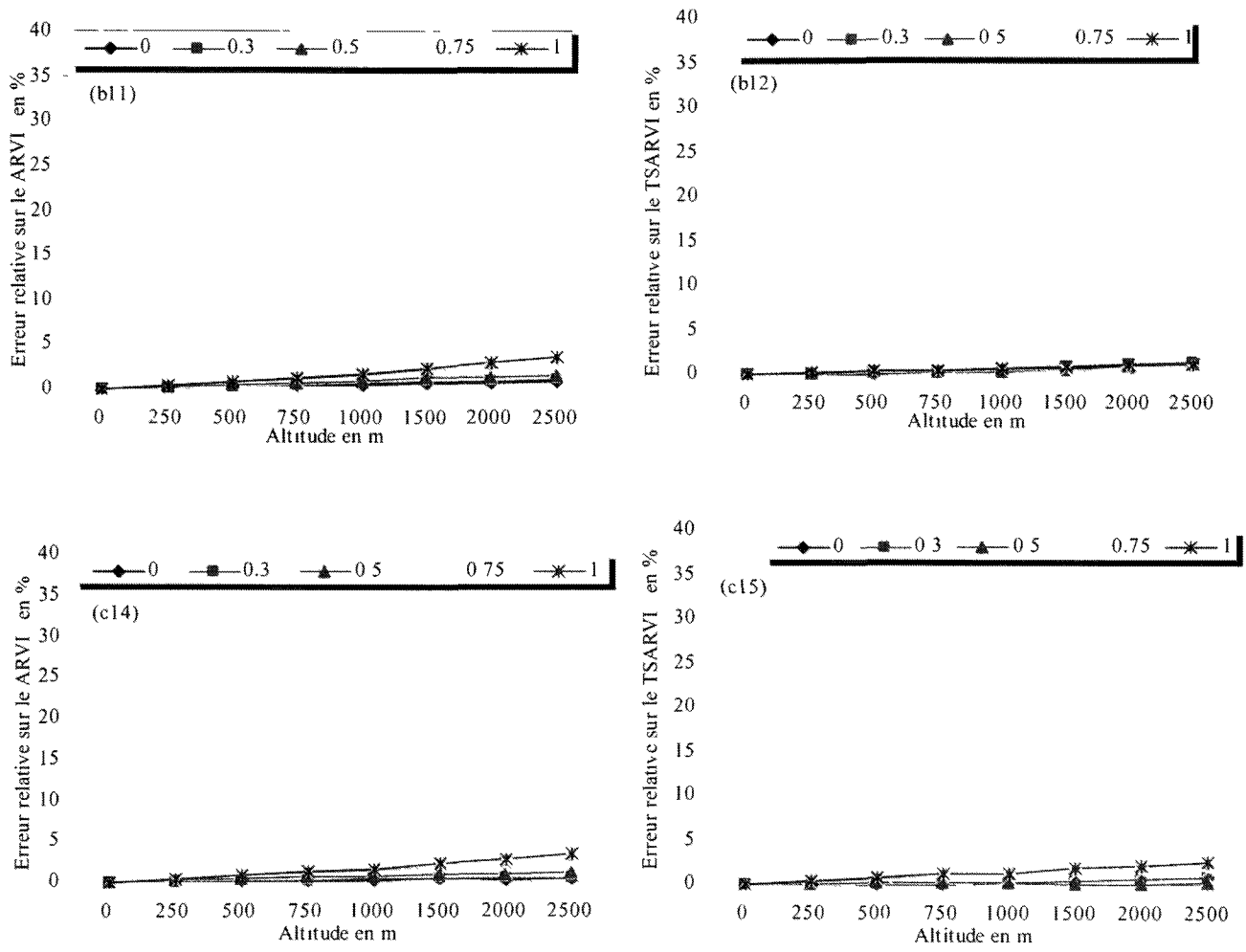


Figure 4.13 : Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 25 km pour les capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS (suite)

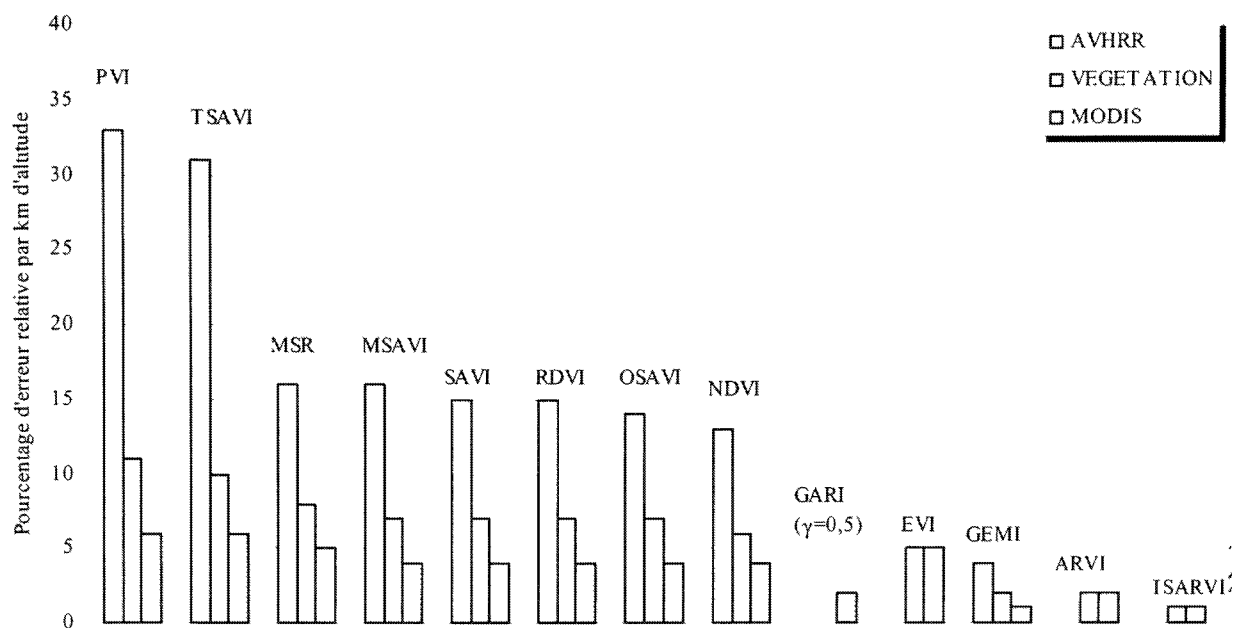


Figure 4.14 : Erreur relative moyenne de la sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie par km d'altitude pour une visibilité de 25 km et pour un couvert dense en fonction des capteurs AVHRR, VEGETATION & MODIS

4.3.4 Analyse des effets bidirectionnels

Le suivi et la gestion des grandes étendues de surfaces forestières nécessitent l'utilisation des données issues de différents capteurs ou d'un même capteur mais à différentes périodes, ce qui implique évidemment différentes géométries d'acquisition. L'utilisation des capteurs comme AVHRR, VEGETATION et MODIS, capteurs à grands champs de visée, impliquent différentes conditions angulaires d'acquisition ce qui créent des variations significatives dans les valeurs des réflectances mesurées et, par conséquent, dans les valeurs des indices de végétation. Pour mieux comprendre l'effet de la BRDF sur le comportement de ces derniers, nous avons procédé à des simulations pour plusieurs angles de visée ($\pm 0^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$ et $\pm 60^\circ$) sous un angle solaire rasant à 55° .

L'effet de l'angle de visée sur les bandes individuelles, du visible et du proche infrarouge, est représenté par la figure 4.15. En général, la réflectance augmente de part et d'autre du nadir d'une façon symétrique. Cette allure convexe est maintenue dans les quatre bandes spectrales de chacun des trois capteurs. Toutefois, les variations dues à un grand angle de visée sont moins prononcées dans le proche infrarouge que dans le visible (figure 4.15). Entre la position du nadir et une géométrie d'acquisition de $\pm 60^\circ$, les variations de la réflectance atteignent les 5 % dans le rouge (figure 4.15.a) et les 8 % dans le vert (figure 4.15.d). Alors qu'ils ne sont que de 2 % dans le proche infrarouge (figure 4.15.b), ce qui peut être expliqué par le fait que l'effet de l'ombre sur le proche infrarouge est plus petit que sur les canaux du visible. Les variations les plus intenses sont illustrées dans le canal bleu (figure 4.15.c), elles fluctuent entre 17 % dans le cas de MODIS et 13 % dans le cas de VEGETATION. Cette variation se produit à toutes les bandes considérées illustrant l'importance des effets angulaires sur le signal mesuré (Widlowski et al., 2000). Entre autres, on remarque sur ces figures que lorsque le capteur et le soleil se situent sur la même direction, la réflectance tend à être légèrement plus grande que s'ils adoptent des directions différentes (Qi, 1993). Par conséquent, ces variations doivent être prises en compte dans les calculs des indices ou dans tous autres rapports établis entre le couvert et le rayonnement, surtout avec les capteurs à grands champs de visée, cas des capteurs exploités dans cette étude (Jackson et al., 1990, Leewen et al., 1994, Goward et al., 1991; Bannari, 1996).

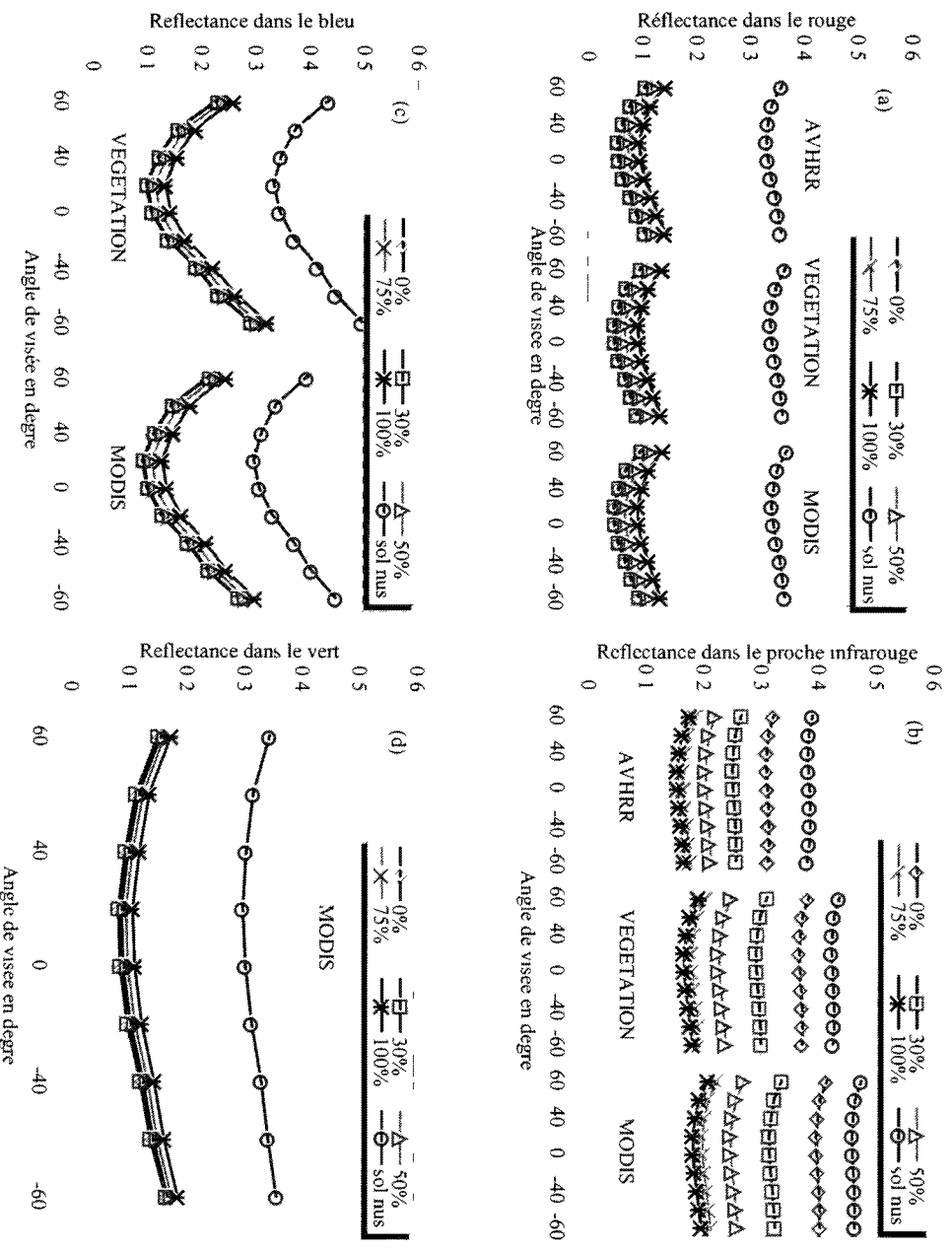


Figure 4.15 : Réponses spectrales des bandes du visible et du proche infrarouge en fonction de l'angle de visé et du capteur satellitaire

La figure 4.16 illustre l'effet de l'angle de visé sur les indices de végétation en fonction de différents degrés de défoliation. Les profils des indices de végétation montrent deux comportements différents. Les indices qui utilisent le canal bleu, ont des courbes concaves, alors que ceux qui exploitent le canal rouge ont des courbes convexes. Indépendamment du capteur utiliser, nous constatons qu'en général les indices dépendent de la géométrie d'acquisition de façon presque symétrique par rapport au nadir et qu'à fur et à mesure qu'on s'éloigne du nadir la valeur de l'indice varie de plus en plus significativement. En outre, nous remarquons qu'un sol dépourvu de couvert est moins sensible aux effets de la géométrie d'acquisition qu'un couvert à différents degrés de défoliation.

Le EVI témoigne d'une sensibilité élevée à la géométrie d'acquisition (figure 4.16.a) notamment pour un angle d'observation de -40° et pour un couvert très dense. Dans cette position la valeur du EVI devient trop élevée et l'erreur relative calculée par rapport à sa vraie valeur au nadir atteint 55 % dans le cas du capteur MODIS. Alors que cette erreur ne dépasse pas 8 % pour un angle de 40° . Par contre, pour le capteur VEGETATION cette sensibilité à l'angle de visée est beaucoup plus prononcée. L'erreur relative est d'environ 80 % pour un angle de 40° . Le EVI est un indice très sensible aux effets atmosphériques et sa sensibilité aux grands angles d'observation intensifiera davantage les erreurs de cet indice.

À cause de sa grande dynamique, l'indice MSR (figure 4.16.b) est souvent l'indice le plus sensible aux effets perturbateurs. Le calcul de cet indice dans des positions d'observation extrêmes engendrent de larges erreurs par rapport aux vraies valeurs de l'indice au sol. Les variations sont presque symétriques de part et d'autre du nadir. Pour un angle de visée de $\pm 60^\circ$, l'erreur relative sur le MSR est d'environ 46 % pour AVHRR et 41 % pour VEGETATION et MODIS. Si l'angle de visée est situé à $\pm 20^\circ$ par rapport au nadir, l'erreur relative sur le MSR est d'environ 10 %.

Indépendamment du degré de défoliation du couvert et du capteur utilisé, l'erreur relative sur le NDVI (figure 4.16.c) est très significative pour les grands angles d'observation. Elle est de l'ordre de 28 %, 14 % et 6 %, respectivement, pour les angles de visée de $\pm 60^\circ$, $\pm 40^\circ$ et $\pm 20^\circ$. À cause de ces erreurs, il devient donc crucial de se renseigner correctement sur les changements temporels à l'aide de cet indice. D'après Leblanc *et al.* (1997), la variation angulaire sur le NDVI ne peut être ignorée dans la validation des données de télédétection surtout que la structure du couvert engendre un effet directionnel additionnel important sur cet indice.

Tous les indices qui s'ajustent par rapport aux bruits des sols (TSAVI, SAVI, MSAVI, OSAVI et RDVI) montrent une sensibilité similaire aux variations de l'angle d'observation, mais relativement moins forte par rapport aux autres indices. Cette sensibilité est symétrique par rapport au nadir et montre la même allure pour les trois capteurs (figures 4.16.d, e, f, g et h). L'erreur moyenne est de l'ordre de 26 % pour des grands angles ($\pm 60^\circ$), environ 14 % pour les

angles moyens ($\pm 40^\circ$) et de 5% pour les angles d'observations de $\pm 20^\circ$. Nous remarquons que pour cette dernière géométrie, l'erreur moyenne est de l'ordre de grandeur de l'erreur causée par les artéfacts qui sont liés aux variations des propriétés optiques des sols nus. Quant au PVI, nous remarquons qu'il normalise les effets de la géométrie d'acquisition mieux que les quatre indices analysés ci-dessus (figure 4.16.i). Dans les cas extrêmes d'observation, l'erreur relative est d'environ 18 % et devient presque négligeable pour un angle de visée de $\pm 20^\circ$. En plus de sa sensibilité relative aux conditions géométriques, le PVI souffre d'une forte sensibilité aux effets atmosphériques et d'un sérieux problème de la saturation ce qui ne lui permet pas de faire des analyses multicateurs ou multitemporelles avec précision.

Par ailleurs, les indices permettant une autocorrection atmosphérique (ARVI et TSARVI) montrent des courbes concaves indépendamment du capteur utilisé (figures 4.16k et l). En général, ces figures montrent que l'effet de l'angle de visée est relativement peu prononcé lorsque le capteur se trouve du côté du soleil. Par contre, lorsque le capteur est du côté opposé du soleil l'erreur relative n'est pas aussi forte. Pour un couvert très dense et une géométrie d'observation de 20° , cette erreur ne dépasse pas 1,6 % et 6 % sur les indices TSARVI et ARVI, respectivement. Alors qu'elle est de l'ordre de 9 % sur le ARVI et 3 % sur le TSARVI dans des conditions extrême d'observation. Bien entendu, en plus de sa résistance aux effets des sols et de l'atmosphère, le TSARVI normalise les effets de la géométrie d'acquisition mieux que tous les autres indices. Quant à l'indice GARI, nous constatons un changement dans l'allure des courbes. En effet, pour un coefficient d'autocorrection égale à 1,7 les courbes sont concaves, alors qu'elles deviennent convexes pour des valeurs de γ égales à 1,0 et 0,5 (figure 4.16j). Toutefois, indépendamment de la valeur du coefficient d'autocorrection ou du taux de couverture au sol, cet indice montre une très grande sensibilité à la géométrie d'acquisition. Cette sensibilité s'exprime par une erreur de 38 %, 13 % et 6 %, respectivement, pour des angles de visée de $\pm 60^\circ$, $\pm 40^\circ$ et $\pm 20^\circ$. Finalement, l'indice GEMI affiche une sensibilité symétrique par rapport au nadir avec une erreur maximale d'environ 9 % lorsque le capteur est situé à $\pm 60^\circ$ et le couvert est très dense (figure 4.16m). Par contre, pour un angle de $\pm 20^\circ$, cette erreur reste presque négligeable.

