

THESE

Présentée en vue de
l'obtention du titre de

DOCTEUR

de

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE**

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace

SPÉCIALITÉ : Modélisation physique en télédétection

par

Xavier LENOT

**Modélisation et inversion d'images hyperspectrales :
quantification et prise en compte du relief et de la réflectance bidirectionnelle**

Soutenue le 8 juillet 2005 devant le jury :

M.	J. Ph. ETCHEGORRY-GASTELLU	Président
Mme	V. ACHARD	Co-directrice de thèse
M.	M. ACHEROY	Rapporteur
Mme	V. CARRERE	Rapporteur
MM.	P. PINET	Directeur de thèse
	L. WALD	Rapporteur

TABLE DES MATIERES

DEFINITIONS ET NOTATIONS	8
INTRODUCTION	12
<u>CHAPITRE 1: POSITION DU PROBLEME ET ETAT DE L'ART.....</u>	18
1. POSITION DU PROBLEME.....	19
2. PRINCIPALES METHODES D'INVERSION.....	23
2.1. Codes d'inversion fonctionnant en sol plat.....	23
2.1.1. Hypothèse d'un sol homogène pour le calcul des effets d'environnement	23
2.1.2. Prise en compte d'un environnement hétérogène pour le calcul des effets d'environnement	25
2.2. Présentation du code ATCOR4 corrigeant de l'influence du relief.....	29
3. CONCLUSION	31
<u>CHAPITRE 2: DESCRIPTION DE LA METHODE D'INVERSION DU CODE SIERRA</u>	32
1. EQUATION D'INVERSION ET METHODE DE RESOLUTION	33
2. IMPACT DES DIFFERENTS TERMES DE L'EQUATION D'INVERSION SUR LA REFLECTANCE CALCULEE.....	35
2.1. Impact d'une erreur sur l'éclairement.....	39
2.2. Impact d'une erreur sur la luminance diffuse montante	55
2.3. Impact d'une erreur sur la luminance atmosphérique.....	61
2.4. Importance de la prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance	66
2.5. Conclusion	69
3. CALCUL DES TERMES INTERVENANT DANS L'EQUATION.....	71
3.1. Eclairement incident	72
3.1.1. Eclairement direct.....	72
3.1.2. Eclairement diffus.....	75
3.1.3. Eclairement de couplage terre-atmosphère.....	80
3.1.4. Eclairement réfléchi par le voisinage	83

3.2.	Luminances diffuse et atmosphérique	86
3.2.1.	Calcul de la luminance atmosphérique	86
3.2.2.	Calcul de la luminance diffuse montante	86
3.3.	Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance.....	91
4.	ORGANIGRAMME GENERAL DU CODE SIERRA.....	93
5.	DESCRIPTION DES DIFFERENTES ETAPES DE SIERRA.....	95
5.1.	Estimation du contenu intégré en vapeur d'eau	95
5.2.	Première étape.....	96
5.3.	Seconde étape	98
5.4.	Troisième étape.....	99
5.5.	Quatrième étape	100

CHAPITRE 3: VALIDATION ET ETUDE DE SENSIBILITE AUX DONNEES D'ENTREE**102**

1.	VALIDATION DE SIERRA	103
1.1.	Erreur intrinsèque de l'algorithme d'inversion du code SIERRA	103
1.2.	Validation de l'algorithme d'inversion par comparaison avec AMARTIS	105
1.2.1.	Première scène de validation	105
1.2.2.	Seconde scène de validation	110
1.2.3.	Troisième scène de validation	112
2.	ETUDE DE SENSIBILITE.....	114
2.1.	Impact du modèle numérique de terrain sur la réflectance estimée.....	114
2.1.1.	Impact d'une différence d'échantillonnage entre le MNT et l'image	114
2.1.2.	MNT décalé par rapport à l'image	116
2.1.3.	Incertitude sur les altitudes	118
2.2.	Impact d'une erreur sur le type d'atmosphère	121
2.2.1.	Impact d'une erreur sur le type d'aérosols.....	121
2.2.2.	Impact d'une erreur sur la visibilité atmosphérique.....	124
2.3.	Conclusion	126

CHAPITRE 4: CAMPAGNE DE VALIDATION**128**

1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS	129
2.	DESCRIPTION DES MESURES AEROPORTEES	130
3.	DESCRIPTION DES MESURES REALISEES PAR L'ONERA.....	132

3.1.	Mesures de réflectance bidirectionnelle	132
3.1.1.	Principe de mesure.....	132
3.1.2.	Analyse des mesures de réflectance bidirectionnelle	136
3.1.3.	Utilisation des mesures de BRDF pour SIERRA	139
3.2.	Mesures d'épaisseur optique	141
4.	INVERSION DES IMAGES HYPERSPECTRALES AVEC SIERRA	142
4.1.	Correction topographique des images HYMAP	147
4.2.	Analyse spectrale des résultats	150
	CONCLUSION GENERALE	154
	BIBLIOGRAPHIE	160
	ANNEXES	164
1.	ANNEXE 1: VALIDATION DES ETAPES INTERMEDIAIRES DE SIERRA.....	165
1.1.	Calcul de l'éclairement incident	165
1.1.1.	Première scène de validation	165
1.1.2.	Deuxième scène de validation	171
1.1.3.	Troisième scène de validation	176
1.1.4.	Quatrième scène de validation.....	181
1.2.	Calcul de la luminance diffuse montante.....	186
1.2.1.	Première scène de validation	186
1.2.2.	Seconde scène de validation	188
1.2.3.	Troisième scène de validation	189
1.2.4.	Quatrième scène de validation.....	190
1.2.5.	Cinquième scène de validation	191
1.2.6.	Synthèse des résultats	191
1.3.	Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance.....	192
1.3.1.	Première scène de validation	193
1.3.2.	Deuxième scénario de validation.....	197
1.3.3.	Troisième scène de validation	201
1.3.4.	Synthèse des résultats	201
1.4.	Inversion de spectres de luminances simulés par MODTRAN4	205
2.	ANNEXE 2: CAMPAGNE EN OMAN	206
2.1.	Détermination du champ de vue du GER sur CHAMO	206
2.2.	Mesures de la luminance réfléchi par le sol, de l'éclairement incident et de la transmission atmosphérique descendante.	208
2.3.	Inter-étalonnage entre les deux GER.....	211
2.4.	Principales mesures réalisées: mesures de BRDF	212

ONERA



DEFINITIONS ET NOTATIONS

P : pixel cible

M : pixel du voisinage de P

$V(P)$: voisinage de P

$\vec{N}(P)$: la normale au pixel P

\vec{u}_x et \vec{u}_y : vecteurs définissant le plan horizontal

\vec{u}_z : vecteur définissant la direction verticale

\vec{n}_i : direction d'incidence définie par (θ_i, φ_i)

θ_s : angle zénithal d'incidence solaire

φ_s : angle azimutal d'incidence solaire

θ_i : angle zénithal d'incidence du rayonnement par rapport à $\vec{N}(P)$

φ_i : angle azimutal d'incidence du rayonnement par rapport au plan défini par \vec{u}_x et $\vec{N}(P)$

\vec{n}_v : direction d'émergence définie par (θ_v, φ_v)

θ_v : angle zénithal d'émergence du rayonnement par rapport à $\vec{N}(P)$

φ_v : angle azimutal d'émergence du rayonnement par rapport au plan défini par \vec{u}_x et $\vec{N}(P)$

θ_c : angle zénithal de visée du capteur

z_c : altitude du capteur

λ : longueur d'onde

dS_M : élément de surface de M (un pixel)

$d\omega$: angle solide élémentaire

E_{coup} : éclairement de couplage terre-atmosphère

E_{dir} : éclairement direct incident au niveau du sol

E_{dif} : éclairement diffus incident au niveau du sol

E_{ref} : éclairement réfléchi par le voisinage du pixel

E_{TOA} : éclairement en haut de l'atmosphère

E_{tot} : éclairement total incident au niveau du sol

F_{envt} : fonction d'environnement

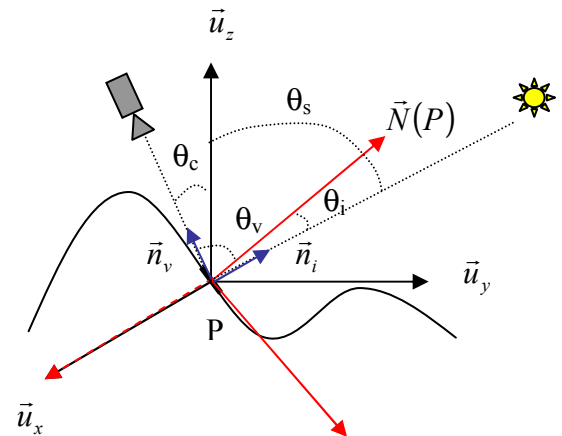
L_{atm} : luminance atmosphérique

L_d : luminance directionnelle descendante

L_{dir} : luminance directe

L_{dif} : luminance diffuse

L_{mes} : luminance mesurée par le capteur



\vec{n}_l : direction d'incidence de la luminance directionnelle descendante

S_{atm} : albédo atmosphérique

$T_{\text{dir}}^{\downarrow}$ et $T_{\text{dir}}^{\uparrow}$: respectivement les transmissions atmosphériques directes descendante et montante

$T_{\text{dir}}(M,P)$: transmission atmosphérique directe entre les pixels M et P

$T_{\text{dif}}^{\downarrow}$ et $T_{\text{dif}}^{\uparrow}$: respectivement les transmissions diffuses descendantes et montantes

V_{ciel} : coefficient de vue du ciel (entre 0 et 1)

V_{ter} : coefficient de vue du terrain (entre 0 et 1, tel que $V_{\text{ciel}}+V_{\text{ter}}=1$)

Ω_{ciel} : angle solide de vue du ciel

$\overline{\Omega}_{\text{ciel}}$: complémentaire à l'angle solide de vue du ciel ($\Omega_{\text{ciel}} + \overline{\Omega}_{\text{ciel}} = 2\pi$)

AMARTIS : Advanced Modeling of the Atmospheric Radiative Transfer for the Inhomogeneous Surfaces

ATCOR : ATmospheric CORrection

FOV : champ de vue (Field Of View)

Ifov : champ de vue instantané (Instantaneous Field Of View)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NDVI: Indice de végétation (Normalized Difference Vegetation Index)

SIERRA : Spectral reflectance Image Extraction from Radiance with Relief and Atmospheric correction

Grandeurs relatives à la réflectance :

BRDF : valeur de la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle pour une direction d'incidence \vec{n}_i et d'émergence \vec{n}_v (en sr^{-1})

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{L(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda)}{E_{dir}(\theta_i, \varphi_i) \cos(\theta_i)}$$

ρ : valeur de la réflectance bidirectionnelle (sans dimension)

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \pi \times BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$$

a_s et a_v : respectivement les réflectances directionnelle-hémisphérique et hémisphérique-directionnelle (sans dimension)

$$a_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \rho(\theta, \varphi, \theta_v, \varphi_v, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$a_s(\theta_i, \varphi_i, \lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \rho(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

s_p : l'albédo sphérique ou réflectance hémisphérique-hémisphérique (sans dimension)

$$s_p(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} a_s(\theta, \varphi, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

Un sol est dit «lambertien» lorsque sa réflectance ne dépend pas des angles d'incidence et de visée. Dans ce cas, on a l'égalité:

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = a_v(\theta_v, \varphi_v, \lambda) = a_s(\theta_i, \varphi_i, \lambda) = s_p(\lambda)$$

ONERA



INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, les techniques d'observation de la Terre se sont considérablement développées, et de nombreux capteurs, aéroportés ou satellitaires, permettent d'acquérir des images de la Terre dans différents domaines spectraux (visible, infrarouge, radar). La télédétection regroupe l'ensemble des connaissances et techniques nécessaires à l'analyse de ces images, l'objectif étant d'en extraire les caractéristiques physiques ou biologiques des objets observés. Les ondes électromagnétiques interagissent sur la matière suivant plusieurs mécanismes en fonction de la nature et de la structure de l'objet. Ces mécanismes modifient les caractéristiques de l'onde électromagnétique (spectre, intensité, polarisation, ...) de telle manière que les propriétés de l'objet peuvent être identifiées et fournir ainsi à distance des informations sur la nature de l'objet.

Les années soixante ont vu apparaître les premiers instruments embarqués sur satellite, qui sont bien adaptés à des domaines tels que la météorologie, mais ont des performances, en terme de résolution spatiale, insuffisantes pour l'observation des fonds terrestres. Dans les années soixante-dix naissent des satellites tels que Landsat et Spot, entièrement dédiés à l'observation de la Terre. Les imageurs large bande ou multispectraux embarqués sur ces satellites, ont quant à eux, une résolution spatiale adaptée à la variabilité des fonds terrestres, mais le contenu informatif des images est insuffisant pour une étude approfondie des scènes visées.

Depuis une vingtaine d'année, l'imagerie hyperspectrale, qui correspond à la mesure de la signature spectrale de chaque élément du paysage dans un ensemble de bandes étroites et contiguës (Entre 100 et 200 bandes spectrales dans le domaine réflectif, pour une résolution de l'ordre de 1% de la longueur d'onde), est une technique en plein essor. Les possibilités offertes par cette technique s'étendent aussi bien à la géologie, la prospection minière, qu'à l'écologie, l'agriculture, l'économie, ou l'observation militaire. La finesse des bandes spectrales des imageurs hyperspectraux permet l'analyse des propriétés de fonds terrestres (composition des roches, stress hydrique et activité chlorophyllienne de la végétation, pollution du sol ...) en observant des bandes d'absorption spécifiques, mais aussi la caractérisation de l'atmosphère (vapeur d'eau, CO₂, ...).

Dans le domaine réflectif (de 0,4 μm à 2,5 μm), la surface du sol est caractérisée par sa réflectance, alors que les instruments hyperspectraux aéroportés ou satellitaires mesurent, pour chaque pixel de l'image, un spectre de luminance. Cette luminance est le résultat d'une interaction du rayonnement solaire avec la surface visée et l'atmosphère, dont les molécules et particules diffusent et absorbent le rayonnement. Ainsi, la luminance d'un pixel, mesurée par un capteur embarqué, provient du rayonnement réfléchi par le pixel puis transmis directement jusqu'au capteur (luminance directe), du rayonnement réfléchi par l'environnement du pixel puis transmis par diffusion dans l'angle de vue du capteur (luminance diffuse), et du rayonnement diffusé par l'atmosphère jusqu'au senseur, sans interaction avec le sol (luminance atmosphérique). La correction atmosphérique permet d'extraire la réflectance de surface du signal mesuré, en estimant pour chaque pixel, le rayonnement incident sur la scène et le rayonnement montant jusqu'au capteur, dans les conditions d'acquisition de l'image.

De nombreux modèles « inverses » ont ainsi été développés pour calculer la réflectance de surface à partir de mesures hyperspectrales aéroportées ou satellitaires. La majorité de ces codes se restreignent au cas d'un sol plat. Certains, comme ATREM [6] [25] ou ACORN [14], supposent également le sol homogène pour le calcul de la luminance diffuse montante. D'autres codes d'inversion, tel que FLAASH [1] et

COCHISE [13] [16], ont été développés afin de prendre en compte l'hétérogénéité de la scène pour estimer la contribution de l'environnement.

Au dessus d'un paysage montagneux, la quantité de rayonnement mesurée par un capteur aéroporté varie en fonction de l'inclinaison du sol, de la géométrie du paysage environnant, et de l'altitude.

A partir de mesures effectuées avec un pyranomètre sur des plans inclinés, Temps et Coulson [27] ont montré que l'éclairement incident sur la surface dépend de la pente au sol. Ainsi, l'éclairement direct varie selon le cosinus de l'angle d'incidence solaire sur le sol. Ils ont également mis en évidence la nature anisotrope de l'éclairement diffus, et l'existence d'un éclairement dû aux réflexions sur le relief environnant, qui est négligeable pour les zones exposées au soleil, mais qui peut devenir un terme de premier ordre de l'éclairement incident dans le proche infrarouge, notamment sur une zone d'ombre.

L'éclairement incident sur le sol est ensuite réfléchi par la surface dans la direction du capteur. La quantité d'éclairement réfléchi dépend de la géométrie d'observation. Dans un état de l'art sur les mesures de réflectances bidirectionnelles, Roujean [21] a recensé de nombreux phénomènes caractéristiques des effets bidirectionnels de surface: effet spéculaire, Hot-spot, augmentation de la réflectance pour de grands angles de visée,... Ces effets peuvent atteindre jusqu'à 50% de variation par rapport à la valeur moyenne de la réflectance mesurée.

Le rayonnement réfléchi est transmis par l'atmosphère dans l'angle de vue du senseur. Le signal mesuré par le capteur aéroporté varie avec l'altitude du sol et la géométrie du paysage, qui délimite la portion d'atmosphère diffusant et absorbant le rayonnement. Dozier et Frew [5] ont ainsi observé de fortes variations de la transmission atmosphérique montante et de la luminance atmosphérique montante, en fonction de l'altitude de la scène.

La modélisation directe du signal mesuré par un capteur aéroporté au-dessus d'un paysage hétérogène et montagneux, a été développée par Miesch et al [12], pour l'élaboration du code monochromatique de transfert radiatif AMARTIS, qui sert de référence dans cette thèse. Ces travaux ont abouti à la modélisation physique de chaque grandeur radiative contribuant au signal.

Concernant les outils d'inversion, le code ATCOR4 développé par Richter et al [19] [20] représente une véritable évolution, puisque le relief de la scène est pris en compte par l'intermédiaire d'un Modèle Numérique de Terrain. L'éclairement incident au niveau du sol, calculé suivant le modèle de Sandmeier [22], dépend de la pente du pixel cible et du relief du voisinage. Les éclairissements directs, diffus, et réfléchis par le voisinage sont estimés. Par contre, l'éclairement de couplage terre-atmosphère, qui a été étudié par Tanré et al [26], et qui peut représenter jusqu'à 15% de l'éclairement incident, est négligé. Dans ATCOR4, le relief intervient également dans le calcul du rayonnement montant, puisque la transmission atmosphérique montante, et la luminance atmosphérique montante sont dépendantes de l'altitude de la scène. D'autre part, une correction effectuée a posteriori sur la réflectance restituée, permet de corriger des variations bidirectionnelles de la réflectance pour de grands angles d'incidence ou de visée.

Dans cette thèse, nous proposons un nouveau modèle de correction atmosphérique et topographique des images hyperspectrales. L'objectif est d'obtenir à partir d'images étalonnées en luminance orthorectifiées sur un Modèle Numérique de Terrain, des images de réflectances spectrales exprimées dans des grandeurs indépendantes de l'atmosphère, et des angles d'incidence et d'observation, quel que soit le paysage survolé. Pour le développement de ce modèle, dénommé SIERRA (Spectral reflectance Image

Extraction from Radiance with Relief and Atmospheric correction), l'effort a notamment porté sur l'estimation de l'éclairement incident, et particulièrement celle de l'éclairement diffus, et sur le calcul de la luminance diffuse montante. En préambule à l'inversion, le contenu intégré en vapeur d'eau est estimé. La réflectance de surface est ensuite restituée en plusieurs étapes successives, s'appuyant sur des équations d'inversion de plus en plus complexes, dans lesquelles sont introduits progressivement l'ensemble des phénomènes physiques. Si la réflectance est supposée lambertienne, deux étapes suffisent, sinon, les effets bidirectionnels de la réflectance sont pris en compte sur l'ensemble du trajet optique du rayonnement, ce qui nécessite deux étapes supplémentaires.

Cette thèse comporte également un volet expérimental. Dans le cadre de l'ACI « Observation de la Terre », et plus particulièrement du projet HYPERGEMME (HYPERspectral pour la GEologie et Minéralogie de Massifs et Environnement minier), une campagne de mesures est réalisée dans le massif montagneux de Maqсад, en sultanat d'Oman. Ce site, particulièrement étudié depuis une vingtaine d'année pour ses caractéristiques géologiques uniques, est survolé par l'imageur hyperspectral HYMAP [3], dans le but d'évaluer l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour l'étude minéralogique des surfaces terrestres. Plusieurs laboratoires de recherche ont contribué à ce projet, dont le Laboratoire de Dynamique Terrestre et Planétaire de l'OMP Toulouse, le Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes, et le Département d'Optique Théorique et Appliquée de l'ONERA Toulouse, qui ont participé à l'acquisition de mesures sur le terrain. Les mesures effectuées par l'ONERA ont pour objectif la validation du code SIERRA. Aussi, parallèlement au survol hyperspectral, des mesures de réflectances bidirectionnelles sont effectuées avec un GER 3700 positionné sur le banc de mesures directionnelles CHAMO (CHArriot Mobile Orientable), ainsi que des mesures de luminance au sol avec le GER 3700, et d'épaisseur optique de l'atmosphère avec un CIMEL prêté par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille.

Le premier chapitre de ce document pose le problème de l'inversion d'images hyperspectrales en zone montagneuse, dans le visible et le proche infrarouge. Dans un premier temps, en s'appuyant sur les travaux de Miesch et al [12], on détermine l'ensemble des grandeurs radiatives contribuant au signal mesuré par un capteur aéroporté, afin de poser ensuite l'équation d'inversion sur laquelle est basée le code SIERRA. Les principaux codes de correction atmosphérique en sol plat sont également présentés, ainsi que le modèle d'inversion développé pour ATCOR4.

Le second chapitre est dédié à la présentation du code SIERRA développé au cours de cette thèse. Une première étude a permis d'évaluer l'importance de chaque terme intervenant dans l'équation d'inversion, ainsi que les différentes méthodes de calcul de ces grandeurs. Cette étude justifie les modèles de calcul employés dans SIERRA et décrits dans ce chapitre, pour chaque grandeur radiative intervenant dans l'équation d'inversion. Une première validation de ces modèles par comparaison avec AMARTIS est présentée, alors qu'une validation plus exhaustive est développée en annexe. Enfin, l'algorithme d'inversion de SIERRA est détaillé.

La validation de l'algorithme d'inversion, et l'étude de sensibilité réalisée sur les données exogènes, sont présentées dans le troisième chapitre. La validation de SIERRA est effectuée en plusieurs étapes. La réciprocity entre les modèles direct et inverse de SIERRA est d'abord évaluée dans le cas d'un paysage montagneux, et de conditions d'acquisition défavorables (faible visibilité atmosphérique, grands angles d'incidence et de visée). Ensuite, trois images de luminance sont simulées par le code AMARTIS [12], sur différents reliefs et pour des conditions d'acquisition variables, puis inversées avec le code SIERRA. Une étude est ensuite réalisée pour évaluer l'impact sur la réflectance restituée, d'imprécisions sur

l'orthorectification de l'image, d'incertitudes en altitude sur le MNT, et d'erreurs sur la visibilité atmosphérique et le type d'aérosols.

Enfin, dans le quatrième chapitre, les mesures effectuées au cours de la campagne de validation en sultanat d'Oman sont décrites et analysées. L'apport de SIERRA pour la correction atmosphérique et topographique des images HYMAP est ensuite évalué. Enfin, les réflectances spectrales restituées par SIERRA sont comparées avec les mesures effectuées au sol, et avec les spectres de réflectance restitués par HYCORR (outil d'inversion basé sur ATREM) et COCHISE.

ONERA



CHAPITRE 1:

POSITION DU PROBLEME ET ETAT DE

L'ART

Dans le but d'élaborer un code de correction atmosphérique d'images hyperspectrales, il est nécessaire d'analyser les différentes composantes du signal mesuré par le capteur. Dans ce chapitre, la luminance mesurée est d'abord décrite analytiquement, et les différentes grandeurs contribuant au signal sont détaillées. Ensuite, les principales méthodes de correction atmosphérique sont présentées en mettant l'accent sur les hypothèses utilisées par chaque algorithme.

1. POSITION DU PROBLEME

La luminance mesurée en entrée d'un capteur aéroporté ou satellitaire, se décompose en trois termes: la luminance issue du pixel cible et transmise directement au niveau du senseur (L_{dir}), la luminance provenant du voisinage du pixel cible et transmise par diffusion (L_{dif}), et la luminance atmosphérique L_{atm} (éclairage incident directement diffusé par l'atmosphère sans interaction avec le sol). Les composantes directes et diffuses de la luminance sont chacune divisées en cinq composantes dépendant du type d'éclairage incident (Figure 1). Les cinq composantes de l'éclairage au niveau du sol sont l'éclairage direct (E_{dir} , 1), l'éclairage diffus (E_{dif} , 2), l'éclairage de couplage terre-atmosphère (E_{coup} , 3, dû à une succession d'interactions entre l'atmosphère et le sol), et les éclairages directs ($E_{dir-ref}$, 4) et diffus ($E_{dif-ref}$, 5) qui sont réfléchis par le voisinage puis directement transmis vers la cible.

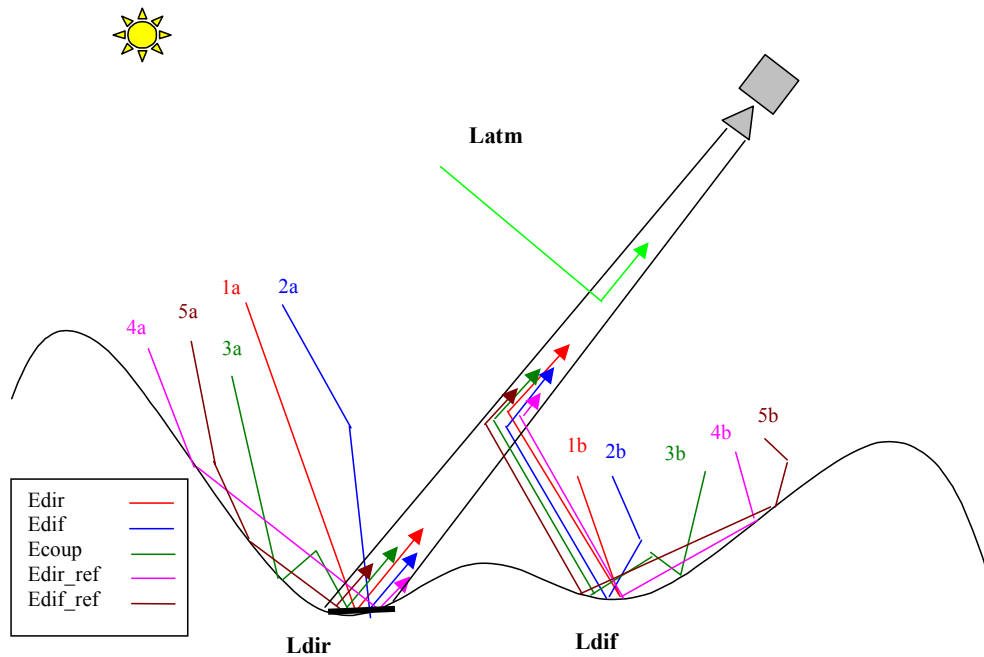


Figure 1 : décomposition du signal mesuré par un capteur aéroporté.

La luminance L_{mes} en entrée du capteur s'exprime donc :

$$L_{mes} = L_{dir} + L_{dif} + L_{atm}$$

$$\text{avec } L_{dir} = L_{dir_dir} + L_{dif_dir} + L_{coup_dir} + L_{dir-ref_dir} + L_{dif-ref_dir} \quad (1)$$

1a 2a 3a 4a 5a

$$L_{dif} = L_{dir_dif} + L_{dif_dif} + L_{coup_dif} + L_{dir-ref_dif} + L_{dif-ref_dif}$$

1b 2b 3b 4b 5b

La luminance en entrée du capteur prend une forme particulièrement complexe en zone montagneuse. Les conditions d'incidence et d'émergence variant d'un point à l'autre sur la scène, il est nécessaire de prendre en compte les effets bidirectionnels de la réflectance. D'autre part, de nouvelles composantes de l'éclairement apparaissent par rapport à un sol plat (éclairage réfléchi par le relief vers le pixel cible). Les variations d'éclairement engendrées par le relief doivent être prises en compte dans le calcul de la luminance issue de l'environnement.

L'équation présentée ci-dessous correspond à la luminance en entrée d'instrument telle qu'elle est modélisée par le code AMARTIS [12]. AMARTIS prend en compte toutes les composantes de la luminance, à l'aide de formules analytiques précises lorsque c'est possible, et de modules Monte-carlo dans le cas contraire. Il nous sert de référence pour la formulation directe sur laquelle s'appuie le code d'inversion SIERRA (Spectral reflectance Information Extraction from Radiance with Atmospheric correction). Les variations de luminance directe dans l'IFOV (champ de vue instantané du capteur) sont prises en compte, mais, afin de ne pas alourdir l'équation, l'intégrale sur l'IFOV n'est pas représentée; l'éclairement, la réflectance, et la transmission sont donc constants sur chaque pixel dans l'équation présentée.

Pour une zone avec relief, la luminance monochromatique pour un pixel P et une longueur d'onde λ s'exprime au niveau du capteur:

$$\begin{aligned}
L(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = & \left\{ \frac{\rho(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} E_{dir}(P, \vec{n}_i, \lambda) + \frac{\bar{\rho}(P, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} E_{dif}(P, \vec{n}_i, \lambda) + \frac{a_v(P, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} E_{coup}(P, \vec{n}_i, \lambda) + \right. \\
& \left. \iint_{V(P)} \frac{\rho(P, \vec{n}_{MP}, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} (E_{dir_ref}(M, P, \vec{n}_i, \lambda) + E_{dif_ref}(M, P, \vec{n}_i, \lambda)) dS_M \right\} T_{dir}^{\uparrow}(P, \vec{n}_v, \lambda) + \\
& \iint_{V(P)} E_{dir}(M, \vec{n}_i, \lambda) \frac{a_s(M, \vec{n}_i, \lambda)}{\pi} F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \iint_{V(P)} E_{dif}(M, \vec{n}_i, \lambda) \frac{s_p(M, \lambda)}{\pi} F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \\
& \iint_{V(P)} E_{coup}(M, \vec{n}_i, \lambda) \frac{s_p(M, \lambda)}{\pi} F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \iint_{V(P)} E_{dir_ref}(M, P, \vec{n}_i, \lambda) \frac{a_s(M, \vec{n}_{PM}, \lambda)}{\pi} F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \\
& \iint_{V(P)} E_{dif_ref}(M, P, \vec{n}_i, \lambda) \frac{a_s(M, \vec{n}_{PM}, \lambda)}{\pi} F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \\
& L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)
\end{aligned} \tag{1}$$

avec pour facteurs de réflectance, la réflectance bidirectionnelle du pixel P, $\rho(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)$, obtenue dans la direction d'incidence \vec{n}_i et de visée \vec{n}_v , la réflectance bidirectionnelle de P moyennée sur les directions de diffusion comprises dans l'angle solide de vue du ciel, $\bar{\rho}(P, \vec{n}_v, \lambda)$, la réflectance hémisphérique-directionnelle, $a_v(P, \vec{n}_v, \lambda)$, la réflectance directionnelle hémisphérique $a_s(P, \vec{n}_i, \lambda)$, et l'albédo sphérique de P, $s_p(P, \lambda)$. T_{dir}^{\uparrow} est la transmission directe montante, F_{envt} , la fonction d'environnement pour la diffusion montante et L_{atm} , la luminance atmosphérique. Le point M, d'élément de surface dS_M (un pixel), décrit le voisinage du pixel P.

La luminance mesurée par un imageur hyperspectral est obtenue par intégration sur chaque bande spectrale, des luminances monochromatiques L pondérées par la sensibilité spectrale de l'instrument S_{spec} :

$$L_{mes}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = \frac{\int L(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) S_{spec}(\lambda) d\lambda}{\int S_{spec}(\lambda) d\lambda} \tag{3}$$

Pour l'inversion, la résolution de l'équation (2) nécessite au préalable le calcul des cinq types d'éclairement et de la fonction d'environnement intervenant dans l'estimation de luminance diffuse. En zone montagneuse, il n'existe pas de formules analytiques permettant de décrire les phénomènes d'interaction terre-atmosphère et de diffusion montante. Dans le code AMARTIS ils sont estimés par des modules Monte-Carlo. La fonction d'environnement F_{envt} n'est pas normée et prend en compte la diffusion atmosphérique.

Par contre il est possible de calculer précisément les quatre autres types d'éclairement, qui s'expriment en monochromatique de la manière suivante:

$$E_{dir}(P, \vec{n}_i, \lambda) = E_{TOA}(\lambda) \Theta(P) \langle \vec{N}(P), \vec{n}_i \rangle T_{dir}^\downarrow(P, \vec{n}_i, \lambda) \quad (4)$$

$$E_{dif}(P, \vec{n}_i, \lambda) = \iint_{\Omega_{ciel}(P)} L_d(z_P, \theta, \varphi, \lambda) \cos \theta d\omega + \iint_{\Omega_{ciel}} L_d(z_P, \theta, \varphi, \lambda) K(P, \theta, \varphi) \cos \theta d\omega \quad (5)$$

avec comme angle solide élémentaire $d\omega = \sin \theta d\theta d\varphi$

$$E_{dir-ref}(M, P, \vec{n}_i, \lambda) = E_{dir}(M, \vec{n}_i, \lambda) \frac{\rho(M, \vec{n}_i, \vec{n}_{MP}, \lambda)}{\pi} V_{MP} \frac{\langle \vec{N}(M), \vec{n}_{MP} \rangle \langle \vec{N}(P), \vec{n}_{PM} \rangle}{r_{MP}^2} T_{dir}(M, P, \lambda) \quad (2)$$

$$E_{dif-ref}(M, P, \vec{n}_i, \lambda) = E_{dif}(M, \vec{n}_i, \lambda) \frac{a_v(M, \vec{n}_{MP}, \lambda)}{\pi} V_{MP} \frac{\langle \vec{N}(M), \vec{n}_{MP} \rangle \langle \vec{N}(P), \vec{n}_{PM} \rangle}{r_{MP}^2} T_{dir}(M, P, \lambda) \quad (3)$$

Avec E_{TOA} , l'éclairement solaire en haut de l'atmosphère, Θ , un coefficient binaire pour tenir compte de l'ombre (Θ vaut 0 en zone d'ombre et 1 ailleurs). La luminance atmosphérique directionnelle incidente en P, L_d , est définie à l'altitude z_p , dans la direction (θ, φ) définie par rapport à la normale du pixel P. K est un coefficient de correction qui permet d'estimer la quantité de rayonnement diffusé par l'atmosphère située entre le pixel et le relief environnant, mais non comprise dans l'angle de vue du ciel Ω_{ciel} . $T_{dir}(M, P)$ est la transmission entre les points M et P et V_{MP} un coefficient binaire de visibilité, qui vaut 1 si les pixels M et P se voient, et 0 sinon.

Pour extraire une carte de réflectances d'une image de luminances acquise par un imageur aéroporté, il faut estimer la réflectance en chaque pixel à partir de l'équation (2). Les principaux codes d'inversion existants sont présentés dans le paragraphe suivant. Leurs caractéristiques et leurs limitations y sont détaillées.

2. PRINCIPALES METHODES D'INVERSION

L'imagerie hyperspectrale est en plein essor depuis une vingtaine d'années et de nombreux codes de correction atmosphérique ont été développés. Cette correction est généralement effectuée en deux étapes. Une première étape consiste à caractériser l'atmosphère, et plus particulièrement à estimer le contenu intégré en vapeur d'eau qui est la cause principale de l'absorption atmosphérique dans le domaine réflectif. Dans certains cas, le type d'aérosols et la visibilité sont également déterminés. Les paramètres atmosphériques estimés sont ensuite pris en compte pour calculer la réflectance du sol.

L'estimation du contenu intégré en vapeur d'eau repose sur l'utilisation de bandes spectrales situées dans et hors des bandes d'absorption de celle-ci [23].

L'inversion est généralement réalisée en considérant la réflectance comme lambertienne. Dans le cas d'un sol plat, cette approximation se justifie car l'angle d'incidence solaire est constant sur l'ensemble de la surface considérée, et l'angle d'émergence varie peu sur l'image (la plupart des codes fonctionnent sur des images de petite taille). Les conditions de survol sont choisies, si possible, assez proches du midi solaire, et les angles d'observations sont proches du nadir. Par contre, en zone montagneuse, les effets de BRDF peuvent avoir une influence importante en raison des variations de pentes.