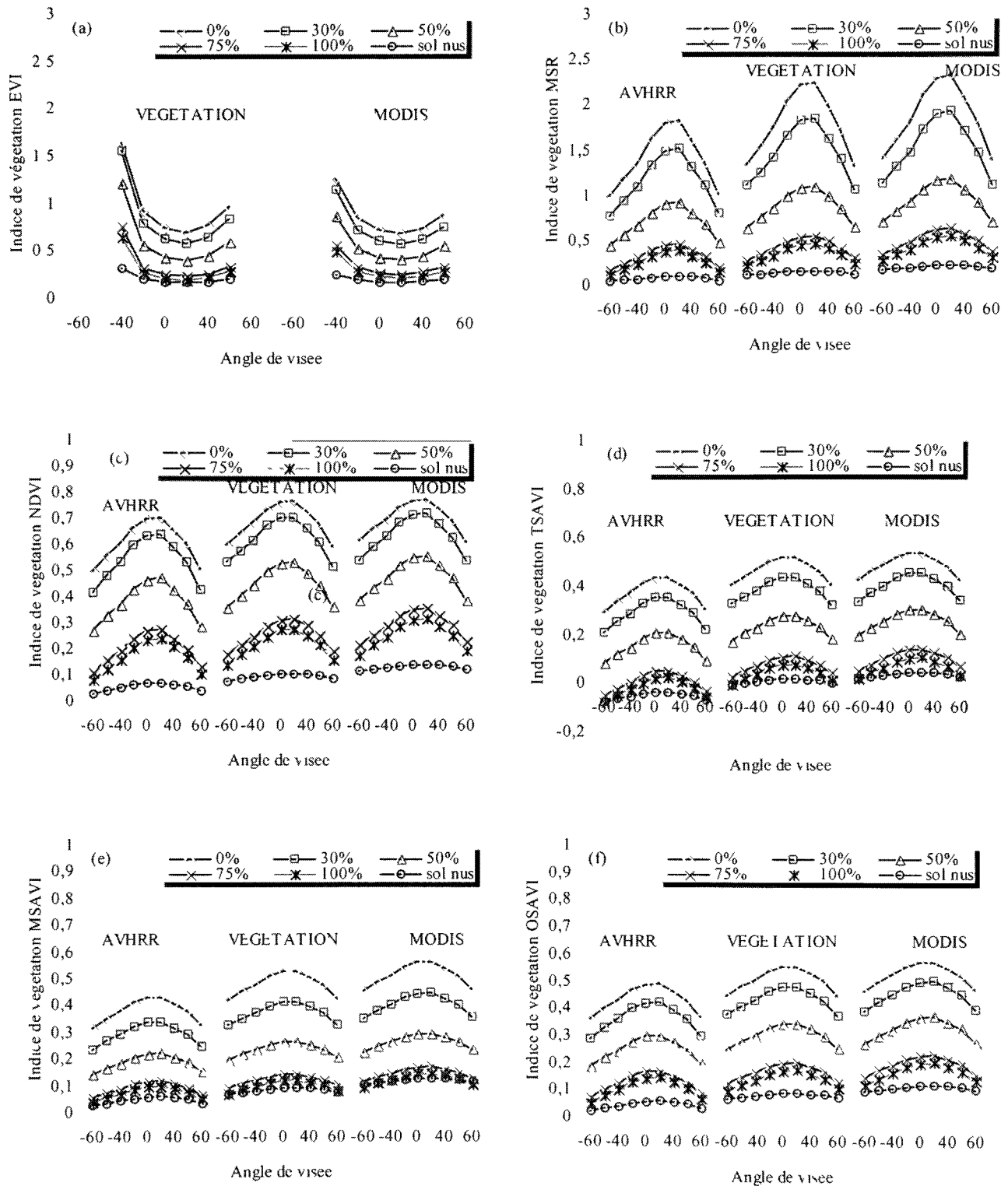


Figure 4.16 : Sensibilité des indices de végétation à la géométrie de visée pour les trois capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS en fonction de différents degrés de défoliation

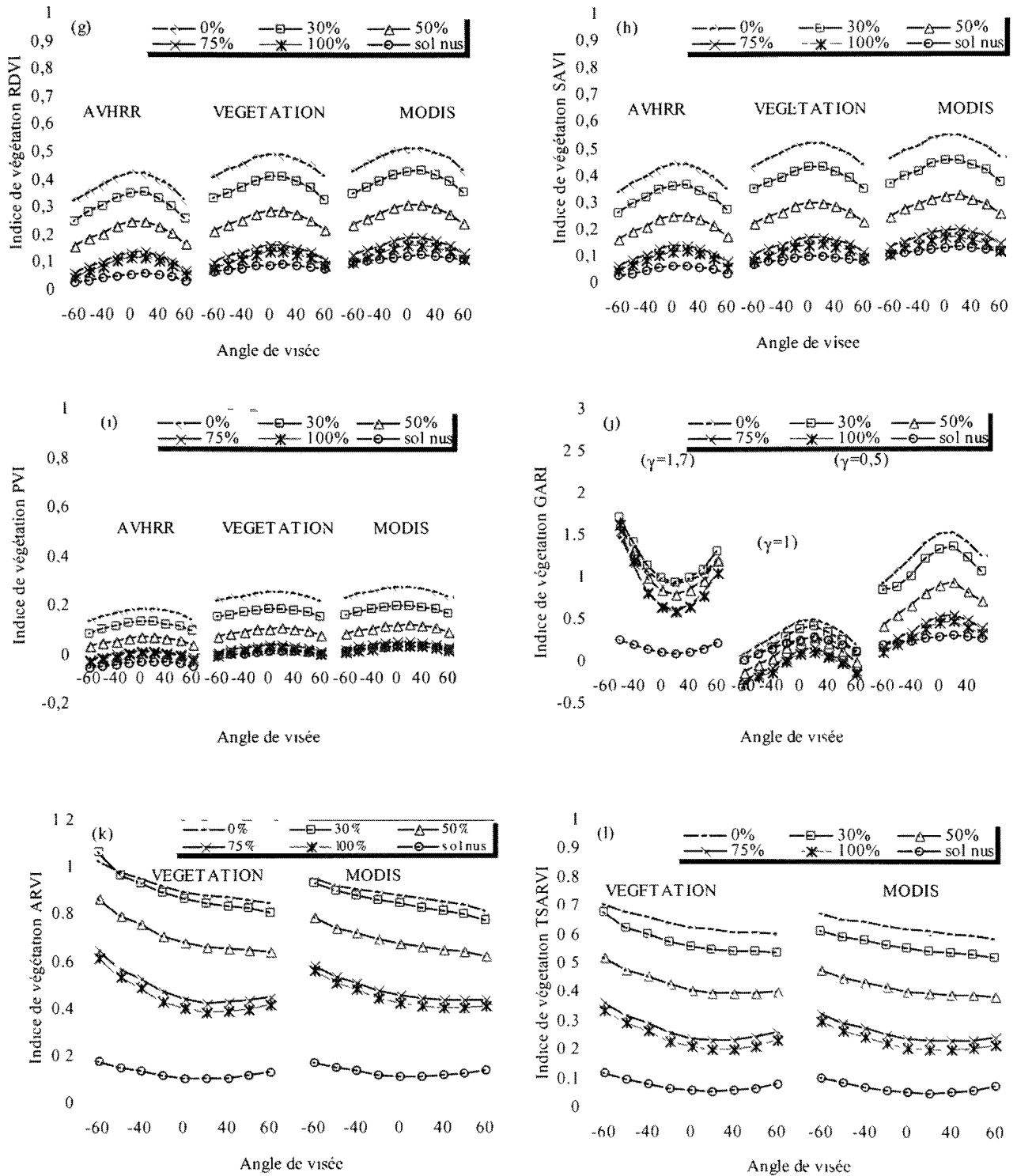


Figure 4.16 : Sensibilité des indices de végétation à la géométrie de visée pour les trois capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS en fonction de différents degrés de défoliation (suite)

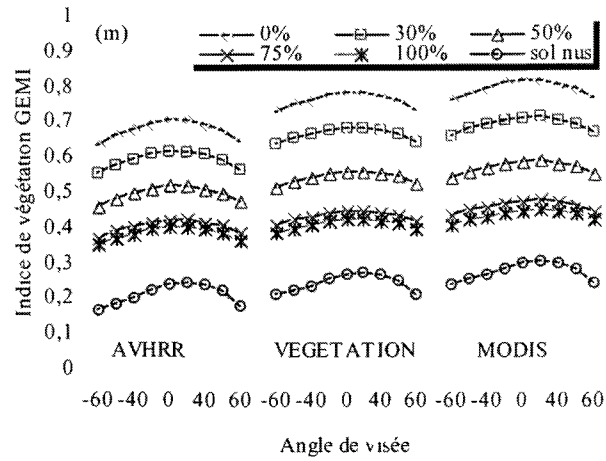


Figure 4.16 : Sensibilité des indices de végétation à la géométrie de visée pour les trois capteurs AVHRR, VEGETATION et MODIS en fonction de différents degrés de défoliation (suite)

4.3.5. Analyse des problèmes de la saturation et de la linéarité

Afin d'analyser les problèmes liés à la saturation et à la linéarité, nous avons rééchantillonné les mesures, pour les différents couvertures aux sols, dans les bandes appropriées des trois capteurs (AVHRR, MODIS et VEGETATION). Une première évaluation du comportement des bandes rouge et proche infrarouge vis-à-vis de la densité de la végétation montre que le signal dans le canal rouge diminue comme conséquence de l'augmentation de la densité de la végétation et de la chlorophylle; alors que le proche infrarouge augmente au fur et à mesure que la végétation devient plus importante (figure 4.17). Cette figure montre clairement que le problème de la saturation est bien évident dans le cas du canal rouge. En effet, contrairement à la réflectance dans le proche infrarouge, la réflectance dans le rouge tend à se stabiliser à partir de 30 % de défoliation pour les trois capteurs.

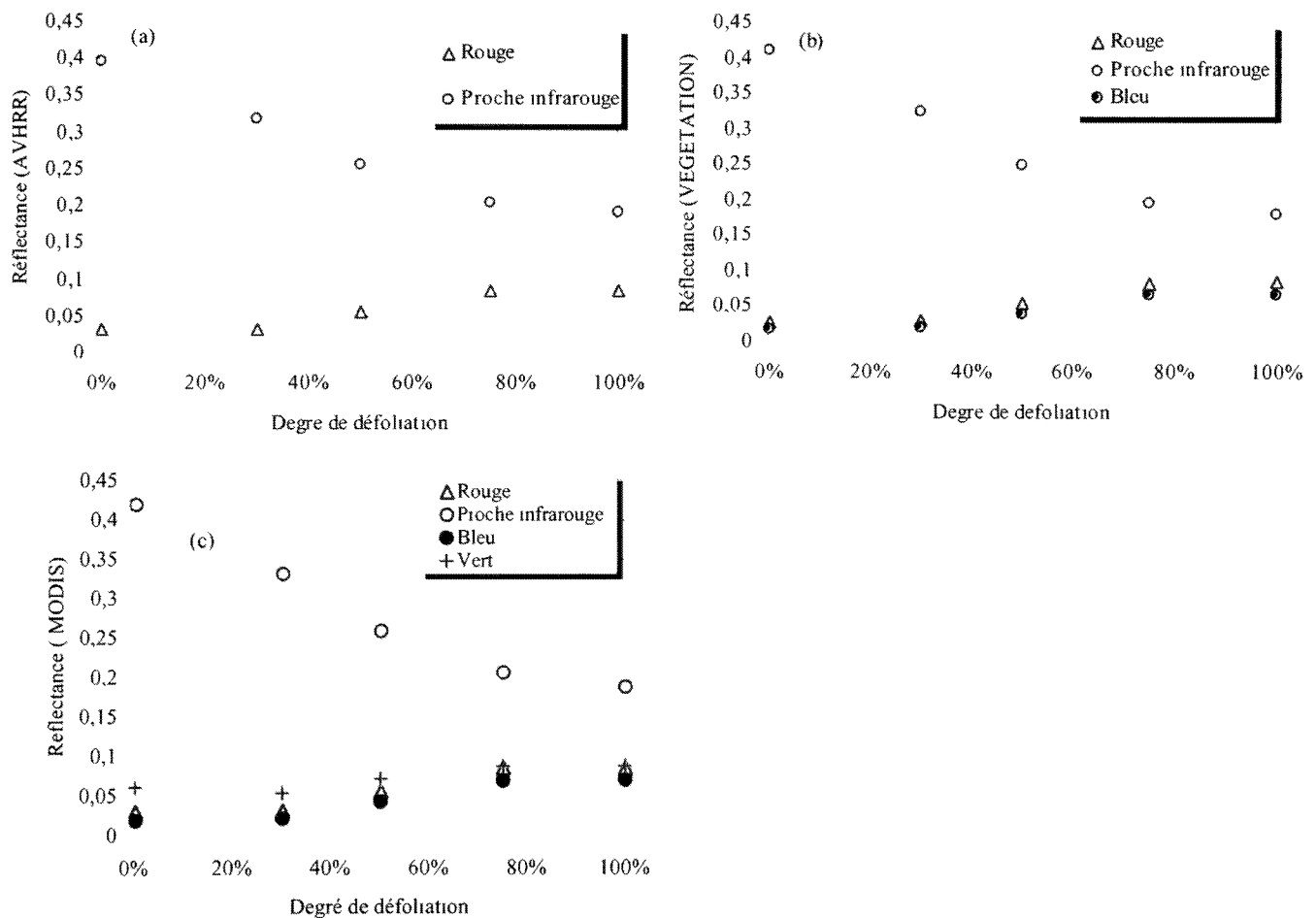


Figure 4.17 : Réflectance dans les bandes des trois capteurs (a) AVHRR, (b) VEGETATION et (c) MODIS en fonction de la densité du couvert

Bien entendu, indépendamment des variations internes et externes du couvert, il est souhaitable d'avoir un indice qui fixe les valeurs entre 0 et 1, respectivement, pour un sol dépourvu de végétation et un sol complètement couvert. Malheureusement, cette linéarité n'est assurée par aucun indice, d'une part à cause des problèmes discutés ci-dessus et, d'autre part, à cause de la non linéarité du rapport entre la densité de la végétation et les valeurs de réflectance lorsque le couvert devient très dense. Ainsi, atteignant une certaine valeur qu'on appelle seuil, l'indice ne se corrèle plus exactement avec la densité réelle de la végétation. Par ailleurs, quelque soit le capteur utilisé pour le calcul des indices spectraux, la fine ou la moyenne résolution spectrale ne contribue en aucun cas à une amélioration significative de la sensibilité des indices lorsque le couvert devient dense. Ceci est probablement dû à la bande rouge qui sature rapidement.

Malgré le potentiel exemplaire du PVI vis-à-vis des sols, en présence du couvert, cet indice présente un manque de vigueur pour une description précise du taux de couverture. Pour un couvert dense et sans défoliation (0 %), sa valeur ne dépasse pas 23 % dans le cas du capteur AVHRR (Figure 4.18), 24 % dans le cas de VEGETATION (Figure 4.19) et 25 % dans le cas du capteur MODIS (Figure 4.20). Par conséquent, pour un couvert forestier fortement ou moyennement dense, il devient très difficile de détecter les changements qui se produisent à la surface ou d'estimer correctement certains paramètres biophysiques à l'aide de cet indice.

Contrairement au PVI, dérivé des données de MODIS, le MSR se distingue par une large dynamique qui varie entre 0,3 pour un sol nu et 3,3 pour un couvert très dense (figure 4.20.a). Or, malgré cette large dynamique, il est difficile d'interpréter correctement le comportement de cet indice lorsque le degré de défoliation est assez avancé à cause de sa sensibilité aux effets, des sols sous-jacents, de la topographie et de la géométrie de visée. En outre, comme nous avons démontré dans cette thèse, le MSR est l'indice le plus sensible aux variations atmosphériques, topographiques et directionnels. D'après Haboudane *et al.* (2002), le MSR montre aussi une très grande instabilité lors de la variation de la concentration de la chlorophylle dans le couvert. Évidemment, tous ces problèmes ne permettent pas à cet indice de bien caractériser les couverts forestiers dans le temps et dans l'espace.

Les figures 4.18b, 4.19,b et 4.20b montrent que l'indice GEMI est moins performant pour caractériser les paramètres biophysiques des couverts forestiers, notamment lorsque le degré de défoliation est supérieur à 50 % à cause de son faible pouvoir discriminant entre les sols nus et le couvert. Bien entendu, cette faiblesse ne permettra pas la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans l'occupation du sol (Huete *et al.*, 1997, Bannari *et al.*, 2000). Toutefois, lorsque le degré de défoliation est moins fort, le GEMI s'approche de plus en plus de la réalité terrain.

Les indices de végétation qui s'ajustent par rapport au sol (TSAVI, SAVI, MSAVI, RDVI et OSAVI) se montrent performant pour la description des couverts avec un degré de défoliation qui varie entre 100 % et 30 % (4.18b, 4.19,b et 4.20b). Autrement dit, les couverts qui varient entre 0 % et 70 % de taux de couverture au sol. Si le degré de défoliation est fort, le TSAVI se distingue des autres indices par un puissant pouvoir discriminant entre le sol et le couvert. Toutefois, si le degré de défoliation est inférieur à 30 % (taux de couverture supérieur à 70 %), le MSAVI montre une légère amélioration par rapport aux autres indices qui s'ajustent par rapport au sol nu. Par comparaison à ces indices, si les données sont adéquatement corrigées des effets atmosphériques et topographiques, et standardisées par un étalonnage radiométrique systématique et fiable du capteur, le MSAVI peut être l'indice optimal pour la description des paramètres biophysiques en milieu forestier. Cet indice se caractérise par un bon potentiel pour minimiser les propriétés optiques des sols nus et se distingue des autres indices qui s'ajustent par rapport au sol par une légère sensibilité aux couverts très denses. Bien qu'il ne soit pas linéaire, il ne sature pas au moment de la présence d'une très forte densité végétale ce qui permettra la distinction entre les différents taux de couverture et la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un environnement forestier.

Quoi que le pouvoir discriminant du TSARVI soit pareil aux indices précédents, cet indice se distingue par une excellente normalisation des effets de la géométrie d'acquisition et par sa grande résistance aux effets perturbateurs dus aux propriétés optiques des sols nus, à l'atmosphère (absorption et diffusion) et aux problèmes de la topographie. Toutefois, indépendamment du capteur utilisé, la dynamique du TSARVI sature à un maximum de 60 %

pour des couverts dont le degré de défoliation est de 0 % (100 % de couverture au sol). Évidemment, cette saturation rapide ne permettra pas au TSARVI d'avoir un potentiel qualitatif et quantitatif des couverts végétaux notamment dans l'environnement forestier. Bien que le EVI soit moins robuste que le TSARVI pour normaliser les problèmes qui sont liés aux facteurs internes et externes au couvert forestier, le EVI souffre, entre autres, d'un sérieux problème de la saturation. En effet, sa valeur ne dépasse pas 80 % pour un couvert complètement dense et sous-estime les couverts moins denses.

Les indices ARVI et NDVI montrent presque la même sensibilité au couvert dense. La dynamique de ces deux indices se sature vers 85 % pour un couvert très dense. En outre, en plus de leur forte sensibilité aux propriétés optiques des sols nus, ils surestiment le taux de couverture par rapport à la vérité terrain lorsque les couverts sont moins et moyennement denses. Il est bien évident que le potentiel de ces indices est bien limité pour la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans l'occupation du sol. Notons ici que ces constatations concordent avec les travaux de Townshend *et al.* (1991), Huete *et al.* (1997) et Bannari *et al.* (2000). Quant au GARI, indépendamment de la valeur du coefficient d'autocorrection ($\gamma = 0,5; 1,0$ ou $1,7$) utilisé, sa valeur ne dépasse jamais 70 % pour couvert très dense. D'ailleurs, cette valeur reste constante pour un couvert de 75 % de couverture comme pour un couvert dense de 100 %. En outre, cet indice surestime les couverts moins denses d'une erreur d'environ 15 %. Rappelons encore ici que le GARI souffre d'une forte sensibilité à la géométrie d'acquisition et des effets atmosphériques. Certainement, toutes ces faiblesses limitent l'utilisation de cet indice pour une estimation précise du taux de couverture dans un environnement forestier. Nous pouvons donc conclure que l'intégration du canal vert dans le GARI n'améliore ni sa résistance aux effets atmosphériques ni le potentiel de sa linéarité.