Les codes de correction atmosphérique les plus utilisés sont présentés dans ce chapitre.

2.1. Codes d'inversion fonctionnant en sol plat

2.1.1. Hypothèse d'un sol homogène pour le calcul des effets d'environnement

2.1.1.1. ACORN

ACORN est un logiciel d'inversion d'images hyperspectrales basé sur des LUT pré-calculées (Look Up Tables) générées par Modtran4 [2]. Ce code permet de résoudre l'équation de transfert radiatif pour un sol plat lambertien [14], en considérant le sol homogène pour le calcul des effets d'environnement. Les éclairagements directs et diffus sont calculés à l'aide de Modtran4 et considérés constants sur l'ensemble de l'image. L'éclairagement de couplage est obtenu sous la forme d'une somme géométrique d'interactions terre-atmosphère faisant intervenir la réflectance de la cible et l'albédo atmosphérique. La résolution de l'équation est effectuée pixel par pixel. La réflectance lambertienne $s_p(P, \lambda)$ est extraite de l'équation suivante:

$$L_{mes}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = s_p(P, \lambda) T_{tot}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) \frac{E_{tot}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda)}{\pi} + L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)$$

$$avec \quad E_{tot}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) = \frac{(E_{dir}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) + E_{dif}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda))}{1 - S_{atm}(z_p, \lambda) s_p(P, \lambda)} \quad (8)$$

Avec T_{tot}^{\uparrow} , la somme des transmissions directe et diffuse montantes, E_{dir}^{pla} et E_{dif}^{pla} , les éclairagements direct et diffus, et S_{atm} , l'albédo atmosphérique.

Au préalable, le contenu intégré en vapeur d'eau est estimé pour chaque pixel en utilisant au choix l'une des bandes d'absorption de la vapeur d'eau centrées sur 820 nm, 940 nm ou 1140 nm. Une carte du contenu intégré en vapeur d'eau peut ainsi être obtenue en sortie. ACORN peut, dans certains cas, donner une estimation de la visibilité et du type d'aérosol présent au moment de l'acquisition, à partir des mesures effectuées sur des surfaces très sombres (végétation dense, surface d'eau) ou de réflectance connue.

2.1.1.2. ATREM

ATmospheric REMoval est un code qui fut développé dans la fin des années 80, principalement pour inverser des images AVIRIS [6]. Les hypothèses sont les mêmes que pour le code ACORN et l'équation à inverser est donc de la même forme que l'équation (8).

Les différents paramètres atmosphériques sont obtenus par le code de transfert radiatif 6S [28]. Le contenu intégré en vapeur d'eau est estimé à partir des bandes d'absorption à 940 nm et 1140 nm, puis pris en compte dans l'inversion. Cette estimation est effectuée à l'aide de LUT pré-calculées. ATREM ne permet pas de caractériser le type d'aérosols et la visibilité atmosphérique.

Les images HyMap [3] en réflectances délivrées par HyVista (concepteur de l'instrument) sont corrigées par ATREM, accompagné du code de lissage spectral EFFORT [25], appliqué aux spectres de réflectance, et qui lisse en partie le bruit instrumental et le bruit introduit par l'inversion.

2.1.1.3. HATCH

Le code High-Accuracy aTmospheric Correction for Hyperspectral data [6] [17] est une évolution du code ATREM. Il est basé sur la même équation d'inversion que les codes ACORN et ATREM. HATCH permet de déterminer le contenu intégré en vapeur d'eau pour chaque pixel de l'image, mais aussi un contenu moyen en dioxyde de carbone et en méthane. Ces estimations sont effectuées après inversion de l'image, avec la méthode "smoothness test" [17]. Les spectres de réflectance obtenus avec un contenu en gaz initial, sont décomposés en séries de Fourier. Les variations haute fréquence sont enlevées en tronquant ces séries de Fourier, puis le spectre de réflectance est retranscrit à partir des séries tronquées (le spectre est donc lissé). Le spectre de réflectance ainsi calculé est comparé au spectre . Plusieurs contenus sont testés, la valeur optimale est obtenue lorsque l'écart RMS entre le spectre tronqué, et le spectre estimé avec le contenu en gaz initial, est le plus faible. Cette méthode est basée sur le principe qu'une mauvaise estimation du gaz absorbant engendre des irrégularités sur la réflectance calculée. Les calculs sont effectués avec divers contenus afin de réduire ces inégalités. Les calculs d'absorption gazeuse utilisent une méthode en k-corrélés avec la base de données HITRAN 96.

2.1.2. Prise en compte d'un environnement hétérogène pour le calcul des effets d'environnement

2.1.2.1. FLAASH

FLAASH est un code d'inversion développé par l'AFRL et Spectral Science Inc, dont l'objectif initial est de traiter les images AVIRIS et HYDICE acquises sur des zones planes et lambertiennes [1] [11]. Il est considéré comme un code de référence en inversion hyperspectrale. Il s'appuie sur le code Modtran4 pour les calculs de transfert radiatif.

Contrairement aux codes précédemment cités, FLAASH tient compte de la réflectance de l'environnement pour le calcul de la luminance diffuse montante et le calcul de l'éclairement de couplage Terre-atmosphère. L'équation d'inversion est donc de la forme :

$$L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda) = s_p(P, \lambda)T_{dir}^\uparrow(P, \bar{n}_v, \lambda)E_{tot}^{pla}(P, \bar{n}_i, \lambda) + s_p^e(P, \lambda)T_{dif}^\uparrow(P, \bar{n}_v, \lambda)E_{tot}^{pla}(P, \bar{n}_i, \lambda) + L_{atm}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda)$$

avec $E_{tot}^{pla}(P, \bar{n}_i, \lambda) = \frac{(E_{dir}^{pla}(P, \bar{n}_i, \lambda) + E_{dif}^{pla}(P, \bar{n}_i, \lambda))}{1 - S_{atm}(z_p, \lambda)s_p^e(P, \lambda)}$ (4)

avec s_p la réflectance du pixel cible P et s_p^e la réflectance de l'environnement de P.

Les éclairements directs et diffus sont obtenus pour un sol horizontal et sont donc considérés constants sur l'ensemble de l'image. L'éclairement de couplage est obtenu sous la forme d'une somme géométrique faisant intervenir la réflectance de l'environnement, calculée à partir des réflectances de chaque pixel de la scène.

Dans un premier temps, une estimation de la contribution de l'environnement à la luminance de chaque pixel est obtenue par convolution entre l'image de luminance et une fonction d'environnement (fonction exponentielle décroissante avec la distance). On en déduit une valeur de la réflectance de l'environnement s_p^e pour chaque pixel. C'est cette valeur qui sera utilisée pour le calcul de l'éclairement de couplage et la luminance diffuse montante (FLAASH considère que les fonctions d'environnement intervenant dans l'éclairement de couplage et dans la luminance diffuse montante sont identiques).

La valeur de la réflectance de l'environnement étant calculée lors d'une première étape, il est ensuite possible de résoudre l'équation d'inversion puis d'estimer la réflectance lambertienne de la cible.

FLAASH donne également une estimation de la visibilité et du type d'aérosol en utilisant des pixels dont la réflectance est connue ou très faible. L'altitude de la scène mesurée peut être estimée à partir de la bande d'absorption de l'oxygène, à condition que les mesures soient obtenues avec une résolution spectrale suffisante (de l'ordre de 10 nm).

2.1.2.2. COCHISE

COCHISE est un code de correction atmosphérique développé par l'ONERA/DOTA basé sur le code de transfert radiatif Modtran4 [13] [16]. COCHISE permet d'inverser des images hyperspectrales dans le domaine réflectif sur des zones plates hétérogènes et lambertiennes. Le contenu intégré en vapeur d'eau est d'abord estimé avec la méthode LIRR [23], qui est appliquée sur la bande d'absorption de vapeur d'eau à 940 nm, puis la réflectance de surface est calculée en considérant connus le type d'aérosols et la visibilité atmosphérique.

Contrairement à FLAASH, ce code considère deux fonctions d'environnement différentes pour le calcul de l'éclairement de couplage (Figure 2, (1)) et de la luminance diffuse montante (Figure 2, (2)). Ces fonctions sont estimées à l'aide de modélisations Monte-Carlo. Les photons sont lancés depuis le pixel cible pour l'estimation de l'éclairement de couplage (Figure 3, (1)), et depuis le senseur vers le sol pour la luminance diffuse montante (Figure 3, (2)). Elles sont calculées une seule fois pour l'ensemble de la scène, ce qui est raisonnable puisque COCHISE ne s'applique que sur des images de petite dimension, où l'angle d'observation varie peu. Ces fonctions qui dépendent des conditions atmosphériques et de l'angle de visée, sont normalisées sur le voisinage de la cible.

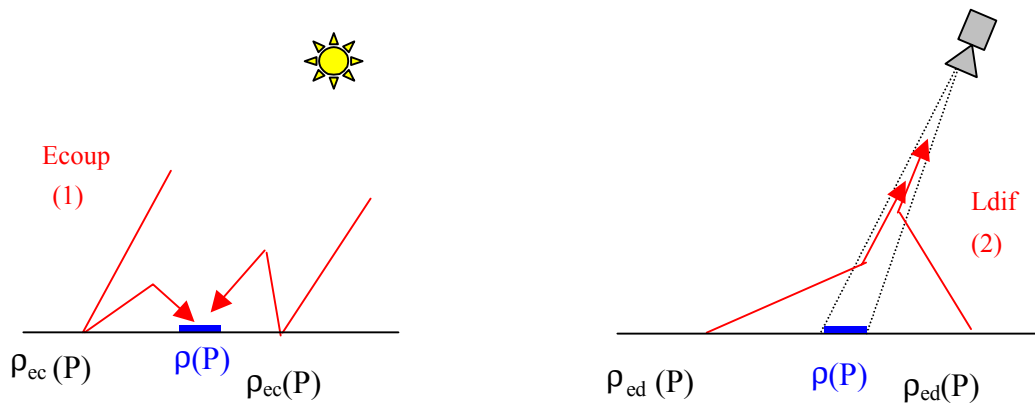


Figure 2: contribution de l'environnement pour l'éclairement de couplage (à gauche) et la luminance diffuse (à droite)

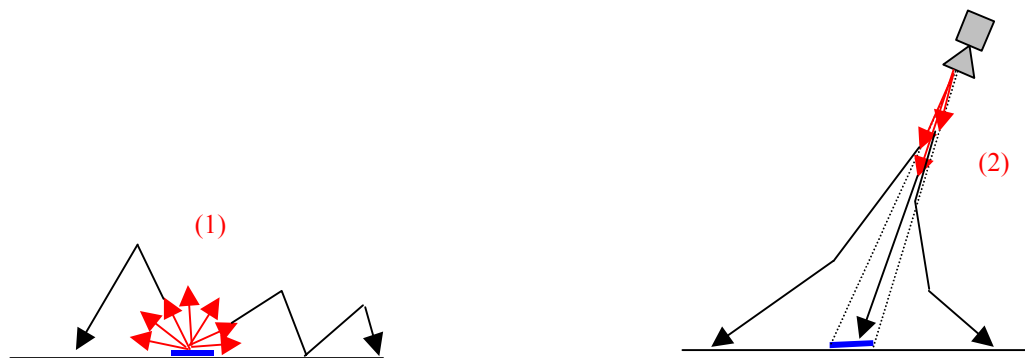


Figure 3: lancé de photons pour le calcul des fonctions d'environnement associées à l'éclairement de couplage (à gauche) et à la luminance diffuse montante (à droite).

L'équation au niveau du senseur s'exprime donc:

$$L_{mes}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = s_p(P, \lambda) T_{dir}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) E_{tot}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) + s_p^{ed}(P, \lambda) T_{dif}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) E_{tot}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) + L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)$$

avec $E_{tot}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) = \frac{(E_{dir}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) + E_{dif}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda))}{1 - S_{atm}(z_p, \lambda) s_p^{ec}(P, \lambda)}$ (5)

avec s_p^{ec} la réflectance de l'environnement contribuant à l'éclairage de couplage, et s_p^{ed} celle contribuant à la luminance diffuse montante.

Cette équation est résolue par étapes successives. Dans un premier temps, les effets d'environnement sont négligés afin d'obtenir une première carte de réflectances. Cette première étape consiste à résoudre l'équation (8). Les réflectances de l'environnement s_p^{ec} (couplage) et s_p^{ed} (diffusion) sont ensuite calculées par intégration avec leurs fonctions d'environnement respectives sur l'ensemble du voisinage, ce qui permet de déterminer la réflectance lambertienne de la cible. Cette étape est itérée pour optimiser les résultats.

Un exemple d'inversion sur une zone montagneuse permet d'évaluer l'impact du relief sur la réflectance retrouvée. Une image de luminance est simulée par AMARTIS à partir du paysage présenté Figure 4, puis inversée par COCHISE.

Le capteur est positionné en visée nadir à 100 km d'altitude, au dessus d'un relief formé par deux collines orientées nord-sud (l'altitude au sommet est de 230 m), et séparées par du sol plat (Figure 4). Le relief, défini sur un profil de 400 pixels, est composé d'herbe verte pour la moitié gauche et de sol nu pour l'autre moitié. Les réflectances du sol sont modélisées suivant la formulation de Rahman, dont les paramètres ont été ajustés sur des mesures effectuées à l'ONERA. L'atmosphère correspond à un climat tempéré été, et les aérosols sont de type rural, pour une visibilité de 15 km. Le soleil éclaire la scène du sud-ouest, avec une incidence de 35°. Cette simulation est réalisée pour trois longueurs d'onde: 450 nm, 850 nm, et 1600 nm.

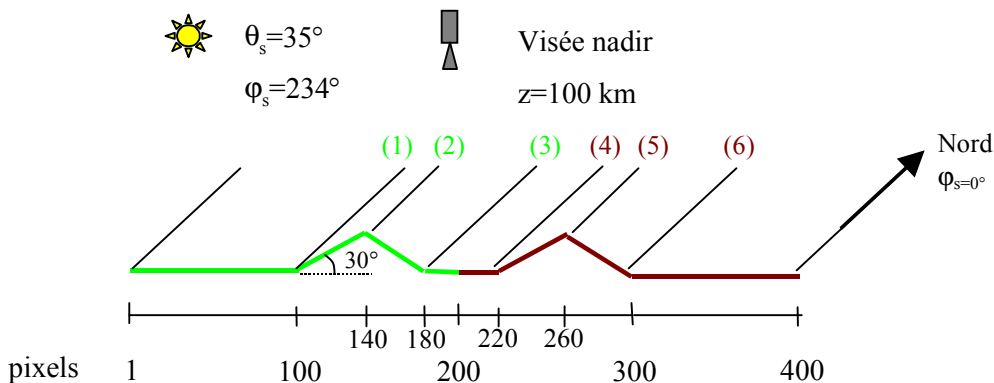


Figure 4: Paysage montagneux simulé

Pour le calcul de la luminance diffuse montante, COCHISE utilise une réflectance moyenne en dehors de l'image alors qu'AMARTIS considère une scène périodique. D'autre part, ces deux codes étant basés sur des codes de transfert radiatif différents (6S et MODTRAN4), la luminance atmosphérique calculée dans COCHISE est biaisée par rapport à celle d'AMARTIS. Ces différences de traitement engendrent des erreurs d'estimation de réflectance, notamment dans le visible et le proche infrarouge (Figure 5).

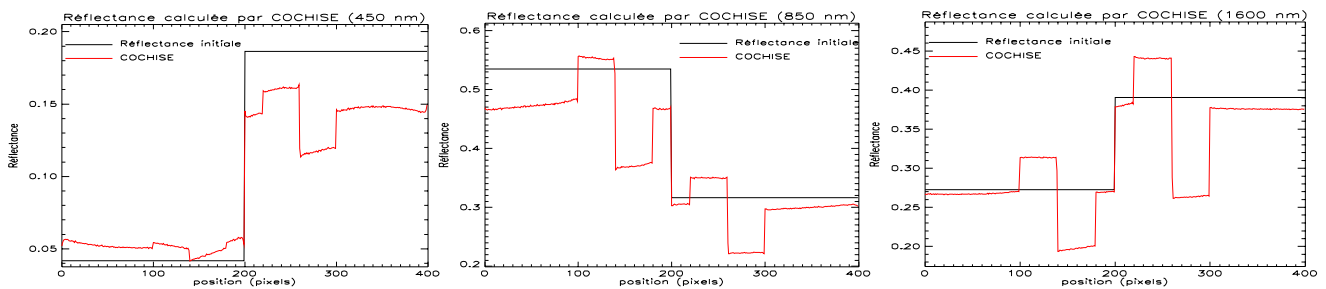


Figure 5: Comparaison entre la réflectance utilisée pour simuler l'image et la réflectance retrouvée par inversion avec COCHISE

Pour estimer l'impact du relief sur le calcul de la réflectance, en s'affranchissant de ces erreurs, on observe donc plus particulièrement les variations de réflectances dues à un changement de pente: entre les pixels 99 et 100 (1), 139 et 140 (2), 179 et 180 (3) pour l'herbe verte, et pour le sol nu, on compare les pixels 219 et 220 (4), 259 et 260 (5), et 299 et 300 (6). Ces variations sont chiffrées dans le Tableau 1 en fonction de la longueur d'onde.

Ecart entre pixels voisins	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
450 nm	+9 %	-15 %	+ 8 %	+11 %	-27 %	+22 %
850 nm	+16 %	-31 %	+24 %	+15 %	-32 %	+34 %
1600 nm	+16 %	-35 %	+34 %	+16 %	-35 %	+43 %

Tableau 1: Variations de la réflectance retrouvée par COCHISE, en fonction de la position sur le relief et de la longueur d'onde.

Ce tableau montre l'importance d'une prise en compte du relief pour l'inversion. L'hypothèse d'un sol plat engendre des variations de réflectance pouvant atteindre 43 % dans le cas étudié. Ces variations augmentent avec la longueur d'onde, car les contributions des luminances diffuses et atmosphériques montantes, peu dépendantes de la pente locale, diminuent avec la longueur d'onde. Ces variations sont également dépendantes de la réflectance du sol, qui influe sur la contribution relative de la luminance directe sur la luminance totale.

2.2. Présentation du code ATCOR4 corrigeant de l'influence du relief

Le code ATCOR4, développé par le DLR, fonctionne avec un module permettant notamment de générer des luts (programme ATLUT), d'étalonner radiométriquement les mesures (PARGE), ou d'effectuer une classification simple sur l'image de réflectances (SPECL) [20].

Le programme ATLUT permet tout d'abord de générer des LUT à l'aide de Modtran4 pour différentes atmosphères, différentes conditions de prise de vue, et dans tout le domaine réflectif. Le programme RESLUT permet ensuite de calculer les paramètres atmosphériques correspondants aux conditions de prise de vue de l'image, en intégrant ces valeurs sur les bandes spectrales de l'instrument hyperspectral ou multispectral utilisé (transmissions directes et diffuses, éclairage direct, diffus et total en sol plat, albédo atmosphérique et luminance atmosphérique).

Le code ATCOR4 fonctionne avec en entrée, un modèle numérique de terrain et une image de luminances ortho-rectifiée. L'équation d'inversion est ensuite résolue par étapes en considérant la réflectance comme lambertienne [19].

L'influence du relief est prise en compte dans le calcul de l'éclairage incident. Le calcul de l'éclairage est dérivé du modèle de Sandmeier [22] qui décompose l'éclairage en trois termes. L'éclairage direct est calculé suivant la formule (4). L'éclairage diffus est obtenu en partant d'une formule approchée développée par Hay [8] [9] qui sépare en deux composantes l'éclairage diffus obtenu en sol plat E_{diff}^{pla} : une anisotrope et une isotrope. La composante anisotrope est corrigée de la pente locale de manière analogue à l'éclairage direct. La composante isotrope est modulée par le coefficient de vue du ciel V_{ciel} calculé suivant la méthode définie par Dozier [4] (V_{ciel} est un angle solide normalisé). Cette formulation montre ses limites lorsque l'incidence solaire sur la pente devient trop importante (environ 25% d'erreur sur une pente de 30° éclairée en incidence rasante, paragraphe 2.1 du chapitre 2) ou lorsque le relief est très marqué (Jusqu'à 50% d'erreur à 450 nm, voir paragraphe 2.1 du chapitre 2). La troisième composante de l'éclairage est inexistante en sol plat, et provient de réflexions de l'éclairage incident sur le relief environnant du pixel cible. Cette grandeur est également calculée de manière approchée: l'éclairage total obtenu en sol plat E_{tot}^{pla} est multiplié par un coefficient de vue du terrain V_{ter} (V_{ter} est tel que $V_{ciel} + V_{ter} = 1$) et une réflectance de l'environnement s_p^{er} . L'éclairage de couplage n'est pas pris en compte, sauf dans le calcul de E_{tot}^{pla} en sol plat pour une réflectance fixée s_p^r . L'éclairage total s'écrit donc:

$$\begin{aligned}
 E_{tot}(P, \vec{n}_i, \lambda) = & E_{TOA}(\lambda) \Theta(P) \langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle T_{dir}^\downarrow(P, \vec{n}_i, \lambda) + \\
 & E_{diff}^{pla}(P, \vec{n}_i, \lambda) \left[\Theta(P) T_{dir}^\downarrow(P, \vec{n}_i, \lambda) \langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle / \cos \theta_s + \left\{ 1 - \Theta(P) T_{dir}^\downarrow(P, \vec{n}_i, \lambda) \right\} V_{ciel}(P) \right] + \quad (6) \\
 & E_{tot}^{pla}(P, \vec{n}_i, s_p^r, \lambda) s_p^{er}(P, \lambda) V_{ter}(P)
 \end{aligned}$$

La première étape de l'inversion consiste à résoudre l'équation par itérations successives, en considérant la réflectance lambertienne, et l'environnement homogène à la cible pour la luminance diffuse montante. Cette première étape revient donc à résoudre l'équation (8) avec un éclairage total incident

corrigé de l'influence du relief selon l'équation (11). Les itérations successives permettent d'optimiser le calcul de la réflectance de l'environnement intervenant dans l'éclairement réfléchi par le voisinage, et ainsi d'en déduire la réflectance de la cible:

$$s_{P(1)}^k(P, \lambda) = \pi \frac{L_{mes}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) - L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)}{T_{tot}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) E_{tot}^k(P, \vec{n}_i, \lambda)} \quad (12)$$

Avec E_{tot}^k l'éclairement total obtenu suivant l'équation (11), à l'étape k pour une réflectance d'environnement $s_p^{er,k}$ calculée par filtrage passe-bas (exponentielle décroissante qui dépend uniquement de la distance entre le pixel cible et les pixels voisins) sur un rayon de 0,5 km.

La deuxième étape consiste à extraire la réflectance de l'environnement de la réflectance obtenue en sortie de la première étape (les variations d'éclairement dues au relief ne sont pas prises en compte). La réflectance de l'environnement pixel intervenant dans la formule de la luminance diffuse, s_p^{ed} , est calculée par filtrage passe-bas (identique au précédent) sur un rayon de 1 à 2 km (ce rayon dépend du type d'aérosols et de la visibilité, mais la manière dont on le détermine n'est pas explicitée dans les articles décrivant ATCOR4). La réflectance en sortie de la deuxième étape est obtenue après correction de la réflectance liée à la diffusion (ceci revient à résoudre l'équation (9) pour un éclairement total prenant en compte le relief).

$$s_{P(2)}(P, \lambda) = s_{P(1)}(P, \lambda) + \frac{T_{dif}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda)}{T_{dir}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda)} (s_{P(1)}(P, \lambda) - s_p^{ed}(P, \lambda)) \quad (13)$$

La troisième étape permet de corriger la réflectance de l'influence de l'albédo atmosphérique, intervenant dans le calcul de E_{tot}^{pla} pour une réflectance fixe s_p^r . Cette correction fait intervenir la différence $s_p^{ed} - s_p^r$:

$$s_{P(3)}(P, \lambda) = s_{P(2)}(P, \lambda) [1 - (s_p^{ed}(P, \lambda) - s_p^r) S_{atm}(z_P, \lambda)] \quad (14)$$

Après résolution de l'équation, le code ATCOR4 permet d'effectuer une correction simple des effets bidirectionnels de la réflectance, pour des grands angles d'incidence ou d'émergence (supérieurs à 60°). Le modèle de BRDF utilisé est apparenté à celui défini par Minnaert [15]. Une correction plus précise peut être effectuée à la suite d'une classification réalisée avec le module SPECL (par comparaison avec des spectres de LANDSAT) [20]. L'estimation du contenu en vapeur d'eau est en phase d'élaboration.

3. CONCLUSION

La plupart des codes de correction atmosphérique considèrent un sol plat et horizontal, et ne sont donc pas adaptés pour inverser des images de luminance acquises en zone montagneuse.

Le code ATCOR4 représente une évolution notable puisque le relief est pris en compte dans l'estimation de l'éclairement incident. Cependant des améliorations peuvent être apportées en calculant de manière plus précise l'éclairement diffus. L'influence de l'environnement dans la luminance diffuse montante peut également être prise en compte de manière plus précise, en faisant notamment intervenir les variations d'éclairement sur le voisinage du pixel, et en utilisant une fonction d'environnement dépendante des conditions atmosphériques et de prise de vue. Enfin, dans ATCOR4, une correction des effets bidirectionnels de la réflectance est appliquée en sortie de la dernière étape, sur la réflectance du pixel cible, ce qui signifie que les variations directionnelles de la réflectance ne sont donc pas prises en compte dans le calcul de la luminance diffuse montante.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de chaque code de correction atmosphérique décrit dans ce paragraphe. $s_p(P)$ est utilisé pour la réflectance du pixel cible P , $s_p^c(P)$ pour la réflectance de son environnement (identique dans ce cas pour l'éclairement de couplage et la luminance diffuse), $s_p^{ec}(P)$ la réflectance de l'environnement utilisée pour l'éclairement de couplage et $s_p^{ed}(P)$ celle utilisée pour la luminance diffuse. L'abréviation MC correspond à Monte-Carlo.

L'objectif de cette thèse est d'étendre le code COCHISE à la prise en compte du relief de la scène et des effets bidirectionnels de la réflectance. Pour réaliser ce code, on s'appuie sur le code de transfert radiatif AMARTIS, qui permet de simuler le signal mesuré par un capteur aéroporté, au-dessus d'une zone montagneuse, pour une longueur d'onde donnée. Un modèle direct a d'abord été développé, chaque étape de calcul étant validée par comparaison avec AMARTIS, ceci permettant d'évaluer l'impact des différentes hypothèses sur le signal mesuré par le capteur. La méthode inverse a ensuite été développée, puis validée en inversant des images de luminance simulées par AMARTIS. En ce qui concerne ATCOR4, aucun résultat n'est publié sur une validation par modélisation. Enfin, la méthode est testée sur des images HYMAP, acquises au cours d'une campagne de mesures effectuée sur le paysage montagneux de Maqad en Oman. Parallèlement à ce survol, des mesures au sol ont également été réalisées afin d'obtenir une vérité terrain.

CODES	ACORN	HATCH	ATREM	FLAASH	COCHISE	ATCOR4
Type de caractérisation atmosphérique	Vapeur d'eau Aérosols Visibilité	Vapeur d'eau Dioxyde de carbone Méthane	Vapeur d'eau	Vapeur d'eau Aérosols Visibilité Altitude (O_2)	Vapeur d'eau	Vapeur d'eau
Sol considéré	Plat, homogène*	Plat, homogène*	Plat, homogène*	Plat, hétérogène*	Plat, hétérogène*	Relief, hétérogène*
Fonction d'environnement	Non	Non	Non	Exponentielle décroissante (E_{coup} et L_{dif})	MC depuis sol (E_{coup}) MC depuis capteur (L_{dif})	Passe-bas 0.5km (E_{ref}) Passe-bas 2km (L_{dif})

* pour le calcul des termes d'environnement

Tableau 2: récapitulatif des codes d'estimation de la réflectance de surface incluant des corrections atmosphériques.

CHAPITRE 2:

DESCRIPTION DE LA METHODE D'INVERSION DU CODE SIERRA

Ce chapitre est consacré au développement du code de correction atmosphérique et topographique, dénommé SIERRA (Spectral reflectance Information Extraction from Radiance with Relief and Atmospheric correction). Dans la première partie de ce chapitre, l'équation d'inversion, sur laquelle est basée le code SIERRA, est posée. L'impact des différents termes intervenant dans l'équation sur la réflectance retrouvée est ensuite estimé, afin d'identifier les grandeurs qui nécessitent un calcul précis. Les méthodes de calcul des différents types d'éclairements incidents et de luminances montantes sont ensuite détaillées, et une première validation de ces modèles est présentée. Enfin, l'algorithme d'inversion est présenté de manière schématique, puis décrit étape par étape.

1. EQUATION D'INVERSION ET METHODE DE RESOLUTION

L'algorithme d'inversion du code SIERRA a été développé pour résoudre une équation analytique dérivée du modèle d'AMARTIS (décrit par l'équation 2). Pour extraire la réflectance de cette équation, des hypothèses simplificatrices sont nécessaires, compte tenu de la méconnaissance des propriétés optiques de l'environnement. Celles-ci sont faites au niveau de la surface, sur les termes d'éclairement, et au niveau du capteur, sur les termes de luminance incidents au senseur. Les onze termes de luminance dans l'équation 2, sont ainsi regroupés en cinq termes, d'après le tableau 3, dans l'équation de luminance considérée dans le code SIERRA (équation 15).

$$\begin{aligned}
 L(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = & \\
 & \left. \frac{\rho(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} E_{dir}(P, \vec{n}_i, \lambda) T_{dir}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) + \right\} L_{dir}^{dir} \\
 & \left. \left\{ \frac{a_v(P, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} [E_{dif}(P, \vec{n}_i, \lambda) + E_{coup}(P, \vec{n}_i, \lambda) + E_{ref}(P, \vec{n}_i, \lambda)] \right\} T_{dir}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) + \right\} L_{dir}^{dif-ref-coup} \\
 & \left. \iint_{V(P)} E_{dir}(M, \vec{n}_i, \lambda) \frac{a_s(M, \vec{n}_i, \lambda)}{\pi} F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \right\} L_{dif}^{dir} \\
 & \left. \iint_{V(P)} \frac{S_p(M, \lambda)}{\pi} [E_{dif}(M, \vec{n}_i, \lambda) + E_{coup}(M, \vec{n}_i, \lambda) + E_{ref}(M, \vec{n}_i, \lambda)] F_{envt}(M, \lambda) dS_M + \right\} L_{dif}^{dif-ref-coup} \\
 & L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Avec L_{dir}^{dir} , la luminance directe-directe, $L_{dir}^{dif-ref-coup}$, la luminance issue des éclairagements diffus, réfléchis et de couplage, puis transmise directement, L_{dif}^{dir} , la luminance directe-diffuse, $L_{dif}^{dif-ref-coup}$, la luminance issue des éclairagements diffus, réfléchis et de couplage, puis diffusée jusqu'au capteur, et L_{atm} , la luminance atmosphérique.

On cherche à extraire de l'équation 15 la réflectance spectrale du pixel cible, qui apparaît sous différentes formes: la réflectance bidirectionnelle ρ , la réflectance hémisphérique-directionnelle a_v , la réflectance directionnelle-hémisphérique a_s , et la réflectance hémisphérique-directionnelle s_p . Si l'on fait l'hypothèse d'une surface lambertienne, alors on a:

$$s_p(P, \lambda) = \rho(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = a_v(P, \vec{n}_v, \lambda) = a_s(P, \vec{n}_i, \lambda) \tag{16}$$

Sinon, un modèle de BRDF est alors introduit, afin de relier ces quatre termes de réflectance. Quelle que soit la méthode de résolution, c'est l'albédo sphérique de la cible, s_p , qui est obtenu en sortie de SIERRA.

Flux incident	Flux émergent	Type de réflectance	Notation pour la luminance montante
Eclairement direct	Luminance directe	$\rho(\vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)$	L_{dir}^{dir}
Eclairement diffus	Luminance directe	$a_v(\vec{n}_v, \lambda)$	} $L_{dir}^{dif-ref-coup}$
Eclairement de couplage	Luminance directe	$a_v(\vec{n}_v, \lambda)$	
Eclairement réfléchi	Luminance directe	$a_v(\vec{n}_v, \lambda)$	
Eclairement direct	Luminance diffuse	$a_s(\vec{n}_i, \lambda)$	L_{dif}^{dir}
Eclairement diffus	Luminance diffuse	$s_p(\lambda)$	} $L_{dif}^{dif-ref-coup}$
Eclairement de couplage	Luminance diffuse	$s_p(\lambda)$	
Eclairement réfléchi	Luminance diffuse	$s_p(\lambda)$	

Tableau 3: Facteur de réflectance utilisé en fonction du trajet suivi par le rayonnement

L'impact des hypothèses sur le regroupement des termes de luminance, est évalué sur trois scènes simulées dans des conditions d'incidence solaire variables et pour trois longueurs d'onde. Les scénarios de validation ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans l'annexe 1 (paragraphe 1.3). Les luminances en entrée capteur calculées par AMARTIS sont comparées avec celles calculées suivant le modèle adopté dans SIERRA, basé sur les hypothèses décrites précédemment.

2. IMPACT DES DIFFERENTS TERMES DE L'EQUATION D'INVERSION SUR LA REFLECTANCE CALCULEE

Dans ce paragraphe, on évalue pour chaque terme de l'équation d'inversion, l'impact d'une erreur d'estimation de ces termes sur la réflectance estimée. L'objectif est notamment de déterminer les grandeurs prédominantes dans l'inversion, et d'évaluer la précision des méthodes existantes pour les estimer.

Des images acquises au-dessus d'un paysage montagneux sont modélisées avec le code AMARTIS [12]. Elles sont ensuite inversées en faisant l'hypothèse d'un sol lambertien suivant la formule:

$$s_p(P, \lambda) = \frac{L_{mes}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) - L_{dif}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) - L_{atm}(P, \vec{n}_v, \lambda)}{E_{tot}(P, \vec{n}_i, \lambda) T_{dir}^{\wedge}(P, \vec{n}_v, \lambda)} \quad (17)$$

Cette étude analyse séparément l'impact d'une incertitude sur la luminance diffuse, la luminance atmosphérique, et les quatre composantes de l'éclairement incident, pour trois longueurs d'onde, 450 nm, 850 nm, et 1600 nm. L'inversion est réalisée dans un premier temps en incluant un biais sur le terme étudié, ce qui permet d'évaluer sa contribution dans l'inversion, en fonction de la position sur le relief et de la longueur d'onde. L'inversion est ensuite effectuée en modélisant ce terme suivant les formules développées dans les codes d'inversion existants. Les autres termes de l'équation 17 sont calculés par AMARTIS.

Dans ce paragraphe, l'impact des effets bidirectionnels de la réflectance sur l'inversion est également évalué. Dans ce cas, les images sont simulées à partir de réflectances modélisées par la formulation de Rahman [18] (les paramètres sont déduits de mesures effectuées à l'ONERA), et inversées avec l'hypothèse d'une surface lambertienne.

Trois scènes de luminance sont modélisées par AMARTIS, qui permet de simuler une image en entrée d'un capteur aéroporté ou satellitaire, et donc non géoréférencée. La taille et la position des pixels sont donc définies par l'intersection entre le relief et l'angle solide de vue du pixel, celui-ci variant avec l'angle de visée. L'inversion avec prise en compte du relief n'étant réalisable que sur des images géoréférencées, où les pixels sont de tailles identiques et positionnés régulièrement dans un repère UTM (Universal Transverse Mercator), toutes les images sont simulées en entrée d'un capteur situé à 100 km d'altitude, en visée nadir (FOV=2,30°), ceci afin de limiter les erreurs sur le positionnement des pixels. Sur chaque scène, le sol est recouvert d'herbe verte et de sable. Pour un angle d'incidence de 40°, les variations de réflectance en fonction de l'angle de visée, sont représentées dans le plan principal Figure 6, pour les deux types de sol, et pour les trois longueurs d'onde considérées. Ne disposant pas de mesures de réflectance pour des angles de visée supérieurs à 60°, la réflectance bidirectionnelle est supposée égale à celle obtenue pour un angle d'émergence de 60°.

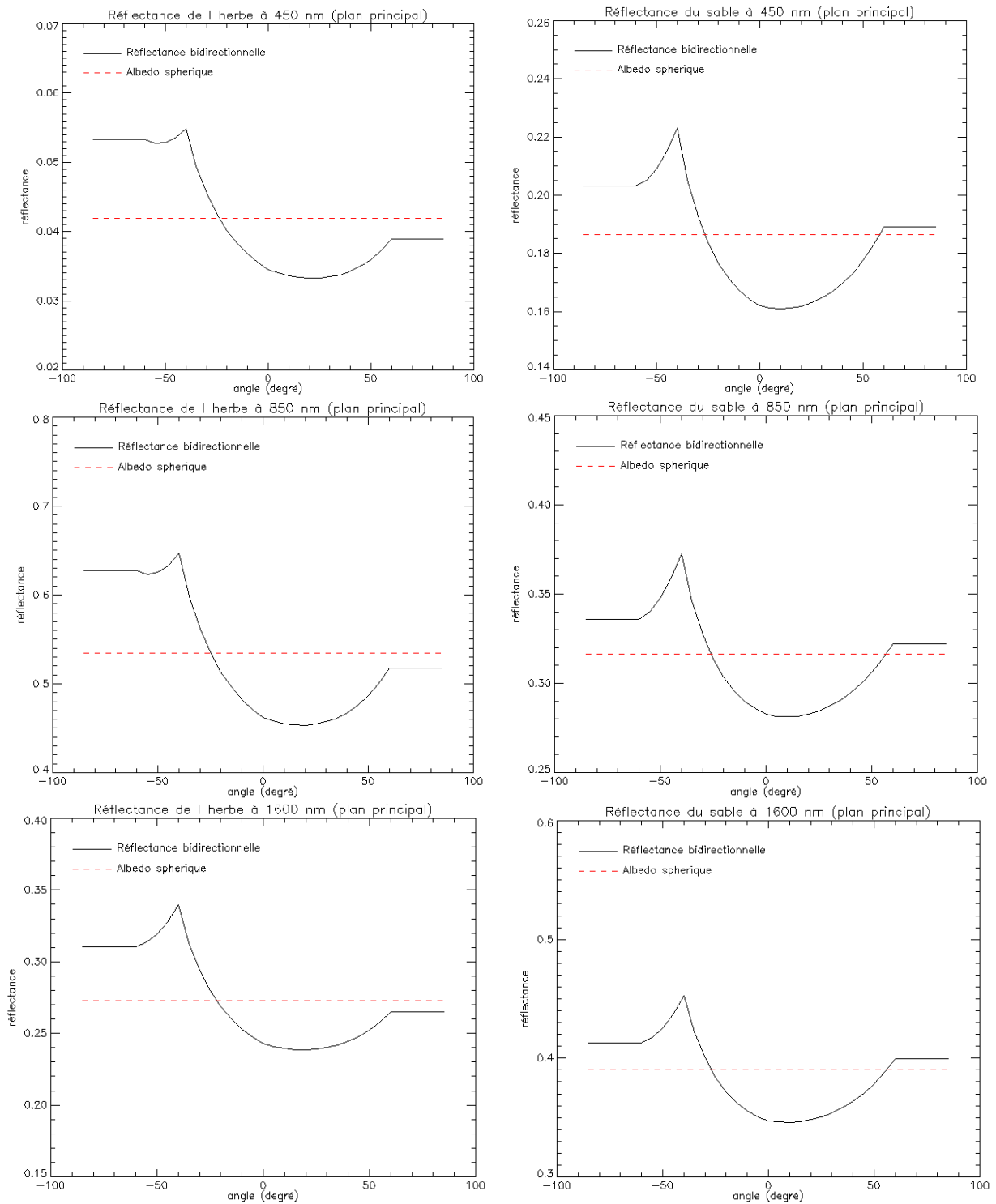


Figure 6: Variations directionnelles de la réflectance de l'herbe (à gauche), et du sable (à droite) dans le plan principal.

Premier scénario:

Le relief de la première scène, dont l'altitude varie entre 0 m et 230 m, est présenté Figure 7. Quatre cents pixels de 10 m de côté composent le profil de ce relief, la première moitié étant recouverte d'herbe verte et la seconde de sol nu. Le relief est invariant sur la troisième dimension, orientée dans la direction sud-nord. Le rayonnement solaire provient du sud-ouest ($\varphi_s=234^\circ$) avec un angle zénithal θ_s de 35° . Le modèle atmosphérique choisi est de type tempéré été avec des aérosols ruraux et une visibilité de 15 km.

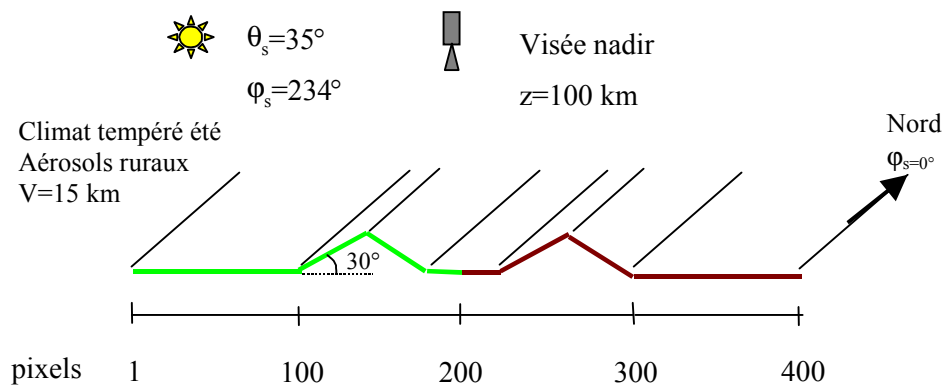


Figure 7: Première scène simulée

Second scénario:

Le relief est identique à celui du premier scénario. L'éclairement provient de l'est ($\varphi_s=90^\circ$) avec une incidence θ_s de 55° . L'atmosphère est de type tropical été, avec une charge en aérosols maritimes correspondant à une visibilité de 9 km (Figure 8). Dans cette simulation, où l'incidence solaire est forte et l'atmosphère plus opaque que dans le cas précédent, l'importance des trajets diffus descendants et montants par rapport aux trajets directs est accentuée.

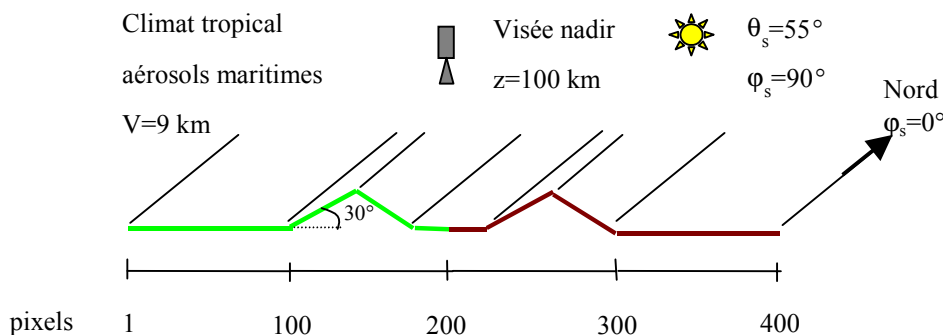


Figure 8: Seconde scène simulée

Troisième scénario:

Toujours sur un profil de 4 km composé d'herbe et de sol nu, le troisième scénario simule l'inversion d'une scène acquise au-dessus de deux montagnes culminant à 1000m, et dont les pentes sont de 45°. L'éclairage provient du nord-est ($\varphi_s=50^\circ$) avec une incidence de 10°. L'atmosphère est de type tempéré été, avec des aérosols ruraux dont l'abondance est définie par une visibilité de 15 km (Figure 9).

Ce relief important va augmenter la quantité d'éclairage réfléchi par le voisinage par rapport aux cas précédents, et la configuration d'incidence solaire a notamment été choisie pour que le capteur vise dans une configuration proche du Hot-Spot.

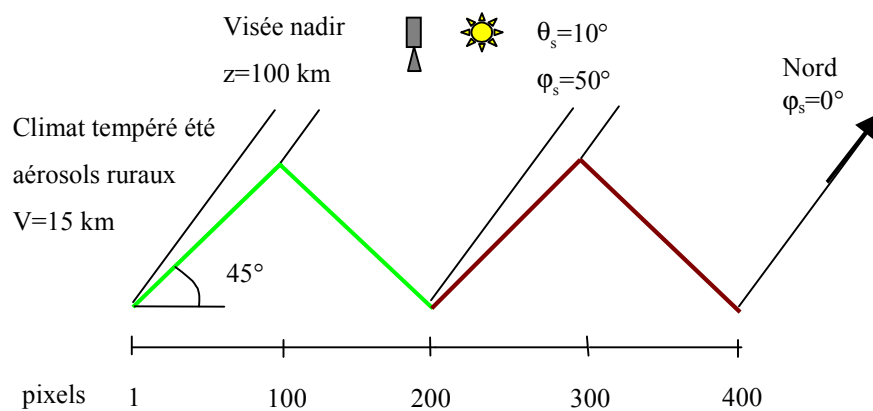


Figure 9: Troisième scène simulée

Pour chaque terme et chaque modèle étudié, les résultats sont présentés sous la forme d'erreurs relatives entre la réflectance restituée et la réflectance initiale. Ces calculs d'erreur sont effectués pour sept pixels de la scène (nommés pixels 1 à 7) dans les deux premiers scénarios, et huit pixels (nommés pixels 1 à 8) pour le troisième scénario.

2.1. Impact d'une erreur sur l'éclairement

On étudie successivement l'impact d'une erreur sur l'éclairement diffus, l'éclairement de couplage, et sur l'éclairement réfléchi. L'éclairement direct étant calculé de façon exacte en zone montagneuse, il ne sera donc pas considéré dans cette étude.

Eclairement diffus:

Pour les trois scénarios décrits précédemment, la luminance en entrée capteur est simulée par AMARTIS. La réflectance de surface est ensuite estimée suivant l'équation 17. Les différentes grandeurs intervenant dans cette formule sont calculées par AMARTIS, excepté l'éclairement diffus, que l'on calcule de trois façons différentes:

- *1^{er} cas*: on ajoute un biais de -20% sur l'éclairement diffus calculé par AMARTIS.
- *2^{ème} cas*: l'éclairement diffus est calculé avec l'hypothèse d'un sol horizontal situé à l'altitude du pixel considéré.
- *3^{ème} cas*: l'éclairement diffus est calculé suivant la formulation utilisée dans ATCOR4.

1^{er} cas:

Si l'on sous-estime l'éclairement diffus, la réflectance que l'on obtient par inversion est surestimée. L'impact de cette erreur est d'autant plus important que la proportion d'éclairement diffus dans l'éclairement total est grande.

Pour chaque scénario, les erreurs les plus conséquentes sont observées sur les pentes éclairées en incidence rasante (pixels 3 et 6 pour la scène 1, 2 et 5 pour la scène 2, et 1,2,5, et 6 pour la troisième scène), où la contribution de l'éclairement direct diminue et celle de l'éclairement diffus augmente.

Pour l'inversion, l'éclairement diffus joue un rôle plus important aux courtes longueurs d'onde. Par exemple, dans le premier scénario, l'erreur sur la réflectance atteint 10% à 450 nm (Figure 10, a), alors qu'elle est au maximum de 4% à 850 nm (Figure 10, b) et 2% à 1600 nm (Figure 10, c).

Pour la deuxième scène simulée, en raison de la forte incidence solaire et de l'atmosphère turbide, l'éclairement diffus est une composante de premier ordre sur l'ensemble du spectre pour les pixels situés sur une face en incidence rasante. Des erreurs de réflectance supérieures à 13% y sont observées à 850 nm et 1600 nm (Figure 11, b et c). Sur ces mêmes pentes, à 450 nm , un biais de 20% sur l'éclairement diffus engendre une erreur de 19% sur la réflectance (Figure 11, a).

Dans le troisième cas, l'impact de l'éclairement diffus est plus faible que précédemment, car l'incidence solaire est quasiment verticale et l'atmosphère est claire. Les erreurs les plus importantes sont observées sur le bas des pentes (Figure 12). Cela est dû notamment au fait que la part de l'éclairement direct dans l'éclairement total est moindre car la transmission directe descendante est plus faible qu'à 1 km d'altitude. L'éclairement diffus diminue également puisque l'angle de vue du ciel réduit, mais de manière moins importante que l'éclairement direct.

2^{ème} cas:

En considérant un sol plat à l'altitude du pixel considéré, des variations importantes sur la réflectance estimée sont observées entre les pentes éclairées de face où l'éclairement direct est dominant, et les pentes en incidence rasante où le diffus domine. La réflectance est ainsi surestimée sur les pentes exposées au soleil et sous-estimée sur les pentes en incidence rasante. D'autre part, sur la portion de sol plat comprise entre les deux montagnes, la présence de relief environnant réduit l'angle solide de vue du ciel et donc l'éclairement diffus, qui est donc surestimé si on considère la scène plate. En conséquence, la réflectance est aussi sous-estimée.

Le premier scénario, où la configuration d'acquisition est la plus favorable, suffit à démontrer l'importance d'une prise en compte du relief pour l'estimation de l'éclairement diffus. A 450 nm (Figure 10, a), pour le pixel 2, une erreur de +5% est faite sur la réflectance, alors qu'elle est de l'ordre de -13% sur le pixel 3. On voit donc très nettement l'influence du relief sur la réflectance. D'autre part, l'erreur sur la réflectance dépend de la longueur d'onde, puisque sur le pixel 3, elle est d'environ -7% à 850 nm (Figure 10, b) et de -3% à 1600 nm (Figure 10, c). Sur les pentes en incidence rasante, ce modèle crée donc une forte déviation spectrale sur la réflectance.

Pour la seconde scène simulée (Figure 11), l'erreur sur la réflectance varie peu avec la longueur d'onde, car l'éclairement diffus reste une composante principale de l'éclairement sur l'ensemble du spectre. Le relief a par contre un impact beaucoup plus grand sur la réflectance puisque l'erreur sur l'inversion varie entre -32% pour les versants en incidence rasante et +10% environ pour les versants exposés au soleil.

Dans le dernier cas, à 450 nm, en raison du relief important qui coupe le rayonnement diffus, l'éclairement diffus est fortement surestimé à basse altitude, et la réflectance de surface est en conséquence fortement sous-estimée: à 450 nm, l'erreur relative sur la réflectance est de -19% sur le pixel 1 (Figure 12, a). L'angle de vue du ciel augmente avec l'altitude, et le relief environnant a donc moins d'impact sur l'éclairement diffus, et sur la réflectance inversée (l'erreur sur la réflectance est de 0,2% sur le pixel 2, à 450 nm). L'incidence étant proche du zénith, les variations de réflectance observées lorsque l'on change de versant sont toujours présentes, mais plus faibles que dans les cas précédents: à 450 nm, on passe d'une erreur d'estimation de 0,2% sur le pixel 2, à 5% sur le pixel 3. Par contre, on observe à l'instar du premier scénario, une forte déviation spectrale sur la réflectance inversée, l'éclairement direct étant la composante dominante de l'éclairement.

3^{ème} cas:

L'éclairement diffus est calculé suivant le modèle utilisé dans ATCOR4. Ce modèle prend en compte l'angle d'incidence sur la pente via une composante anisotrope, ainsi que le relief environnant par l'intermédiaire d'un coefficient de vue du ciel appliqué sur la composante isotrope de l'éclairement. Les erreurs sur l'estimation de la réflectance sont nettement plus faibles que dans le cas précédent.

Pour la première scène (Figure 10), elles sont de l'ordre de +/- 2%, sauf pour les pixels 3 et 6 (situés sur les faces les moins éclairées) où l'erreur à 450 nm atteint 6 à 7%.

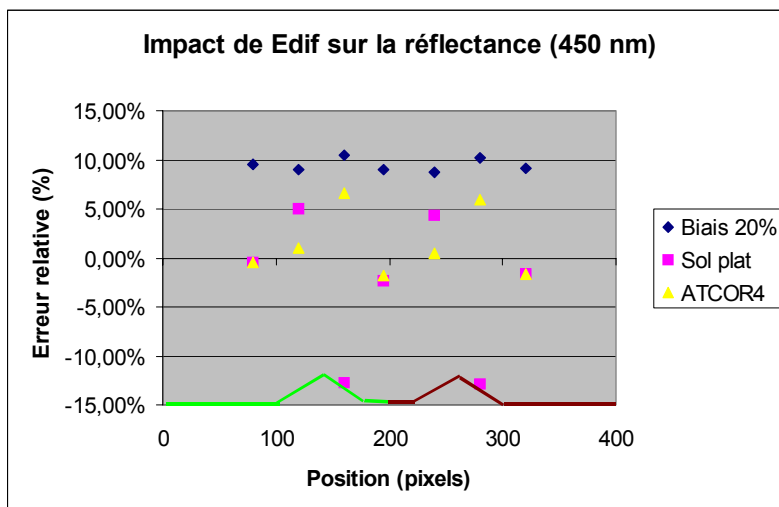
Dans le second scénario, l'erreur sur l'inversion est plus conséquente. Dans ce cas, la réflectance est estimée avec un écart maximal de 10% en incidence rasante à 450 nm (Figure 11, a). Dans le proche infrarouge (Figure 11, b et c), cette erreur ne dépasse pas 5%. L'erreur sur la réflectance varie fortement en fonction de la position des pixels sur le relief. Sur le pixel 4, situé en sol plat, l'erreur à 450 nm est de -4% alors que sur le pixel 5, positionné sur le versant le moins exposé au soleil, elle est d'environ +10%. L'impact du relief dépend également de la longueur d'onde. Dans le proche infrarouge, la variation de réflectance due

au relief est plus marquée entre les deux versants de la montagne. La déviation spectrale devient importante dans ce scénario, puisqu'en incidence rasante, la réflectance est nettement surestimée à 450 nm (+10%) puis sous-estimée à 850 nm (-3,5%), puis quasiment identique à la réflectance initiale à 1600 nm (-0,5%). On remarque également qu'à 450 nm, l'erreur maximale sur la réflectance est située sur un versant en incidence rasante, et dans le proche infrarouge sur un versant exposé au soleil.

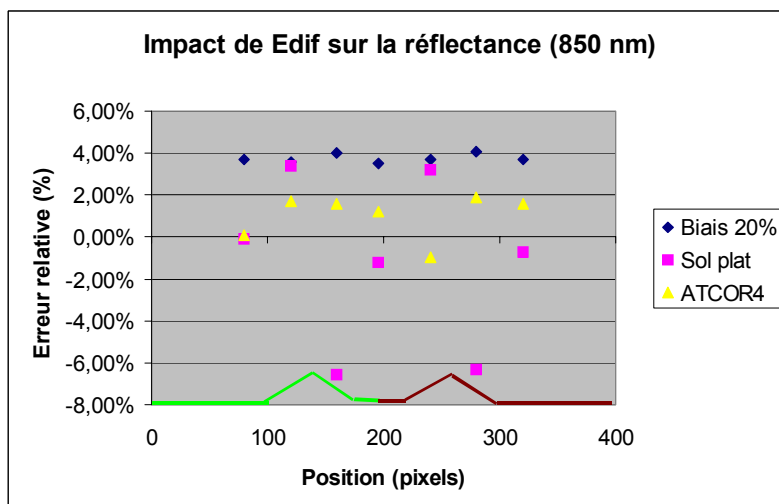
Enfin, sur la dernière scène, l'éclairement diffus calculé suivant le modèle d'ATCOR4 ne varie pas avec le relief de la même manière que dans AMARTIS (Figure 12). A basse altitude, l'éclairement diffus est surestimé, ce qui engendre un biais sur la réflectance supérieur à -7% à 450 nm (pixel 8). L'impact sur la réflectance dans le proche infrarouge est très faible (<-1%). Par contre, pour les pixels proches de sommets, l'éclairement diffus est nettement sous-estimé, et l'erreur maximale sur la réflectance est de 15% à 450 nm, 6% à 850 nm et 3% à 1600 nm. Ces erreurs sont notamment dues au fait que le modèle d'ATCOR4 ne prend pas en compte les variations de luminances directionnelles en dehors de la direction d'incidence, et que la portion d'atmosphère située entre le relief et l'angle de vue du ciel est négligée.

Synthèse:

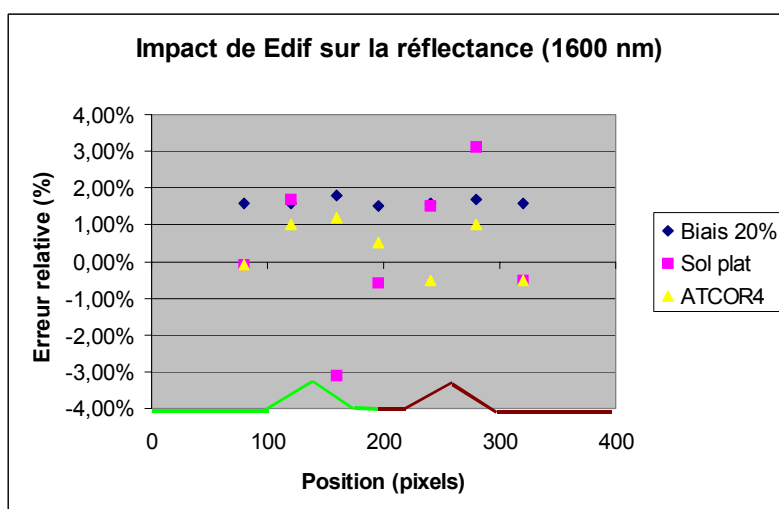
L'éclairement diffus est une composante dominante dans l'éclairement incident à 450 nm pour une atmosphère claire (visibilité atmosphérique de 15 km), et aux trois longueurs d'onde étudiées (450 nm, 850 nm, et 1600 nm) lorsque l'atmosphère est turbide. Sa contribution dans l'éclairement incident est d'autant plus élevée que l'angle d'incidence des rayons solaires sur la pente est grand. L'éclairement diffus étant anisotrope, la quantité d'éclairement diffus atteignant le sol dépend de l'angle d'incidence du rayonnement sur la pente. Ainsi, lorsque l'on considère un sol horizontal, on sous-estime l'éclairement diffus sur les pentes exposées au soleil, et on le surestime sur les pentes non exposées, ce qui engendre des variations non négligeables sur la réflectance restituée: dans le scénario 3, l'erreur relative sur la réflectance varie entre -22% et +5% à 450 nm, suivant la pente considérée. Dans le second scénario, les erreurs maximales sur la réflectance dues à l'approximation d'un sol horizontal dépassent 30% aux trois longueurs d'onde. Le modèle d'ATCOR4 prend en compte l'anisotropie du rayonnement diffus, et permet donc de modéliser les variations d'éclairement diffus en fonction de l'angle d'incidence sur la pente. Dans le premier scénario, l'erreur sur la réflectance varie entre -2% et 7% à 450 nm, alors qu'elle varie entre -13% et 5% en supposant le sol horizontal. Dans le second scénario, l'erreur relative sur la réflectance obtenue en utilisant le modèle d'ATCOR4 pour l'éclairement diffus atteint 10% à 450 nm et 5% à 850 nm et 1600 nm. Dans le troisième scénario, elle varie entre -7% et +15% à 450 nm.



a)

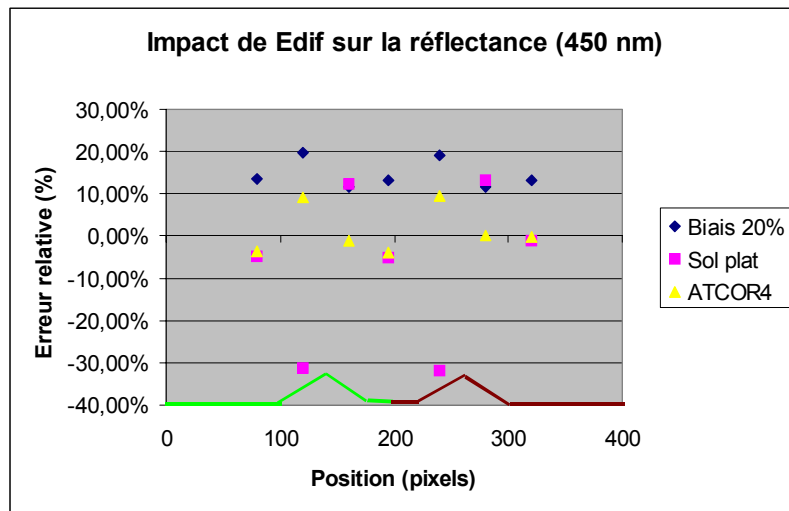


b)

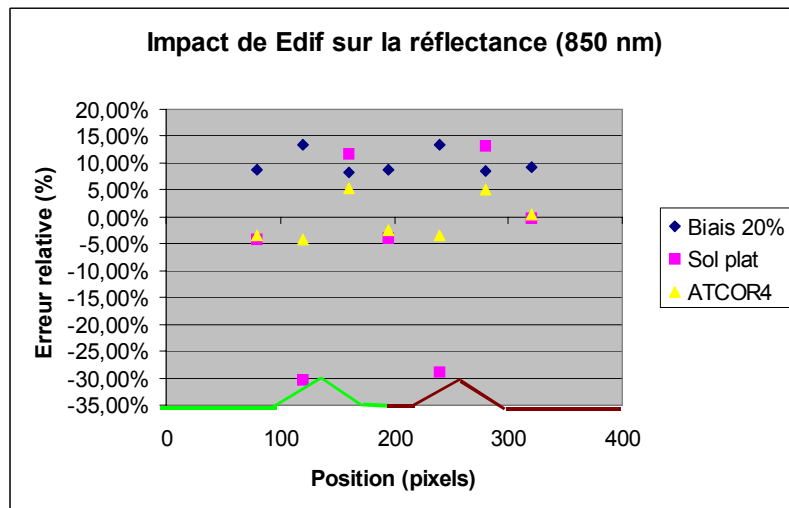


c)

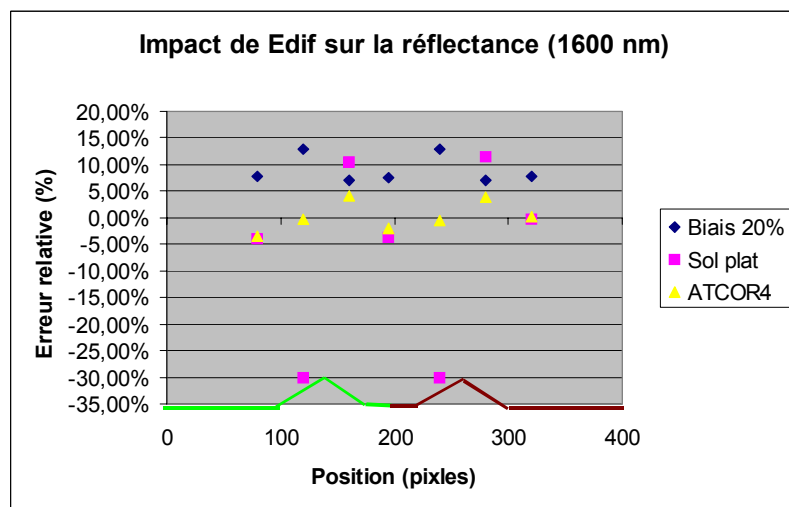
Figure 10: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage diffus, scène 1.



a)

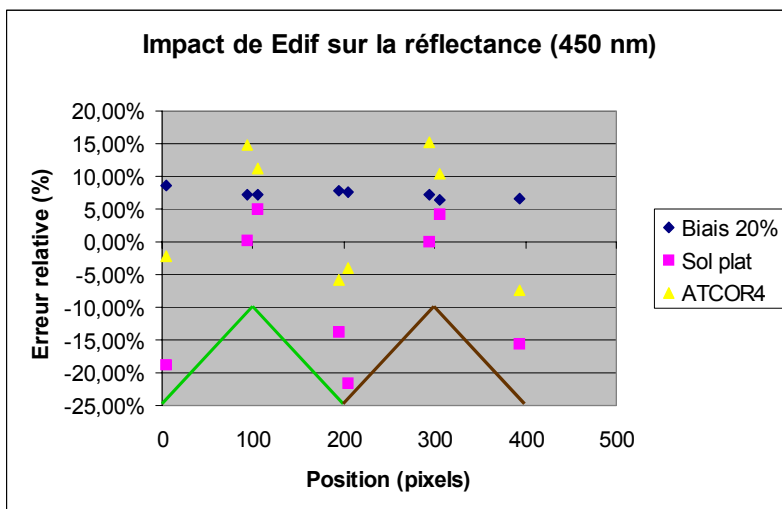


b)

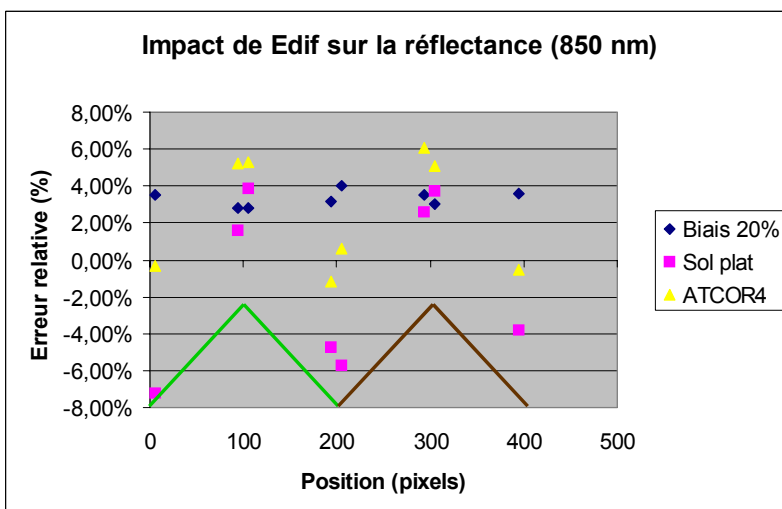


c)

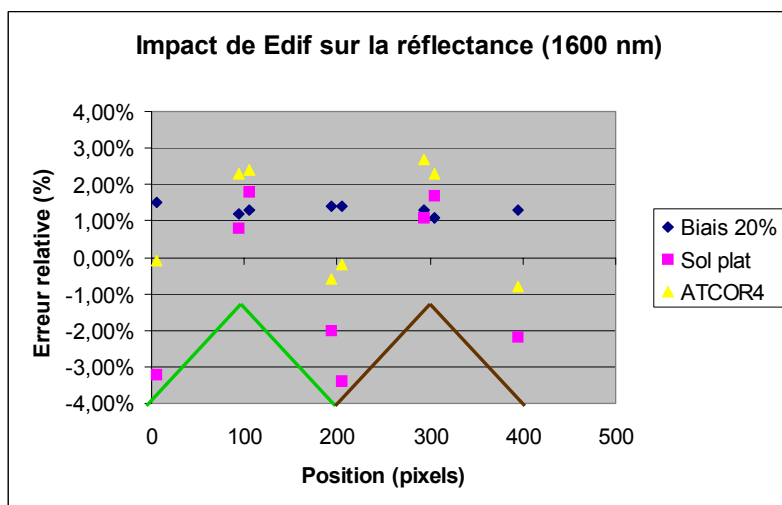
Figure 11: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage diffus, scène 2.



a)



b)



c)

Figure 12: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage diffus, scène 3

Eclairement de couplage:

Dans ce paragraphe, les trois images de luminance modélisées par AMARTIS à partir des scénarios présentés dans l'introduction du paragraphe 2, sont inversées suivant l'équation 17. Excepté l'éclairement de couplage, tous les termes de l'équation sont calculés par AMARTIS. L'éclairement de couplage est calculé de trois manières différentes:

- *1^{er} cas*: un biais de – 30% est appliqué sur l'éclairement de couplage calculé par AMARTIS.
- *2^{ème} cas*: il est obtenu suivant la méthode utilisée pour un sol plat (équation 18), en considérant une suite géométrique dont la raison est le produit entre la réflectance de l'environnement s_p^e et l'albédo atmosphérique S_{atm} , mais en prenant l'éclairement incident sur le pixel cible E_{tot} , avec prise en compte du relief.

$$E_{couplage}(P, \lambda) = E_{tot}(P, \lambda) \frac{s_p^e(\lambda) S_{atm}(\lambda)}{1 - s_p^e(\lambda) S_{atm}(\lambda)} \quad (18)$$

- *3^{ème} cas*: l'éclairement de couplage est négligé, ce qui est l'approche choisie dans le code ATCOR4.

1^{er} cas:

L'éclairement de couplage terre-atmosphère dépend du relief, de la réflectance du sol, de l'albédo atmosphérique, et de l'éclairement sur la scène. Pour prendre en compte le voisinage en dehors de l'image, la scène est périodisée.

L'inversion effectuée avec un biais de 30% sur l'éclairement de couplage engendre de faibles erreurs sur la réflectance retrouvée. A 450 nm, où les éclairagements directs et diffus sont prédominants, l'erreur maximale sur la réflectance est de 3% tous scénarios confondus (Figure 13a, Figure 14a, Figure 15a). Dans le premier scénario, cette erreur est inférieure à 2% dans le proche infrarouge (Figure 13b et c). Elle est quasiment nulle à 1600 nm où l'albédo atmosphérique est très faible. Dans la seconde scène simulée, la forte incidence solaire et l'atmosphère turbide engendrent de faibles éclairagements directs et diffus, et un fort albédo atmosphérique, ce qui induit que l'éclairement de couplage contribue plus à l'éclairement total que dans le premier scénario, notamment dans le proche infrarouge où le sol réfléchit davantage (Figure 14). A 850 nm et 1600 nm, les erreurs sur la réflectance sont supérieures à 5%. Dans le dernier scénario, le biais de 30% engendre une erreur maximale d'environ 4%, à 850 nm. Dans ce cas, l'éclairement direct reste la composante principale de l'éclairement quelle que soit la longueur d'onde, en raison de la faible incidence solaire ($\theta_s=10^\circ$).

L'éclairement de couplage est un terme de second ordre dans chacune des scènes étudiées. Les plus grandes erreurs sur l'inversion apparaissent sur les versants en incidence rasante où les éclairagements directs et diffus sont plus faibles, et l'éclairement de couplage plus important.

2^{ème} cas:

L'étape suivante consiste à inverser images de luminance simulées en calculant l'éclairement de couplage suivant le modèle utilisé pour un sol plat. Ce terme est calculé suivant l'équation 18, avec l'éclairement incident sur le pixel, une réflectance de l'environnement estimée avec la fonction d'environnement de 6S, et l'albédo atmosphérique obtenu pour l'altitude minimale de la scène.

Les erreurs maximales sur l'inversion sont situées sur les versants les moins éclairés, où la réflectance est la plus grande (le versant composé de sable à 450 nm et 1600 nm, et celui composé d'herbe à 850 nm). La contribution de l'éclairement de couplage à l'éclairement total y est plus importante, de même que son impact sur la réflectance inversée.

Dans le premier scénario (Figure 13), ces erreurs restent basses quelle que soit la longueur d'onde, car l'éclairement de couplage est faible par rapport à l'éclairement total.

Dans le second scénario (Figure 14), les erreurs sont plus importantes et dépendent de la longueur d'onde, notamment sur les flancs de montagne en incidence rasante, pour lesquels l'éclairement direct contribue peu à l'éclairement incident. Pour le pixel 2, l'erreur de calcul de la réflectance est de 6% à 450 nm (Figure 14a), 11% à 850 nm (Figure 14b), et 12% à 1600 nm (Figure 14c). Par contre, sur le pixel 5, cette erreur est de 1% à 450 nm, de 15% à 850 nm et 9% à 1600 nm. Dans ce cas, l'approximation d'un sol plat pour le calcul de l'éclairement de couplage, crée un biais important sur la réflectance, surtout dans le proche-infrarouge où la contribution de l'éclairement diffus diminue.