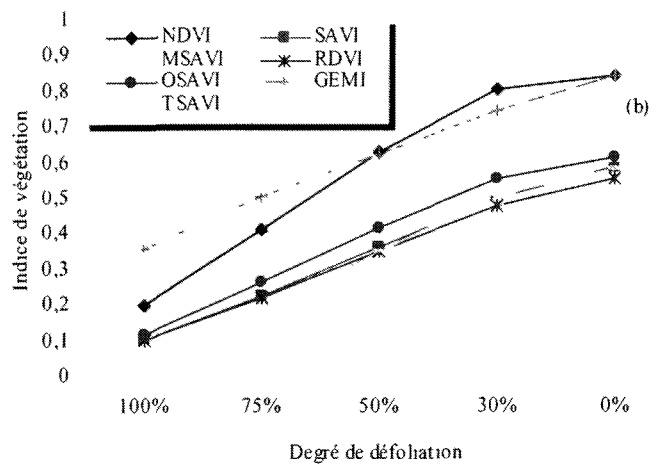
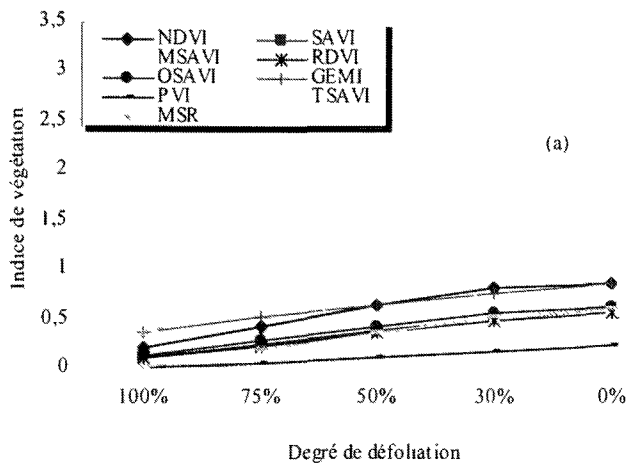


Figure 4.18 : Sensibilité des indices de végétation en fonction de la densité du couvert : cas du capteur AVHRR

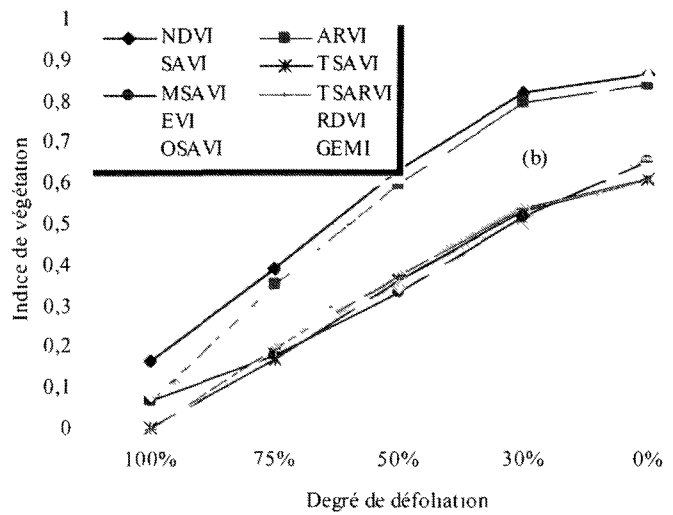
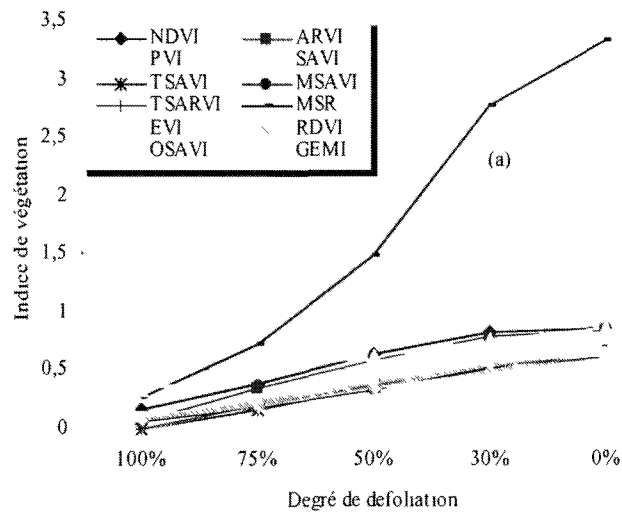


Figure 4.19 : Sensibilité des indices de végétation en fonction de la densité du couvert : cas du capteur VEGETATION

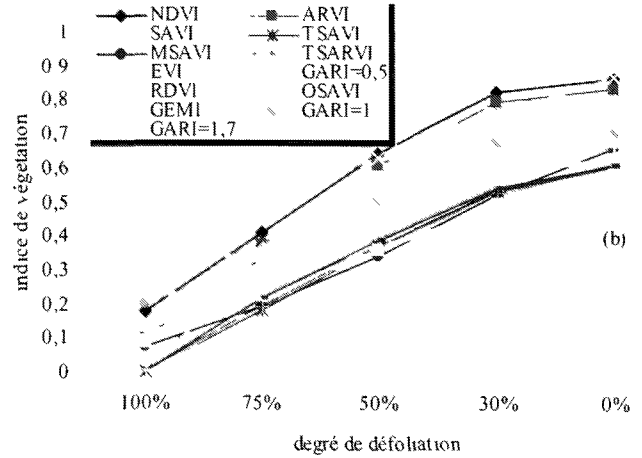
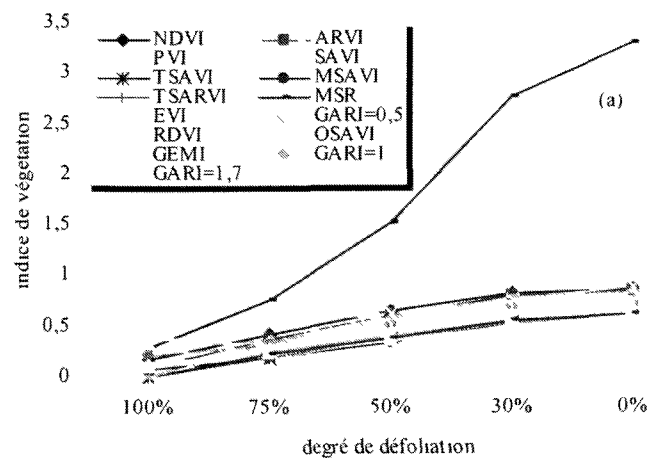


Figure 4.20 : Sensibilité des indices de végétation en fonction de la densité du couvert : cas du capteur MODIS

4.4. Conclusions

Dans ce chapitre, l'influence des effets des propriétés optiques des sols nus, de l'atmosphère, de la topographie, de la géométrie de visée, de la linéarité et de la saturation a été étudiée dans les bandes de AVHRR, MODIS et VEGETATION. Les principaux résultats obtenus sont :

- En général, l'influence des effets perturbateurs sur les indices de végétation est complexe. Il n'y a pas une seule composante qui domine les variations rencontrées, mais plutôt une combinaison de plusieurs facteurs. Par conséquent, l'interaction complexe de tous ces facteurs doit être considérée simultanément lors de l'utilisation des indices de végétation pour la quantification des paramètres biophysiques dans un environnement forestier.
- Tous les indices de végétation analysés souffrent des problèmes de la saturation et de la linéarité. Malheureusement, cette linéarité n'est assurée par aucun indice, d'une part à cause des problèmes internes et externes au couvert qui ont été analysés et discutés dans ce chapitre et, d'autre part, à cause du problème de saturation propre au couvert forestier lui-même à cause de la concentration de la chlorophylle qui se stabilise et, par conséquent, sature le signal dans le rouge. Toutefois, certains indices montrent une linéarité relative par rapport à d'autres ce qui donne au MSAVI l'avantage du fait qu'il sature moins vite que tous les autres indices.
- Tous les indices de végétation qui ne s'ajustent pas par rapport aux sols sont sensibles aux propriétés optiques des sols nus. Il est évident que le concept de la droite des sols nus est performant pour minimiser l'effet des propriétés optiques des sols. En effet, les indices PVI, TSARVI et TSAVI, se caractérisent par une meilleure aptitude à discriminer les sols des couverts végétaux notamment lorsque le couvert est épars ou moyennement dense. Cependant, à cause d'une saturation précoce et de leur forte sensibilité à la diffusion atmosphérique et aux effets topographiques, le PVI et le TSAVI, ne peuvent caractériser la végétation des milieux forestiers.

- Quelle que soit la résolution spectrale du capteur, le GEMI montre une très grande erreur liée aux propriétés optiques des sols nus. Pour des sols nus, il donne l'impression d'un couvert végétal d'environ 36 % de densité ce qui fausse l'estimation de la biomasse verte et l'interprétation des résultats. Par contre, les turbidités atmosphériques sur cet indice, sont minimisées par la fine et la moyenne résolution spectrale de MODIS et VEGETATION.
- Bien qu'ils soient développés dans le but de normaliser les effets des sols, les indices SAVI, OSAVI, MSAVI et RDVI montrent une légère sensibilité à cet effet. En général, ils surestiment la couverture au sol lorsque le couvert est épars ou moyennement dense. Toutefois, si les effets atmosphériques sont corrigés, indépendamment du degré de défoliation ou de la densité du couvert présent dans une scène, le MSAVI peut être généralisé pour le suivi et la gestion des couverts forestiers. Bien qu'il ne soit pas linéaire, c'est un indice qui ne sature pas au moment de la présence d'une forte densité du couvert et montre toujours un potentiel et une sensibilité qui permettent la distinction entre les différents taux de couverture et la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un environnement forestier.
- Le MSR est l'indice le plus sensible aux effets perturbateurs internes et externes aux couverts. Il se distingue par une large dynamique qui varie entre 0,16 et 3,02, respectivement, pour un sol nu et un couvert sans défoliation. Or, malgré cette large dynamique, il est difficile d'interpréter correctement le comportement de cet indice vis-à-vis des couverts forestiers épars et moyennement denses ou lorsque le degré de défoliation est assez avancé à cause de sa sensibilité aux effets des sols sous-jacents. Précisons ici que cet indice a été validé pour la première fois à partir des données du capteur TM de Landsat (Chen, 1996), alors que les résultats obtenus dans cette étude à partir des données simulées dans les capteurs AVHRR, MODIS et VEGETATION. Les résultats obtenus montrent que le RDVI et le NDVI peuvent être des meilleurs descripteurs des paramètres biophysiques forestiers que le MSR.

- Développé pour une meilleure surveillance de la végétation sans être affecté par les aérosols atmosphériques, le EVI est loin d'être l'indice idéal. À l'exception d'une 'bonne' sensibilité aux propriétés optiques de sols nus, les erreurs liées aux variations, à la topographie et à la géométrie d'acquisition sont très significatives et détruisent le potentiel de cet indice.
- Quelque soit la valeur du coefficient d'autocorrection atmosphérique (γ), le GARI, ne présente aucune amélioration par rapport à l'NDVI, à moins qu'il ne soit calculé avec la vraie valeur du coefficient d'autocorrection atmosphérique γ . D'après nos résultats, nous pouvons donc conclure que l'intégration du canal vert dans le GARI n'améliore nullement la résistance de cet indice aux effets atmosphériques et ne résout pas non plus ses problèmes de linéarité et de saturation.
- Les indices NDVI et ARVI ne permettent pas de bien caractériser un couvert forestier moins dense, mais ils restent assez adaptés pour la description de la vigueur d'une végétation relativement dense. Ces indices dépendent des caractéristiques du capteur et montrent une forte sensibilité vis-à-vis des propriétés optiques des sols nus surtout ceux qui sont brillants et de couleur claire. Ainsi, pour un taux de couverture inférieur à 60 %, ils surestiment le taux de couverture végétale d'environ 1,5 fois. En plus, le NDVI se trouve affecté par les conditions atmosphériques, et l'erreur peut atteindre un maximum de 15 %. Quant au ARVI, il réduit très significativement les effets atmosphériques.
- À la lumière de ce travail, il apparaît clairement que l'utilisation de la fine résolution spectrale pour le calcul des indices de végétation apporte une contribution précieuse aux problèmes liés à l'atmosphère (absorption et diffusion) et aux changements du relief. La comparaison des valeurs d'un même indice calculé à partir des données MODIS et AVHRR montre une amélioration d'environ 20 % par rapport à la vérité terrain en faveur de MODIS évidemment. Cependant, dans le cas des perturbations dues aux propriétés optiques des sols nus, et à la géométrie de visée, l'amélioration sur les indices reste insignifiante, environ 3 %. Par contre, dans le cas des problèmes liés à la saturation, la fine résolution spectrale n'apporte aucun avantage par rapport à la large résolution de AVHRR. Ce qui peut être

expliqué par le fait que le problème de la saturation et de la linéarité est dû à l'indice lui-même et non à la résolution spectrale du capteur. À la lumière des résultats obtenus dans cette thèse, nous résumons dans le tableau 4.2 les forces et les faiblesses des indices par rapport aux différents effets perturbateurs.

Tableau 4.2 : Résumé de la performance des indices de végétation par rapport aux différents effets perturbateurs.

	NDVI	PVI	SAVI	TSAVI	MSAVI	OSAVI	ARVI	GEMI	TSARVI	EVI	GARI	RDVI	MSR
Effet des propriétés optiques des sols nus	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	☹	😊	😊	☹	😊	☹
Effet de la diffusion atmosphérique	☹	☹	☹	☹	☹	☹	😊	☹	😊	☹	😊	😊	😊
Effet de l'absorption par la vapeur d'eau	😊	☹	😊	😊	☹	😊	😊	😊	😊	☹	😊	😊	☹
Effet de l'absorption par l'ozone	😊	☹	😊	😊	☹	😊	😊	😊	😊	☹	☹	😊	☹
Effet de la topographie	😊	☹	😊	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Effet de la géométrie d'acquisition	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	☹	😊	😊	☹
Effet de la saturation et de la linéarité	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	☹	☹	😊	😊	😊	😊

😊 : bonne performance

☹ : mauvaise performance

😊 : performance moyenne

Chapitre V : Conclusions et recommandations

5.1. Conclusions

Cette étude porte sur l'analyse de l'impact de la variabilité des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés des données simulées des capteurs MODIS, VEGETATION et AVHRR. Seuls les indices conçus pour minimiser les effets perturbateurs et mieux rehausser le signal issu de la végétation ont été retenus. À cette fin, des mesures spectroradiométriques de sols nus de propriétés optiques différentes et d'un couvert forestier à différents degrés de défoliation ont été utilisées. Globalement, les indices considérés montrent des forces et des faiblesses contradictoires et aucun parmi eux ne satisfait les exigences de l'indice optimal pour le milieu forestier. En effet, si un indice se montre résistant à un effet, il devient sensible aux autres effets et vice-versa. À la lumière des résultats obtenus nous formulons les conclusions et les recommandations suivantes.

Dans un premier temps, il est important de souligner l'apport significatif de la résolution spectrale étroite, notamment le capteur MODIS, pour minimiser les effets atmosphériques et les variations topographiques sur la plupart des indices de végétation.

Le NDVI est l'indice «*fétiche*» de la série des capteurs AVHRR; il a souvent été utilisé pour étudier l'état phénologique des couverts végétaux durant les périodes de croissance, pour la cartographie et la classification de l'occupation des sols, et il occupe une position intéressante dans le programme des changements à l'échelle du globe. Toutefois, nous avons démontré que cet indice est moins performant pour caractériser les paramètres biophysiques des couverts forestiers à défoliation plus ou moins forte (50 % à 100 %) à cause de son faible pouvoir discriminant entre les propriétés spectrales des sols nus et des couverts. Indépendamment du degré de défoliation du couvert et du capteur utilisé, l'effet de l'angle d'acquisition sur le NDVI est très significatif, notamment pour les grands angles d'observation. En outre, il montre une très grande sensibilité aux variations atmosphériques et topographiques, et montre aussi une sensibilité significative à la résolution spectrale du capteur. Le NDVI souffre d'un problème de saturation lorsque le degré de défoliation est moins fort (défoliation de plus de 30 %). Sa

dynamique se sature et se stabilise à un maximum de 0,85 pour des couverts dont le degré de défoliation varie de 20 à 0 %, ce qui ne permettra pas la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un couvert forestier. À cause de ces erreurs, il devient donc difficile de se renseigner correctement sur les changements temporels d'un couvert forestier à l'aide de cet indice.

Le GARI ne présente aucune amélioration par rapport au NDVI. Nous pouvons donc conclure que l'intégration du canal vert dans le formalisme du GARI n'améliore nullement la résistance de cet indice aux effets atmosphériques et aux variations topographiques, et ne résout pas non plus ses problèmes de linéarité et de saturation. En plus, indépendamment de la valeur du coefficient d'autocorrection ou du taux de couverture au sol, cet indice montre une très grande sensibilité à la géométrie d'acquisition.

En l'absence de couvert forestier, le GEMI montre une très grande erreur liée aux propriétés optiques des sols nus. Pour des sols nus, il donne l'impression d'un couvert végétal d'environ 36 % de densité ce qui fausse l'estimation de la biomasse verte et l'interprétation des résultats. Malgré son potentiel de normaliser l'effet de la géométrie d'acquisition et les effets atmosphériques et topographiques, le GEMI est moins performant pour caractériser les paramètres biophysiques des couverts forestiers, notamment lorsque le degré de défoliation est supérieur à 50 % et cela à cause de son faible pouvoir discriminant entre les sols nus et le couvert. Bien entendu, cette faiblesse ne permettra pas la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans l'occupation du sol. Par contre, le GEMI s'approche de plus en plus de la réalité terrain lorsque le degré de défoliation est moins fort.

Destiné à une meilleure surveillance de la végétation sans être affecté par les aérosols atmosphériques, le EVI est loin d'être l'indice idéal. À l'exception d'une 'bonne' sensibilité aux propriétés optiques de sols nus, les erreurs liées aux variations dues à l'atmosphère, à la topographie et à la géométrie d'acquisition sont très significatives et détruisent le potentiel de cet indice. Entre autres, le EVI souffre d'un sérieux problème de saturation et sous-estime les

couverts moins denses. Par conséquent, le EVI ne peut être un indice fiable pour les applications forestières.

Le MSR est sujet à plusieurs perturbations, il est l'indice le plus sensible aux effets perturbateurs internes et externes aux couverts. Cet indice se distingue par une large dynamique qui varie entre 0,16 et 3,02, respectivement, pour un sol nu et un couvert sans défoliation. Malgré cette large dynamique, il est difficile d'interpréter correctement le comportement de cet indice vis-à-vis des couverts forestiers épars et moyennement denses ou lorsque le degré de défoliation est assez avancé à cause de sa sensibilité aux effets des sols sous-jacents. Précisons ici que le MSR a été validé pour la première fois à partir des données du capteur TM de Landsat, alors que les résultats obtenus dans cette étude (à partir des données simulées dans les capteurs AVHRR, MODIS et VEGETATION) montrent que cet indice ne peut être utilisé correctement dans un milieu forestier.