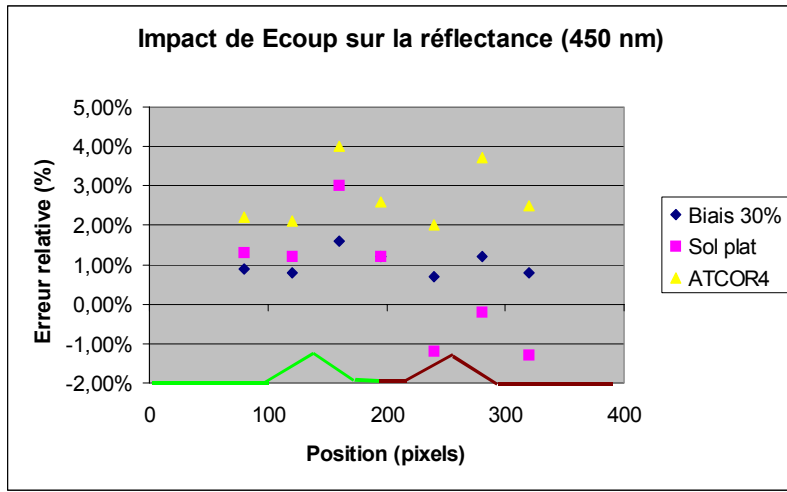
Dans le dernier cas (Figure 15), les erreurs ne dépassent pas 3%, sauf à 850 nm sur les pixels 3 et 6, où la réflectance est sous-estimée respectivement de 5% et 4%.

3^{ème} cas:

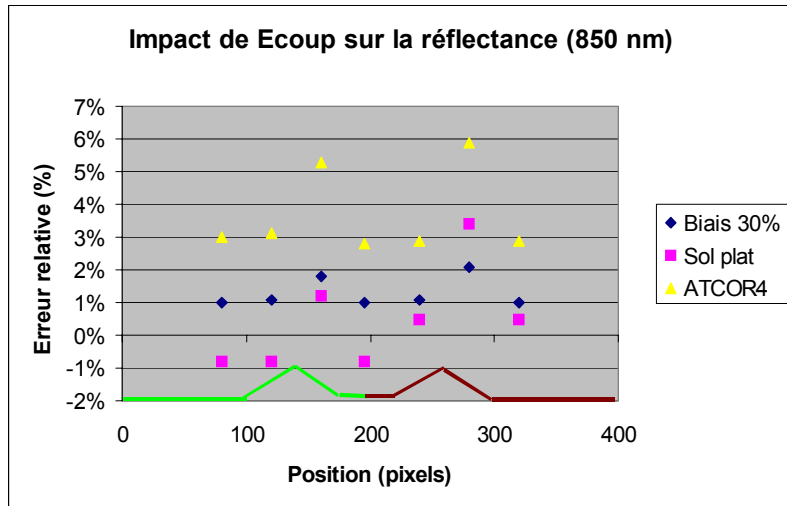
L'estimation de la réflectance est réalisée en omettant l'éclairement de couplage. Ce dernier étant plus élevé sur les flancs de montagne, et sa contribution plus importante sur les pixels où l'incidence solaire est rasante, l'impact de ce modèle sur la réflectance y sera plus marqué. Pour le premier et le dernier scénario (respectivement Figure 13 et Figure 15), même si l'écart à la réflectance initiale peut être supérieur à 5% (à 850 nm), les variations de réflectance d'un pixel à l'autre sont inférieures à 2%, quelle que soit la longueur d'onde. L'impact du relief est donc assez faible dans ces cas. Par contre, dans le second scénario, les erreurs sur l'inversion atteignent 23% à 850 nm et 17% à 1600 nm, sur les pixels où l'incidence solaire est rasante. Sur le reste du relief, l'erreur est inférieure à 7%.

Synthèse:

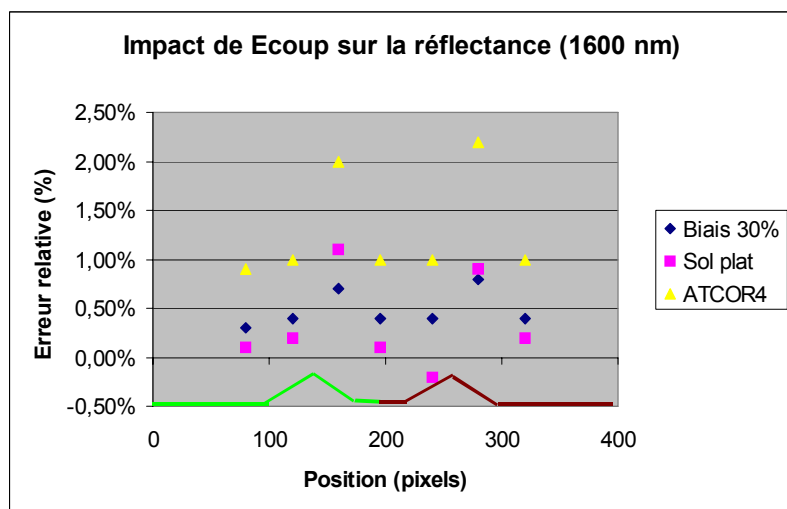
L'éclairement de couplage est une composante de second ordre de l'éclairement incident aux trois longueurs d'onde considérées. Cependant, ne pas prendre en compte ce terme dans l'inversion engendre des erreurs relatives importantes sur la réflectance lorsque l'atmosphère est turbide (scénario 2): jusqu'à 23% à 850 nm. Pour une atmosphère claire, l'erreur relative sur la réflectance varie peu avec le relief, et elle atteint au maximum 8%, dans le troisième scénario à 850 nm. Si on applique la formulation utilisée en sol plat, les erreurs relatives sur la réflectance sont plus faibles en valeur (erreur maximale de 15%, à 850 nm, scénario 2), mais l'amplitude des erreurs est la même qu'en omettant l'éclairement de couplage dans l'inversion.



a)

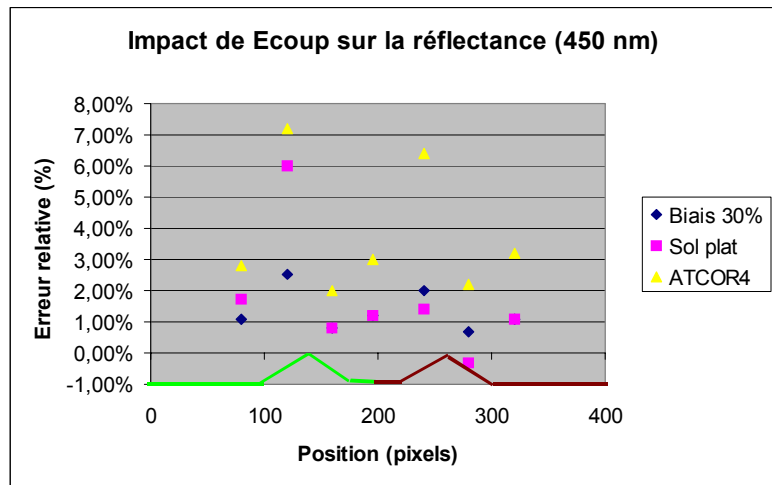


b)

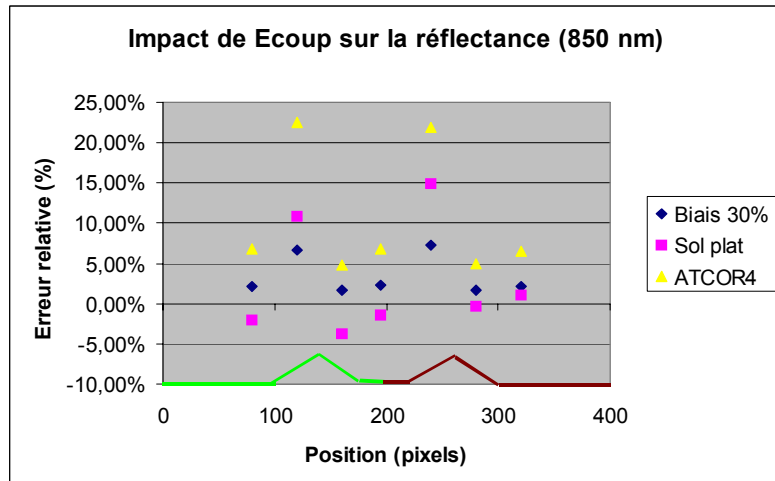


c)

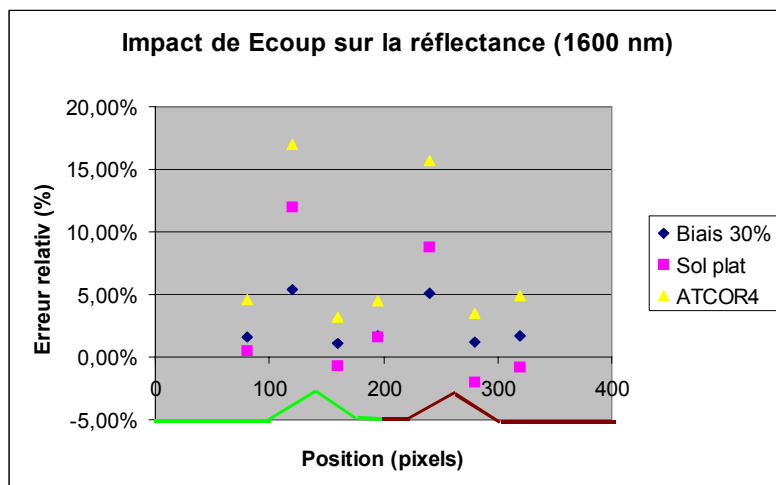
Figure 13: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage de couplage, scène 1.



a)

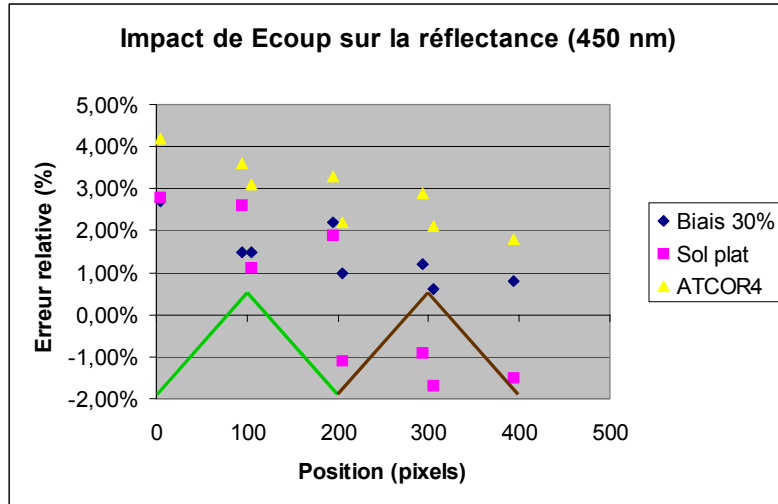


b)

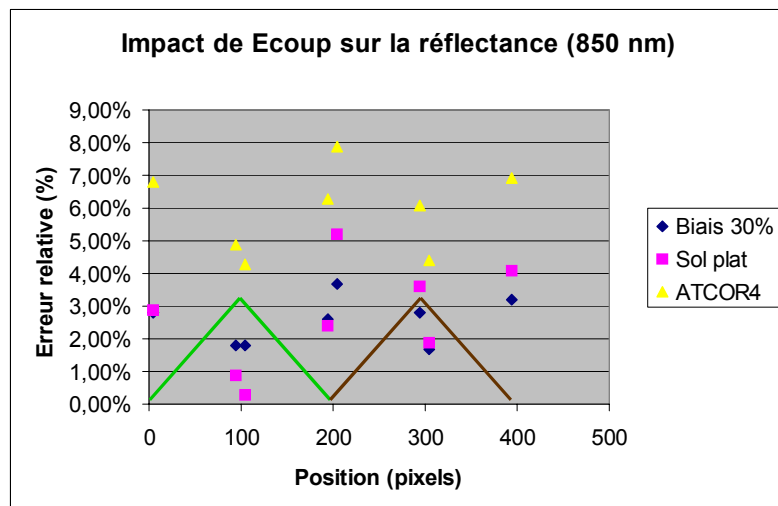


c)

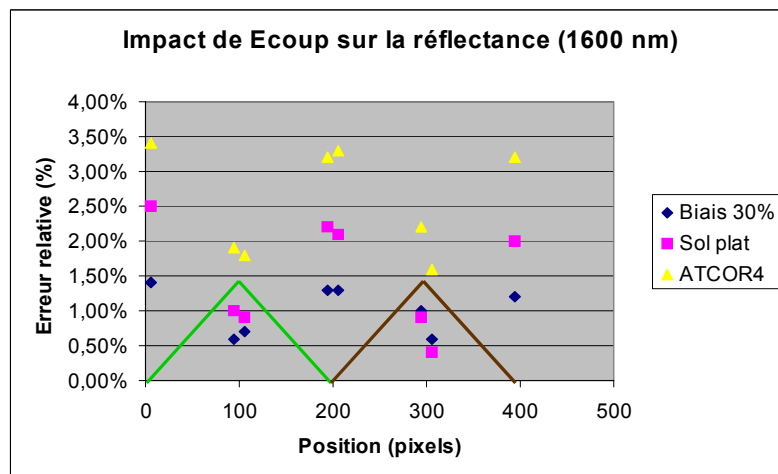
Figure 14: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage de couplage, scène 2.



a)



b)



c)

Figure 15: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage de couplage, scène3.

Eclairement réfléchi par l'environnement:

L'éclairement réfléchi dépend du relief environnant la cible, des réflectances de surface, et de la transmission atmosphérique directe. A l'instar de l'éclairement de couplage, la contribution de l'environnement situé en dehors de la scène, est calculé en périodisant les images.

Pour cette étude, les images de luminance modélisées par AMARTIS à partir des trois scénarios décrits en introduction du paragraphe 2, sont inversées suivant l'équation 17. Excepté l'éclairement réfléchi, tous les termes de l'équation sont calculés par AMARTIS. L'éclairement réfléchi par le voisinage est estimé de trois façons différentes:

- *1^{er} cas*: un biais de -30% est appliqué sur l'éclairement réfléchi calculé par AMARTIS.
- *2^{ème} cas*: ce terme est négligé, comme dans le cas d'un sol plat.
- *3^{ème} cas*: il est calculé suivant le modèle défini dans ATCOR4 (équation 11).

1^{er} cas:

Les trois images simulées sont inversées en ajoutant un biais de -30% sur l'éclairement réfléchi. Pour chaque scénario, les erreurs relatives les plus grandes sont observées sur les versants en incidence rasante. Sur ces portions de relief, les éclairements direct et diffus contribuent moins à l'éclairement incident, et un flanc de montagne exposé au soleil réfléchit du rayonnement dans leur direction.

Pour la première scène (Figure 16), ce biais engendre de faibles erreurs relatives sur la réflectance (inférieures à 2%).

Dans le second scénario (Figure 17), la composante dominante de l'éclairement sur les pentes en incidence rasante est l'éclairement diffus, dont la contribution diminue avec la longueur d'onde. A 450 nm, le biais sur l'éclairement réfléchi crée au maximum une erreur de 1% (Figure 17a), alors qu'elle est de l'ordre de 6% à 850 nm (Figure 17b) et 4% à 1600 nm (Figure 17c). L'impact de l'éclairement réfléchi est plus important à 850 nm en raison de la forte réflectance de l'herbe à cette longueur d'onde.

Les montagnes juxtaposées et de forte pente du dernier scénario (Figure 18), réfléchissent plus de rayonnement que dans les cas précédents. Dans le proche infrarouge cette composante est dominante par rapport à l'éclairement diffus. Une erreur d'estimation de l'éclairement réfléchi a ainsi plus d'impact sur l'inversion que dans les deux premiers scénarios, et les erreurs relatives sur la réflectance restituée atteignent 5% à 450 nm et 1600 nm, et 10% à 850 nm.

2^{ème} cas:

Si le sol est supposé plat, l'inversion est réalisée en ne considérant que les éclairements directs, diffus et de couplage. Négliger l'éclairement réfléchi dans l'inversion a un impact important sur la réflectance, puisque l'erreur relative peut atteindre 13% à 450 nm, 33% à 850 nm et 24% à 1600 nm (scénario 3, Figure 18). Ces erreurs dépendent de la longueur d'onde, ce qui peut engendrer une forte déformation spectrale, qui varie également avec la position sur le relief.

3^{ème} cas:

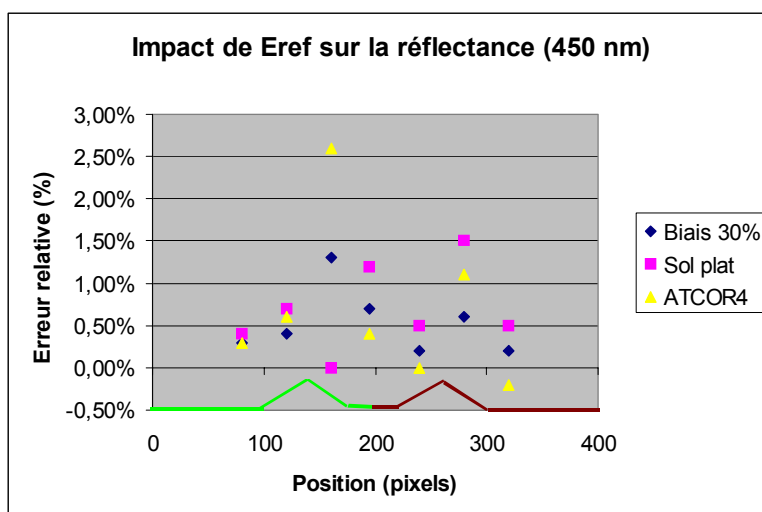
Le modèle utilisé dans ATCOR4 permet d'estimer l'ordre de grandeur de l'éclairement réfléchi par l'environnement du pixel cible. Par rapport à l'hypothèse d'un sol plat, l'inversion est donc plus précise. Cette approche semble mieux adaptée à un sol plat entouré de relief, ou pour un versant exposé au soleil. Lorsque c'est le relief environnant qui est exposé au soleil, l'éclairement réfléchi est nettement sous-estimé si

l'environnement est fortement réfléchissant. Dans ces cas, pour les pixels cibles où l'incidence solaire est rasante, cette approche peut engendrer de fortes erreurs relatives sur la réflectance, notamment dans le proche infrarouge. Dans le second scénario (Figure 17), le biais sur la réflectance atteint 13% à 850 nm et 7% à 1600 nm.

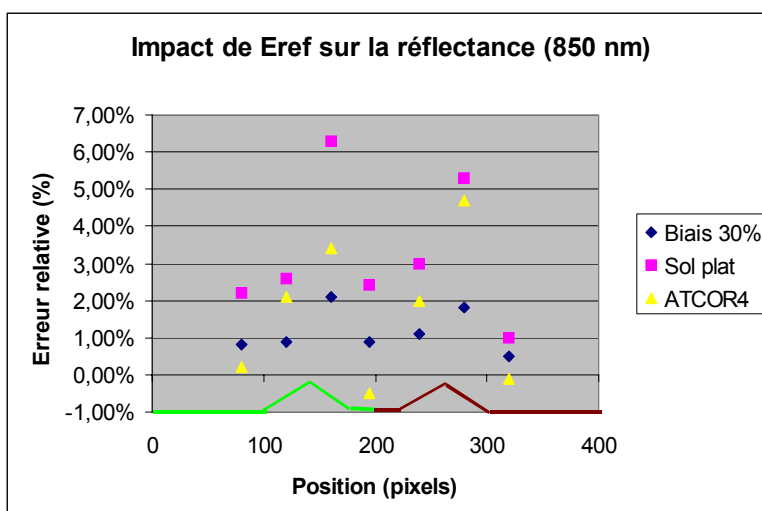
Ce modèle prend en compte les réflexions sur le relief environnant via un angle solide de vue du terrain normalisé. Cet angle est donc quasiment nul lorsque le relief qui réfléchit le rayonnement est éloigné. D'autre part, la réflectance de l'environnement n'est estimée que sur un rayon de 0,5 km, avec une contribution plus grande du voisinage proche (la fonction d'environnement est une exponentielle décroissante). Dans ce cas, l'éclairement réfléchi calculé avec cette méthode est sous-estimé, ce qui peut avoir un impact significatif sur la réflectance (à 850 nm, l'erreur sur la réflectance est d'environ 5% sur le pixel 6 pour la scène 1, Figure 16b, et de 7% sur le pixel 2 pour la deuxième scène, Figure 17b). Dans le dernier scénario (Figure 18), cette méthode améliore sensiblement les résultats de l'inversion, puisque l'erreur maximale est de 9% à 850 nm, alors qu'elle atteint 33% si l'éclairement réfléchi est négligé. Par contre, les erreurs relatives sur la réflectance variant fortement avec la longueur d'onde (et la position sur le relief), elles peuvent ici encore engendrer des déformations spectrales sur la réflectance estimée.

Synthèse:

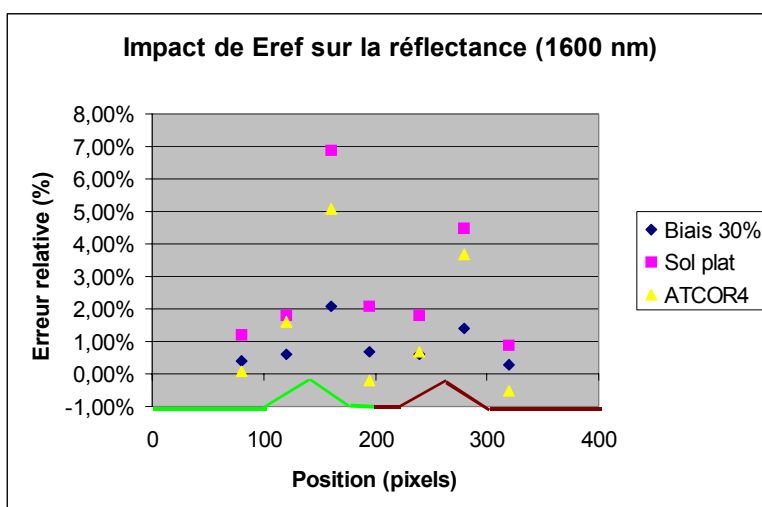
L'éclairement réfléchi est une composante de second ordre de l'éclairement à 450 nm. En revanche, à 850 nm et 1600 nm, il est un terme dominant de l'éclairement incident sur le versant d'une vallée où l'angle d'incidence est très fort (85°, dans le scénario 2), où lorsque le relief est très marqué (scénario 3). Ainsi, faire abstraction de ce terme dans l'inversion engendre jusqu'à 33% d'erreur sur la réflectance dans le scénario 3 (à 850 nm), et jusqu'à 18% dans le scénario 2 (à 850 nm). Le modèle d'ATCOR4 permet d'estimer un ordre de grandeur de l'éclairement réfléchi par le voisinage. Avec ce modèle, l'erreur maximale sur la réflectance est de 13% (850 nm, scénario 2).



a)

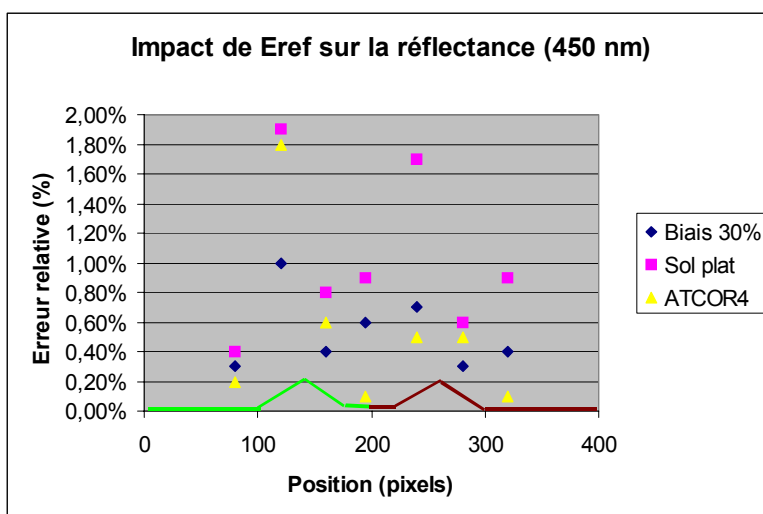


b)

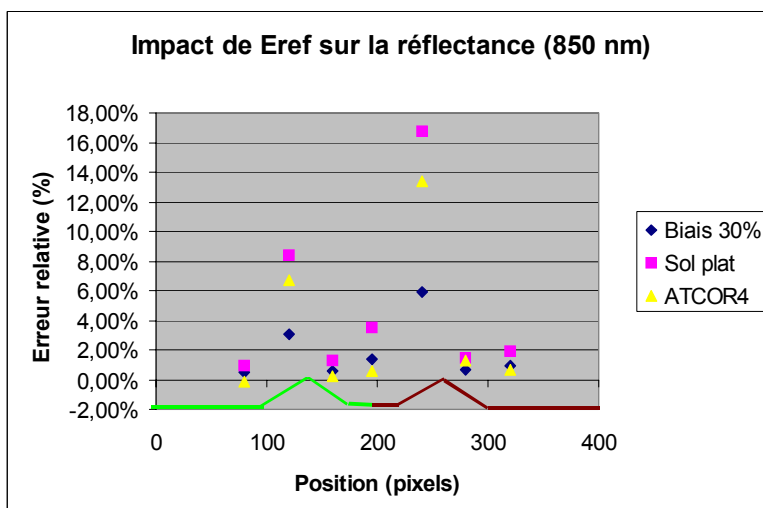


c)

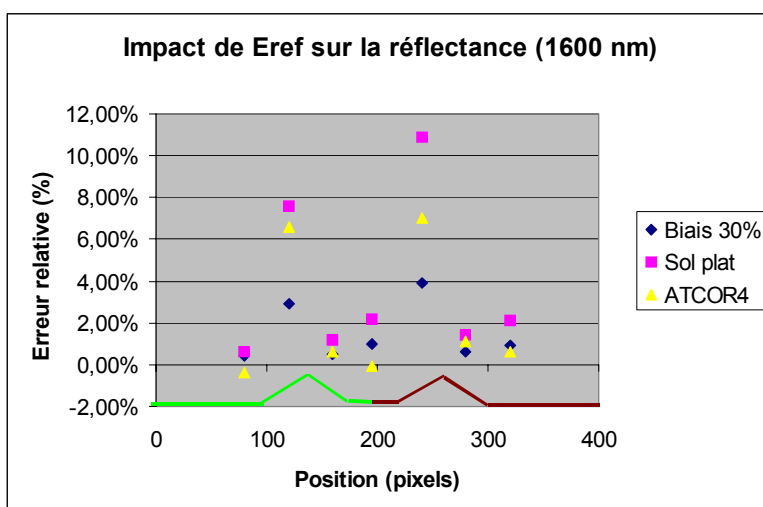
Figure 16: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage réfléchi, scène 1.



a)

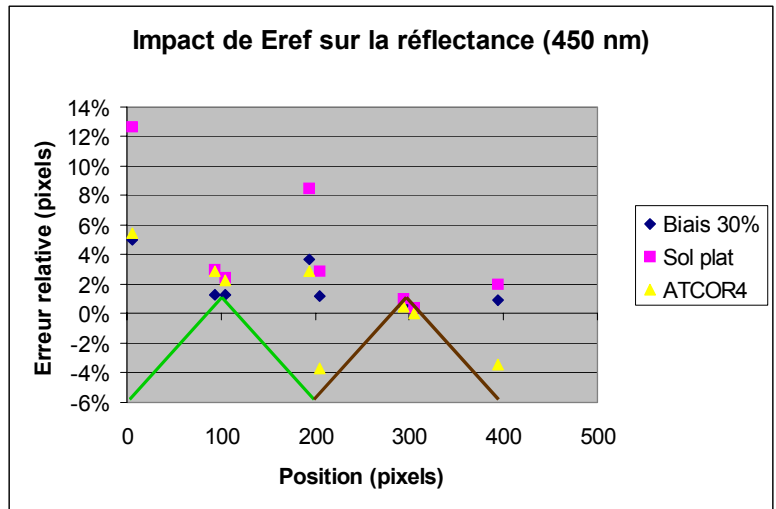


b)

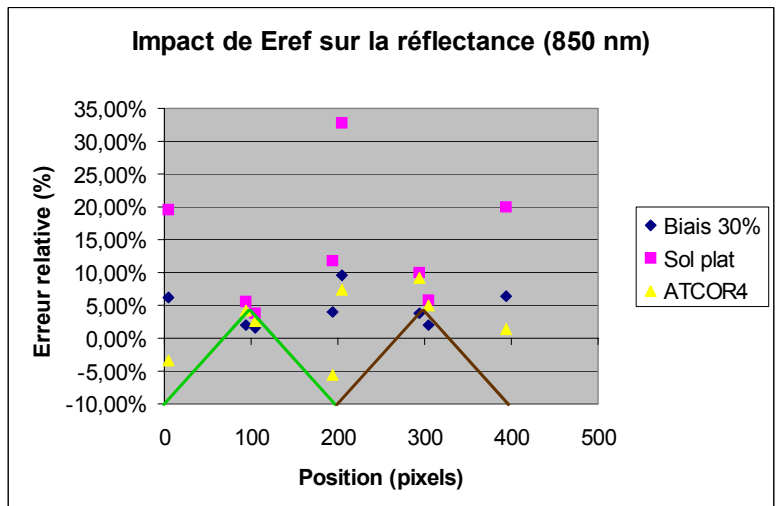


c)

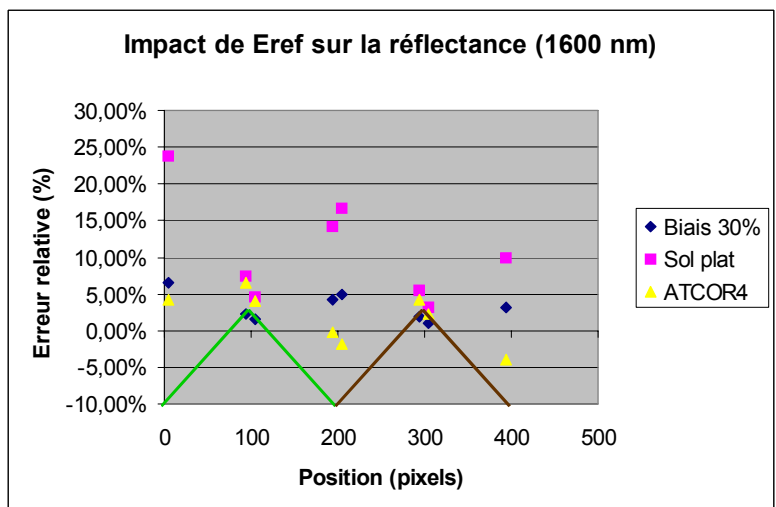
Figure 17: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage réfléchi, scène 2.



a)



b)



c)

Figure 18: Erreur relative sur la réflectance induite par l'éclairage réfléchi, scène 3.

2.2. Impact d'une erreur sur la luminance diffuse montante

La luminance mesurée par un capteur au dessus des trois scènes présentées paragraphe 2, est modélisée par AMARTIS, puis inversée suivant la formule 17. Pour chaque inversion, mise à part la luminance diffuse, tous les termes de l'équation sont calculés avec AMARTIS. La luminance diffuse est estimée de trois manières différentes:

- *1^{er} cas*: un biais de 20% est appliqué sur la luminance diffuse calculée par AMARTIS.
- *2^{ème} cas*: elle est calculée pour un pixel cible, à partir de l'éclairement incident sur le pixel (avec prise en compte du relief), de la transmission diffuse montante, et de la réflectance de l'environnement.

$$L_{dif}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = s_p^e(P, \lambda) E_{tot}(P, \vec{n}_i, \lambda) T_{dif}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda) \quad \text{avec} \quad s_p^e(P, \lambda) = \iint_{V(P)} s_p(M, \lambda) F_{envt}(R_{MP}, z_p, \theta_s, \lambda) dS \quad (19)$$

La réflectance de l'environnement du pixel cible est calculée en pondérant les réflectances avec la fonction d'environnement de 6S [28], qui est détaillée dans le paragraphe 3.2.2 de ce chapitre. Cette fonction prend en compte la distance R par rapport au pixel cible, la composition de l'atmosphère via les transmissions diffuses montantes dues aux molécules t_{dif}^r et aux aérosols t_{dif}^a (T_{dif}^\uparrow est la transmission diffuse montante totale), et la position du capteur (équation 20). Les fonctions F_r et F_a sont des fonctions exponentielles décroissantes exprimant respectivement la contribution des molécules et des aérosols dans la fonction d'environnement. Le voisinage du pixel cible est pris en compte sur un rayon de 50 km, en périodisant l'image, afin de prendre en compte 99% des pixels de l'environnement contribuant au rayonnement diffus montant (paragraphe 3.2.2).

$$F_{envt}^{6S}(P, R, \theta_c, \lambda) = 1/(2\pi R) \frac{d}{dR} \left[\frac{t_{dif}^r(P, \vec{n}_v, \lambda) F_r(P, R, \theta_c) + t_{dif}^a(P, \vec{n}_v, \lambda) F_a(P, R, \theta_c)}{T_{dif}^\uparrow(P, \vec{n}_v, \lambda)} \right] \quad (20)$$

- *3^{ème} cas*: la luminance diffuse est également calculée suivant l'équation 19, mais la fonction d'environnement utilisée est celle utilisée dans ATCOR4, définie par un filtre passe-bas:

$$F_{envt}^{atcor4}(R) = (2R)^2 e^{-R/R_s} \quad \text{avec} \quad R_s = R_{max}/2,3 \quad (21)$$

Cette fonction n'est pas dépendante de l'atmosphère, ni de la position du capteur. La taille du voisinage est définie par un rayon R_{max} généralement compris entre 0,5 km et 2 km, qui dépend des conditions atmosphériques de la scène d'acquisition, mais cette dépendance n'est pas expliquée dans les articles publiés [19] [20]. La valeur de ce rayon ayant une importance considérable sur le calcul de la réflectance de l'environnement, les tests ont été réalisés pour quatre rayons différents: 0,5 km, 1 km, 1,5 km et 2 km.

1^{er} cas:

Dans le visible, la luminance diffuse montante est une composante de premier ordre dans la luminance mesurée par un capteur. Elle dépend des réflectances et des éclairagements de l'environnement du pixel cible, du relief, des conditions atmosphériques et de l'angle de visée du capteur.

L'inversion réalisée avec un biais de 20% sur la luminance diffuse, montre que l'impact de ce terme sur la réflectance est le plus significatif sur les pixels où la luminance directe est la plus faible. Ce sont les pixels de faible réflectance (herbe à 450 nm et 1600 nm, sable à 450 nm), situés sur des pentes en incidence rasante (pixels 3 et 6 pour la scène 1, 2 et 5 pour la scène 2), et à basse altitude (pixels 1 et 5 du scénario 3). A 450 nm, les erreurs relatives maximales sur la réflectance sont de l'ordre de -30% pour des aérosols ruraux et une visibilité de 15 km (scénario 1, Figure 19a, et scénario 3, Figure 21a), et de -58% pour une visibilité de 9 km et des aérosols maritimes (scénario 2, Figure 20a). Dans le proche infrarouge, la contribution de la luminance diffuse montante est moins grande, et pour une atmosphère claire, les erreurs sur la réflectance sont au maximum de -4% à 850 nm et -1,5% à 1600 nm (scénario 1, Figure 19b et c)). Par contre, dans le second scénario où l'atmosphère est plus opaque, l'impact de ce biais sur la réflectance est significatif sur l'ensemble du spectre, avec des erreurs de -20% à 850 nm et -17% à 1600 nm (respectivement Figure 20b et Figure 20c). La déformation spectrale sur la réflectance dépend de la position des pixels sur le relief, comme en témoignent, par exemple, les erreurs relatives observées sur les pixels 3 et 5 du scénario 2.

2^{ème} cas:

L'inversion est ensuite réalisée avec la fonction d'environnement de 6S. Sur les trois scénarios, les erreurs sur la réflectance estimée sont très importantes. Les erreurs maximales sont observées à 450 nm, sur les pixels composés d'herbe, et situés sur le versant de montagne le moins éclairé. Dans le premier scénario, à 450 nm, l'erreur sur la réflectance varie entre -8% et 66% (Figure 19a). L'erreur relative sur la réflectance est encore plus élevée pour une atmosphère plus opaque. A 450 nm, elle varie entre -13% et 186% dans le second scénario (Figure 20a). Dans ce cas, l'impact sur la réflectance est également important dans le proche infrarouge, avec des erreurs maximales sur la réflectance de l'ordre de 64% à 850 nm (Figure 20b) et 56% à 1600 nm (Figure 20c).