Malgré son fort potentiel d'autocorrection de la diffusion atmosphérique et la normalisation des variations de la topographie de la géométrie d'acquisition, le ARVI reste très sensible aux effets de l'absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone. En outre, cet indice dépend des caractéristiques spectrales du capteur et montre une forte sensibilité vis-à-vis des propriétés optiques des sols nus surtout ceux qui sont brillants et de couleur claire. Ainsi, pour un taux de couverture inférieur à 60 %, il surestime le taux de couverture végétale d'environ 1,5 fois. Quoique, le ARVI ne permet pas de bien caractériser un couvert forestier moins dense, il reste assez adapté pour la description de la vigueur d'une végétation relativement dense.

Si le coefficient d'autocorrection atmosphérique est connu *a priori*, le TSARVI est un indice qui se caractérise par une excellente correction combinée des effets atmosphériques (diffusion et absorption par la vapeur d'eau et par l'ozone) et des propriétés optiques des sols nus. Entre autres, il est indépendant de la résolution spectrale du capteur et normalise parfaitement les perturbations causées par les variations topographiques et de la géométrie de visée. Le TSARVI montre une meilleure aptitude à discriminer les sols des couverts végétaux dans un environnement épars ou moyennement dense. Toutefois, cet indice souffre des problèmes de la

saturation et la linéarité ce qui ne permet pas de bien caractériser les couverts denses et très denses.

Il est bien évident que le concept de la droite des sols nus est performant pour minimiser l'effet des propriétés optiques des sols sur les indices de végétation. En effet, les indices PVI et TSAVI, se caractérisent par une meilleure aptitude à discriminer les sols des couverts végétaux notamment lorsque le couvert est épars ou moyennement dense. Toutefois, ces deux indices sont très sensibles aux variations de l'atmosphère et de la topographie, relativement sensibles aux variations de la géométrie d'acquisition et montrent une saturation précoce et rapide, notamment le PVI. Évidemment, ces indices ne peuvent être des bons descripteurs des couverts forestiers.

Bien qu'ils soient développés dans le but de normaliser les effets des sols, les indices SAVI, OSAVI, MSAVI et RDVI montrent une légère sensibilité à cet effet. En outre, ils sont sensibles aux effets atmosphériques, aux variations de la topographie et de la géométrie de visée. Ces indices se montrent performant pour la description des couverts avec un degré de défoliation qui varie entre 100 % et 30 %. Autrement dit, les couverts qui varient entre 0 % et 70 % du taux de couverture au sol. Si le degré de défoliation est fort, le SAVI se distingue des autres indices par un puissant pouvoir discriminant entre le sol et le couvert. Toutefois, si le degré de défoliation est inférieur à 30 % (taux de couverture supérieur à 70 %), le MSAVI montre une légère amélioration par rapport aux autres indices qui s'ajustent par rapport au sol nu. Cependant, si les données sont adéquatement corrigées des effets atmosphériques et topographiques et standardisées par un étalonnage radiométrique systématique et fiable du capteur, indépendamment du degré de défoliation ou de la densité du couvert présent dans une scène, parmi ces quatre indices le MSAVI peut être généralisé pour le suivi et la gestion des couverts forestiers. Cet indice se caractérise par un bon potentiel pour minimiser les propriétés optiques des sols nus et se distingue des autres indices qui s'ajustent par rapport au sol par une légère sensibilité aux couverts très denses. Comparativement aux trois autres indices, il montre une sensibilité relativement moins forte aux variations de l'angle d'observation. Cette sensibilité est symétrique par rapport au nadir et montre la même allure pour les trois capteurs. Bien qu'il ne soit pas linéaire, c'est un indice qui ne sature pas vite au moment de la présence d'une forte

densité du couvert et montre toujours un potentiel et une sensibilité permettant la distinction entre les différents taux de couverture et la détection des changements temporels qui peuvent avoir lieu dans un environnement forestier.

5.2. Recommandations

Finalement, l'analyse des résultats obtenus nous amène à formuler les recommandations suivantes:

- Les indices de végétation ont toujours été développés et testés dans des conditions idéales en utilisant des modèles de transfert radiatif et un jeu de donnée unique et limitée, si bien qu'il est facile d'en clamer la supériorité. Il sera intéressant de vérifier la performance de ces indices de végétation à partir des données images acquises sur des couverts forestiers de différentes densités.
- Il sera intéressant d'utiliser des images acquises par les capteurs considérés dans cette étude (AVHRR, MODIS et VEGETATION) afin d'examiner les effets combinés de différentes résolutions spatiales et spectrales sur la précision des indices de végétation.
- Il est très important d'étudier le potentiel du moyen infrarouge pour améliorer la précision des indices de végétation. En effet, dans cette région du spectre, en dehors de l'absorption, l'atmosphère présente une très grande transparence qui facilite l'observation par les capteurs optiques. En plus, le contraste entre les propriétés optiques des sols et celles des couverts végétaux est très élevé et l'effet de l'environnement est faible.
- Il est fortement recommandé d'analyser le potentiel de la télédétection hyperspectrale pour minimiser les effets perturbateurs sur les indices de végétation dans un environnement forestier.

- Par ailleurs, nous constatons que globalement les méthodes de conception des indices de végétation manquent de robustesse. En effet, les bandes spectrales sont combinées de façon «rigide» pixel par pixel afin de dériver un indice spectral donné. Cette façon ne s'occupe guère du problème de l'hétérogénéité du pixel considéré (mélange spectral) et de l'effet de l'environnement, ce qui entraîne inévitablement une perte d'information puisque chacun des pixels ne peut être attribué qu'à une seule classe d'occupation du sol : végétal, sol, eau, etc. Afin d'éviter les problèmes ardu du mélange spectral dans un même pixel dans les milieux hétérogènes (notamment lors du traitement des images de faible résolution spatiale), et d'améliorer la précision des indices spectraux de nouvelles méthodes de conception appropriées sont requises. Pour s'affranchir de cette situation délicate, de multiples voies doivent permettre une meilleure analyse avec des techniques plus souples et mieux adaptées au traitement du signal et de l'image. Parmi ces techniques, celles basées sur la théorie des ensembles flous ou sur la méthode d'analyse de mixture spectrale linéaire et non linéaire sont bien adaptées et constituent des avenues très prometteuses.

Références bibliographiques

- Asrar, G., Kanemasu, E.T. and Yochida, M., 1985, Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing of Environment*, vol.17, p.1-11.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., and Hatfield, J.L., 1984, Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomic Journal*, vol.76, p.300-306.
- Bannari, A, Teillet, P.M., Leckie, D.G. et Fedosejevs, G., 2000, Impact des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés de AVHRR. *La revue Télédétection*, vol. 1, n° 3, p. 157-181.
- Bannari, A., Morin, D. et Haboudane, D., 1999a, Analyses des effets atmosphériques sur les indices de végétation en milieu urbain. *Télédétection*, vol.1, p. 19-46.
- Bannari, A., Teillet, P.M. et Richardson, G., 1999b, Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection. *Journal canadien de Télédétection*, vol.25, n° 1, p. 45-59.
- Bannari, A., 1998, Modélisation des effets atmosphériques sur le signal au satellite dans le visible et le proche infrarouge du spectre solaire. Rapport technique, SPAR Aérospatiale limitée, ste-anne-de-bellevue, Montréal, 59 pages.
- Bannari,A., Teillet, P., Richardson, G., Leckie, D.G. et Fedosejevs,G., 1998, Impact des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivées de AVHRR. 20^e symposium canadien de la télédétection. Calgary, AB, Canada, p.169-174.
- Bannari, A., Royer, A. et Morin, D., 1997, L'indice de végétation TSARVI : Transformed soil atmospherically resistant vegetation index. 7th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, p. 677-684.
- Bannari, A., 1996, La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparsé et moyennement dense. Thèse de doctorat (Ph.D), Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 250 pages.

- Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. et Zagolski, F., 1996, Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. *International Journal of Remote Sensing*, vol.17, n°.10, p. 1885-1906.
- Bannari, A., Morin, D., Huette, A.R. and Bonn, F., 1995, A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, vol.13, p. 95-120.
- Baret, F., Jacquemoud, S. and Hanocq, J.F., 1993, The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, vol.7, n°.1, p. 65-82.
- Baret, F., Guyot, G. et Major, D.J., 1989, TSAVI: A Vegetation Index which minimises Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation. *Proceedings of 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada*, vol. 3, p. 1355-1358.
- Baret, F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud Orley, France, 182 pages.
- Bariou, R., Lecamus, D. et Henaff, F., 1985. Les indices de végétation. *Dossiers de télédétection, Centre régional de télédétection, Université de Rennes 2, Rennes, France*, 71 pages.
- Burgess, D.W., Lewis, P., and Muller, J. -P. A. L., 1995, Topographic effects in AVHRR NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, p. 223-232.
- Cavayas, F., 1984, Correction radiométrique des effets topographiques sur les images LANDSAT de territoire forestier. Thèse de doctorat (Ph.D.), Faculté de la foresterie et de géodésie, Université Laval, Québec, 177 pages
- Chartier, L., Coté, P., Hubert, L., Rochon, S., O'Neill, N.T. et Royer, A., 1989, Caractérisation des effets atmosphériques en télédétection satellitaire : modélisation et correction. *Comptes rendus du 6^{ème} congrès de l'association québécoise de télédétection*, vol.4, p.303-312.
- Chen, J.M. and Leblanc, S., 1997, A four-scale Bidirectional Reflectance Model Based on Canopy Architecture. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.37, n° 5, p. 1316 - 1337.
- Chen, J.M. 1996, Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal application. *Canadien Journal of Remote Sensing*, vol.22, n°.3, p. 229-242.
- CNES, 1995, VEGETATION, lettre d'information, n°2, p.1-12.
- Colwell, R.N., 1983, *Manual of remote sensing. Second Edition, v.1, American Society of Photogrammetry*, 132 pages.

- Condit, H.R., 1970, The spectral reflectance of American soils. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.36, p.955-966.
- Deering, D.W., Rouse, J.W., Haas, R.H and Schall, H.H., 1975, Measuring forage production of grazing units from LANDSAT-MSS data. *Proceedings of the tenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. ERIM, Ann Arbor, Michigan, USA, p.1169-1198.
- Deschamps, P. Y., Duhaut, P., Rouquet, M.C., et Tanré, D., 1984, Mise en évidence, analyse et correction des effets atmosphériques sur des données multispectrales de Landsat ou Spot. *Comptes rendus du 11^{ème} Colloque International des Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Bordeaux, France, p.709-722.
- Deschamps, P. Y., Herman, M., Tanré, D., Rouquet, M.C., et Durpaire, J.P., 1982, Effets atmosphériques et évaluation du signal pour des instruments optiques de télédétection. *ESA Journal*, vol.6, p.233-246.
- Diner, D.J. and Martonchik, J.V., 1985, Atmospheric transmittance from spacecraft using multiple view angle imagery. *Applied Optics*, vol.21, p.3503-3511.
- D'Iorio, M.A. and Cihlab, J., 1991, Effet of the Calibration of AVHRR Data on the Normalized Difference Vegetation Index and Compositing. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n°. 3, p. 251-262.
- Escadafal, R.G. et Huete, A., 1991, Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *Académie des Sciences, Paris, Série II*, p.1385-1391.
- Escadafal, R.G., Rand, M.C. and Gourault, D., 1989, Munsell Soil Color And Soil Reflectance In the Visible Spectral Bands of the Landsat (MSS and TM). *Remote Sensing of Environment*, vol. 27, p. 37-46.
- Franklin, J. and Turner, L. 1992, The applications of the geometric optical canopy reflectance model to semiarid vegetation. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.30, p.293-301.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J. and Merzlyak, N.M., 1996, Use of Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, p. 289-298.

- Goïta, K., 1995, Caractérisation des paramètres bio-géophysique de surface à l'échelle globale par télédétection satellitaire : Application à l'analyse des écosystèmes boréaux. Thèse de doctorat (Ph.D), Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 241 pages.
- Goward, S. N., Markham, B., Dye, D.G., Dulaney, W. and Yang, J., 1991, Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, vol.35, p.257-277.
- Guyot, G. et Gu, X.F., 1994, Effet of radiometric corrections on NDVI- determined from SPOT-HRV and Landsat-TM data. *Remote sensing of Environment*, vol.49, p. 169-180.
- Guyot, G., 1989, Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Télédétection satellitaires*, tome 5. paradigme, Caen, France, 165 pages.
- Guyot, G., 1984, Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge; application à la télédétection. *Bulletin de la société française de photogrammétrie et de la télédétection*, n°. 95-3, p.5-22.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. and Dextraze.L., 2002, Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote sensing of environment*, vol.81, p 416-426
- Holben, B.N. and Justice, C.O., 1979, Evaluation and modeling of the topographic effects on the spectral response from nadir pointing sensors. *NASA/GSFC TM 80305*, 19 pages.
- Huete, A.R., Justice and C., Leeuwen, W.V., 1999, MODIS Vegetation Index, Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3, University of arizona, Tuscon, USA, 120 pages.
- Huete, A.R., Liu, Batchily, H.Q., Leewen, 1997, A comparaison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, p.440-451.
- Huete, A.R., Justice, C. and Leuwen, W.van, 1996, MODIS vegetation index (MOD13), Algorithm theoretical basi document, version 2, University of arizona, Tuscon, USA, 115 pages.

- Huete, A.R. and Liu, H.Q., 1994, An error And Sensitivity Analysis of the Atmospheric And soil-correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS. IEEE Transactions of Geoscience in Remote Sensing, vol. 32, n°.4, p. 897-905.
- Huete, A.R., Justice, C. and Liu, H.Q., 1994, Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. Remote Sensing of Environment, vol.49, p.224-234.
- Huete, A.R., 1989, Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. Theory and application of Optical Remote Sensing (G.Asrar eds.), Wley, Washington, USA, p.107-141.
- Huete, A.R., 1988, A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p.295-309.
- Huete, A.R. and Jackson R.D., 1987, Suitability of Spectral Indices for Evaluating Vegetation Characteristics on Arid Rangelands. Remote Sensing of Environment, vol. 23, p.213-232.
- Huete, A.R., 1984, Soil Spectral Effets On Vegetation Discrimination. Ph.D. Thesis, Departement of Soils, Water and Engineering, University of Arisona, Tucson, U.S.A., 208 pages.
- Huete, A. R., Post, D. F., and Jackson, R. D.,1984, Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination. Remote Sensing of Environment, vol.15, p.155-165.
- Illera, P., Fernandez, A., and Delgado, J.A., 1996, Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest danger. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n°. 6, p. 1093-1105.
- Jackson R.D et Huete, A.R., 1991, Interpreting Vegetation Indices. Preventive Veterinary Medicine, vol. 11, p. 185-200.
- Jackson R.D., Teillet, P.M., Slater, P.N., Fedosejevs, G., Jasinski, M.F., Aase, J.K and Moran, M.S., 1990. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle correction of oblique imagery. Remote sensing of environment, vol.32, p.189-202.
- Jackson, R.D., Slater, P.N. and Pinter, P.J., 1983, Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various vegetation index through clear and turbid atmospheres. Remote Sensing of Environment, v.13, p.187-208.

- Jackson R.D., Ninter, P.J., Paul, J., Reganato, R.J., Robert, J. and Adso, S.B., 1980, Hand-held radiometry, U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration. Agricultural reviews and Manuals, ARM-W-19, Phoenix, Arizona, U.S.A.
- Kasischke, E.S., and French, N.H.F., 1997, Constraints on using AVHRR composite index imagery to study patterns of vegetation cover in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n°.11, p. 2403-2426.
- Kaufman, Y.J., Wald, A.E., Remer, L.A., Gao, B.C., LI, R.R. and Flynn, L., 1997, The MODIS 2-1 μm channel correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.35, n°. 5, p.1286-1297.
- Kaufman, Y.J., and Tanré , D., 1992, Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, p. 261-270.
- Kaufman, Y.J., 1988, Atmospheric effects on spectral signature measurements and corrections. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, n°.4, p.441-450.
- Kaufman, Y.J., 1984, Atmospheric effects On Remote sensing of surface reflectance. SPIE-Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, n°.475, p.20-33.
- Kauth, R. J. and Thomas, G.S., 1976, The tasseled cop- a graphic description of the the spectral-temporel developpement of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceeding of Synposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, p. 41-51.
- King, M.D., Kaufman, Y.J., Menzel, W.P., and Tanre, D., 1992, Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n°.1, p.2-27.
- Kong, X.N. et D. Vidal-Madjar, 1988, Effet de la résolution spatiale sur des propriétés statistiques des images satellites: une étude de cas. *International Journal of Remote Sensing*, vol 9, n°8, p. 1315-1328
- Leckie, D.G., Teillet, P.M., Fedosejevs, G. And Ostaff, D.P., 1988, Reflectance characteristics of cumulative defoliation of balsam fir. *Canadian Journal of Forest Research* vol.18, n°.8, p.1008-1016.

- Leeuwen, V., 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 sensitivity to biomass and plant cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 69, p.267-288.
- Meyer, D., Verstraete, M., and Pinty, B., 1995, The effet of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. *Remote Sensing Review*, vol.12, p.3-27.
- NASA, 2000. MODIS Web, <http://www.gsfc.nasa.gov/MODIS/MODIS.html> 25 pages.
- NASA, 1986, Volume Iib, NASA, Code NIT-4, Washington, D.C., 20 546-001, 59 pages.
- Pearson, R.L and Miller, L.D., 1972, Remote Mapping of Standing Crop biomass for Estimation of the Productivity of the Short grass Prairie, Pawnee National Grass Lands. *Proceeding of the 8th International Symposium on Remote Sensing of The Environment*, Colorado, p.1355-13797.
- Pinty, B. and Verstraete, M.M., 1992, GEMI : A non lineare index to monitor global vegetation from sattelites. *Vegetation*, vol. 10, n^o.1 p :15- 20.
- Proy, C., Tanré, D. and Deschamps, P.Y., 1989, Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 30: 21-32.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. and Sorroshian, S., 1994, A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 47, p. 1-25.
- Qi, J., 1993, Compositing Multitemporal Remote Sensing Data. Ph.D dissertation, Departement of Soil and Water Science, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA, 200 pages.
- Richardson, A.J., and Wiegand, C.L., 1977, Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammitric engineering and Remote Sensing*, vol.43, p. 15-41.
- Rochon, G., Audirac, H., Larrivee, A., beaubien J. et Gignac, P., 1979, Correction radiométrique des effets topographiques sur des images Landsat de territoires forestiers. *Compte rendu de l'association québécoise de télédétection*, p.151-163.
- Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F, 1996, Optimisation of the Soil-Adjusted Vegetation Indeces. *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p.95-107.
- Roujean, J-L., and Breon, F.M., 1995, Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, p. 375-384.

- Roujean, J.L., M. Leroy, A. Podaire, and Deschamps, P.Y., 1992, Evidence of surface reflectance bidirectional effects from a NOAA/AVHRR multi-temporal data set. *International Journal of RemoteSensing*, vol.13, p.685-698.
- Rousse, J.W., Haas, R.W., Schelle, J.A., Deering, D.W, and Harlan, J.C., 1974, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effet) of natural vegetation. NASA/GSFCT Type I rapport, Greenbelt, Maryland, USA.
- Royer, A., Goïta, K., Anseau, C., Faizonn, A. and Saint, G., 1997, Analysis of boreal forest dynamics using the global vegetation index. *Remote Sensing Reviews*, vol. 15, p. 265 - 282.
- Royer, A., Davis, A. et O'Neill, N.T., 1988, Analyse des effets atmosphériques dans les images HRV de SPOT. *Journal canadien de télédétection*, vol.14, n°.2, p.80-91.
- Running, S.W., Justice, C., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufman, Y., Huete, A.R., Muller, J., Vanderbit, V., Wan, Z. Teillet, P.M. and Carneggie, D., 1994, Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS-MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, vol.15, n°.17, p.3587- 3620.
- Salmonson, V.V., Barnes, W.L., Maymon, P.W., Montgomery, H.E. and Ostrow, H., 1989, MODIS: Advenced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.27, n°. 2, p. 145 - 153.
- Schowengerdt, R.A., Biggar, S.E., Marsh, S.E., Rojas, F. And Braga, A., 2000, Validation And Correction For The Terra MODIS Spatial Response. EOS Validation Investigation Annual Report, University of Arizona, Tucson, U.S.A, 12 pages.
- Shaw, G. E., 1983, Sun photometry. *American Meteorological Society*, vol.64, n°.1, p.1-10.
- Slater, P.N., 1980, *Remote Sensing: Optics and Optical Systems*. Addison-wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- Stanz, K.; Gauthier, R. P., Williams, D. J., Teillet, P. M., 1995, The Behavior of the Anisotropic Reflectance of a Pecan Orchard Derived from Multiview and Multiscale Imaging Spectrometer Data.*Remote sensing of environment*, vol.52, p. 122-136.
- Stanz, K., Brown, R.J. and Teillet, P.M., 1983, Influence of the viewing geometry on vegetation mesures. *Actes du 8^e Symposium canadien de la télédétection*, Montréal, Québec, canada, p.5-12.

- Stoner, E.R., M.F., Baumgardner, L.L., Biehl, and Robinson, B.F., 1980, Atlas of soil reflectance properties. Res. Bulletin n°.962. Agric. Exp. Stn. Purdue University, Indiana.
- Suits, G.H., 1972, The calculation of directional reflectance of a vegetation canopy. Remote Sensing of environment, vol.2, p.117-125.
- Tanré, D., Herman, M. et Deschamps, 1983, Influence of the atmosphere on space measurements of directional properties. Applied Optics, vol.22, p.733-741.
- Tanré, D., 1982, Interaction rayonnement-aérosols : Application à la télédétection et au calcul du bilan radiatif. Thèse de Doctorat d'État, Université des sciences et techniques de Lille, Lille, France, 258 pages
- Teillet, P. M., Staenz, K. and Williams, D.J., 1997, Effets of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. Remote Sensing of Environment, vol.61, p. 139- 149.
- Teillet, P. M., Staenz, K. and Williams, D.J., 1994, Effects of spectral and spatial resolution on NDVI. Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Ontario, Canada, 10 pages.
- Teillet, P.M. and Staenz, K., 1992, Atmospheric effects due to topography on MODIS vegetation index data simulated from AVIRIS imagery over mountainous terrain. Canadian Journal of Remote Sensing, vol.18, n°.4, p : 283-291.
- 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, n°.1, p. 36-44.
- Teillet, P. M., 1985, Réflexion sur la correction radiométrique des images en télédétection. L'Association québécoise de télédétection, télédétection et gestion des ressources : L'Aspect opérationnel, vol.5, p.571-581.
- Towshend, J.R.G., C. Justice, W. Li, C. Gurney, and McManus, J., 1991, Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. Remote Sensing of Environment, vol.35, p.243-256.
- Trotter, C. M., 1998, Characterising the topographic effect at red wavelengths using juvenile conifer canopies. International Journal of Remote Sensing, vol.19,n°.11, p.2215-2221

- Turner, R.E. and Spencer, M.M., 1972, Atmospheric model for correction Spacecraft data. Proceeding of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, USA, p.895-934.
- Turner, R.E., Malila, W.A and Nalepka, R.f., 1971, Importance of atmospheric scattering in remote sensing, or everything you've always wanted to know about atmospheric scattering but were afraid to ask. Proceedings of the Seventh International Symposium on Remote Sensing of environment, Ann Arbor, Michigan, USA, vol.3, p.1651-1683.
- Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M.M. and Govaerts, Y., 1997, Geobotany: vegetation mapping earth sciences. Chapter 4 in Manual of Remote Sensing, Andrew Rencz (ed.).
<http://cstars.ucdavis.edu/papers/susting/geobotany/paper.html>. 19 pages.
- Vermote, E. F., Tanré, D., Denzé, J. L., Herman, M. et Morcrette J. J., 1996, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, , vol. 35, n°. 3, p. 675-686.
- Zagolski, F., 1994, Évaluation des concentrations chimiques d'un couvert forestier à l'aide de la haute résolution spectrale. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 172 pages.
- Yuan, X., 1993, Empirical correction techniques for view-angle effects on airborne multispectral scanner data of forested terrain. Proceedings of the International Forum on Airborne Multispectral Scanning for Forestry and Mapping, Val Morin, Québec, Forestry Canada Information Report PI-X-113, Petawawa National Forestry Institute, p.63-68.

Annexe A : Exemple de out-put du modèle de simulation 6S

TERRAIN ELEVATION: .500 KM SENSOR ALTITUDE: 850.00 KM

GEOMETRICAL CONDITIONS

MONTH : 8
DAY : 5
SOLAR DISTANCE : 1.0145
SOLAR ZENITH ANGLE : 43.10 DEG
SOLAR AZIMUTHAL ANGLE : 145.50 DEG
OBSERVATION ZENITH ANGLE : .00 DEG
OBSERVATION AZIMUTHAL ANGLE : 270.00 DEG
SCATTERING ANGLE : 136.90 DEG
AZIMUTHAL ANGLE DIFFERENCE : 124.50 DEG

ATMOSPHERIC MODEL DESCRIPTION

ATMOSPHERIC MODEL IDENTITY :
US STANDARD 1962 (UH2O=1.424G/CM2 ,UO3=0.5G/CM2)
AEROSOLS TYPE IDENTITY : CONTINENTAL AEROSOL MODEL
OPTICAL CONDITIONS : VISIBILITY (AT GROUND LEVEL) = 5.00 KM
ESTIMATED VISIBILITY (AT SEA LEVEL) = 3.46 KM
AEROSOL OPTICAL THICKNESS (AT 550NM) = .5069

SPECTRAL BAND

AVHRR 2 (NOAA12) FILTER FUNCTION
MINIMUM WAVELENGTH = .600 MICROMETRES
MAXIMUM WAVELENGTH = 1.200 MICROMETRES

TARGET TYPE

HOMOGENEOUS GROUND
SPECTRAL VEGETATION GROUND REFLECTANCE = .5060

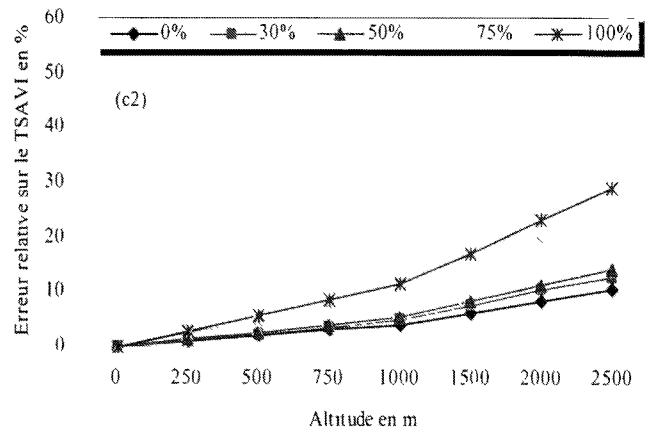
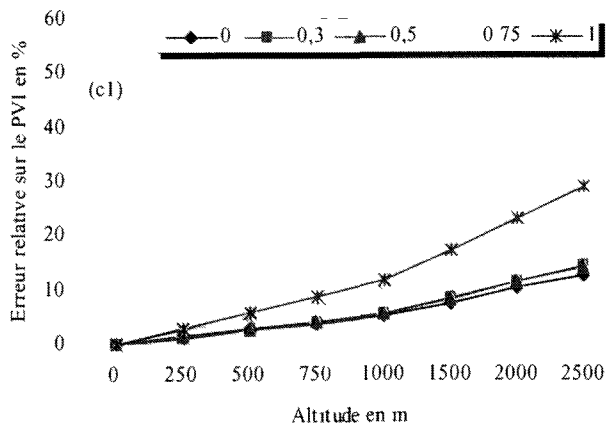
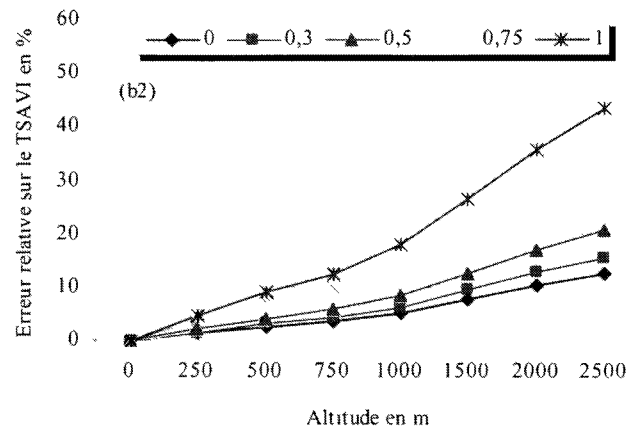
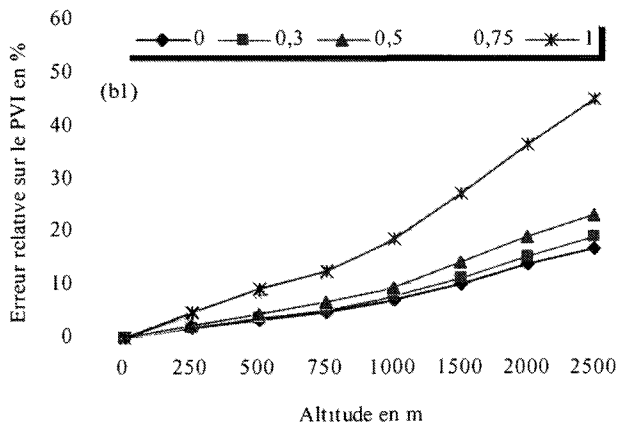
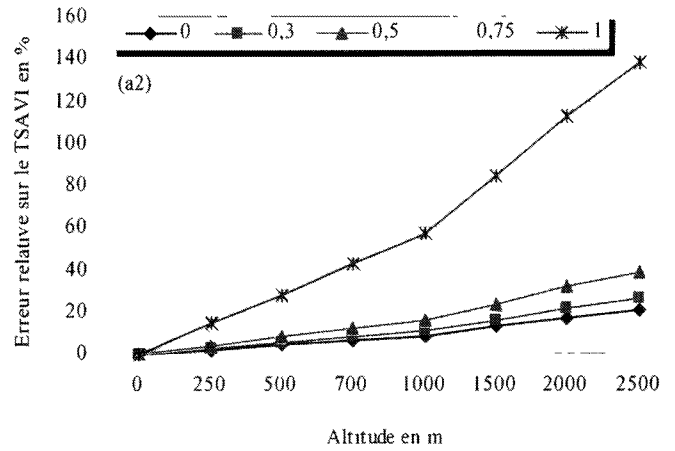
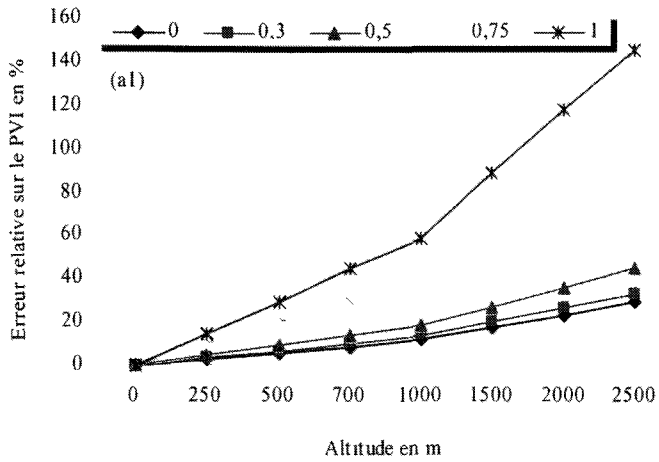
INTEGRATED VALUES OF :

APPARENT REFLECTANCE (USING EXOATMOSPHERIC IRRADIANCE) : .3963
APPARENT REFLECTANCE (USING IRRADIANCE AT ALTITUDE): .3894
Direct IRRADIANCE AT SENSOR LEVEL (W/M2): 165.3835
Total IRRADIANCE AT SENSOR LEVEL (W/M2): 165.3835
APPARENT RADIANCE (W/M2/SR): 20.4998
TOTAL GASEOUS TRANSMITTANCE: .8766

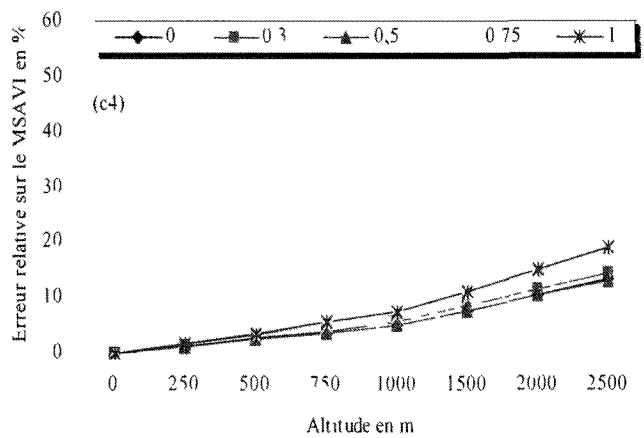
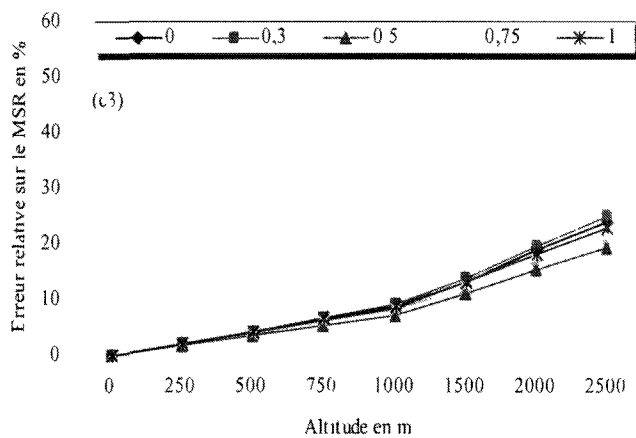
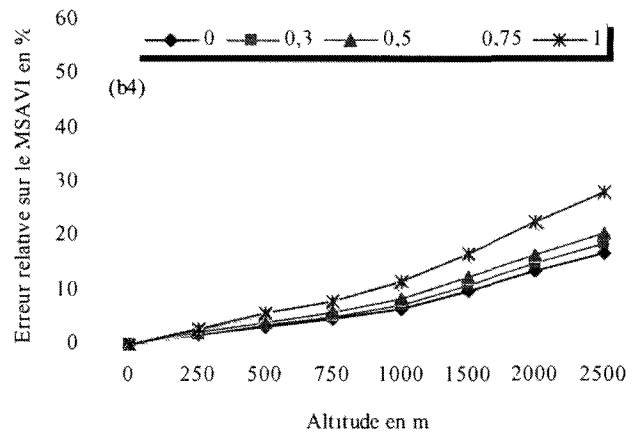
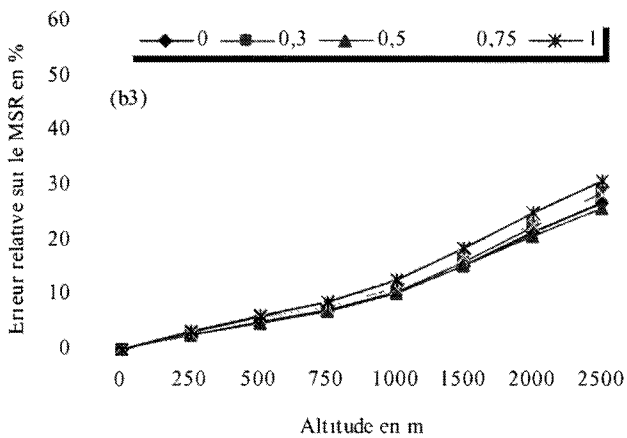
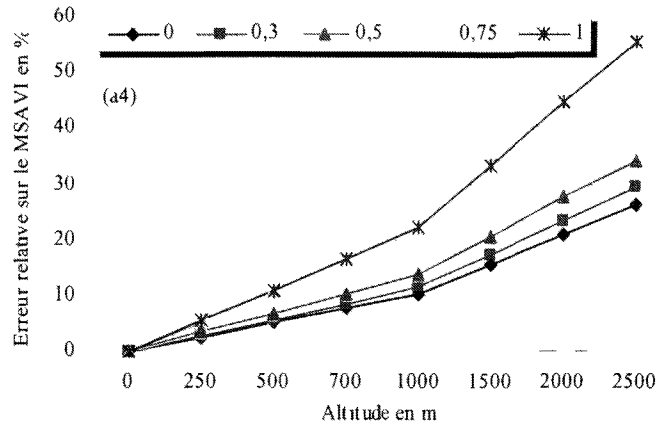
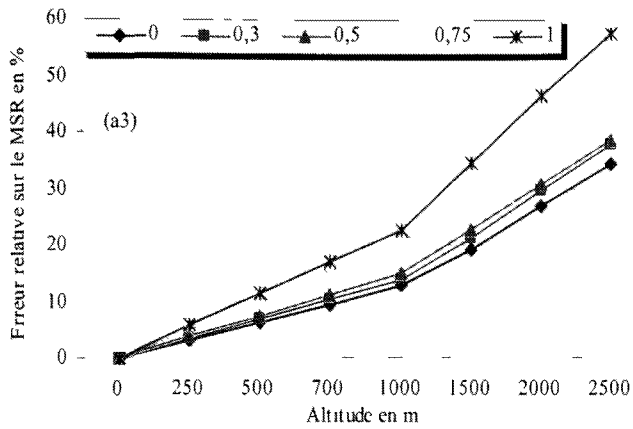
INTEGRATED NORMALIZED VALUES OF :