3^{ème} cas:

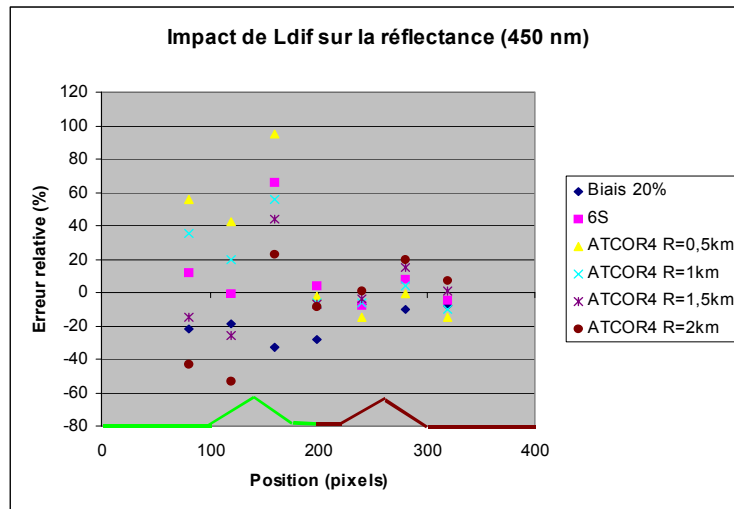
Dans chaque scénario, de fortes erreurs relatives sont observées sur la réflectance inversée lorsque la luminance diffuse est calculée avec la fonction d'environnement d'ATCOR4. Si l'on considère le rayon donnant les meilleurs résultats, le modèle d'ATCOR4 fournit des résultats sur l'inversion qui sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus au cas précédent. A 450 nm, l'erreur relative sur la réflectance varie entre -10% et 56% dans le premier scénario (Figure 19a, $R_{\max}=1$ km), et entre -13% et 20% dans le troisième (Figure 21a, $R_{\max}=1,5$ km). Dans ces deux cas, bien que les modèles atmosphériques soient identiques, les rayons optimaux sont différents. Dans le second scénario à 450 nm (Figure 20a), pour des rayons de 1,5 km et 2 km, l'amplitude des erreurs est du même ordre de grandeur que pour les calculs effectués avec la fonction d'environnement de 6S. Dans le proche infrarouge, les erreurs sur la réflectance sont équivalentes à celle obtenues avec la fonction d'environnement de 6S, quel que soit le rayon du voisinage dans ATCOR4 (Figure 19 à Figure 21, b et c).

On remarque également que l'impact de cette fonction sur la réflectance restituée, pour un même pixel, dépend fortement du rayon choisi. Par exemple, sur le pixel 2 du premier scénario, à 450 nm, l'erreur

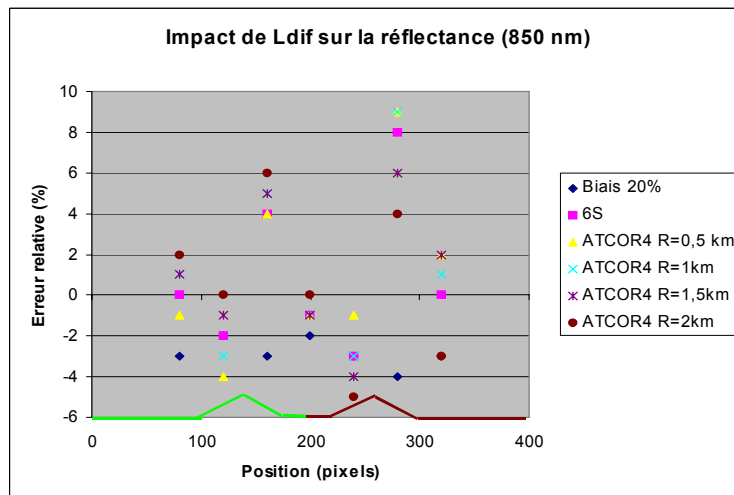
relative sur la réflectance est de 42% pour un rayon de 0,5 km, de 20% avec un rayon de 1 km, -26% pour un rayon de 1,5 km et -53% si le rayon est de 2 km.

Synthèse:

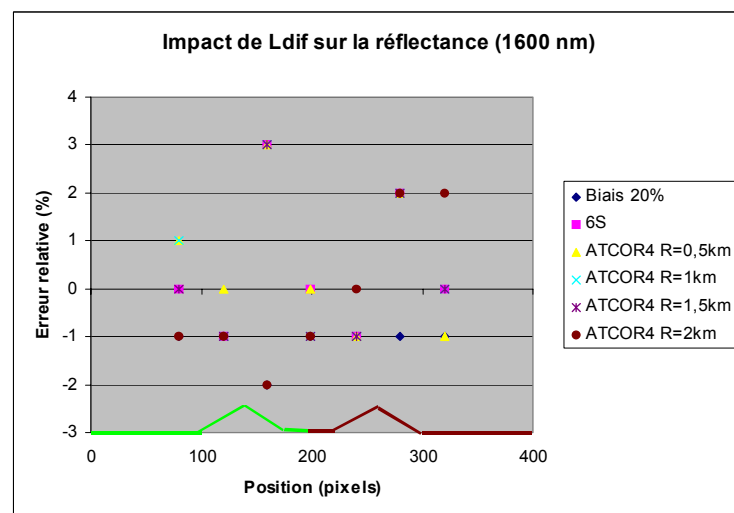
La luminance diffuse montante est une composante de premier ordre de la luminance mesurée par un capteur à 450 nm. Lorsque la visibilité atmosphérique est faible (scénario 2), elle est également de premier ordre à 850 nm et 1600 nm. A 450 nm, les formulations étudiées engendrent des erreurs relatives sur la réflectance supérieures à 40% dans le premier scénario, à 100% dans le second et à 20% dans le troisième. A 850 nm et 1600 nm, les erreurs maximales sur la réflectance sont faibles dans les scénarios 1 et 3, mais elles dépassent 50% dans le scénario 2. Ces fortes erreurs montrent qu'il est nécessaire de prendre en compte les variations d'éclairement incident sur le voisinage du pixel cible, afin de calculer avec précision la luminance diffuse montante. D'autre part, la fonction d'environnement implémentée dans 6S semble mieux adaptée que celle d'ATCOR4, car elle est calculée en fonction des conditions atmosphériques et de la position du capteur.



a)

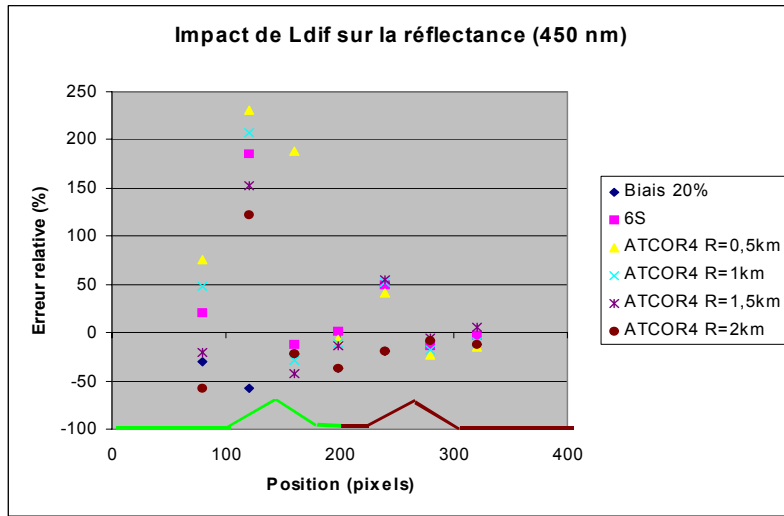


b)

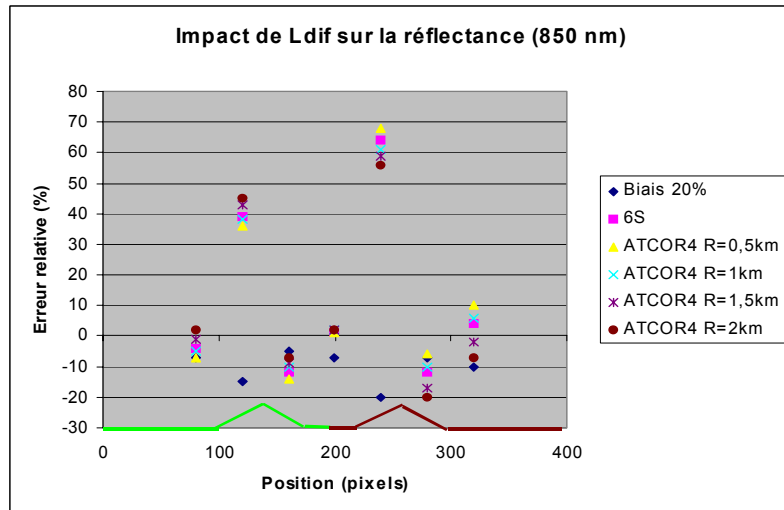


c)

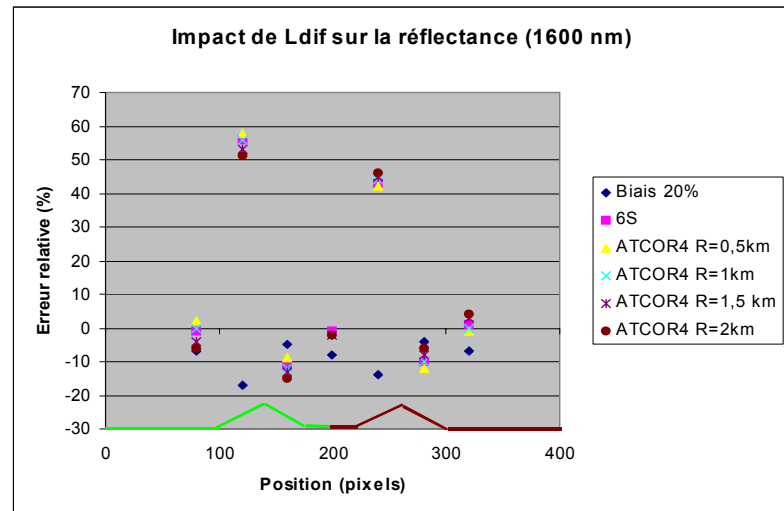
Figure 19: Erreur relative sur la réflectance induite par la luminance diffuse, scène 1.



a)

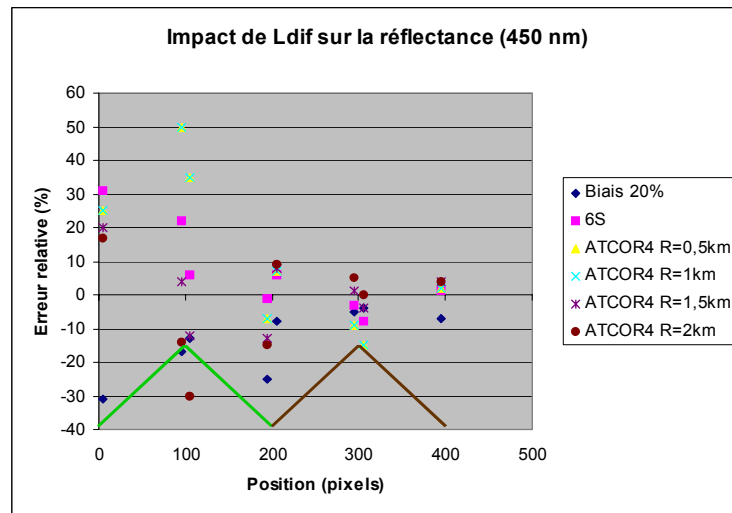


b)

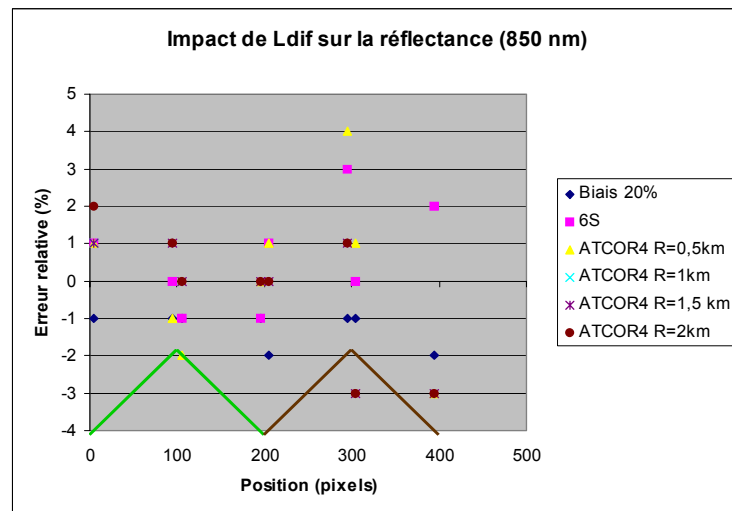


c)

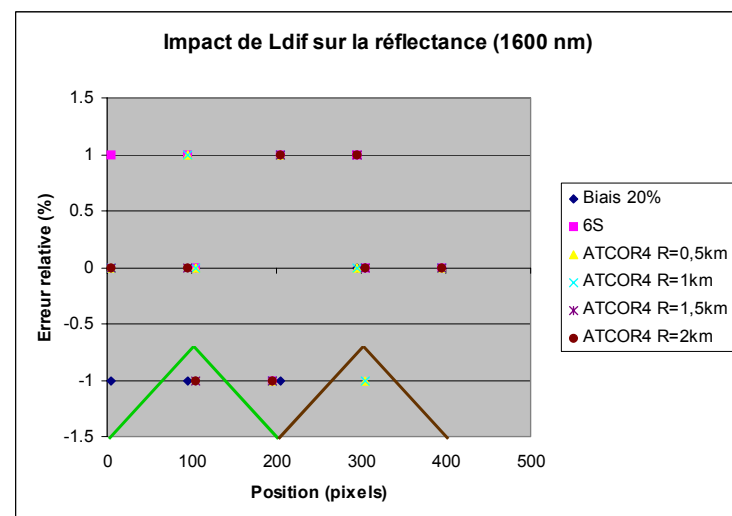
Figure 20: Erreur relative sur la réflectance induite par la luminance diffuse, scène 2.



a)



b)



c)

Figure 21: Erreur relative sur la réflectance induite par la luminance diffuse, scène 3.

2.3. Impact d'une erreur sur la luminance atmosphérique

Dans cette étude, les trois images de luminance modélisées à partir des scénarios présentés en introduction du paragraphe 2 sont inversées suivant l'équation 17. Mis à part la luminance atmosphérique, tous les termes de l'équation sont calculés par AMARTIS. La luminance atmosphérique est obtenue de deux manières différentes:

- *1^{er} cas*: un biais de 10% est appliqué sur la luminance atmosphérique obtenue par AMARTIS.
- *2^{ème} cas*: ce terme est calculé en faisant l'hypothèse d'un sol plat, sans prendre en compte les variations de l'angle de visée sur l'image.

1^{er} cas:

A 450 nm, la luminance atmosphérique est une composante de premier ordre de la luminance mesurée par un capteur. Elle dépend des conditions atmosphériques, de l'altitude du pixel visé, et de l'angle de vue du capteur. Lorsque sa contribution est la plus grande, c'est à dire pour les pixels de faible réflectance (herbe à 450 nm) situés sur une pente en incidence rasante (pixels 3 et 6 pour la scène 1, 2 et 5 pour la scène 2, et 1,2,5 et 6 dans le dernier cas), un biais de 10% sur la luminance atmosphérique engendre une erreur relative sur la réflectance d'environ 80% pour le premier et le dernier scénario (Figure 22a et Figure 24a), et de 185% pour le second (Figure 23a), où l'atmosphère turbide augmente le poids des luminances atmosphériques et diffuses par rapport à la luminance directe. L'impact sur la réflectance est nettement plus faible dans le proche infrarouge, puisque l'erreur relative maximale observée est de 8%, à 850 nm dans le second scénario (Figure 23b). Pour éviter une forte déformation spectrale sur la réflectance, il est donc nécessaire d'estimer avec précision ce terme, surtout dans le visible.

2^{ème} cas:

L'inversion a ensuite été effectuée en calculant la luminance atmosphérique issue d'un sol plat, à l'altitude minimale de la scène, sans prendre en compte les variations de l'angle de visée sur l'image.

Dans le premier scénario (Figure 22), l'impact du relief est surtout visible sur la montagne d'herbe, à 450 nm. Sur la pente en incidence rasante, l'erreur sur la réflectance atteint 16%. Dans le proche infrarouge, l'erreur sur la réflectance est quasiment nulle.

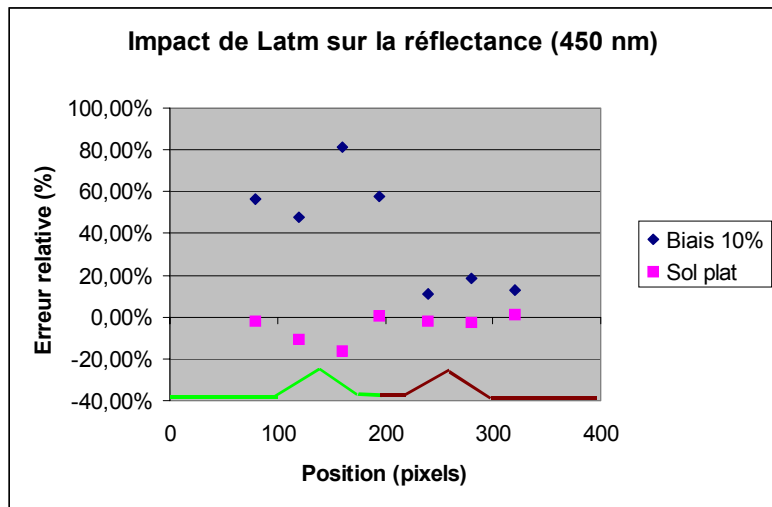
Dans le second cas, en raison de l'atmosphère turbide, l'impact de l'altitude est plus élevé avec un biais maximal de -34% sur le pixel 2 à 450 nm (Figure 23a). Par contre dans le proche infrarouge (Figure 23b et c), les erreurs sur la réflectance sont inférieures à 2%.

Pour le dernier scénario (Figure 24), malgré la forte variation d'altitude sur le relief, dans l'infrarouge, l'impact de la luminance atmosphérique sur l'inversion est du même ordre de grandeur que dans le cas précédent. Par contre, à 450 nm, l'erreur relative sur la réflectance atteint -94%.

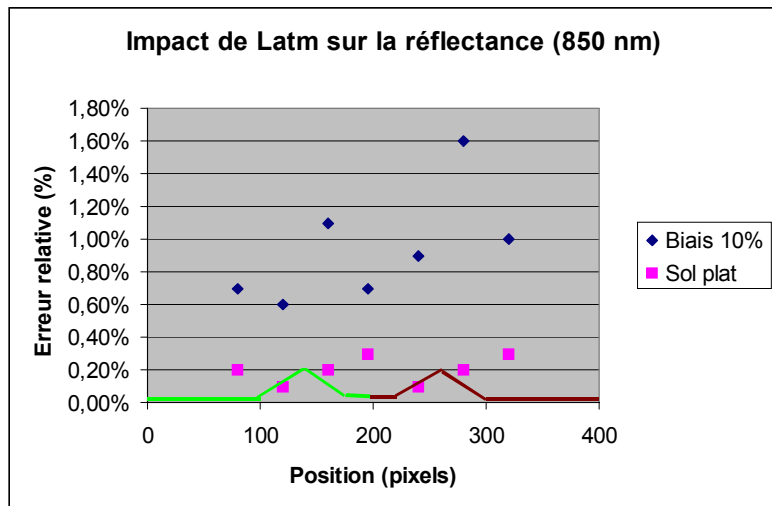
D'autre part, l'angle de visée varie très peu sur les scènes mesurées ($\pm 1^\circ$), pourtant des erreurs sur la réflectance ont été observées pour les pixels situés en sol plat, à l'altitude minimale de la scène, et sur les bords de l'image (5% d'erreur à 450 nm sur le pixel 1, scène 2). Pour des images aéroportées, où l'angle de visée varie plus que sur des images satellitaires, une prise en compte de l'angle de visée est aussi nécessaire.

Synthèse:

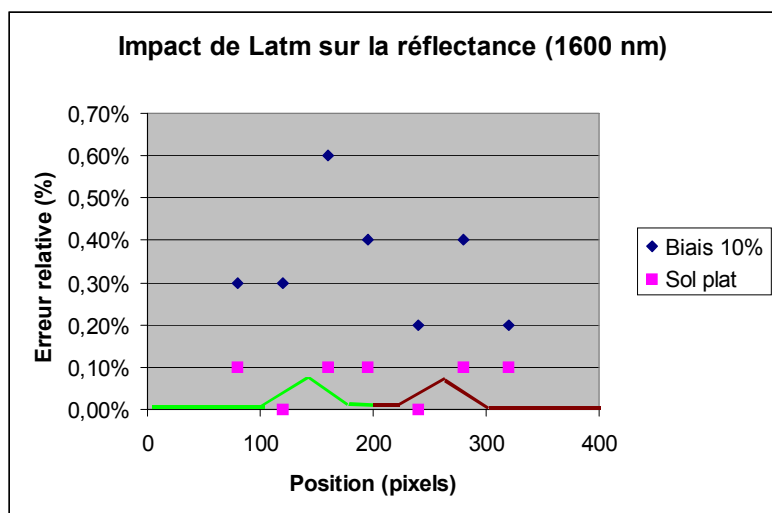
Ces trois simulations montrent l'importance d'une prise en compte des variations d'altitude pour estimer la luminance atmosphérique, notamment dans le visible. Lorsque les variations d'altitude ne sont pas prises en compte, l'erreur sur la réflectance est de l'ordre de 100% à 450 nm sur un relief très marqué (scénario 3). Les variations de l'angle de vue sur la scène doivent également être prises en compte, puisqu'une variation de 1° crée jusqu'à 5% d'erreur sur la réflectance à 450 nm (scénario 2). Par contre, à 850 nm et 1600 nm, les erreurs relatives sur la réflectance sont inférieures à 2% en supposant le sol plat et l'angle de vue du capteur constant.



a)

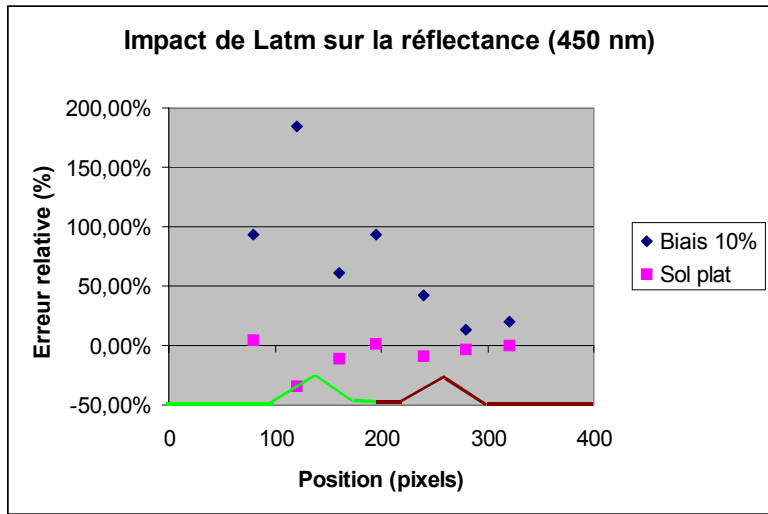


b)

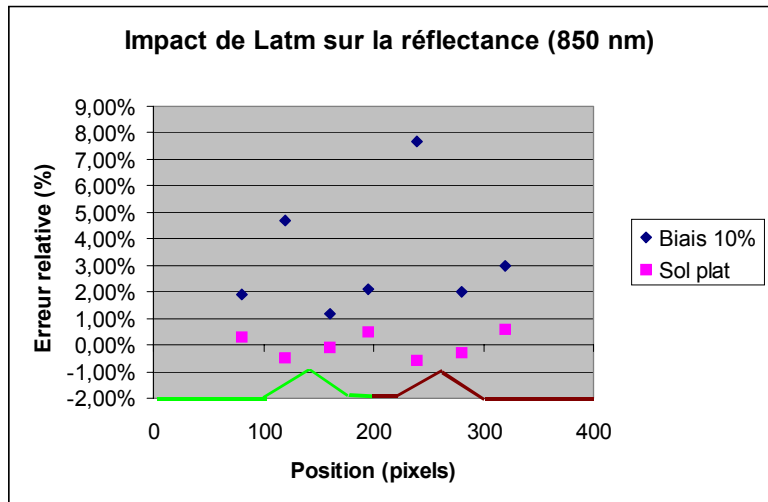


c)

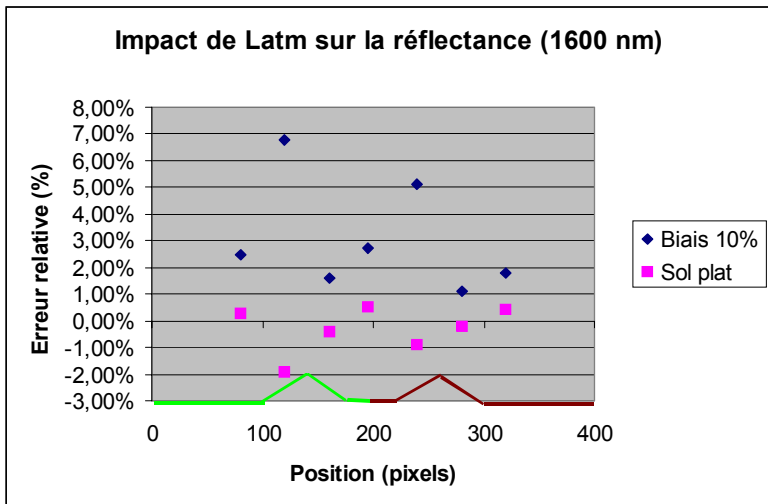
Figure 22: Erreur relative sur la réflectance induite par la luminance atmosphérique, scène 1.



a)

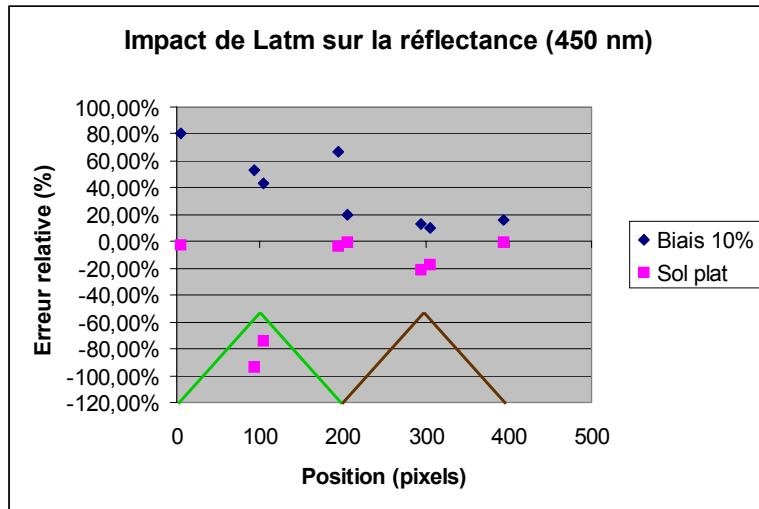


b)

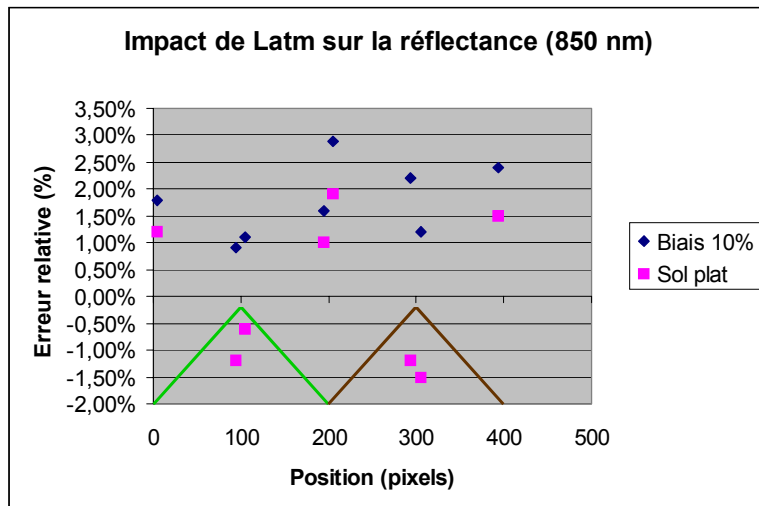


c)

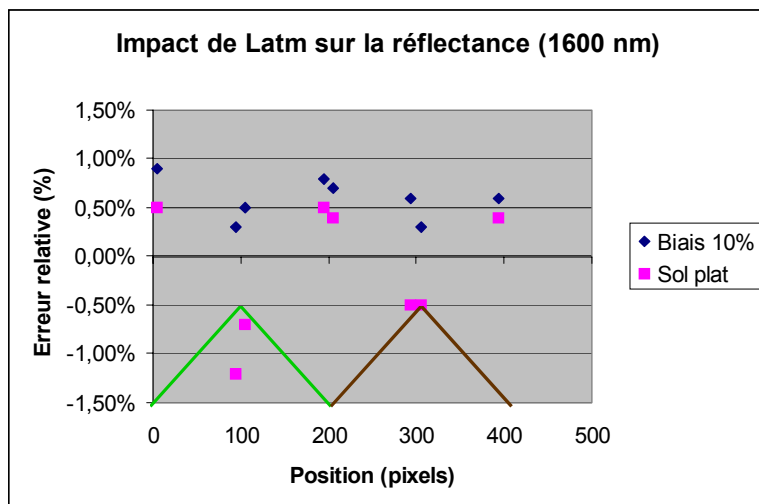
Figure 23: Erreur relative sur la réflectance induite par la luminance atmosphérique, scène 2.



a)



b)



c)

Figure 24: Erreur relative sur la réflectance induite par la luminance atmosphérique, scène 3.

2.4. Importance de la prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance

Les trois images de luminance sont simulées par AMARTIS, en considérant des réflectances bidirectionnelles, modélisées suivant la formulation de Rahman [18], ajustée sur des réflectances bidirectionnelles de l'herbe et du sable, mesurées à l'ONERA. Pour l'inversion, l'ensemble des termes intervenant dans l'équation est calculé par AMARTIS pour un sol lambertien. La réflectance lambertienne du sol est identique à l'albédo sphérique, calculé en effectuant une intégrale normée des réflectances bidirectionnelles, sur toutes les directions d'incidence et de visée.

La réflectance du sol, extraite de ces images sous l'hypothèse d'un sol lambertien, est ensuite comparée pour chaque pixel avec l'albédo sphérique initial. Les effets directionnels de la réflectance ont un impact sur la luminance directe, et sur la luminance directe-diffuse. La luminance diffuse issue des éclairagements diffus, réfléchis et de couplage, est calculée avec l'albédo sphérique du sol, et ne dépend donc pas des conditions d'incidence et d'émergence du rayonnement. Dans chaque scénario, on observe que l'approximation d'un sol lambertien, engendre des erreurs relatives sur la réflectance inversée qui sont plus élevées à 450 nm qu'à 850 nm et 1600 nm. La réflectance du sol est extraite de la luminance directe, elle même déduite de la luminance mesurée en soustrayant les luminances diffuses et atmosphériques montantes (Equation 17). La luminance directe-diffuse ayant une contribution plus grande aux courtes longueurs d'onde, l'impact de la BRDF y est donc plus important. L'impact des effets bidirectionnels de la réflectance peut être significatif sur l'ensemble du spectre, comme en témoignent les erreurs maximales dans le premier scénario (Figure 25a), qui sont environ de -23% à 450 nm, -14% à 850 nm et -11% à 1600 nm.

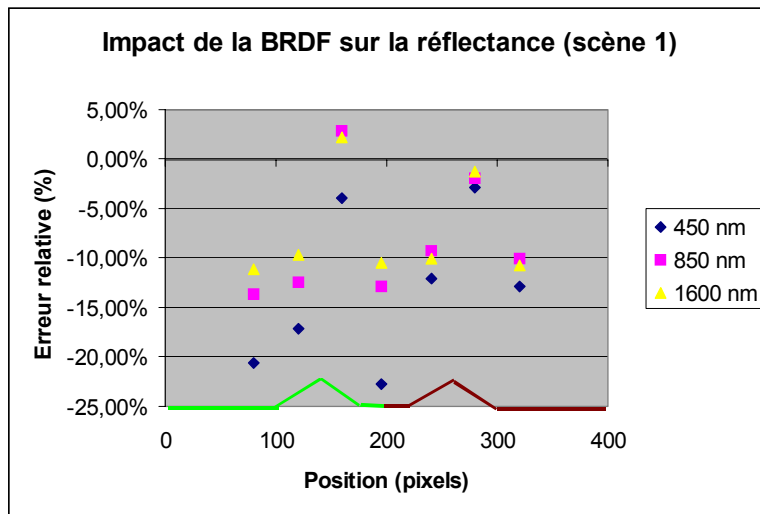
En fonction de la position des pixels sur le relief, la composition du sol, ainsi que les angles d'incidence et d'émergence varient. En conséquence, effectuer l'inversion en supposant la réflectance du sol lambertienne, engendrent des erreurs relatives sur la réflectance différentes pour chaque pixel. Les effets de BRDF sont plus marqués sur l'herbe verte que sur le sable (Figure 6). Les erreurs sur la réflectance sont donc plus élevées sur les pixels composés d'herbe (pixels 1 à 4 dans les trois scénarios). Par exemple, dans le premier scénario (Figure 25a), à 450 nm, cette erreur atteint -23% pour de l'herbe et -13% pour du sable. Pour un même type de sol, l'estimation de la réflectance est plus ou moins précise en fonction de la position sur le relief. Dans le scénario 2 (Figure 25b), l'erreur à 450 nm oscille entre -4% et -22% pour de l'herbe.

Suivant les conditions angulaires d'acquisition, l'albédo sphérique de la scène peut être sous-estimé (scénario 1 et 2), ou surestimé (scénario 3). Dans le scénario 3 (Figure 25c), les angles ont été choisis afin de se retrouver dans une configuration proche du hot-spot, phénomène qui amplifie la réflectance lorsque la direction de visée est proche de la direction d'incidence. Plus les angles d'incidence et de visée sont grands, plus ce phénomène est important. Les erreurs les plus élevées sont ainsi observées sur les pixels 1 et 2, qui sont composés d'herbe et situés sur une pente où l'incidence est rasante. Dans ce scénario, l'erreur maximale sur la réflectance dépasse les 20% sur l'ensemble du spectre.

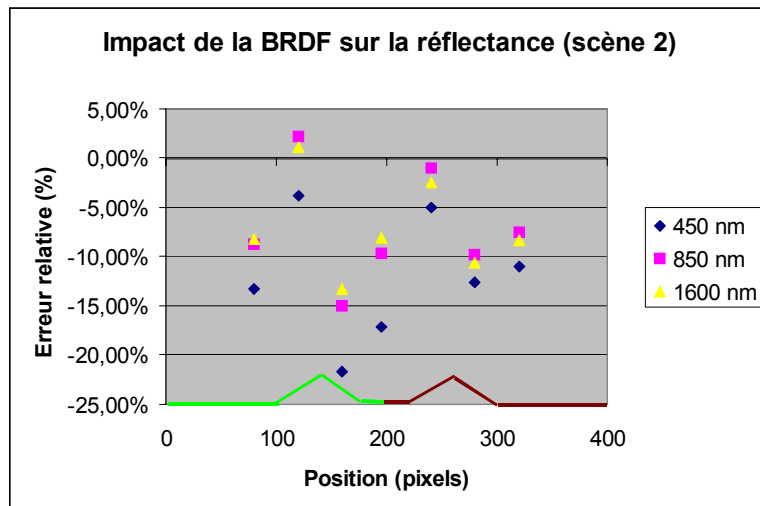
L'erreur sur la réflectance est la plus grande lorsque la réflectance bidirectionnelle est la plus éloignée de l'albédo sphérique. L'erreur maximale n'est donc pas forcément observée sur les pixels situés en forte incidence. Ainsi, pour la première scène simulée, elle est située sur les pixels 1 et 4 suivant la longueur d'onde, qui sont sur le sol plat.

Synthèse:

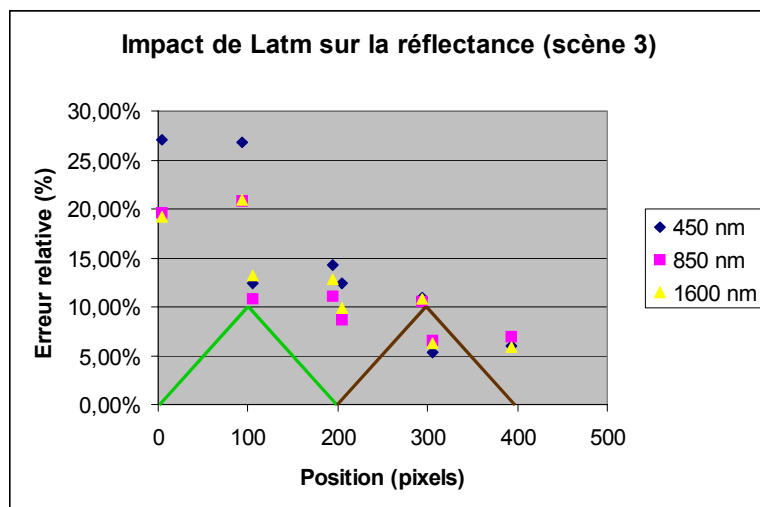
Ces trois scénarios mettent en évidence l'importance d'une prise en compte des effets bidirectionnels pour l'estimation de la réflectance. Lorsque le sol est supposé lambertien, les erreurs relatives sur la réflectance peuvent dépasser 20% aux trois longueurs d'onde considérées (scénario3). Dans le code ATCOR4, une correction de ces effets peut être effectuée sur la réflectance obtenue en sortie de la troisième étape. L'inversion est donc réalisée avec l'hypothèse d'un sol lambertien, ce qui induit que les variations directionnelles de la réflectance ne sont pas prises en compte dans le calcul de la luminance diffuse. Cette correction de BRDF a posteriori, s'applique par conséquent aussi bien sur la luminance directe-directe, que sur la luminance directe issue des éclairements diffus, réfléchis et de couplage, pour laquelle une réflectance de type hémisphérique-directionnelle est plus appropriée, du fait du caractère isotrope des éclairements incidents.



a)



b)



c)

Figure 25: Erreur relative sur la réflectance induite par l'hypothèse d'une surface lambertienne.

2.5. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence les termes de l'équation d'inversion ayant un impact important sur la réflectance estimée, et qu'il est donc nécessaire de calculer de manière précise. Elle montre également les limitations des méthodes existantes pour la prise en compte du relief dans l'inversion.

La luminance diffuse:

Actuellement, les modèles de calcul de la luminance diffuse, définis dans les codes d'inversion existants, ne sont pas adaptés à une scène montagneuse. A 450 nm, le modèle le plus précis engendre des erreurs sur la réflectance variant entre -60% et +130% dans le scénario 2. A 850 nm et 1600 nm, l'erreur sur la réflectance oscille au mieux entre -15% et +50%. Pour une atmosphère plus claire (scénario 1), l'impact de ces modèles reste considérable à 450 nm, avec des erreurs sur la réflectance variant entre -10% et +56% dans le meilleur des cas. Par contre, dans le proche infrarouge, l'impact de ce terme sur la réflectance est plus faible avec une erreur engendrée sur la réflectance de l'ordre de +/- 5%.

La luminance atmosphérique:

Lorsque l'atmosphère est fortement chargée en aérosols (scénario 2), considérer un sol plat pour estimer ce terme peut engendrer 50% d'erreur sur la réflectance pour une variation d'altitude de 100 m. Avec une variation d'altitude de 500 m et une atmosphère plus claire, l'erreur sur la réflectance atteint 90% à 450 nm.

Une faible variation de l'angle de visée sur l'image, de l'ordre de 1°, peut créer jusqu'à 5% d'erreur sur la réflectance à 450 nm.

Par contre, à 850 nm et 1600 nm, l'impact de ce terme sur la réflectance est très faible, et les erreurs engendrées par l'approximation d'un sol plat sont inférieures à 1%.

Les effets bidirectionnels de la réflectance:

Suivant le scénario considéré, faire l'approximation d'une surface lambertienne pour l'inversion engendre jusqu'à 25% d'erreur sur la réflectance estimée à 450 nm, et 20% d'erreur à 850 nm et 1600 nm.

L'éclairement diffus:

Dans le scénario 2, où l'incidence solaire est de 55° et la visibilité atmosphérique est faible, faire l'hypothèse d'un sol horizontal sans relief environnant engendre des erreurs sur la réflectance variant entre -30% et +15% aux trois longueurs d'onde considérées. L'approche utilisée dans ATCOR4 permet d'obtenir la réflectance du sol avec une erreur oscillant entre -5% et +10% à 450 nm, et entre -5% et +5% à 850 nm et 1600 nm.

Lorsque le relief est très marqué, l'éclairement diffus calculé suivant le modèle d'ATCOR4 engendre entre -5% et +15% d'erreur sur la réflectance à 450 nm, et moins de 5% d'erreur à 850 nm et 1600 nm.

L'éclairement réfléchi:

Pour un relief très marqué (scénario 3), ne pas considérer ce terme engendre jusqu'à 13% d'erreur sur la réflectance à 450 nm, 35% à 850 nm et 25% à 1600 nm. Avec le modèle d'ATCOR4, ces erreurs sont inférieures à 6% à 450 nm et 1600 nm, et à 10% à 850 nm. Dans les autres scénarios, l'erreur sur la réflectance à 450 nm est inférieure à 2% avec ce modèle. Elle atteint 13% à 850 nm et 7% à 1600 nm dans le

second scénario, sur les versants où l'incidence est rasante. Par contre, sur le reste du relief, l'erreur sur la réflectance est inférieure à 1%.

L'éclairement de couplage:

Si on néglige ce terme, l'erreur sur la réflectance peut atteindre 22% à 850 nm sur les versants où l'incidence solaire est rasante (scénario 2). Sur le reste du relief, l'erreur sur la réflectance est inférieure à 6% dans les trois scénarios, quelle que soit la longueur d'onde. Dans les scénarios 1 et 3, l'erreur sur la réflectance due à cette approximation varie très peu avec le relief.

Calculer ce terme avec la formulation utilisée en sol plat réduit les erreurs relatives sur la réflectance, avec au maximum 15% d'erreur, à 850 nm, sur un versant éclairé en incidence rasante, dans le scénario 2.

Cette étude motive le développement du code SIERRA, afin d'apporter des modifications nécessaires à une meilleure prise en compte du relief de la scène. Ainsi, un nouveau modèle a été créé pour calculer la luminance diffuse montante, afin de prendre en compte les variations d'éclairement incident sur le voisinage du pixel cible. La fonction d'environnement est celle du code de transfert radiatif 6S, qui a pour avantage de prendre en compte la composition atmosphérique et l'angle de vue du capteur. D'autre part, le modèle de 6S converge quand la taille du voisinage considéré grandit, alors que dans ATCOR4, le choix de la taille du voisinage a un impact considérable sur l'inversion, et la méthode permettant de déterminer ce voisinage n'est pas décrite dans les publications.

Les quatre composantes de l'éclairement sont calculées dans SIERRA. Pour le calcul de l'éclairement diffus, les variations de luminances directionnelles sont prises en compte, tout en gardant un temps de calcul restreint. L'objectif est notamment d'affiner l'estimation de l'éclairement diffus dans les courtes longueurs d'onde, où ce terme est de premier ordre. L'éclairement de couplage variant peu avec le relief, on a donc cherché à estimer un ordre de grandeur de ce terme, en s'inspirant de la formulation définie pour un sol plat homogène. Le modèle défini dans ATCOR4 pour calculer l'éclairement réfléchi par le voisinage, est la seule approche permettant une prise en compte de ce terme, cependant limitée lorsque le relief est trop marqué, ou trop éloigné. On utilise donc cette formulation, légèrement modifiée pour réduire le temps de calcul.

Pour chaque pixel, l'angle de visée et l'altitude sont pris en compte pour le calcul de la luminance atmosphérique montante.

Enfin, dans SIERRA, les effets bidirectionnels de la réflectance sont pris en compte sur les quatre composantes de la luminance issue de la surface (SEQARABIC).

3. CALCUL DES TERMES INTERVENANT DANS L'EQUATION

Les modèles proposés dans SIERRA pour le calcul des différentes grandeurs radiatives sont détaillés dans ce paragraphe. Dans un premier temps, le calcul des quatre composantes de l'éclairement incident est décrit. Puis, les méthodes employées pour estimer les luminances atmosphériques et diffuses montantes sont présentées. Enfin, le modèle utilisé pour la prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance est explicité.

Les méthodes de calcul de l'éclairement incident et de la luminance montante sont validées par comparaison avec le code de transfert radiatif AMARTIS [12]. A partir d'un modèle numérique de terrain, des conditions atmosphériques, et des angles d'incidence solaire et de visée du capteur, on calcule chaque terme d'éclairement et de luminance avec AMARTIS et avec le modèle de SIERRA. Afin d'éviter les différences inhérentes aux codes de transfert radiatif, tous les termes atmosphériques intervenant dans ces calculs sont obtenus avec le code de transfert radiatif 6S [28].

La validation complète, qui est réalisée sur plusieurs types de relief, sous différentes conditions d'incidence et d'observation, et pour des conditions atmosphériques variables, est présentée de manière exhaustive dans l'annexe 1. Dans ce paragraphe, un exemple de validation est donné pour chacun de ces paramètres. Une image mesurée par un capteur embarqué situé au nadir, à 100 km d'altitude, est simulée par AMARTIS (Figure 26). Le relief est construit sur un profil de 400 pixels de 10 mètres; il est invariant sur la troisième dimension, orientée nord-sud. Il est formé par deux montagnes dont les pentes sont de 30° , et de sol plat. Les deux cents premiers pixels sont composés d'herbe verte, et les deux cents suivants de sol nu. La réflectance du sol est définie par le modèle de Rahman. Le soleil éclaire la scène du sud ouest, avec un angle zénithal d'incidence de 35° et un angle azimutal de 234° . L'atmosphère correspond à un milieu tempéré été, avec une charge en aérosols ruraux correspondant à une visibilité de 15 km. Les résultats sont présentés à 450 nm, 850 nm et 1600 nm pour l'éclairement, et à 450 nm et 850 nm pour la luminance diffuse montante (à 1600 nm, la luminance diffuse est très faible et contribue donc peu au signal mesuré par un capteur).

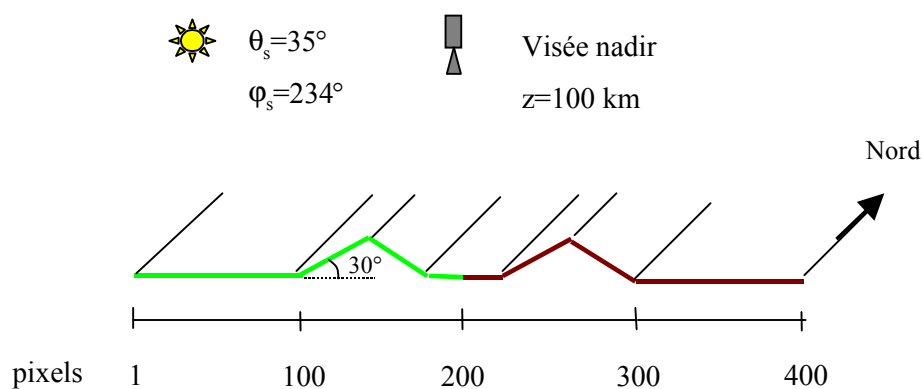


Figure 26: scène de validation

3.1. Eclairage incident

L'éclairage incident au niveau du sol se décompose en quatre termes. L'éclairage direct est la composante principale. L'éclairage diffus est également une composante de premier ordre, notamment pour les courtes longueurs d'onde. Dans la plupart des cas, les éclairages réfléchis et de couplage sont faibles par rapport aux deux autres termes, mais dans des conditions d'incidence rasante, de fortes réflectances de l'environnement, ou pour des reliefs très marqués, leur influence peut devenir significative.

3.1.1. Eclairage direct

L'éclairage direct dépend de l'éclairage en haut de l'atmosphère E_{TOA} , de la transmission atmosphérique directe sur le trajet descendant T_{dir}^\downarrow , et du produit scalaire entre la normale au pixel \vec{N} et la direction d'incidence solaire \vec{n}_i (Figure 27). Un coefficient binaire Θ intervient dans le calcul pour prendre en compte une éventuelle ombre créée par le relief environnant.

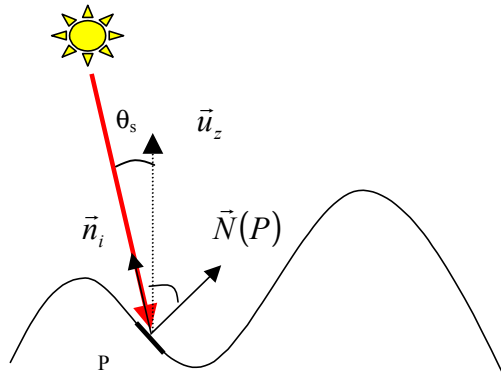


Figure 27: Eclairage direct au niveau du sol

L'éclairage direct s'exprime donc:

$$E_{dir}(P, \vec{n}_i, \lambda) = E_{TOA}(\lambda) \Theta(P) \langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle T_{dir}^\downarrow(P, \theta_s, \lambda) \quad (22)$$

Avec $\langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle$ le produit scalaire entre la normale à la surface $\vec{N}(P)$ et la direction d'incidence \vec{n}_i , et θ_s l'angle zénithal d'incidence solaire.

L'éclairement direct en sol plat E_{dir}^{pla} , à l'altitude z_p , pour un angle zénithal solaire θ_s , est calculé par MODTRAN4 (ou 6S pour la validation), à partir de la luminance directe-directe $L_{dir-dir}^{mod}$ et de la transmission directe montante T_{dirmod}^{\uparrow} , calculées dans les conditions atmosphériques et d'incidence de la scène à inverser, et pour un angle de visée θ_c . Pour ce calcul, la réflectance du sol est égale à 1 sur l'ensemble du spectre.

$$E_{dir}^{pla}(z_p, \theta_c, \lambda) = \frac{L_{dir-dir}^{mod}(z_p, \theta_c, \lambda)}{T_{dirmod}^{\uparrow}(z_p, \theta_c, \lambda)} \quad (23)$$

On en déduit donc l'éclairement incident sur chaque pixel en fonction de la pente locale définie par la normale au pixel:

$$E_{dir}(P, \vec{n}_i, \lambda) = E_{dir}^{pla}(z_p, \theta_s, \lambda) \Theta(P) \frac{\langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle}{\cos(\theta_s)} \quad (24)$$

La formule analytique utilisée dans SIERRA pour modéliser l'éclairement direct étant identique à celle d'AMARTIS, il n'y a donc pas de différences sur les résultats obtenus (Figure 28).

La Figure 28 illustre les différences d'éclairement direct sur la scène imputables au relief. Dans le cas présenté, cette grandeur varie d'un facteur 2 entre le versant exposé au soleil et celui où l'incidence est la plus grande.

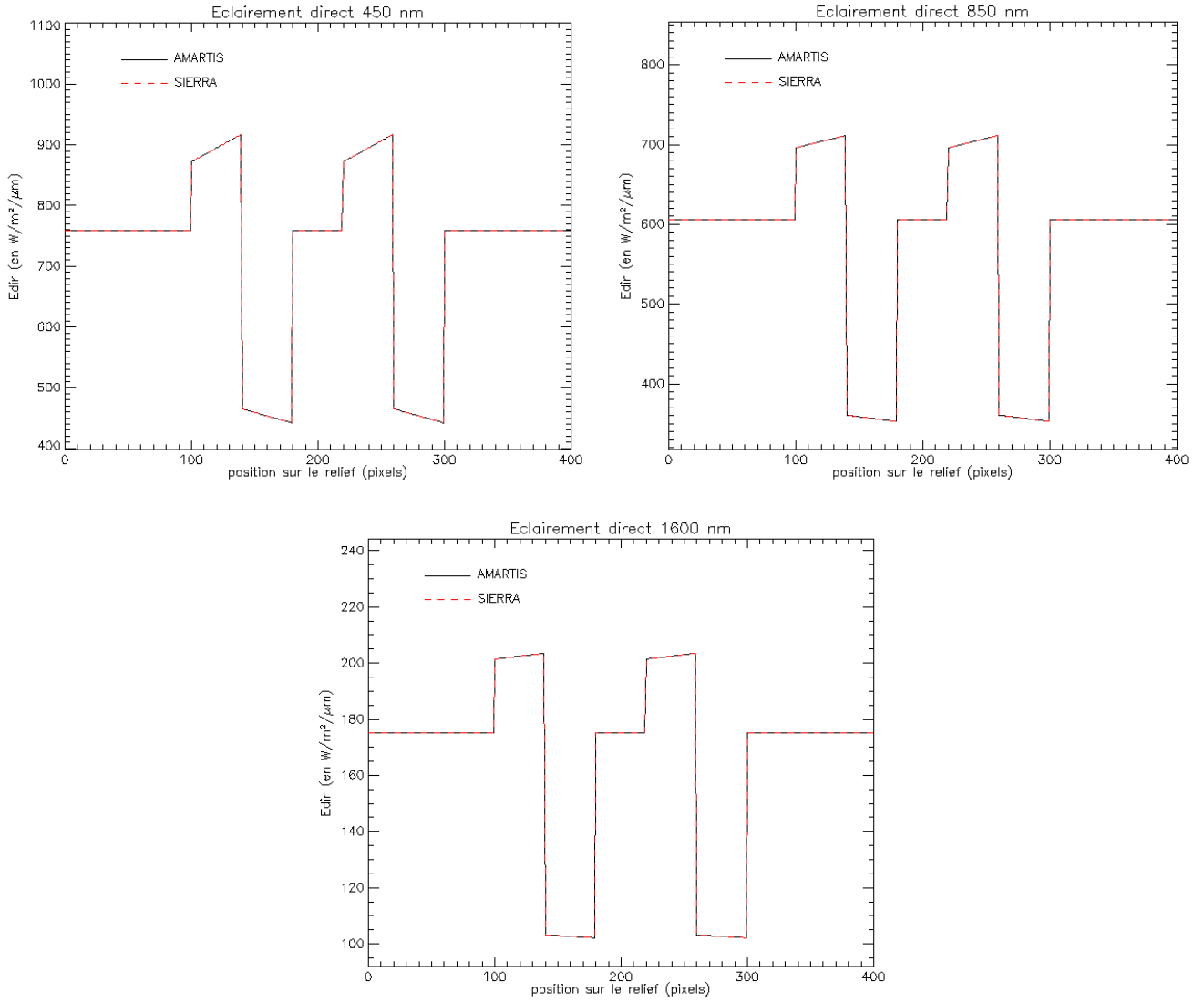


Figure 28: Comparaison entre les éclairages directs calculés avec SIERRA et AMARTIS

3.1.2. Eclairage diffus

La diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère est due à la diffusion par les molécules, qui est quasiment isotrope, et par les particules d'aérosols, qui privilégient la diffusion vers l'avant. Ce pic de diffusion avant augmente avec la taille des particules. Les phénomènes de diffusion sont donc fortement liés au type et à la quantité d'aérosols. En raison de son anisotropie, l'éclairage diffus dépend des conditions d'incidence. D'autre part, le relief coupe une partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère, ce qui tend à diminuer l'éclairage diffus par rapport à celui que recevrait un sol plat. Une formulation précise est implémentée dans le code AMARTIS qui nous sert de référence (équation 5).

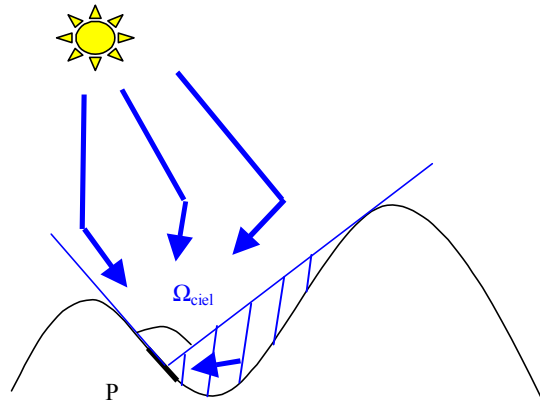


Figure 29: Eclairage diffus incident

Une telle formulation serait très coûteuse en temps de calcul car elle nécessite le calcul complet de la sphère de luminances par MODTRAN4, qui dépend de l'altitude du pixel.

Sandmeier [22] a développé une méthode approchée, utilisée dans le code ATCOR4, pour estimer cette quantité. L'éclairage diffus calculé en sol plat, E_{dif}^{pla} , est séparé en une composante isotrope (Equation 25, terme (2)), modulée par le coefficient de vue du ciel V_{ciel} (angle de vue du ciel normalisé), et une composante anisotrope (Equation 25, terme (1)) dans la direction d'incidence solaire, dont le calcul est similaire à celui de l'éclairage direct:

$$E_{diffus}(P, \vec{n}_i, \lambda) = E_{dif}^{pla}(z_p, \theta_s, \lambda) \left[\Theta(P) T_{dir}^\downarrow(P, \theta_s, \lambda) \langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle / \cos \theta_s + \left\{ 1 - \Theta(P) T_{dir}^\downarrow(P, \theta_s, \lambda) \right\} V_{ciel}(P) \right] \quad (25)$$

(1)
(2)

Ce modèle ne tient pas compte des variations de luminances directionnelles en dehors de la direction d'incidence solaire. Un nouveau modèle approché, dépendant du type d'atmosphère, a donc été développé pour prendre en compte ces variations tout en gardant un temps de calcul raisonnable. Cette méthode est dérivée du modèle AMARTIS. Elle est basée sur l'intégration angulaire des luminances directionnelles incidentes. L'intégration est effectuée de manière à tenir compte de l'anisotropie de la diffusion, et des variations de luminances directionnelles, très importantes aux alentours de la direction d'incidence, et moindres en s'en éloignant.

La sphère de luminances est découpée en dix zones de diffusion (neuf pour la diffusion avant et une pour la rétro-diffusion). Chaque zone est conique et centrée sur la direction d'incidence solaire. Leur taille augmente avec l'éloignement de la direction d'incidence. Le découpage de la sphère de luminances est représenté Figure 31, une couleur étant attribuée à chaque zone de diffusion. Cette modélisation considère une symétrie axiale par rapport à la direction d'incidence solaire, bien qu'en réalité, il existe une dissymétrie car les basses couches atmosphériques diffusent davantage que les hautes couches (Figure 30).

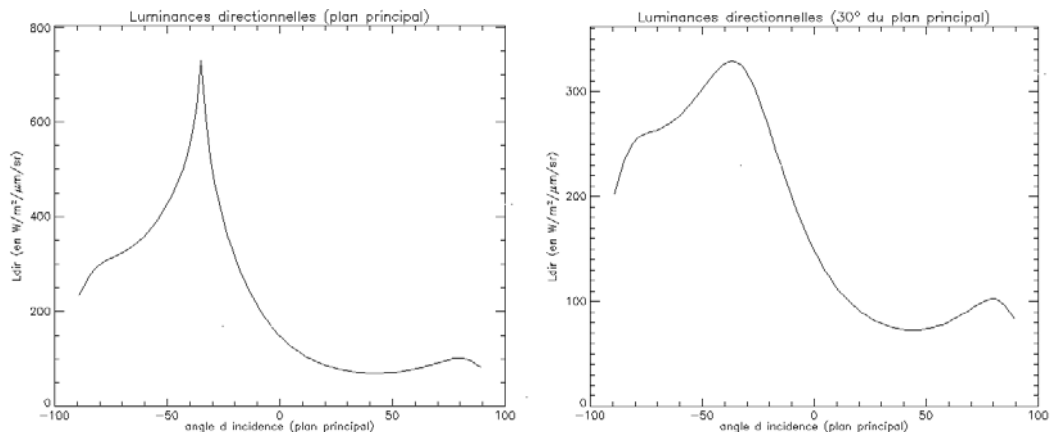


Figure 30: Luminances directionnelles descendantes calculées pour une incidence de 35° , dans le plan principal (à gauche) et dans un plan décalé de 30° par rapport au plan principal (à droite)

Pour prendre en compte cette dissymétrie, les zones 2 à 9 sont chacune divisées en deux parties: le demi-cône situé sous la direction d'incidence solaire (partie hachurée Figure 31), et le demi-cône supérieur (partie non hachurée Figure 31). On émet l'hypothèse que les luminances directionnelles ne varient pas à l'intérieur de chaque zone. Par conséquent, pour estimer l'éclairement diffus en un point de la scène, le calcul d'un maximum de dix-huit luminances directionnelles est nécessaire. Ces luminances sont calculées avec MODTRAN4 (ou 6S) sur une grille d'altitudes comprises entre l'altitude minimale et l'altitude maximale de la scène (le pas d'échantillonnage est défini par l'utilisateur). Ces calculs sont effectués dans les conditions atmosphériques et d'incidence solaire de la scène à inverser. Le capteur est positionné au niveau du sol et vise vers le ciel.

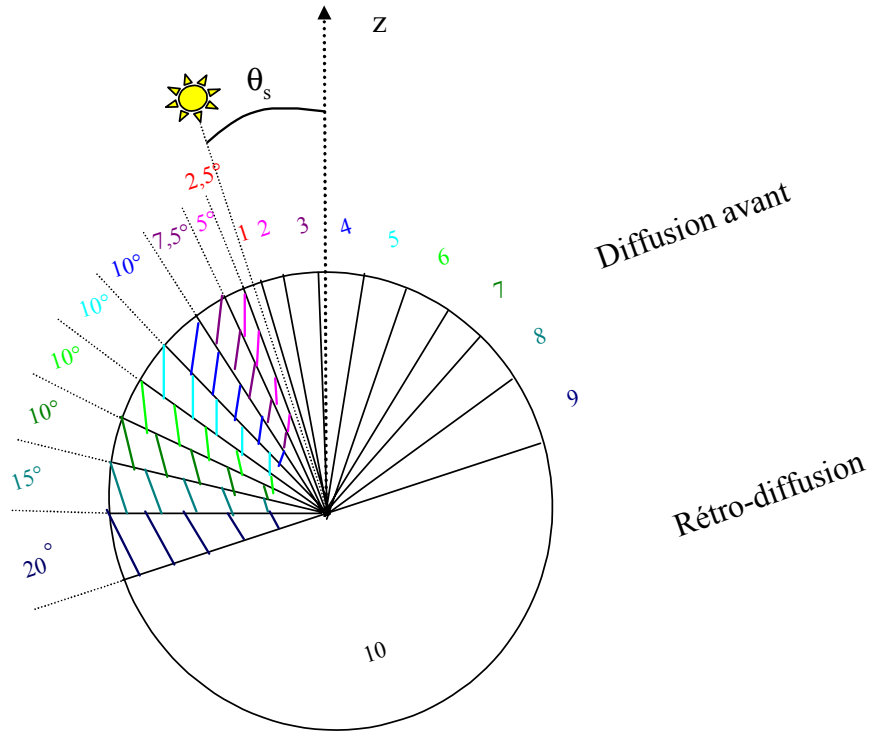


Figure 31: Découpage de la sphère de luminances pour le calcul de l'éclairement diffus dans SIERRA

Chaque zone est repérée par les indices k (k=1,10) et h (h=0 en dessous de la direction d'incidence et h=1 au dessus). Il lui correspond une direction $(\theta_{k,h}, \varphi_{k,h})$ pour laquelle on calcule la luminance directionnelle descendante $L_d^{k,h}$.

Les luminances directionnelles incidentes sont calculées avec MODTRAN4 [2] puis intégrées sur l'angle solide de vue du ciel. La taille de chaque zone de diffusion dépend du découpage de la sphère de luminance mais aussi de l'angle solide de vue du ciel. L'éclairement diffus estimé en P à l'altitude z_p , est donc obtenu suivant l'équation:

$$E_{diffus}(P, \vec{n}_i, \lambda) = \sum_{k=1,10} \sum_{h=0,1} L_d^{k,h}(z_p, \theta_{k,h}, \varphi_{k,h}, \lambda) \iint_{\{zone\ k,h\} \subset \Omega_{ciel}} \langle \vec{n}_i \cdot \vec{N}(P) \rangle d\omega \quad (26)$$

où Ω_{ciel} est l'angle solide de vue du ciel, et $d\omega$ l'angle solide élémentaire tel que $d\omega = \sin\theta_1 d\theta_1 d\varphi_1$, où θ_1 et φ_1 sont respectivement les angles zénithaux et azimutaux définissant la direction d'incidence \vec{n}_i de la luminance directionnelle descendante. Pour les zones 1 et 10, on a $L_d^{k,0} = L_d^{k,1}$.

Avant de calculer l'éclairement diffus sur la scène, on détermine, dans les conditions atmosphériques de l'acquisition, les directions $(\theta_{k,h}, \varphi_{k,h})$ les plus appropriées au calcul des luminances directionnelles $L_d^{k,h}$ dans chaque zone (k,h) . Suivant le modèle d'AMARTIS, on calcule l'éclairement diffus pour un sol plat situé à l'altitude minimale de la scène. Ce calcul est effectué à 550 nm. L'intégration est effectuée avec un pas d'échantillonnage de 1° en zénith et 2° en azimut. Les directions $(\theta_{k,h}, \varphi_{k,h})$ sont choisies de manière à ce que l'éclairement diffus calculé suivant le modèle de SIERRA soit le plus proche possible de celui calculé par AMARTIS.

Le modèle SIERRA néglige les phénomènes de diffusion issus de la portion d'atmosphère comprise entre le relief et l'angle solide de vue du ciel Ω_{ciel} (partie hachurée, Figure 29), ce qui peut avoir un impact important sur l'éclairement diffus pour des reliefs très marqués.

Les calculs d'éclairement diffus effectués avec SIERRA sont comparés avec ceux d'AMARTIS et d'ATCOR4. Les résultats obtenus pour le scénario défini en introduction du paragraphe 3 (Figure 26) sont présentés Figure 32.

L'éclairement diffus calculé par SIERRA à 450 nm est quasiment identique à celui calculé par AMARTIS, pour les zones planes ou en incidence rasante. L'erreur relative maximale de 3% apparaît sur les pentes les plus éclairées (pixels 100 à 139 et 220 à 259). Le modèle utilisé dans ATCOR4 [19] est moins précis, et les erreurs relatives atteignent 13 % sur les pentes éclairées en incidence rasante (pixels 140 à 179 et 260 à 299).

A 850 nm et 1600 nm, notre modèle suit bien les variations d'éclairement dues au relief, mais un léger biais apparaît avec des erreurs relatives maximales situées en sol plat (pixels 180 à 219), et qui sont de 8 % à 850 nm et 14 % à 1600 nm. Ces erreurs sont cependant faibles en absolu, dans un domaine spectral où l'éclairement direct est prédominant. L'erreur relative engendrée sur la somme des éclairagements directs et diffus, qui sont les termes d'éclairement de premier ordre, ne dépasse pas 1,5 % pour ces deux longueurs d'onde, dans le cas étudié.

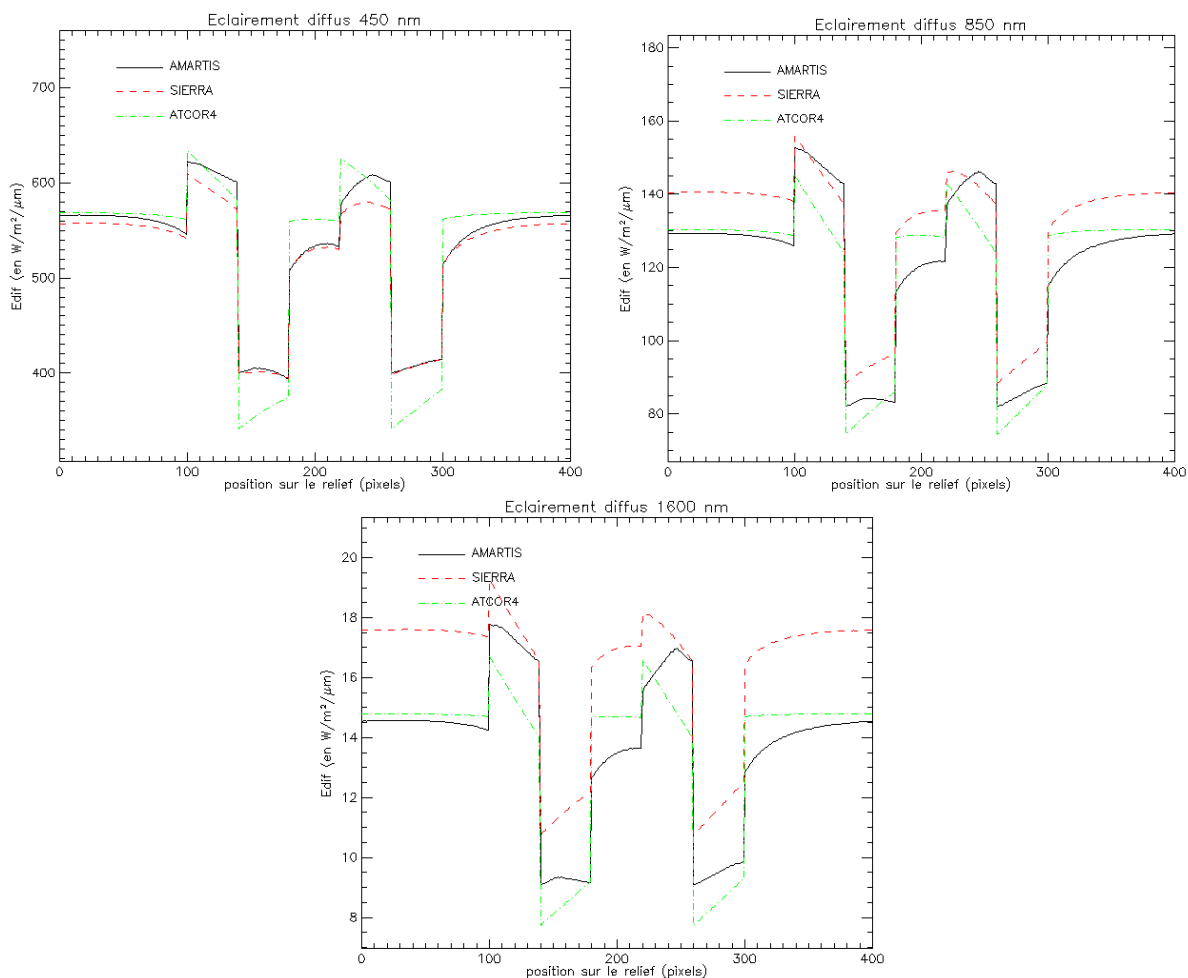


Figure 32: Comparaison entre les éclairages diffus calculés par les codes AMARTIS, ATCOR4 et SIERRA.

Une validation plus exhaustive est présentée dans l'annexe 1, paragraphe 1.1. Pour les simulations effectuées sur le même relief en changeant le type d'atmosphère et sa composition en aérosols (milieu tropical, aérosols maritimes et visibilité de 9 km, annexe 1, paragraphe 1.1.2), ou pour un angle d'incidence plus grand (angle zénithal solaire de 55° , annexe 1, paragraphe 1.1.3), le modèle de SIERRA pour estimer l'éclairage diffus engendre moins de 3% d'erreur sur l'éclairage total. Dans le cas d'un relief très marqué (annexe 1, paragraphe 1.1.4), l'erreur engendrée sur l'éclairage total est inférieure à 5%.