IRRADIANCE AT GROUND LEVEL (%) : DIRECT: 69.88
DIFFUSE: 25.30
SURROUND: 4.83

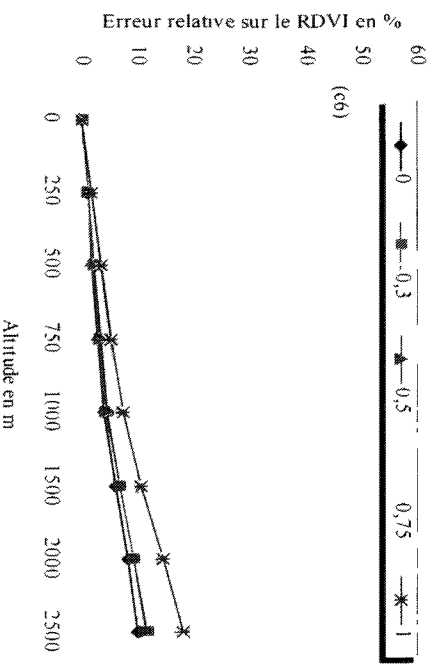
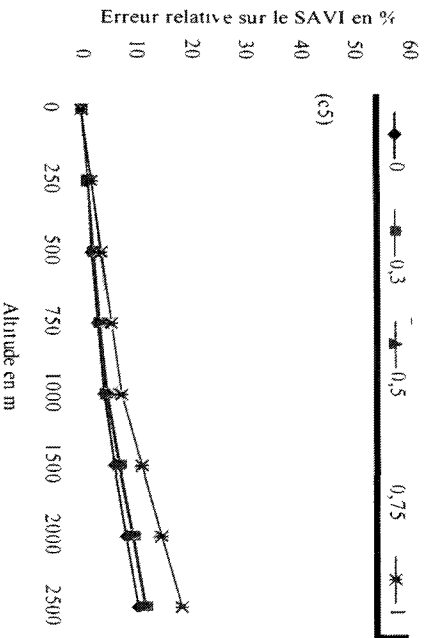
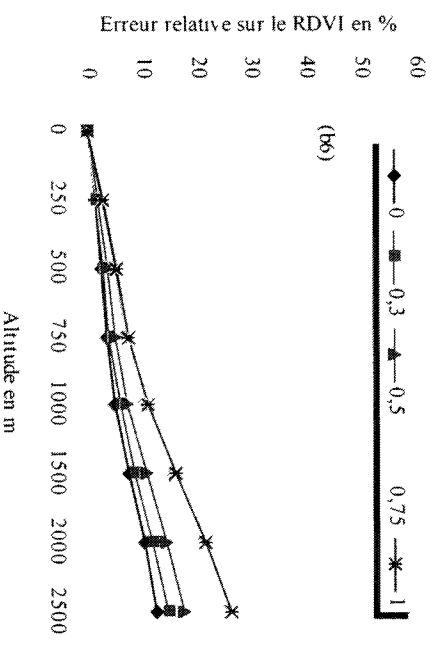
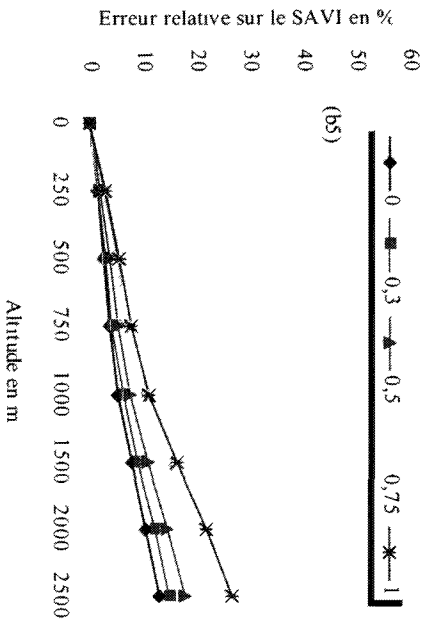
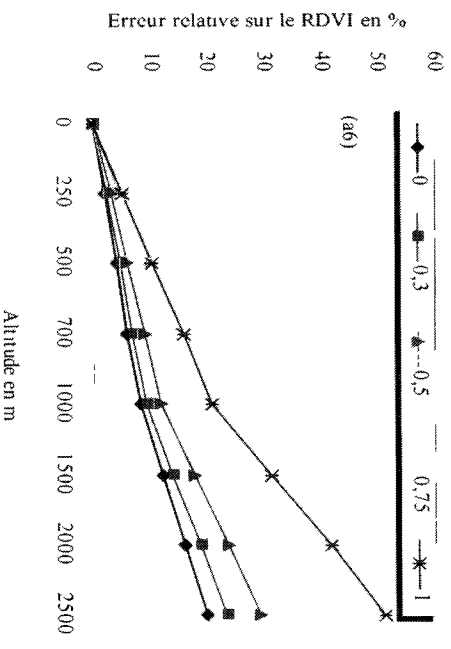
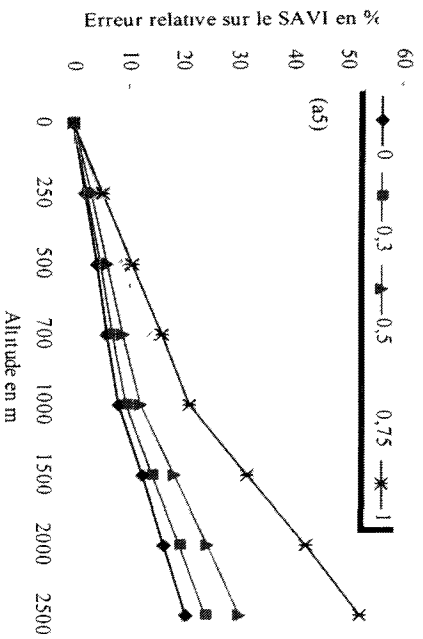
Annexe B



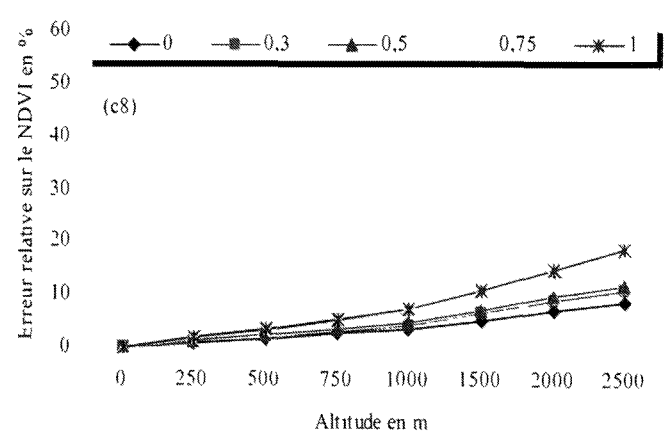
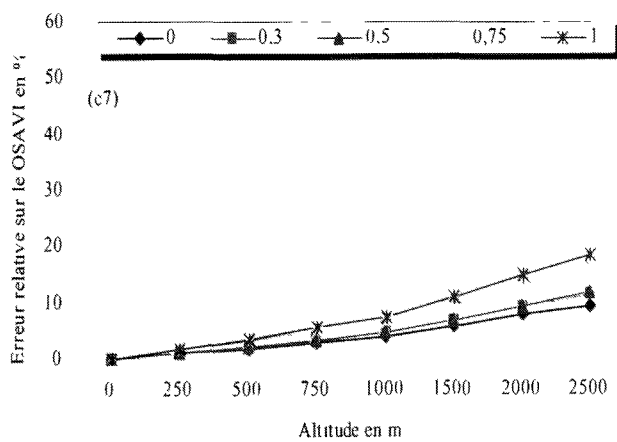
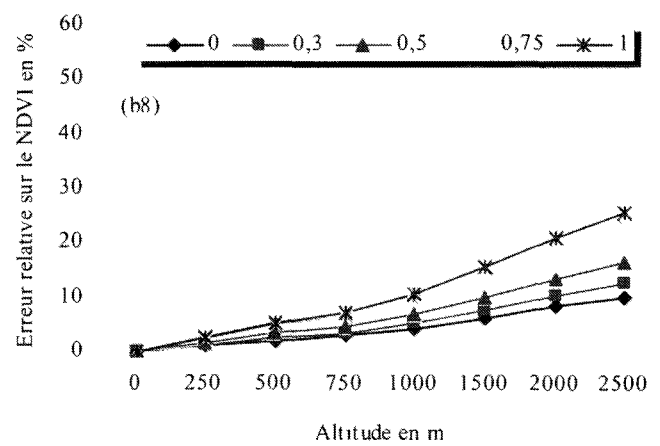
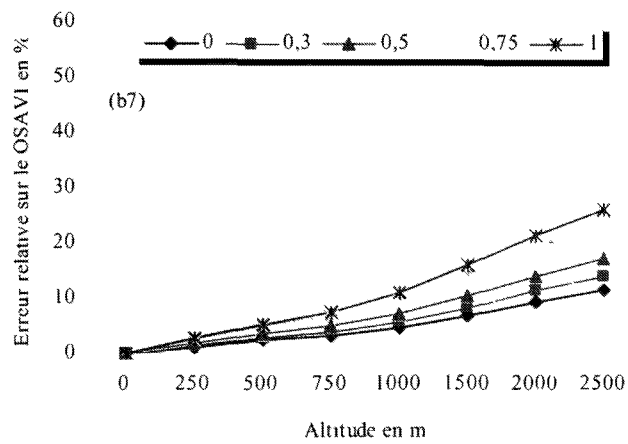
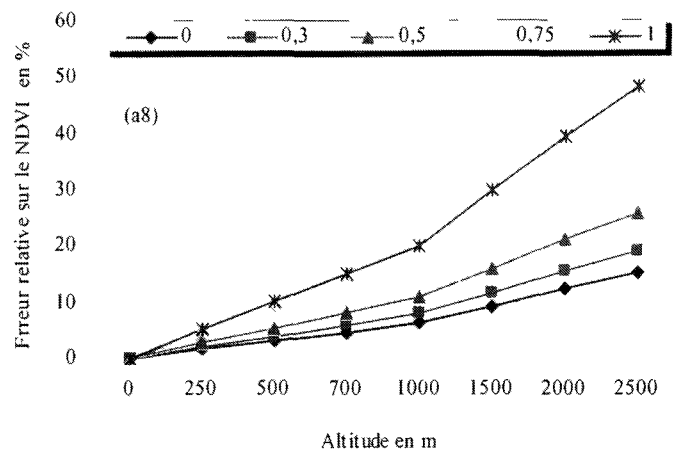
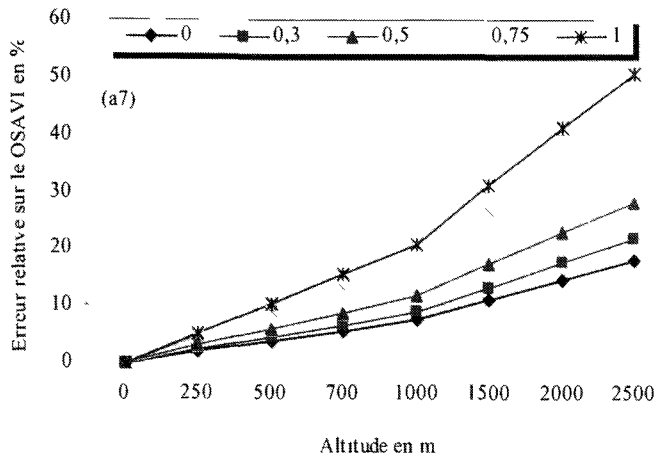
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c)



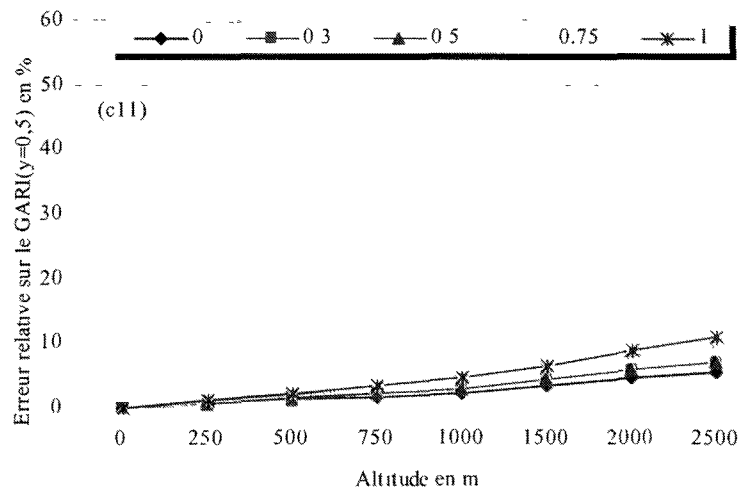
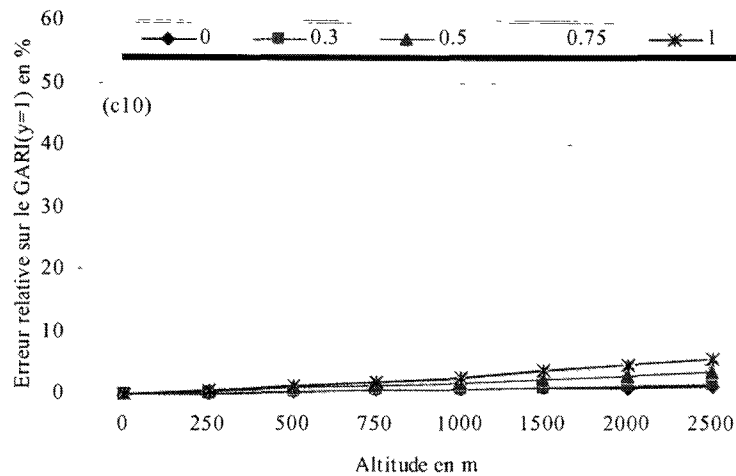
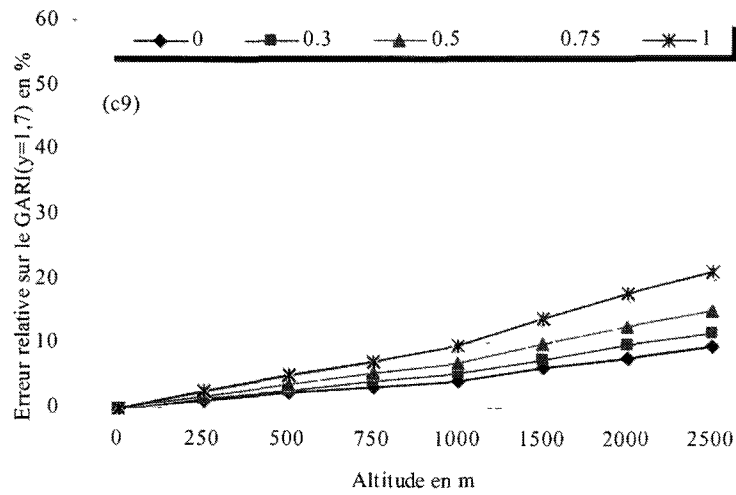
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



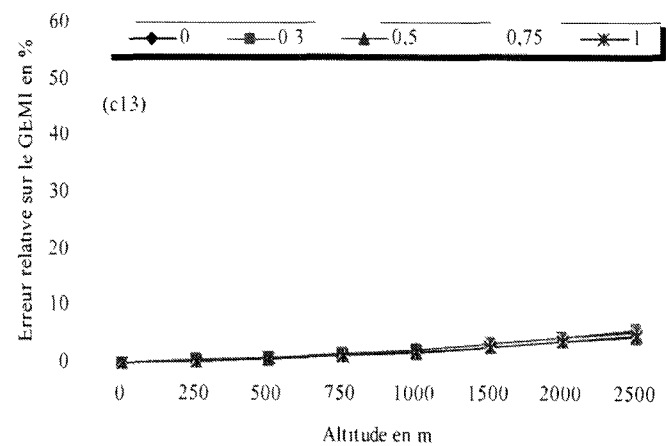
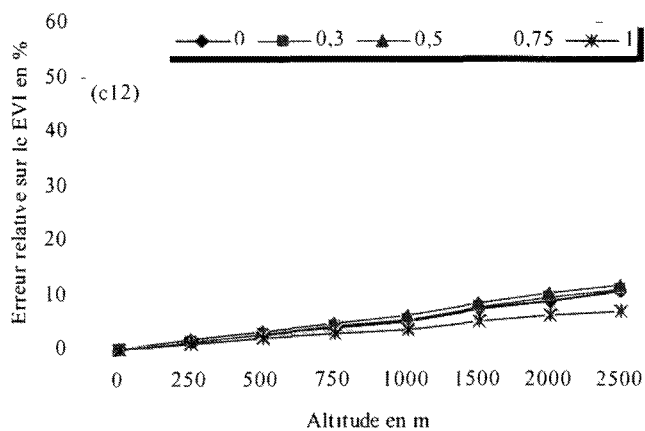
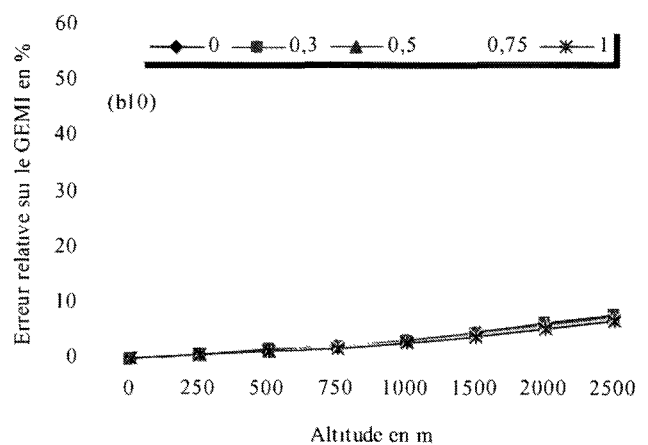
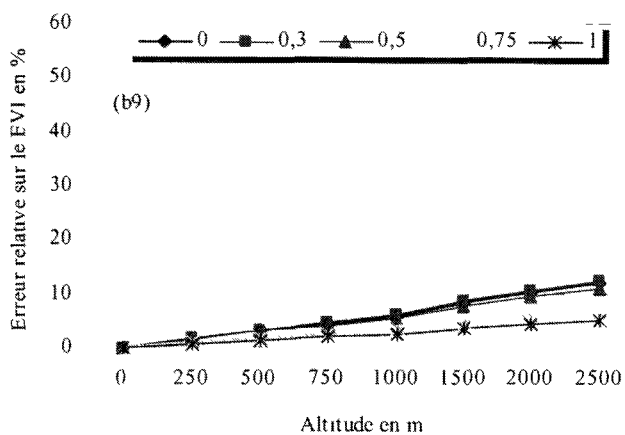
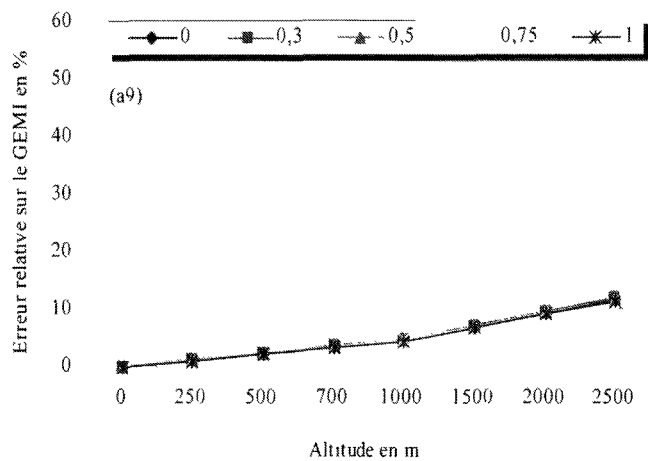
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



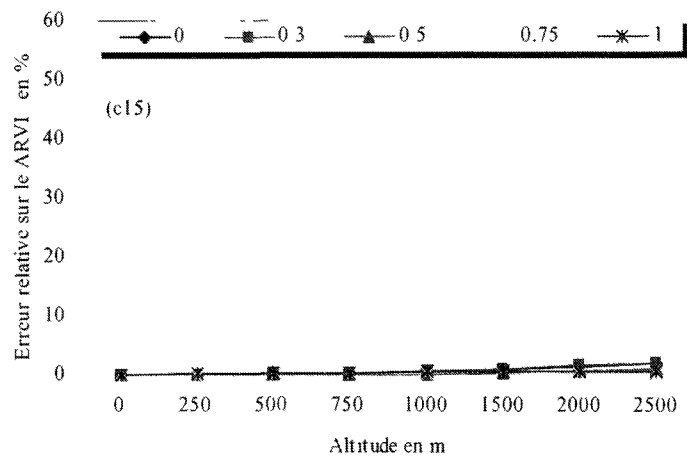
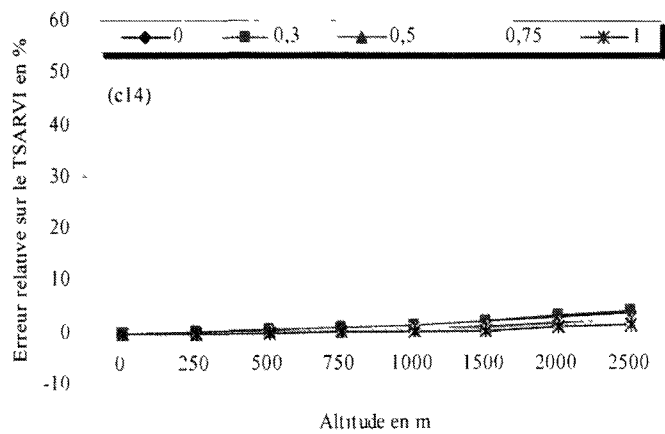
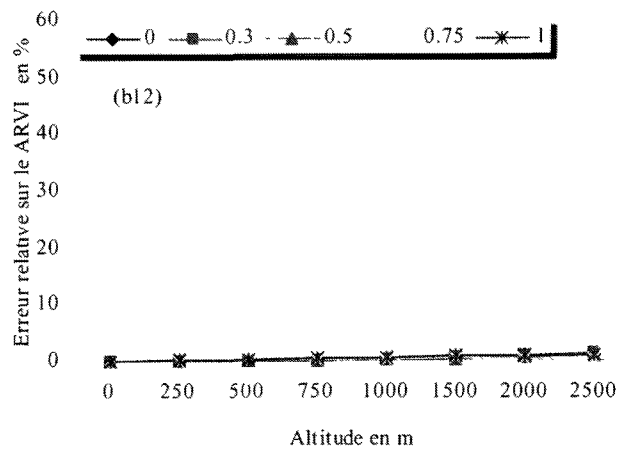
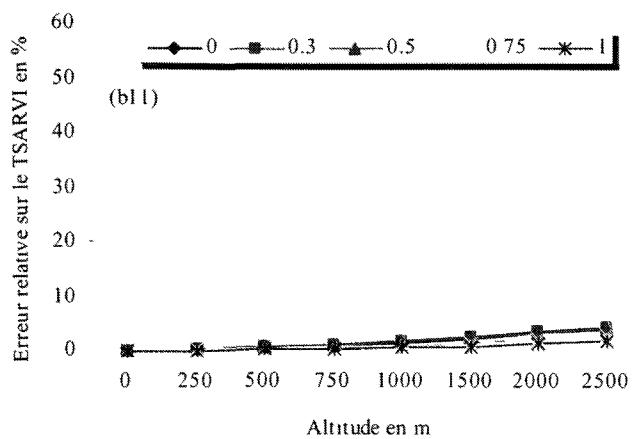
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)

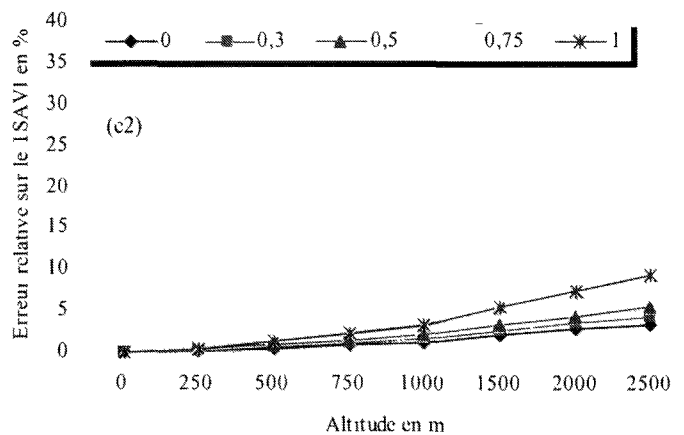
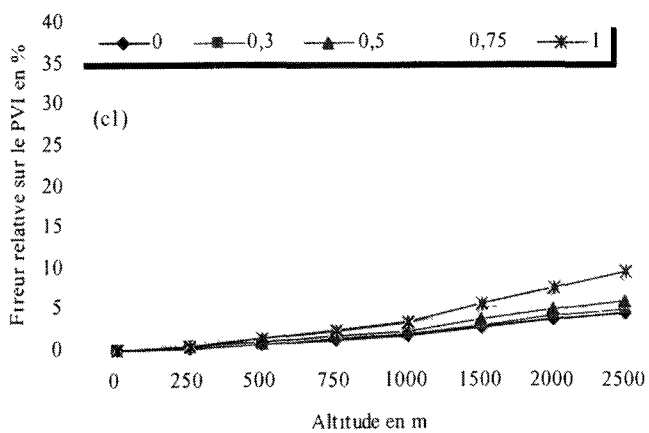
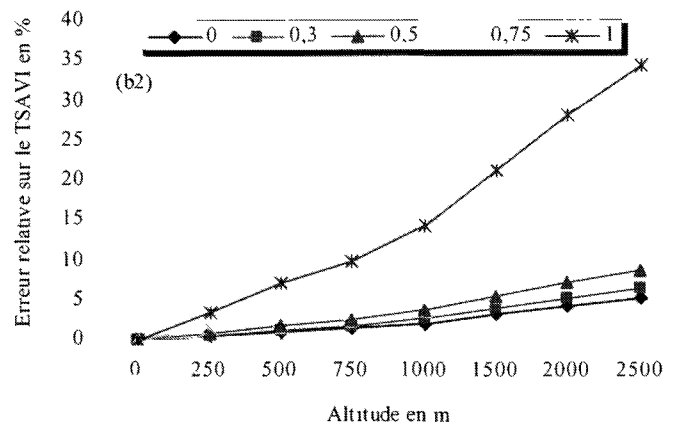
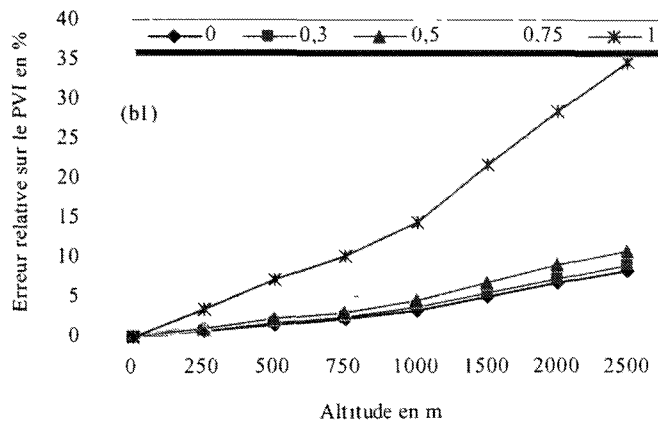
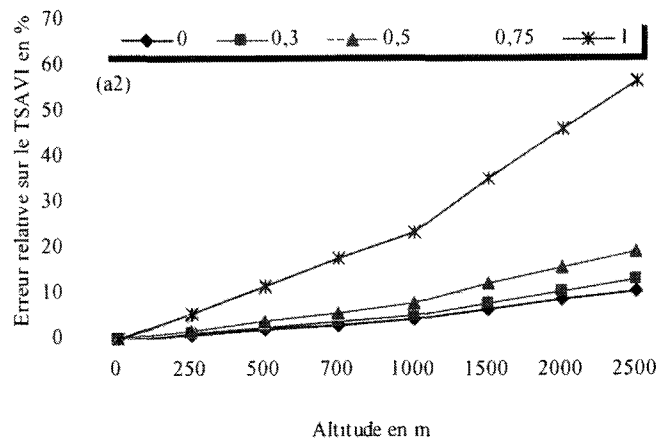
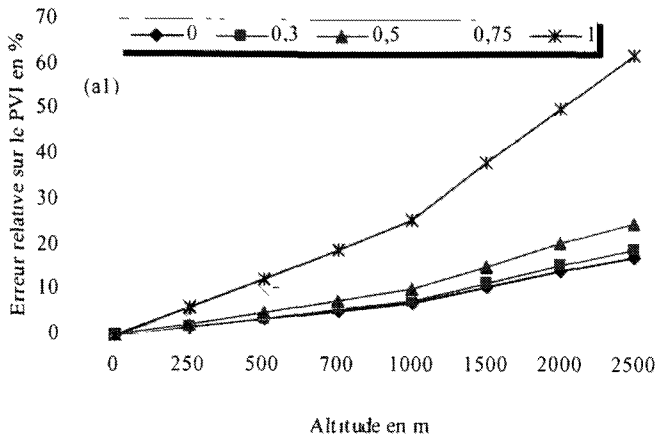


Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)

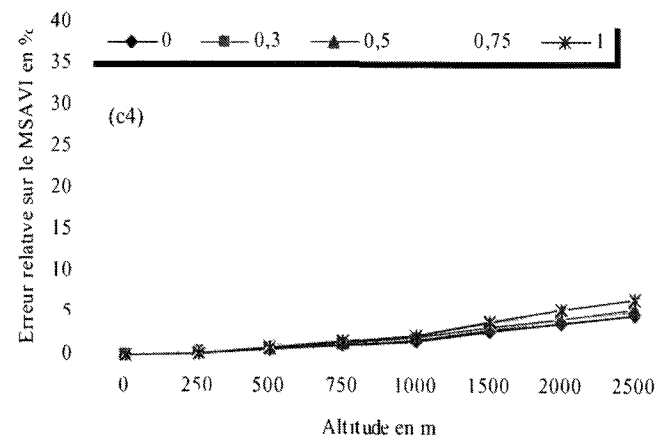
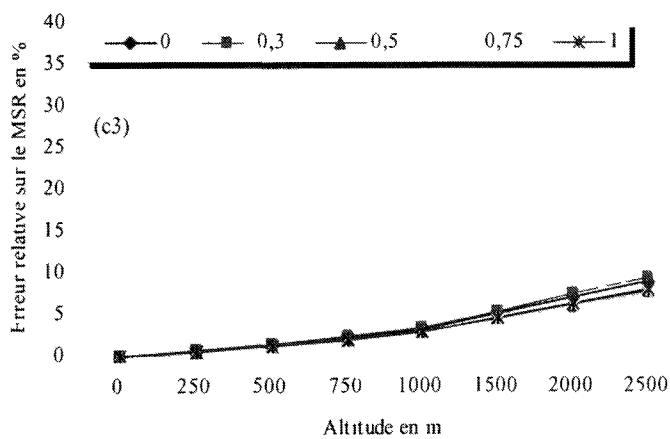
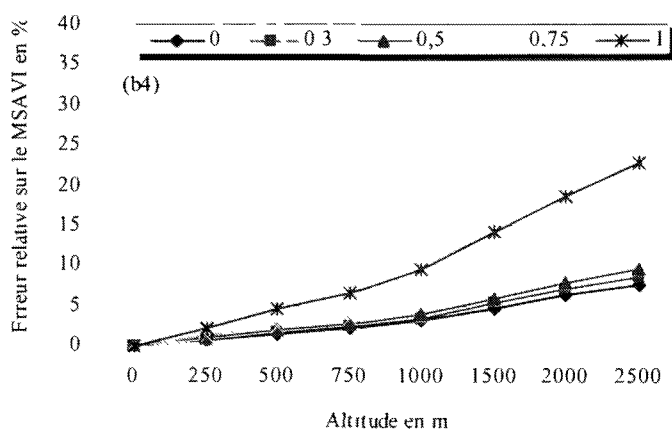
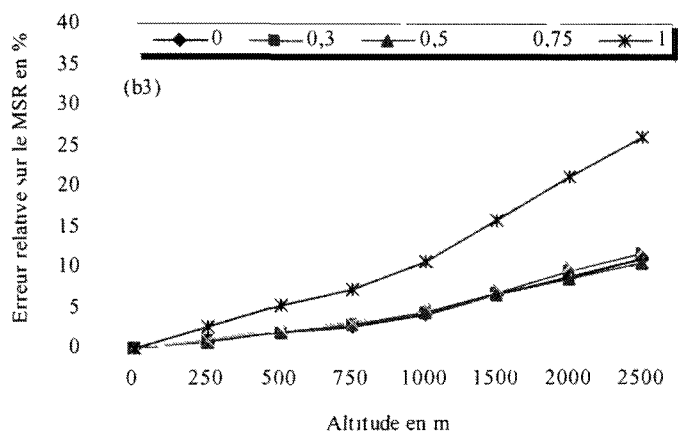
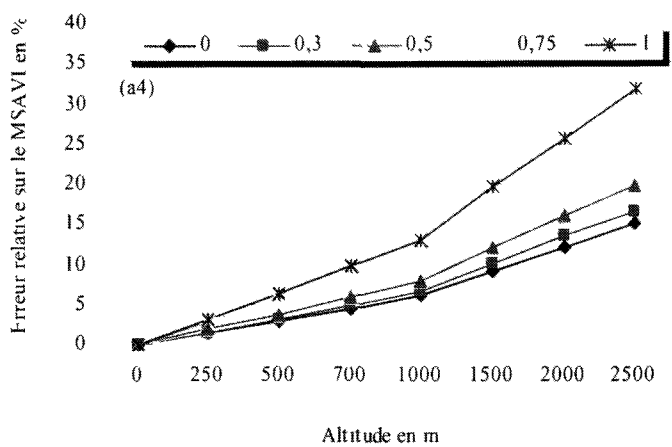
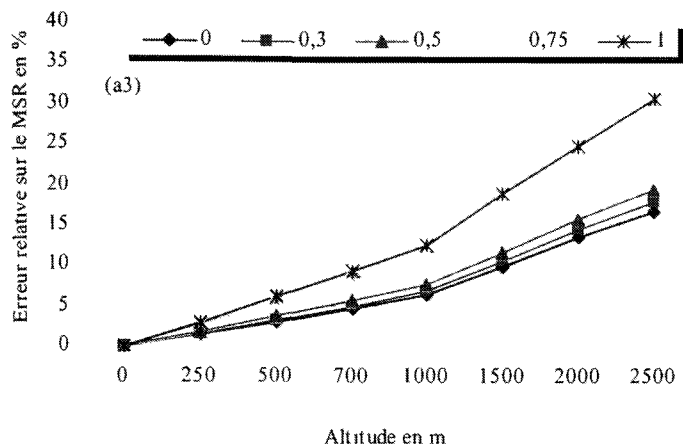


Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 10 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)

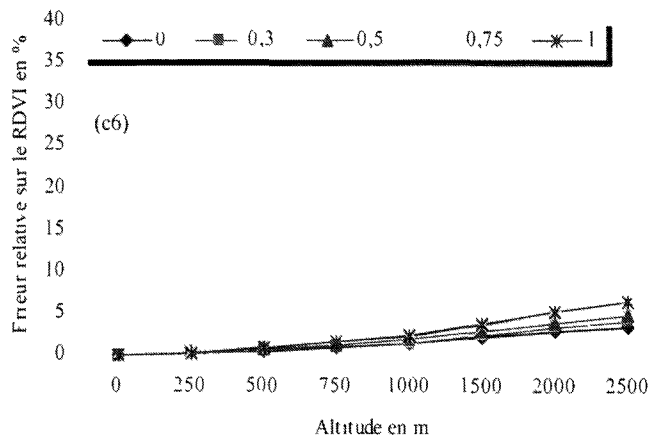
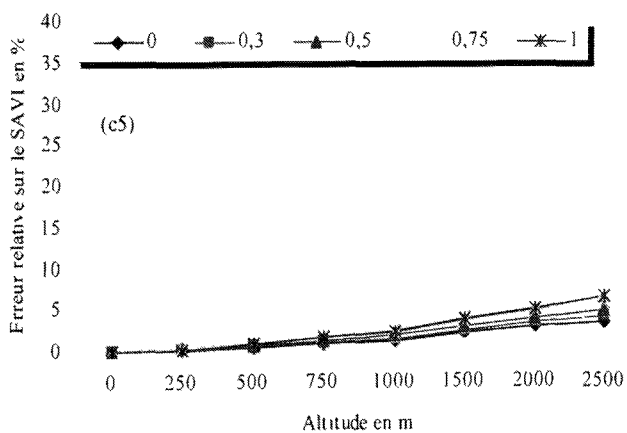
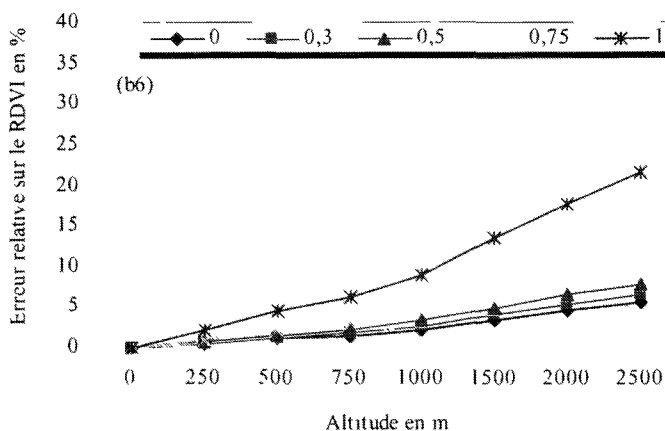
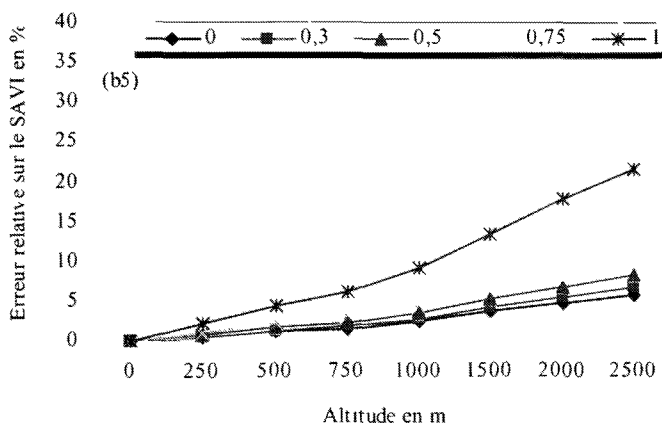
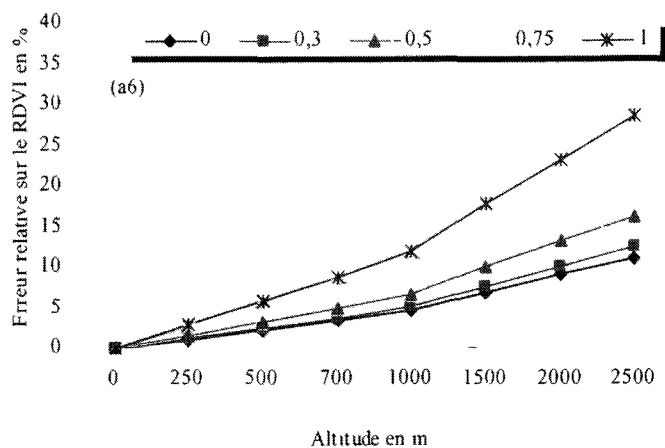
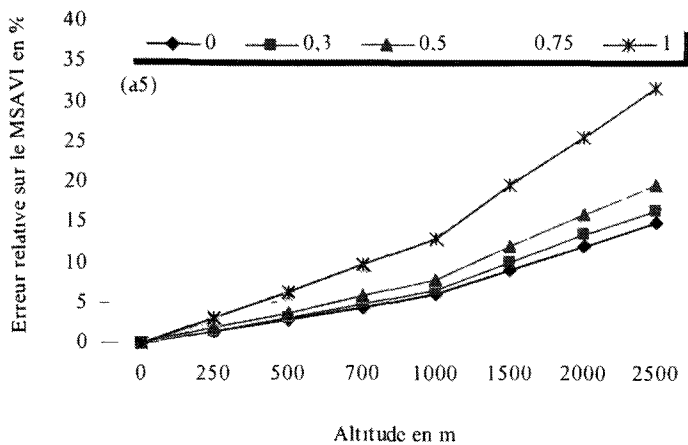
Annexe C