Avec ATCOR4, l'erreur maximale engendrée sur l'éclairage total varie entre 10% et 15% suivant la longueur d'onde, pour une incidence solaire de 55° (annexe 1, paragraphe 1.1.3). Pour un relief très marqué (annexe 1, paragraphe 1.1.4), cette erreur atteint 15% à 450 nm.

3.1.3. Eclairage de couplage terre-atmosphère

L'éclairage de couplage provient d'une succession d'interactions entre le sol et l'atmosphère (Figure 33). Dans le cas d'un sol plat homogène, l'éclairage incident étant constant sur la scène, cet éclairage peut s'exprimer sous la forme d'une somme géométrique de raison $s_p \times S_{atm}$, où s_p est la réflectance lambertienne du sol, et S_{atm} est l'albédo atmosphérique:

$$E_{couplage}(\theta_s, \lambda) = E_{tot}(\theta_s, \lambda) \sum_{k=1}^{\infty} (s_p(\lambda) S_{atm}(\lambda))^k = E_{tot}(\theta_s, \lambda) \frac{s_p(\lambda) S_{atm}(\lambda)}{1 - s_p(\lambda) S_{atm}(\lambda)} \quad (27)$$

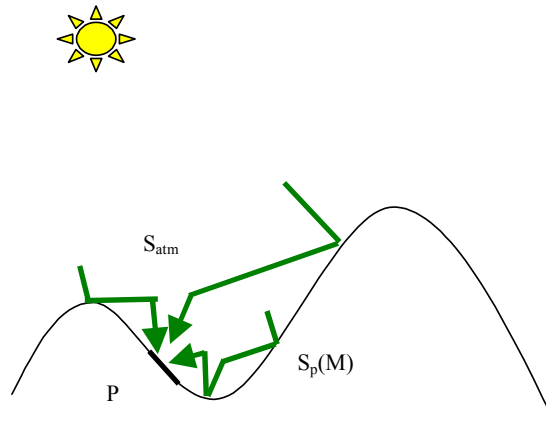


Figure 33: Eclairage de couplage terre-atmosphère

Pour un sol plat hétérogène, on peut appliquer la même formulation en remplaçant la réflectance du sol par une réflectance de l'environnement s_p^e . Cette réflectance est obtenue en intégrant l'ensemble des réflectances de la scène pondérées par une fonction d'environnement G_{envt} .

$$E_{couplage}(P, \theta_s, \lambda) = E_{tot}(z_p, \theta_s, \lambda) \frac{s_p^e(P, \lambda) S_{atm}(\lambda)}{1 - s_p^e(P, \lambda) S_{atm}(\lambda)} \quad \text{avec} \quad s_p^e(P, \lambda) = \iint_{V(P)} s_p(M, \lambda) G_{envt}(R_{MP}, z_p, \theta_s, \lambda) dS_M \quad (28)$$

La fonction d'environnement G_{envt} exprime la probabilité que le rayonnement soit réfléchi par un pixel M situé à une distance R_{MP} du pixel cible P. Elle dépend des conditions atmosphériques. Elle est obtenue de manière précise à l'aide d'un module Monte-Carlo. Dans le code 6S, une formule approchée a été définie dans le cas d'un sol plat, pour une cible située dans un environnement homogène.

En zone montagneuse, il n'existe pas de formule approchée, car l'éclairage de couplage dépend directement du relief de la scène, et varie donc d'un pixel à l'autre. L'unique méthode précise consiste à utiliser un module Monte-Carlo [12]. Une telle estimation de l'éclairage de couplage nécessite donc un

temps de calcul élevé, ce qui n'est pas envisageable dans un processus d'inversion. Dans la formulation développée par Sandmeier [22], ce terme est négligé.

Les nombreuses simulations effectuées avec AMARTIS montrent que généralement, la valeur de l'éclairement de couplage varie peu sur une scène. Une formulation simple, correspondant au cas d'un sol plat homogène, a donc été choisie pour en estimer un ordre de grandeur:

$$E_{\text{couplage}}(\lambda) = E_{\text{tot}}^{\text{moy}}(\lambda) \frac{s_p^{\text{moy}}(\lambda) S_{\text{atm}}(\lambda)}{1 - s_p^{\text{moy}}(\lambda) S_{\text{atm}}(\lambda)} \quad (29)$$

Avec $E_{\text{tot}}^{\text{moy}}$ et s_p^{moy} respectivement l'éclairement moyen et la réflectance moyenne sur la scène. L'albédo atmosphérique S_{atm} est déduit de calculs effectués avec MODTRAN4 [2]. Dans les conditions d'acquisition de la scène, la luminance totale mesurée par un capteur $L_{\text{tot}}^{\text{mod}}$ est calculée à l'altitude minimale de la scène, pour trois valeurs de réflectance: $\rho=1$, $\rho=0,5$, et $\rho=0$. L'albédo sphérique est déduit de trois formules:

$$L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 1, \lambda) = \frac{T_{\text{tot mod}}^{\uparrow}(\lambda)(E_{\text{dir}}^{\text{pla}}(\lambda) + E_{\text{dif}}^{\text{pla}}(\lambda))}{1 - S_{\text{atm}}(\lambda)} + L_{\text{atm}}(\lambda) \quad (30)$$

$$L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 0,5, \lambda) = \frac{T_{\text{tot mod}}^{\uparrow}(\lambda)(E_{\text{dir}}^{\text{pla}}(\lambda) + E_{\text{dif}}^{\text{pla}}(\lambda))}{2 - S_{\text{atm}}(\lambda)} + L_{\text{atm}}(\lambda) \quad (31)$$

$$L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 0, \lambda) = L_{\text{atm}}(\lambda) \quad (32)$$

D'où

$$S_{\text{atm}}(\lambda) = \frac{L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 1, \lambda) + L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 0, \lambda) - 2 L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 0,5, \lambda)}{L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 1, \lambda) - L_{\text{tot}}^{\text{mod}}(\rho = 0, \lambda)} \quad (33)$$

Avec $T_{\text{tot mod}}^{\uparrow}$ la somme des transmissions directes et diffuses montantes calculées par MODTRAN4.

L'éclairement de couplage calculé avec SIERRA est comparé avec AMARTIS, suivant le scénario défini paragraphe 3. Le modèle de SIERRA fournit un éclairement de couplage moyen sur l'image, pouvant créer des erreurs relatives de 20 % sur ce terme (Figure 34). L'éclairement de couplage étant un terme de second ordre, l'erreur relative engendrée sur l'éclairement total reste cependant très faible puisqu'elle ne dépasse pas 1% dans le cas étudié.

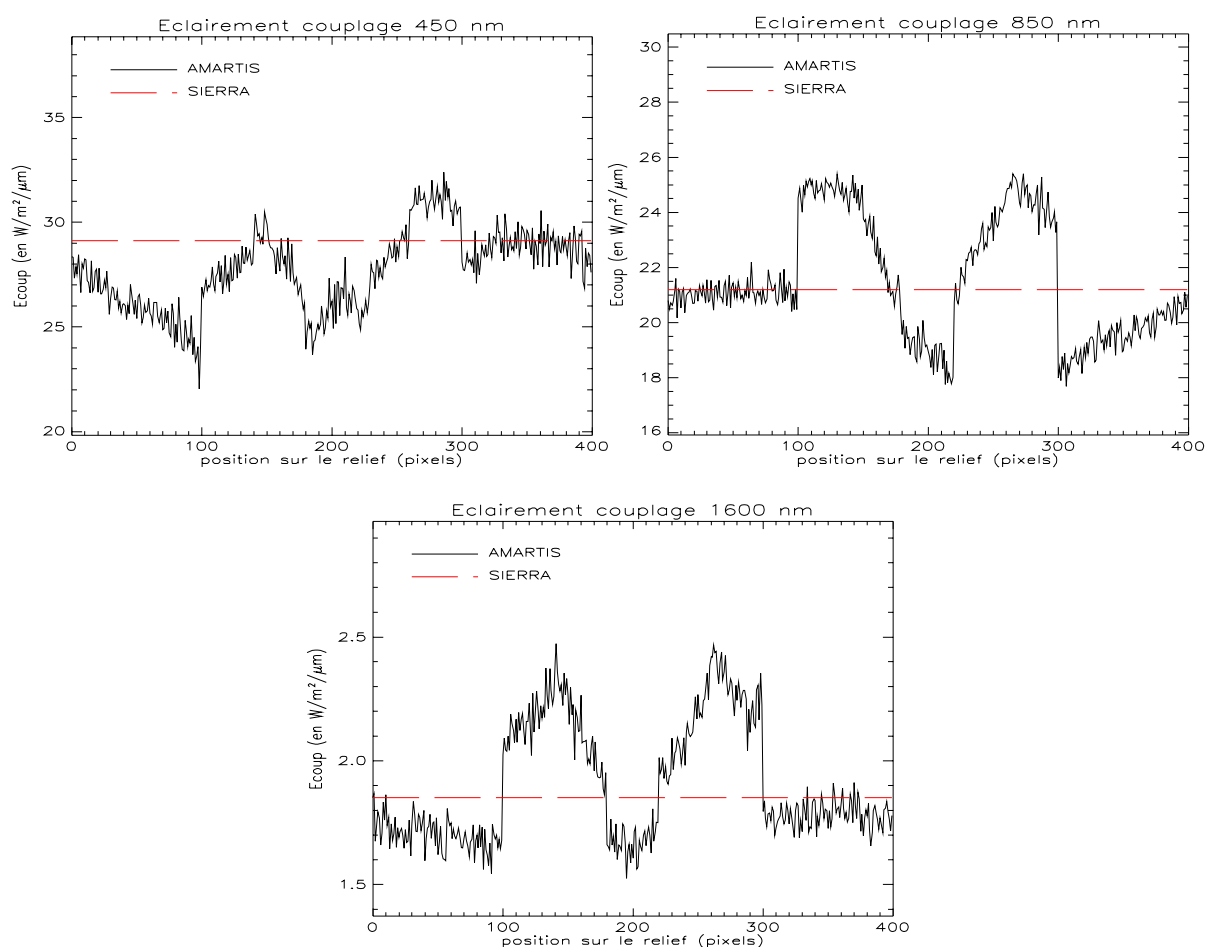


Figure 34: Comparaison entre les éclairagements de couplage calculés par SIERRA et AMARTIS

Les autres scénarios de validation sont présentés dans l'annexe 1. Dans les deux cas simulés sur le même relief, avec le modèle de SIERRA pour calculer l'éclairagement de couplage, l'erreur sur l'éclairagement total est inférieure à 3%, alors que lorsqu'on néglige ce terme, elle oscille entre 5% et 12% en fonction de la longueur d'onde (annexe 1, paragraphes 1.1.2 et 1.1.3). Dans le quatrième scénario, l'éclairagement de couplage contribue à moins de 3% de l'éclairagement total (annexe 1, paragraphe 1.1.4).

3.1.4. Eclairage réfléchi par le voisinage

Pour un pixel donné, l'éclairage réfléchi correspond à l'éclairage incident sur le relief environnant, réfléchi par celui-ci et transmis directement jusqu'au pixel (Figure 35). Pour estimer cette composante, AMARTIS utilise au choix un module Monte-carlo ou une formule analytique précise [12].

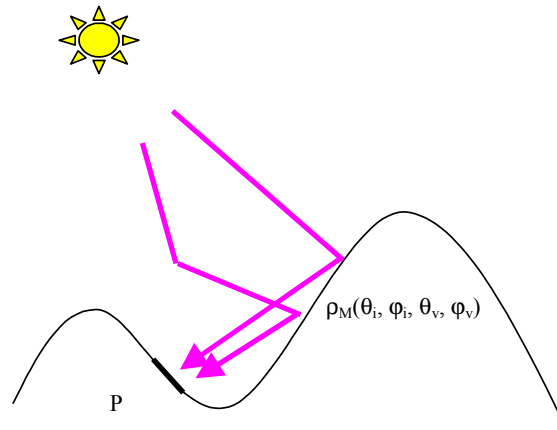


Figure 35: Eclairage réfléchi par le voisinage de la cible

Sandmeier a développé un modèle approché permettant d'estimer cette quantité [22]. Ce modèle, utilisé dans ATCOR4, prend en compte le relief environnant via un coefficient correspondant à l'angle solide de vue du terrain normalisé V_t (équation 35). La somme des éclairages direct et diffus en sol plat, E_{tot}^{plat} , est calculée par MODTRAN4 [2], à partir de la luminance directe L_{dir}^{mod} , obtenue pour une réflectance égale à 1, en considérant un sol plat à l'altitude du pixel P (équation 34).

$$E_{tot}^{plat}(z_p, \lambda) = (1 - S_{atm}(\lambda)) \frac{L_{dir}^{mod}(z_p, \rho = 1, \lambda)}{T_{dir}^{mod}(\lambda)} \quad (34)$$

$$E_{ref}(P, \lambda) = E_{tot}^{plat}(z_p, \lambda) s_p^{ref}(P, \lambda) V_{ter}(P) \quad (35)$$

Sandmeier calcule la réflectance de l'environnement s_p^{ref} avec un filtre passe-bas, sous la forme d'une exponentielle décroissante, et sur un voisinage défini par un rayon de 0,5 km autour du pixel cible. Cette approche peut se justifier par le fait que la transmission atmosphérique diminue lorsque les pixels réfléchissants s'éloignent du pixel cible. Cependant, elle tend à donner trop d'importance au voisinage proche de la cible, même si les pixels voisins ne réfléchissent pas de rayonnement vers la cible (s'ils se trouvent sur la même pente ou s'ils ne sont pas vus par la cible). Dans SIERRA, on a donc opté pour un calcul plus

simple et plus rapide de la réflectance de l'environnement, en effectuant une moyenne des réflectances sans pondération. Les résultats fournis par les deux méthodes sont quasiment identiques dans les cas simulés.

Cette approche fournit des résultats du même ordre de grandeur que ceux d'AMARTIS, même si dans le cas de relief importants ou d'angles d'incidence élevés, des erreurs relatives significatives apparaissent. Ces erreurs sont notamment importantes lorsque les pixels réfléchissants sont fortement éclairés.

Cette méthode ne prend pas en compte les variations de l'éclairement sur le voisinage de la cible. La transmission atmosphérique entre les pixels environnant et le pixel cible, ainsi que les effets bidirectionnels de la réflectance ne sont pas non plus considérés. D'autre part, il n'y a pas de distinction entre les pixels de l'environnement qui sont vus par la cible et ceux qui ne le sont pas.

L'éclairement réfléchi par le voisinage, calculé par SIERRA, ATCOR4, et AMARTIS sur la scène définie en introduction du paragraphe 3, est présenté Figure 36. Pour ce calcul, la scène a été périodisée. Les codes SIERRA et ATCOR4 obtiennent des résultats quasiment identiques. Ces modèles fournissent des résultats cohérents lorsque les reliefs sont proches, et lorsqu'il n'y a pas de fort contraste de réflectance entre le voisinage réfléchissant le rayonnement et le voisinage proche de la cible. Dans les autres cas, des erreurs d'estimation significatives peuvent apparaître. Cependant, l'éclairement réfléchi étant généralement un terme de second ordre, l'erreur relative créée sur l'éclairement total ne dépasse pas 5%. Cette erreur est maximale à 1600 nm, où l'éclairement réfléchi est du même ordre de grandeur que l'éclairement diffus.

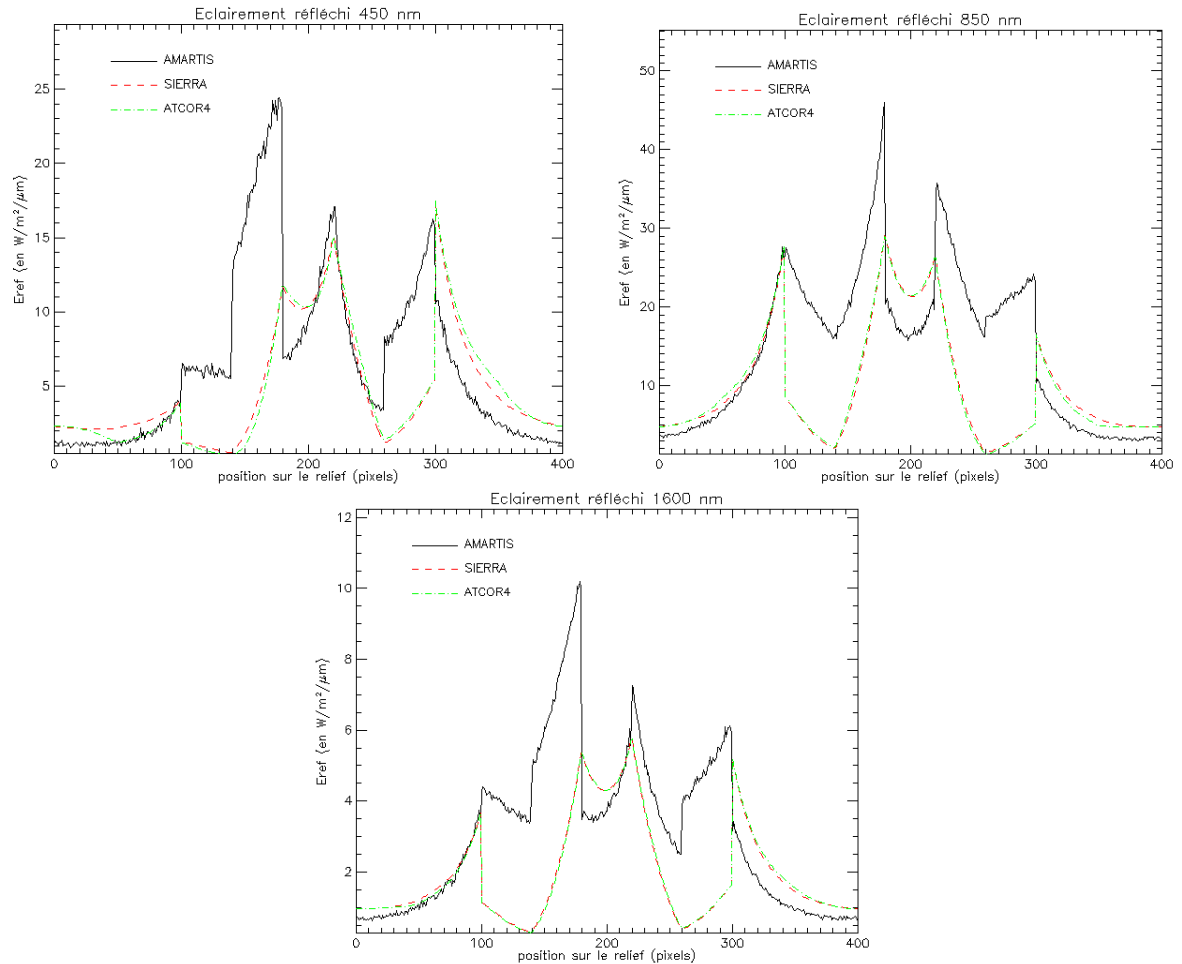


Figure 36: Comparaison entre les éclaircements réfléchis calculés par SIERRA et par AMARTIS

Dans chaque scénario de validation présenté dans l'annexe 1, les résultats obtenus avec les modèles de SIERRA et d'ATCOR4 fournissent des résultats similaires. A 450 nm, l'erreur sur ce terme engendre une erreur sur l'éclaircement total inférieure à 5% dans chaque cas simulé (annexe 1, paragraphe 1.1). Par contre, dans le proche infrarouge, cette erreur atteint 15% sur les pentes en incidence rasante, lorsque l'angle d'incidence solaire est de 55° (annexe 1, paragraphe 1.1.3), et elle est de l'ordre de 10% sur le relief formé par deux montagnes dont les pentes sont de 45° (annexe 1, paragraphe 1.1.4).

3.2. Luminances diffuse et atmosphérique

3.2.1. Calcul de la luminance atmosphérique

La luminance atmosphérique est issue du rayonnement incident diffusé par l'atmosphère et transmis jusqu'au capteur sans interaction avec le sol. Elle dépend de la composition de l'atmosphère, des angles zénithaux et azimutaux solaire et de visée, et de l'épaisseur de la couche atmosphérique comprise entre le sol et le capteur.

La luminance atmosphérique est calculée à l'aide d'une LUT dont les paramètres sont l'altitude du sol et l'angle zénithal de visée. L'angle zénithal de visée varie entre 0° et l'angle de vue maximal de l'instrument. L'altitude du sol varie entre les valeurs minimale et maximale de la scène. Cette LUT est obtenue pour les conditions atmosphériques et d'incidence solaire correspondant à celles du survol. La luminance atmosphérique est calculée en modélisant par MODTRAN4, la luminance totale mesurée par un capteur aéroporté au-dessus d'une surface dont la réflectance est nulle. La diffusion n'étant pas isotrope, la LUT est calculée pour les deux demi-plans azimutaux de visée (φ_v et φ_v+180°).

3.2.2. Calcul de la luminance diffuse montante

Pour un pixel P de la scène, la luminance diffuse est issue du voisinage de P, chaque pixel de la scène contribuant au signal mesuré par le senseur. Pour estimer cette quantité, il est donc nécessaire de connaître l'éclairement incident et les propriétés de réflectance en tout point de la scène.

La contribution de chaque pixel de l'environnement de P pour le calcul de la luminance diffuse montante est estimée à l'aide d'une fonction d'environnement. Cette fonction qui dépend des conditions atmosphériques, des angles de visée, et du relief de la scène, ne peut être estimée de façon exacte qu'avec un module Monte-carlo.

Une formule approchée a été développée pour exprimer analytiquement cette fonction dans le cadre d'un sol plat [26] [28]. Ce modèle est utilisé dans le code de transfert radiatif 6S. Il se décompose en deux fonctions exponentielles décroissantes avec la distance, F_r et F_a . La fonction F_r estime la contribution de la diffusion moléculaire pour les effets d'environnement et F_a celle due à la diffusion par les aérosols. Elles sont pondérées respectivement par des rapports entre la transmission diffuse moléculaire (t_{dif}^r) et des aérosols (t_{dif}^a) et la transmission totale T_{dif}^\uparrow .

La fonction E_{envt} qui définit la contribution d'une cible de rayon R située dans un environnement homogène, s'exprime en visée nadir par:

$$E_{envt}^{6S}(P, R, \theta_c = 0^\circ, \lambda) = \frac{t_{dif}^r(P, \theta_c = 0^\circ, \lambda)F_r(P, R, \theta_c = 0^\circ) + t_{dif}^a(P, \theta_c = 0^\circ, \lambda)F_a(P, R, \theta_c = 0^\circ)}{T_{dif}^\uparrow(P, \theta_c = 0^\circ, \lambda)} \quad (36)$$

avec
$$F_r(P, R, \theta_c = 0^\circ) = 1 - cr1 \times e^{-cr2 \times R} - (1 - cr1)e^{-0.08R} \quad (37)$$

et
$$F_a(P, R, \theta_c = 0^\circ) = 1 - ca1 \times e^{-ca2 \times R} - (1 - ca1)e^{-ca3 \times R} \quad (38)$$

Les coefficients cr1, cr2, ca1, ca2 et ca3 sont des paramètres dépendant de l'altitude du capteur z_c .

Il est possible de prendre en compte les variations de F_r et F_a avec l'angle de visée du pixel cible, θ_c , en effectuant la correction suivante [28]:

$$F_r(P, R, z_c, \theta_c) = F_r(P, R, 0^\circ) [\ln(\cos \theta_c)(1 - F_r(P, R, 0^\circ)) + 1] \quad (39)$$

$$F_a(P, R, \theta_c) = F_a(P, R, 0^\circ) \left[\begin{aligned} & [1 + a_0 \ln(\cos \theta_c) + b_0 \ln(\cos \theta_c)^2] + \\ & F_a(P, R, 0^\circ) [a_1 \ln(\cos \theta_c) + b_1 \ln(\cos \theta_c)^2] + \\ & F_a(P, R, 0^\circ)^2 [(-a_1 - a_0) \ln(\cos \theta_c) + (-b_1 - b_0) \ln(\cos \theta_c)^2] \end{aligned} \right] \quad (40)$$

On en déduit le poids de chaque pixel du voisinage par dérivation de la fonction E_{envt} :

$$F_{envt}^{6S}(P, R, \theta_c, \lambda) = 1/(2\pi R) \frac{d}{dR} E_{envt}^{6S}(P, R, \theta_c, \lambda) \quad (41)$$

Pour calculer la luminance diffuse totale atteignant le capteur, on intègre la luminance diffuse issue de chaque pixel, pondérée par la fonction d'environnement, sur le voisinage $V(P)$ centré sur la cible P et de rayon R_{max} . Dans SIERRA, la fonction d'environnement est normée sur le voisinage $V(P)$.

A l'instar de la luminance directe, la luminance diffuse se décompose en deux termes, en fonction du rayonnement incident. L'albédo sphérique est utilisé pour les réflexions des éclairissements diffus, réfléchis et de couplage alors que l'on considère la réflectance directionnelle-hémisphérique pour la réflexion de l'éclairissement direct. La luminance diffuse s'écrit

$$L_{dif}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = L_{dif}^{dir}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) + L_{dif}^{dif-ref-coup}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) \quad (42)$$

avec
$$L_{dif}^{dir}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = \frac{\iint_{V(P)} \frac{a_v(M, \vec{n}_v, \lambda)}{\pi} E_{dir}(M, \vec{n}_i, \lambda) F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R, \theta_c, \lambda) dS_M} \times T_{dif}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda) \quad (43)$$

et

$$L_{dif}^{dif-ref-coup}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = \frac{\iint_{V(P)} \frac{s_p(M, \lambda)}{\pi} E_{dif-ref-coup}(M, \vec{n}_i, \lambda) F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R, \theta_c, \lambda) dS_M} \times T_{dif}^{\uparrow}(P, \theta_c, \lambda) \quad (44)$$

où

$$E_{dif-ref-coup}(M, \vec{n}_i, \lambda) = E_{dif}(M, \vec{n}_i, \lambda) + E_{coup}(M, \lambda) + E_{ref}(M, \lambda) \quad (45)$$

La transmission diffuse totale est déduite de calculs effectués dans les conditions d'acquisition avec MODTRAN4, suivant la formule:

$$T_{dif}^{\uparrow}(\theta_c, \lambda) = \left(L_{tot}^{mod}(\theta_c, \rho = 1, \lambda) - L_{tot}^{mod}(\theta_c, \rho = 0, \lambda) \right) \frac{1 - S_{atm}(\lambda)}{E_{tot}^{plat}(\lambda)} - T_{dir}^{\uparrow}(\theta_c, \lambda) \quad (46)$$

La transmission diffuse moléculaire est obtenue avec la même formule, mais les calculs MODTRAN4 sont réalisés pour une visibilité de 100 km afin d'enlever l'influence des aérosols. La transmission diffuse due aux aérosols est déduite de la transmission diffuse totale et de la transmission diffuse moléculaire.

Généralement, le voisinage de la cible qui contribue au rayonnement diffus montant, est délimité par un rayon de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. La fonction d'environnement E_{envt}^{6S} , qui représente la proportion du rayonnement diffus montant issu d'un disque de rayon R, est tracée Figure 37 à 450 nm, dans le cas d'un capteur situé à 100 km d'altitude, en visée nadir, pour une atmosphère de type milieu tempéré été, composée d'aérosols continentaux dont la charge est déterminée par une visibilité de 15 km. 50% du rayonnement diffus montant provient d'un disque de rayon 5 km, 75% d'un disque de rayon 10 km, et 99% d'un disque de rayon 50 km.

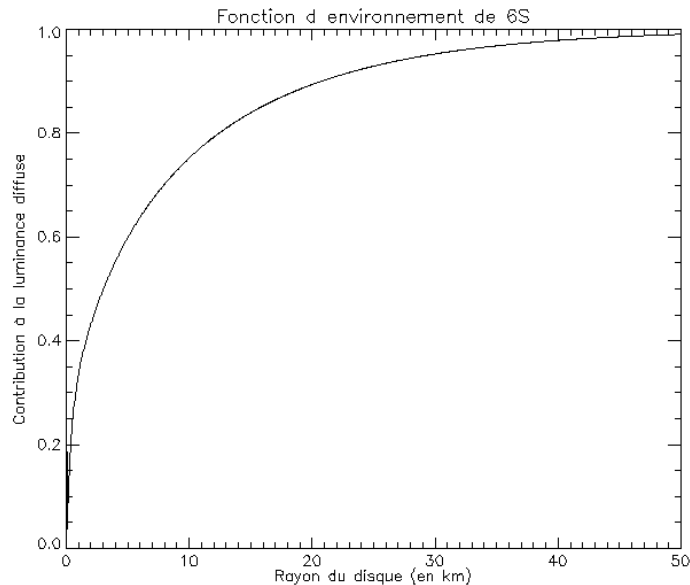


Figure 37: Fonction d'environnement E_{envt}^{6S} obtenue à 450 nm, pour un capteur situé en haut de l'atmosphère, en visée nadir, et une atmosphère de type milieu tempéré été, composée d'aérosols continentaux pour une visibilité de 15 km.

La précision du calcul de la luminance diffuse montante dépend donc du rayon R_{max} utilisé pour déterminer la taille du voisinage $V(P)$. Un exemple de luminance diffuse est présenté Figure 38, à 450 nm et 850 nm, pour trois rayons R_{max} différents (5 km, 10 km, et 50 km), dans les conditions d'acquisition définies Figure 26. Dans chacun des cas simulé, la luminance diffuse calculée par SIERRA varie sur la scène de la même manière que celle obtenue par AMARTIS. Pour les trois rayons R_{max} , et les deux longueurs d'onde, l'erreur maximale sur la luminance diffuse est inférieure à 10%. Si l'on prend en compte l'ensemble du voisinage contribuant au rayonnement diffus montant ($R_{max}=50$ km), les variations de luminance diffuse à 450 nm sont légèrement sous-estimées par rapport à AMARTIS, alors qu'elles sont légèrement amplifiées pour un rayon R_{max} de 5 km ou 10 km. A 850 nm, la luminance diffuse calculée par SIERRA fournit une meilleure estimation de la luminance diffuse pour un rayon de 50 km. L'impact du rayon sur la luminance diffuse calculée est cependant moindre qu'à 450 nm.

Une validation exhaustive de ce modèle est présentée dans l'annexe 1, paragraphe 1.2. Pour les différents reliefs étudiés, et pour toutes les conditions d'acquisition envisagées, ce modèle est en bon accord avec la luminance diffuse calculée par AMARTIS.

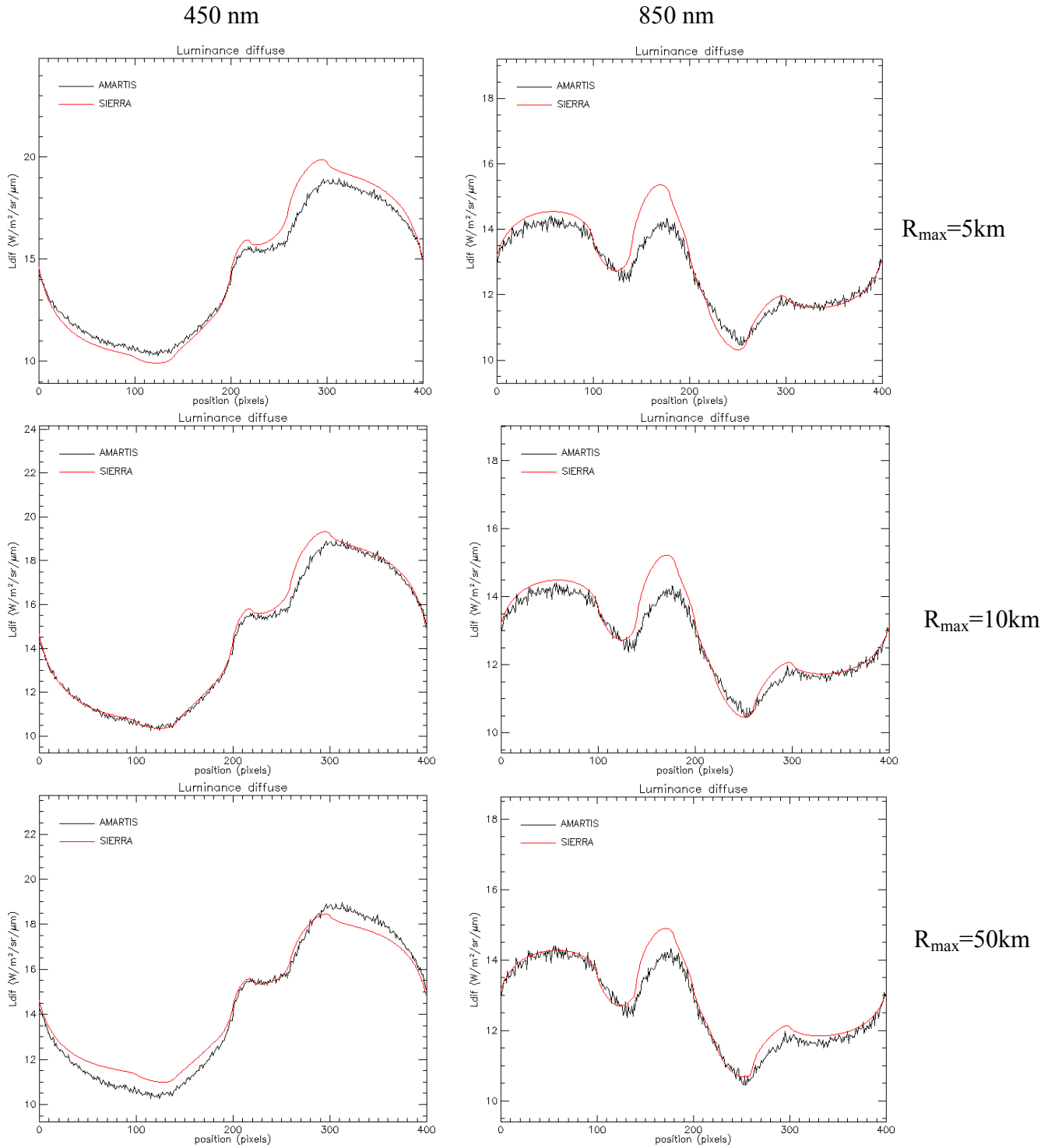


Figure 38: comparaison entre la luminance diffuse calculée par AMARTIS, et celle obtenue avec la fonction d'environnement de 6S, à 450 nm (à gauche) et à 850 nm (à droite).

3.3. Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance

Dans le code SIERRA, les effets bidirectionnels de la réflectance sont pris en compte avec le modèle à trois paramètres défini par Rahman [18]. Il est particulièrement bien adapté aux couverts végétaux ainsi qu'aux sols nus, dans tout le domaine réflectif. Il permet notamment de retranscrire les variations de réflectance pour de grands angles d'incidence et d'observation, en diffusion avant et arrière, et de modéliser les phénomènes de hot-spot et de spécularité. La formulation est complexe et non linéaire:

$$\rho(\vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = \pi k_0(\lambda) [(\cos \theta_i \cos \theta_v)(\cos \theta_i + \cos \theta_v)]^{k_1(\lambda)} F(\xi, k_2(\lambda)) [1 + R(G, k_0(\lambda))] \quad (47)$$

$$\text{avec } \vec{n}_i = \begin{pmatrix} \cos \varphi_i \sin \theta_i \\ \sin \varphi_i \sin \theta_i \\ \cos \theta_i \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{n}_v = \begin{pmatrix} \cos \varphi_v \sin \theta_v \\ \sin \varphi_v \sin \theta_v \\ \cos \theta_v \end{pmatrix}$$

où θ_i et φ_i sont respectivement les angles zénithal et azimutal d'incidence solaire, θ_v et φ_v respectivement les angles zénithal et azimutal d'émergence du flux. La réflectance peut être exprimée indifféremment en fonction des directions d'incidence \vec{n}_i et d'émergence \vec{n}_v , ou des couples d'angles (θ_i, φ_i) et (θ_v, φ_v) correspondants. k_0 , k_1 et k_2 sont les paramètres du modèle. Le paramètre k_0 , qui exprime l'intensité de la réflectance en fonction de la longueur d'onde, est appelé "composante lambertienne" car il intervient en tant que facteur des fonctions dépendantes des conditions d'incidence et de visée. k_1 est le facteur d'assombrissement et k_2 indique la contribution relative de la diffusion arrière par rapport à la diffusion avant. Ces paramètres sont calculés en ajustant le modèle de Rahman sur des mesures de réflectance bidirectionnelle.