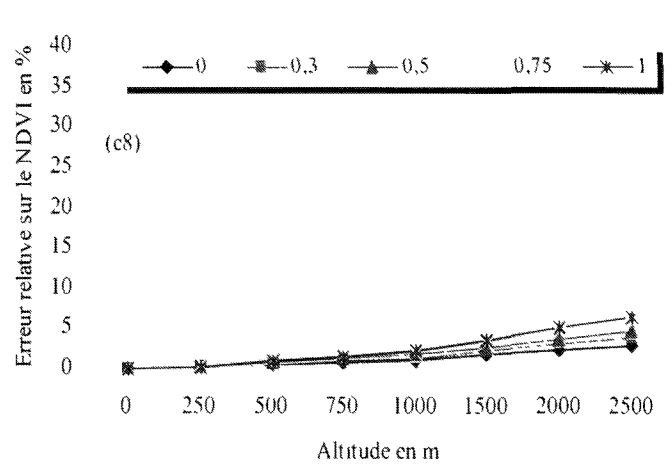
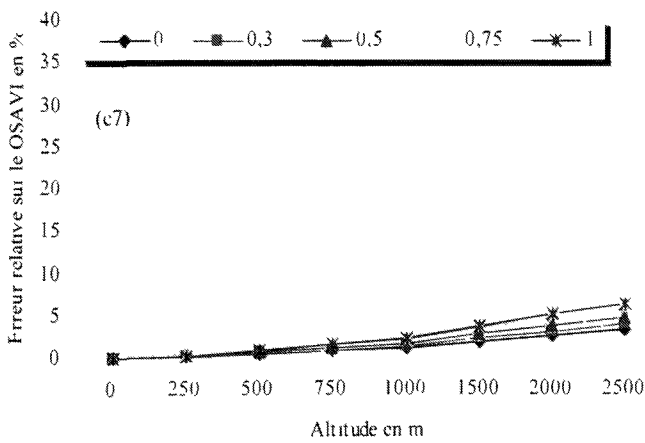
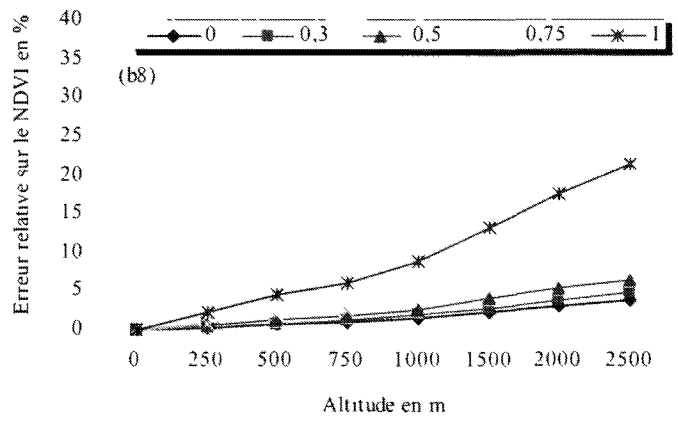
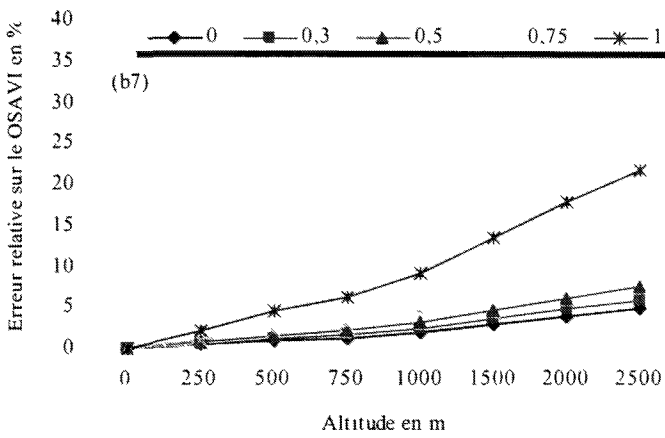
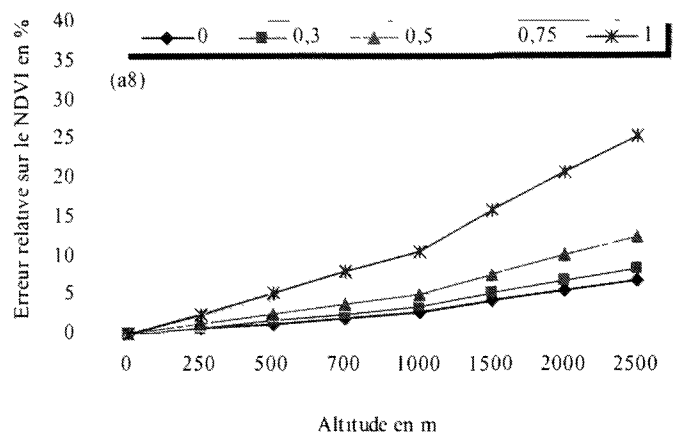
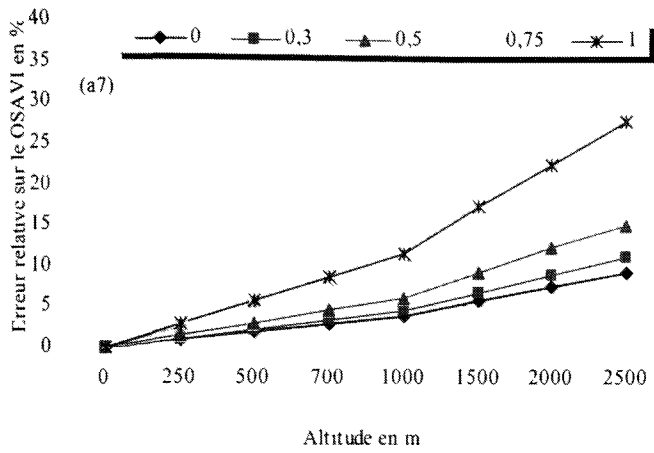
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c)



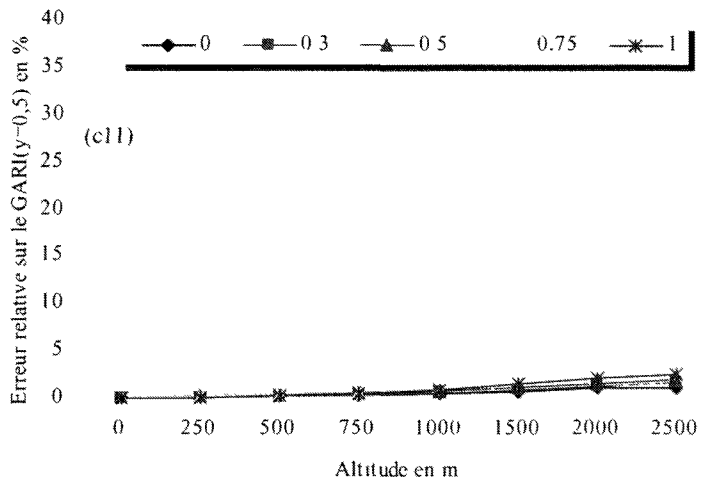
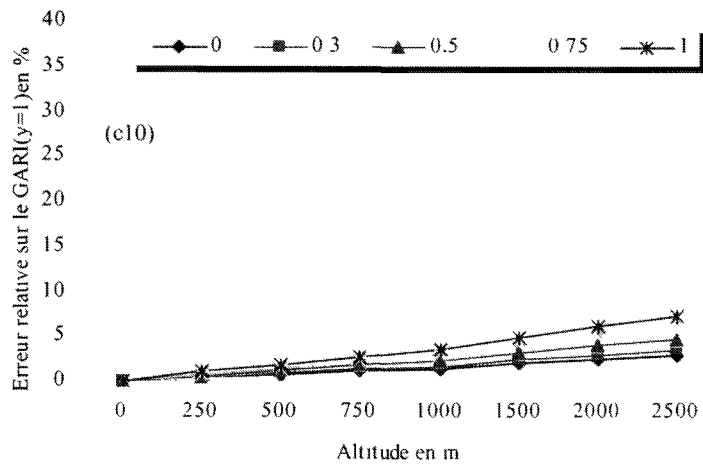
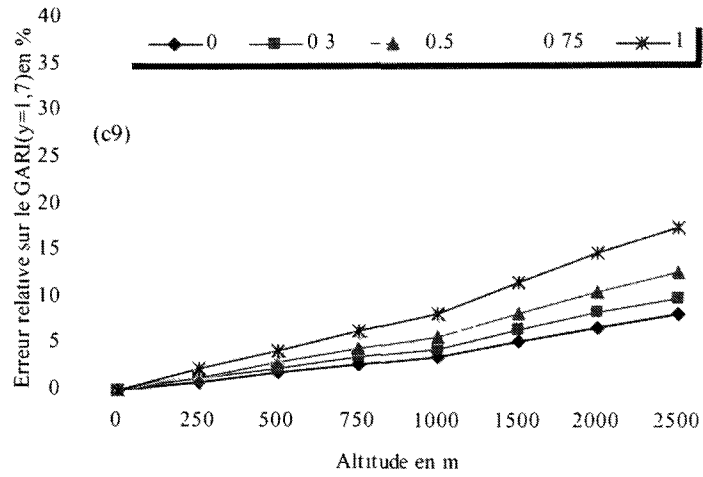
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



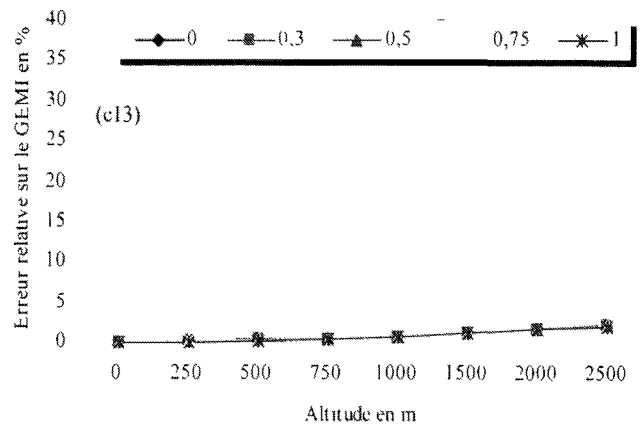
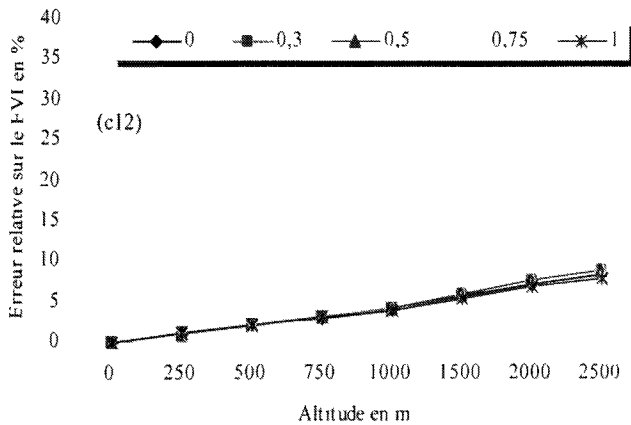
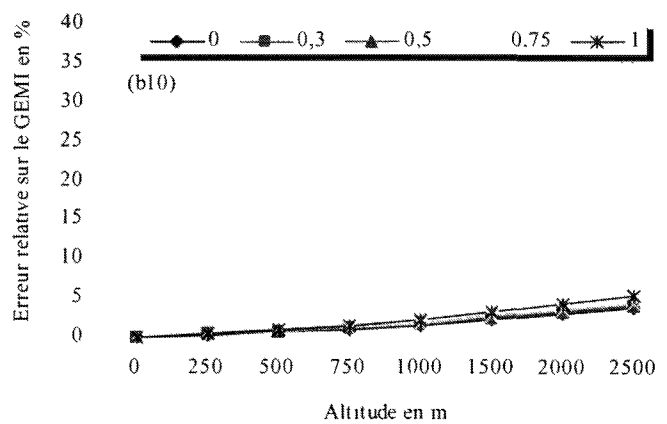
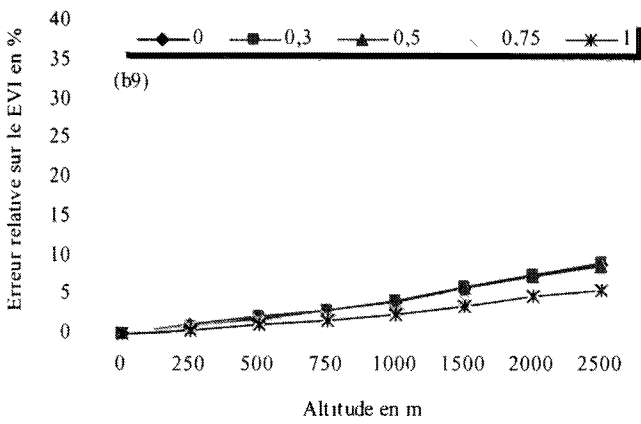
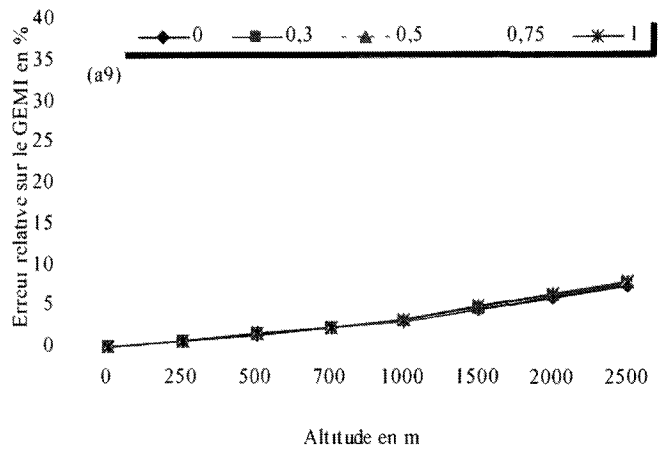
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



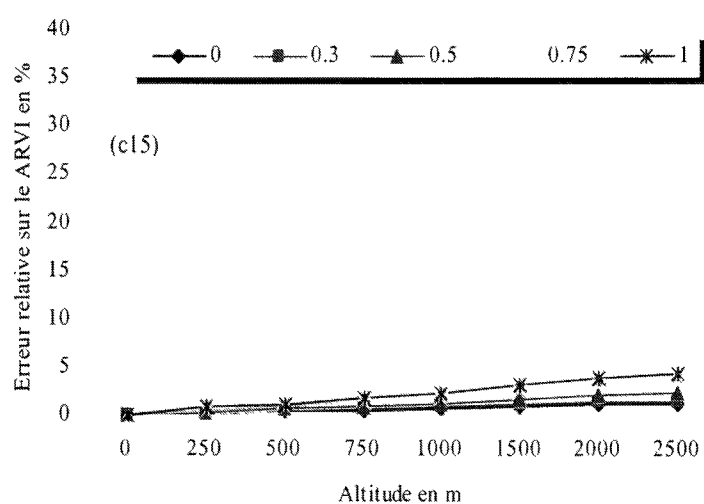
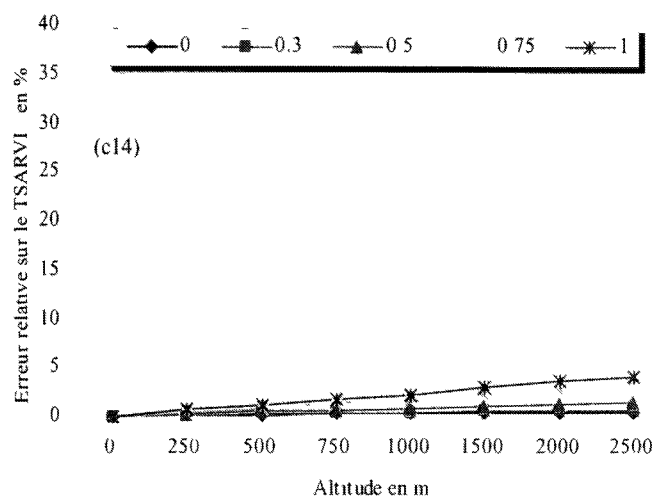
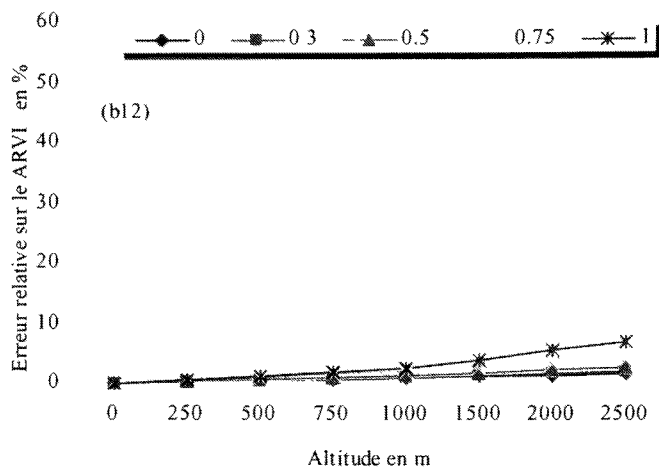
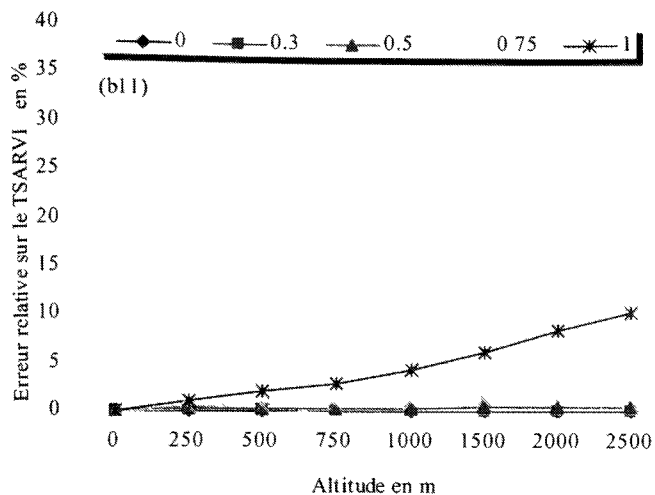
Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)



Sensibilité des indices de végétation aux effets de la topographie en fonction du taux de couverture pour une visibilité atmosphérique de 100 km pour les capteurs AVHRR(a), VEGETATION(b) et MODIS(c) (suite)