La fonction de phase moyenne des diffuseurs, ou fonction d'Henryey Greenstein, s'écrit:

$$F(\xi, k_2(\lambda)) = \frac{1 - k_2(\lambda)^2}{[1 + k_2(\lambda)^2 - 2k_2(\lambda) \cos(\pi - \xi)]^{1,5}} \quad (48)$$

La fonction R exprime la contribution de l'effet Hot-Spot à la réflectance:*

$$R(G, k_0(\lambda)) = \frac{1 - \pi k_0(\lambda)}{1 + G} \quad (49)$$

Le modèle de Rahman ainsi défini n'est pas utilisable dans un processus d'inversion car il comporte trois inconnues: les paramètres k_0 , k_1 , et k_2 . Le choix effectué consiste à utiliser ce modèle en isolant la composante lambertienne k_0 des fonctions dépendant des conditions angulaires d'incidence et de visée. Les paramètres intervenant dans les fonctions angulaires (notés $k_1^\#$ et $k_2^\#$) sont fixés afin que l'unique inconnue du modèle soit k_0 . Ce modèle n'est cependant pas linéaire en k_0 . Aussi, dans la fonction R , qui modélise l'effet hot-spot, ce paramètre est remplacé par $k_0^\#$, déduit des valeurs de k_0 obtenues à chaque étape de l'inversion. La réflectance bidirectionnelle du pixel cible P peut donc s'écrire:

$$\begin{aligned}\rho(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) &= k_0(P, \lambda) \times \pi [(\cos \theta_i \cos \theta_v)(\cos \theta_i + \cos \theta_v)]^{k_1^\#(\lambda)} F(\xi, k_2^\#(\lambda)) [1 + R(G, k_0^\#(\lambda))] \\ &= k_0(P, \lambda) \times \rho^\#(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda)\end{aligned}\quad (50)$$

On en déduit la réflectance hémisphérique-directionnelle:

$$\begin{aligned}a_v(P, \vec{n}_v, \lambda) &= \frac{k_0(P, \lambda)}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \rho^\#(\theta, \varphi, \vec{n}_v, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= k_0(P, \lambda) \times a_v^\#(P, \vec{n}_v, \lambda)\end{aligned}\quad (51)$$

La réflectance directionnelle hémisphérique:

$$\begin{aligned}a_i(P, \vec{n}_i, \lambda) &= \frac{k_0(P, \lambda)}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \rho^\#(\vec{n}_i, \theta, \varphi, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= k_0(P, \lambda) \times a_i^\#(P, \vec{n}_i, \lambda)\end{aligned}\quad (52)$$

Ainsi que l'albédo sphérique:

$$\begin{aligned}s_p(P, \lambda) &= \frac{k_0(P, \lambda)}{\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} a_v^\#(P, \theta, \varphi, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= k_0(P, \lambda) \times s_p^\#(P, \lambda)\end{aligned}\quad (53)$$

4. ORGANIGRAMME GENERAL DU CODE SIERRA

Le code SIERRA permet de restituer les spectres de réflectance du sol à partir d'images étalonnées en luminance. Ces images doivent être orthorectifiées par rapport à un modèle numérique de terrain. Chaque pixel de l'image est de taille identique et positionné avec précision sur le relief.

En entrée de SIERRA, on fournit le modèle numérique de terrain, le type d'atmosphère et d'aérosols, la visibilité atmosphérique, les angles d'incidence solaire, l'altitude du capteur, l'angle de visée au centre de l'image et la direction de vol. On obtient en sortie une carte d'albédos sphériques de la scène.

L'équation en entrée capteur est complexe. Le calcul de l'éclairement incident et de la luminance montante fait notamment intervenir, pour un pixel cible donné, l'ensemble des réflectances du voisinage de la cible. Une inversion directe de l'équation n'est donc pas possible, et plusieurs étapes sont donc nécessaires.

Après estimation du contenu en vapeur d'eau, l'inversion est réalisée au plus en quatre étapes. Dans les deux premières étapes, le sol est considéré lambertien, alors que dans les deux dernières, les variations directionnelles de la réflectance du sol sont prises en compte. L'utilisateur peut ainsi choisir d'effectuer une inversion en deux étapes, en considérant la réflectance du sol comme lambertienne, ou de corriger le signal des effets bidirectionnels de la réflectance en quatre étapes. Dans ce cas, le type de sol est déterminé par une classification simple effectuée sur les spectres de réflectance obtenus en sortie de la deuxième étape. Trois grandes classes de sol sont considérées: les surfaces spéculaires (eau, neige), les sols rugueux (type sol nu) et la végétation. La réflectance bidirectionnelle est définie suivant le modèle à 3 paramètres développé par Rahman. Ces paramètres, $k_0^{\#}$, $k_1^{\#}$, et $k_2^{\#}$, sont fixés dans le code pour chaque type de sol. A partir de la quatrième étape, $k_0^{\#}$ est mis à jour dans chaque itération avec la valeur moyenne des k_0 estimés. Quelle que soit la méthode de résolution choisie, la dernière étape est itérée trois fois afin de converger vers la valeur optimale de réflectance.

La Figure 39 schématise les différentes étapes du code SIERRA, avec pour chacune les hypothèses simplificatrices effectuées.

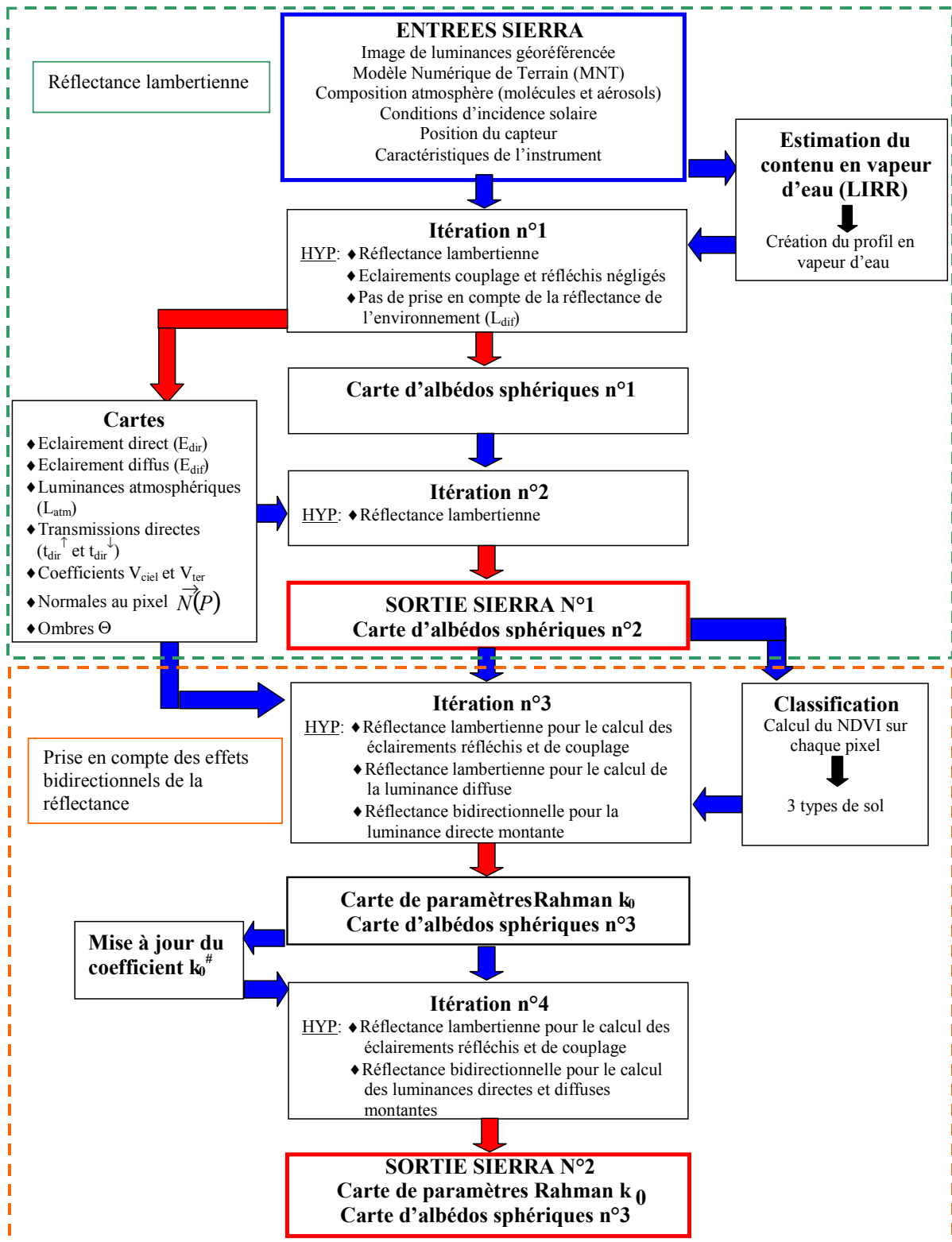


Figure 39: organigramme du code d'inversion SIERRA

5. DESCRIPTION DES DIFFERENTES ETAPES DE SIERRA

5.1. Estimation du contenu intégré en vapeur d'eau

En préambule à l'inversion, on estime un contenu intégré en vapeur d'eau moyen sur la scène. Le profil initial de vapeur d'eau est choisi parmi les modèles standards de MODTRAN4 [2], ou bien est défini par l'utilisateur.

Le contenu intégré en vapeur d'eau est estimé à partir de la bande d'absorption de vapeur d'eau à 940 nm. Il s'agit de calculer un rapport entre la luminance mesurée dans la bande d'absorption et la luminance que l'on observerait en absence d'absorption. Cette dernière est estimée par régression linéaire à partir de luminances mesurées en bordure de la bande d'absorption (la méthode Linear Regression Ratio [24], schématisée Figure 40, est utilisée pour estimer ce rapport). Le rapport obtenu à partir de spectres de luminances mesurés est ensuite comparé avec des Look Up Table regroupant les rapports LIRR calculés avec un jeu de réflectances et de contenus en vapeur d'eau représentatif de l'ensemble des cas possibles.

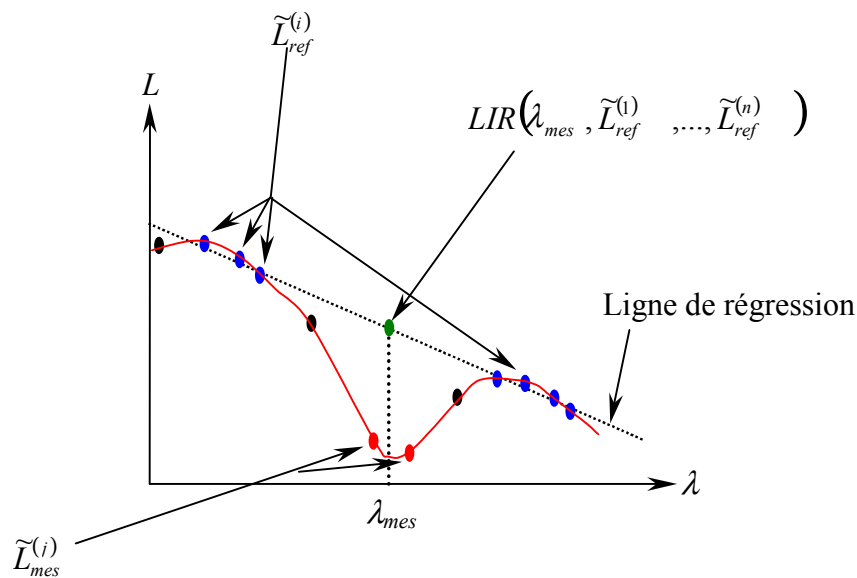


Figure 40: Principe de la méthode LIRR utilisée pour l'estimation du contenu en vapeur d'eau

Dans le cas d'une scène non plane, les conditions d'incidence et de visée varient d'un pixel à l'autre de la scène. Pour estimer le contenu intégré en vapeur d'eau sur chaque pixel, il serait donc nécessaire de calculer les LUT avec pour paramètres de contexte, l'altitude du sol, ainsi que les angles d'incidence et d'émergence du rayonnement.

Afin de limiter le temps de calcul, on a donc choisi de déterminer le contenu en vapeur d'eau uniquement pour quelques pixels de l'image. Ces pixels sont choisis en fonction de leur altitude et des conditions d'incidence solaire. Les pixels étudiés sont compris entre l'altitude la plus basse de l'image z_{min} , et l'altitude z^* telle que $z^* = z_{min} * 1,1$. On ne considère pas les pixels sur lesquels le rayonnement incident est

rasant ($\theta > 60^\circ$) afin que le signal mesuré par le capteur soit suffisamment important. A partir des contenus intégrés en vapeur d'eau ainsi estimés, on calcule un contenu intégré moyen, que l'on utilise ensuite pour ajuster le profil en vapeur d'eau. Toutes les grandeurs atmosphériques nécessaires à l'inversion sont ensuite calculées avec le profil ainsi obtenu.

5.2. Première étape

Pour la première étape, le sol est considéré lambertien, les éclairagements de couplage et réfléchis ne sont pas pris en compte, et les réflectances de l'environnement de la cible sont prises égales à celles de la cible pour le calcul de la luminance diffuse montante. L'ensemble de ces hypothèses permet d'obtenir une équation d'inversion simple, avec pour unique inconnue la réflectance du pixel P considéré.

Cette équation est résolue pour chaque canal de mesure ci de l'instrument hyperspectral. La longueur d'onde centrale de ces canaux λ_{ci} , et leur sensibilité spectrale S_{ci} , sont des entrées du code SIERRA. Les grandeurs atmosphériques monochromatiques f sont calculées par MODTRAN4, puis intégrées sur le domaine de sensibilité spectrale du canal D_{ci} en pondérant par la sensibilité spectrale (équation 54). Les grandeurs intégrées sont par la suite nommées grandeurs équivalentes.

$$f(\lambda_{ci}) = \frac{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} f(\lambda) S_{ci}(\lambda) d\lambda}{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} S_{ci}(\lambda) d\lambda} \quad (54)$$

La réflectance équivalente en sortie de la première étape de SIERRA, calculée dans un canal ci , est de la forme:

$$s_{p,1}(P, \lambda_{ci}) = \pi \frac{(L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{atm}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}))}{A_{dir,1}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + A_{dif,1}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})} \quad (55)$$

Avec:

$$\begin{aligned} A_{dir,1}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) &= \frac{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} E_{dir}(P, \bar{n}_i, \lambda) T_{dir}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda) S_{ci}(\lambda) d\lambda}{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} S_{ci}(\lambda) d\lambda} + \frac{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} E_{dif}(P, \bar{n}_i, \lambda) T_{dir}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda) S_{ci}(\lambda) d\lambda}{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} S_{ci}(\lambda) d\lambda} \\ &= A_{dir,1}^{dir}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + A_{dir,1}^{dif}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) \end{aligned} \quad (56)$$

Soit en utilisant les équations 23 et 24:

$$A_{dir,1}^{dir}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) = \frac{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} L_{dir-dir}^{mod}(z_p, \theta_c, \lambda) \Theta(P) \frac{\langle \vec{N}(P) \vec{n}_i \rangle}{\cos(\theta_s)} S_{ci}(\lambda) d\lambda}{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} S_{ci}(\lambda) d\lambda} \quad (56)$$

et

$$A_{dif,1}^{dif}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) = \frac{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} A_{dif,1}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) S_{ci}(\lambda) d\lambda}{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} S_{ci}(\lambda) d\lambda} \quad (57)$$

$$A_{dif,1}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) = T_{dif}^{\uparrow}(P, \theta_c, \lambda)^{V(P)} \frac{\iint [E_{dir}(M, \lambda) + E_{dif}(M, \lambda)] F_{envi}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envi}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda) dS_M} \quad (58)$$

$$L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) = \frac{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda) S_{ci}(\lambda) d\lambda}{\int_{D_{ci}(\lambda_{ci})} S_{ci}(\lambda) d\lambda} \quad (59)$$

L'ensemble des paramètres calculés dans cette étape est obtenu suivant les méthodes explicitées dans le paragraphe 3 de ce chapitre. L'influence du relief est prise en compte dans le calcul des éclairagements incidents ainsi que dans l'estimation des transmissions atmosphériques et de la luminance diffuse.

On obtient en sortie une première carte de réflectances $s_{p,1}$, qui sera utilisée dans la seconde étape, pour calculer les éclairagements réfléchis et de couplage négligés ici, ainsi que pour optimiser l'estimation de la luminance diffuse. Au cours de cette étape, de nombreux paramètres sont calculés une fois pour toutes: localisation des zones d'ombre (coefficient $\Theta(P)$), les angles d'incidence et de visée, les angles solides de vue du ciel et du terrain, les éclairagements directs et diffus équivalents, les transmissions directes et diffuses montantes équivalentes, et la luminance atmosphérique équivalente.

5.3. Seconde étape

La carte de réflectances lambertiennes obtenue en sortie de la première étape permet d'estimer les grandeurs dépendant de l'environnement du pixel cible. Le calcul de l'éclairement réfléchi par l'environnement, et de l'éclairement de couplage, affine l'estimation de l'éclairement incident. Ces grandeurs sont obtenues suivant les modèles définis dans ce chapitre, paragraphes 3.1.3 et 3.1.4.

La carte de réflectances obtenue à l'étape précédente, ainsi que la nouvelle carte d'éclairements, sont utilisées pour estimer précisément la luminance diffuse montante. Tous les pixels compris dans un voisinage $V(P)$ de rayon R_{\max} sont considérés.

L'équation à résoudre dans cette étape s'écrit donc:

$$L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) = \frac{s_{p,2}(P, \lambda_{ci})}{\pi} \left\{ A_{dir,1}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + [E_{coup,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) E_{ref,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci})] T_{dir}^{\uparrow}(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \right\} +$$

$$T_{dif}^{\uparrow}(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \frac{\iint_{V(P)} \frac{s_{p,1}(P, \lambda_{ci})}{\pi} E_{tot,2}(M, \lambda_{ci}) F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M} +$$

$$L_{atm}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) \quad (60)$$

$$\text{Avec } E_{tot,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) = E_{dir}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) + E_{dif}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) + E_{coup,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) + E_{ref,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) \quad (61)$$

La solution est donc de la forme:

$$s_{p,2}(P, \lambda_{ci}) = \pi \frac{L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{atm}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{dif,2}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})}{A_{dir,1}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + [E_{coup,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) E_{ref,2}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci})] T_{dir}^{\uparrow}(P, \theta_c, \lambda_{ci})} \quad (62)$$

$$\text{Avec } L_{dif,2}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, z_c, \lambda_{ci}) = T_{dif}^{\uparrow}(P, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) \frac{\iint_{V(P)} \frac{s_{p,1}(P, \lambda_{ci})}{\pi} E_{tot,2}(M, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M} \quad (63)$$

On obtient en sortie de cette étape une carte de réflectances lambertiennes beaucoup plus précise que la précédente. Si l'inversion est effectuée en considérant la surface du sol comme lambertienne, alors cette étape est répétée trois fois pour converger vers les valeurs optimales de réflectance. Sinon, deux étapes supplémentaires sont nécessaires pour la prise en compte des variations directionnelles de la réflectance.

5.4. Troisième étape

Afin de prendre en compte les effets bidirectionnels de la réflectance, une classification simple basée sur le calcul du NDVI est appliquée sur cette carte de réflectances. Chaque pixel est attribué à l'une des trois classes de sol suivantes: sol spéculaire, rugueux, et végétation.

Le NDVI est obtenu en effectuant un rapport entre des réflectances PIR mesurées dans le proche infrarouge (entre 0,75 et 1 μm) et des réflectances VIS mesurées dans le visible (entre 0,6 et 0,7 μm). Dans le cas où plusieurs bandes sont choisies dans chaque domaine spectral, on effectue alors une moyenne simple entre ces canaux. Le choix des bandes est fonction de l'instrument hyperspectral utilisé.

$$NDVI(P) = \frac{PIR(P) - VIS(P)}{PIR(P) + VIS(P)} \quad (64)$$

Les valeurs de NDVI sont comprises entre -1 et 1. Les valeurs négatives correspondent aux matériaux spéculaires tels que la neige ou l'eau, celles comprises entre 0 et 0,1 correspondent aux sols rugueux et les valeurs supérieures à 0,1 sont obtenues pour des couverts végétaux. Plus le NDVI est important, plus le couvert végétal est vert et dense.

Pour prendre en compte les effets bidirectionnels de la réflectance, on considère ces trois grands types de sols auxquels correspondent trois jeux de paramètres dépendant de la longueur d'onde ($k_0^\#$, $k_1^\#$, $k_2^\#$), qui seront utilisés dans les fonctions $\rho^\#$, $a_v^\#$, $a_s^\#$, et $s_p^\#$ (paragraphe 3.3). Ces paramètres sont définis pour chaque type de sol et sont fonction de la longueur d'onde.

Dans cette étape une première estimation du paramètre k_0 est réalisée. Les éclaircissements réfléchis et de couplage sont re-calculés en introduisant les valeurs de réflectance lambertienne obtenues en sortie de la deuxième étape. Il en est de même pour l'estimation de la luminance diffuse montante. La dépendance directionnelle n'est donc introduite que pour le calcul de la luminance directe montante.

L'équation à résoudre est de la forme:

$$L_{mes}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) = \frac{k_0(P, \lambda_{ci})}{\pi} \left[\rho^\#(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) A_{dir,1}^{dir}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) + a_v^\#(P, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) \left\{ A_{dir,1}^{dif}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) + (E_{ref,3}(P, \lambda_{ci}) + E_{ref,3}(P, \lambda_{ci})) T_{dir}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \right\} \right] + T_{dif}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \frac{\iint_{V(P)} \frac{S_{p,2}}{\pi}(P, \lambda_{ci}) E_{tot,3}(M, \lambda_{ci}) F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M} + L_{atm}(P, \vec{n}_i, \vec{n}_v, \lambda_{ci}) \quad (65)$$

L'inconnue k_0 s'exprime alors:

$$k_{0,3}(P, \lambda_{ci}) = \pi \frac{L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{atm}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{dif,3}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})}{A_{dir,3}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})} \quad (66)$$

$$\text{Avec } A_{dir,3}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda) = \left[\rho^\#(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) A_{dir,1}^{dir}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + a_v^\#(P, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) \left\{ A_{dir,1}^{dif}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + (E_{ref,3}(P, \lambda_{ci}) + E_{ref,3}(P, \lambda_{ci})) T_{dir}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \right\} \right] \quad (67)$$

$$\text{Et } L_{dif,3}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) = T_{dif}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \frac{\iint_{V(P)} \frac{s_{p,2}(P, \lambda_{ci})}{\pi} E_{tot,3}(M, \lambda_{ci}) F_{envi}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envi}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M} \quad (68)$$

Une carte d'albédos sphériques $s_{p,3}$, ou "réflectances lambertiennes équivalentes", est obtenue en sortie de cette étape en utilisant l'équation 53. D'autre part, on estime une valeur moyenne des $k_{0,3}$ pour chaque type de sol. Dans l'étape suivante, ces valeurs moyennes remplacent dans le modèle de Rahman les $k_0^\#$ fixés pour chaque classe.

5.5. Quatrième étape

Une dernière étape est nécessaire afin de prendre en compte les effets bidirectionnels de la réflectance sur l'ensemble des trajets effectués par le rayonnement. Cette dernière étape affine légèrement les résultats de la précédente. Le coefficient $k_0^\#$ fixé pour chaque classe de sol est réajusté en fonction de la carte de $k_{0,3}$ obtenue à l'étape précédente. Les fonctions $\rho^\#$, $a_v^\#$, $a_s^\#$, et $s_p^\#$ sont re-calculées. Les éclaircissements réfléchis et de couplage sont calculés avec l'ensemble des albédos sphériques de la scène.

Dans cette étape, on considère l'équation complète présentée dans le paragraphe 1 de ce chapitre:

$$\begin{aligned}
 L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) = & \\
 & \frac{k_{0,4}(P, \lambda_{ci})}{\pi} \left[\rho^\#(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) A_{dir,1}^{dir}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + \right. \\
 & \left. a_v^\#(P, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) \left\{ A_{dir,1}^{dif}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) + (E_{ref,3}(P, \lambda_{ci}) + E_{ref,3}(P, \lambda_{ci})) T_{dir}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \right\} \right] + \\
 & \frac{\iint_{V(P)} \frac{k_{0,3}(P, \lambda_{ci})}{\pi} \left[a_s^\#(M, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) E_{dir}(M, \lambda_{ci}) + s_p^\#(\lambda_{ci}) E_{dif-ref-coup,4}(M, \lambda_{ci}) \right] F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M} + \\
 & T_{dif}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci})
 \end{aligned} \tag{69}$$

$$L_{am}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})$$

$$\text{Avec} \quad E_{dif-ref-coup,4}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) = E_{dif}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) + E_{ref,4}(P, \lambda_{ci}) + E_{coup,4}(P, \lambda_{ci}) \tag{70}$$

Le facteur $k_{0,4}$ obtenu en sortie est de la forme:

$$k_{0,4}(P, \lambda_{ci}) = \pi \frac{L_{mes}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{am}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) - L_{dif,4}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})}{A_{dir,3}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci})} \tag{71}$$

Avec

$$\begin{aligned}
 L_{dif,4}(P, \bar{n}_i, \bar{n}_v, \lambda_{ci}) = & T_{dif}^\uparrow(P, \theta_c, \lambda_{ci}) \times \\
 & \frac{\iint_{V(P)} \frac{k_{0,3}(P, \lambda_{ci})}{\pi} \left[a_s^\#(M, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) E_{dir}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) + s_p^\#(\lambda_{ci}) E_{dif-ref-coup,4}(P, \bar{n}_i, \lambda_{ci}) \right] F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}{\iint_{V(P)} F_{envt}^{6S}(P, R_{MP}, \theta_c, \lambda_{ci}) dS_M}
 \end{aligned} \tag{72}$$

L'équation 71 est itérée trois fois afin de converger vers les valeurs optimales pour les coefficients $k_{0,4}$. On obtient en sortie une carte de réflectances lambertiennes équivalentes $s_{p,4}$, estimée à partir de l'équation 53.

CHAPITRE 3:

VALIDATION ET ETUDE DE SENSIBILITE **AUX DONNEES D'ENTREE**

Dans un premier temps, le code SIERRA est validé par inversion d'images synthétiques. La réciprocité entre le modèle direct et le modèle inverse de SIERRA est d'abord vérifiée. Ensuite, des images simulées par AMARTIS sur des paysages hétérogènes et montagneux sont inversées par SIERRA. Les scénarios choisis présentent des situations suffisamment diverses pour étudier la robustesse de la modélisation implémentée dans SIERRA. Dans la seconde partie de ce chapitre, la sensibilité du code SIERRA aux imprécisions sur l'orthorectification de l'image, aux incertitudes sur le MNT, ainsi qu'aux erreurs sur la visibilité atmosphérique et le type d'aérosol, sont étudiées.

1. VALIDATION DE SIERRA

1.1. Erreur intrinsèque de l'algorithme d'inversion du code SIERRA

Dans ce paragraphe, on étudie la cohérence de l'algorithme d'inversion avec son modèle direct. Une image de luminances acquise par un capteur embarqué est simulée avec le modèle direct sur lequel est basé le code SIERRA. Cette image est ensuite inversée avec SIERRA. Les données entrées dans le modèle direct et le modèle inverse sont identiques. On compare la réflectance obtenue par inversion, avec celle fournie en entrée du code direct.

La scène est modélisée pour un angle de visée de 30° , le capteur étant positionné dans le plan principal tel que $\varphi_v = \varphi_s + 180^\circ$. Le paysage, l'atmosphère, et les angles d'incidence solaires sont identiques à ceux du deuxième scénario du paragraphe 2, chapitre 2. Le scénario de validation est représenté Figure 41SEQARABIC.

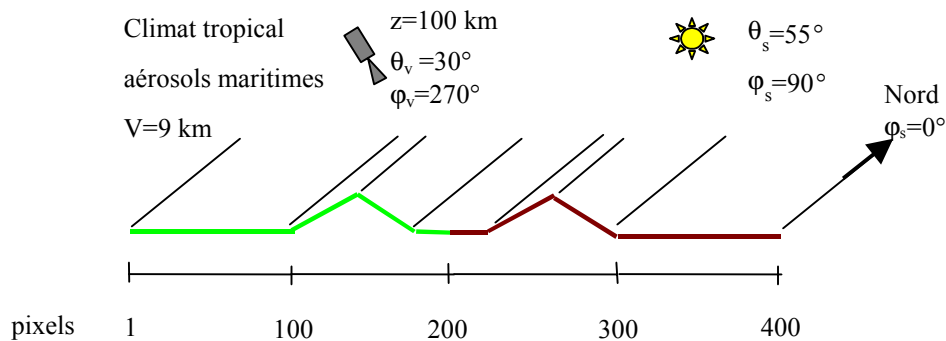


Figure 41: Scène utilisée pour évaluer l'erreur intrinsèque de l'algorithme d'inversion de SIERRA.

La réflectance de surface obtenue en sortie du code SIERRA est représentée Figure 42SEQARABIC. Aux trois longueurs d'onde étudiées, l'erreur relative sur la réflectance est inférieure à 1% sur l'ensemble de la scène.

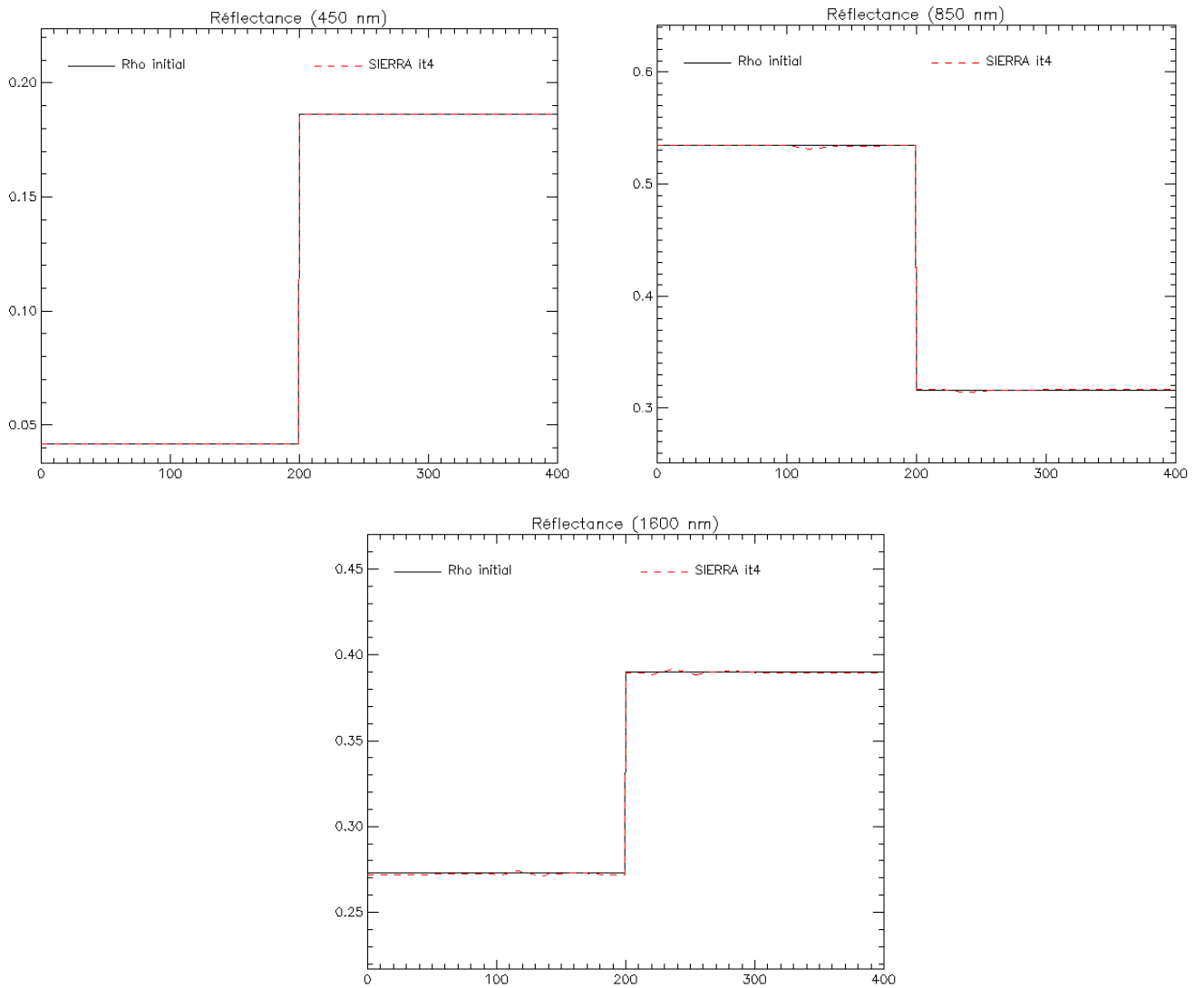


Figure 42: Comparaison entre la réflectance fournie en entrée du code direct et celle obtenue par inversion.

1.2. Validation de l'algorithme d'inversion par comparaison avec AMARTIS

Dans les trois cas de validation présentés dans ce paragraphe, l'image est simulée en entrée capteur avec le code AMARTIS, puis inversée avec SIERRA. Les données d'entrée (MNT, conditions atmosphériques et conditions d'acquisition) sont identiques pour les deux codes. On compare ici les albédos sphériques de la scène restitués par SIERRA, avec ceux correspondant aux BRDF fournies en entrée d'AMARTIS.

Les scènes simulées sont identiques à celles décrites dans le paragraphe 2 du chapitre 2, sauf que le sol n'est pas lambertien. La réflectance du sol est modélisée suivant la formulation de Rahman [18], dont les paramètres ont été ajustés sur des mesures de BRDF. Afin de limiter les erreurs sur le positionnement des pixels, les images sont obtenues en visée nadir pour un capteur situé à une altitude de 100 km. Une erreur de positionnement apparaît néanmoins sur les crêtes (pixels 139 et 260), ce qui engendre des erreurs importantes sur la réflectance estimée. Ces simulations sont effectuées pour trois longueurs d'onde: 450 nm, 850 nm, et 1600 nm.

1.2.1. Première scène de validation

La scène de validation est présentée Figure 43SEQARABIC. Quatre cents pixels de 10 m de côté composent le profil de ce relief, la première moitié étant recouverte d'herbe verte et la seconde de sol nu. Le relief est invariant sur la troisième dimension, orientée dans la direction sud-nord. Le rayonnement solaire provient du sud-ouest ($\phi_s=234^\circ$) avec un angle zénithal θ_s de 35° . Le modèle atmosphérique choisi est de type tempéré été avec des aérosols ruraux dont la densité est définie par une visibilité de 15 km.

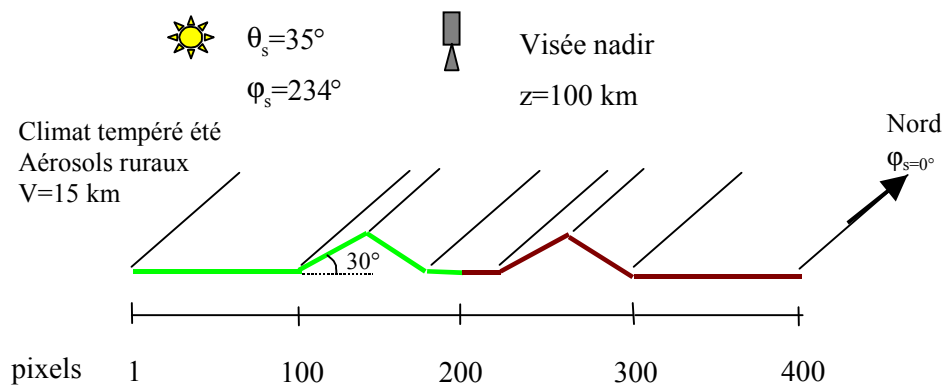


Figure 43: Première scène de validation

Dans cette configuration d'acquisition, le rayonnement transmis directement est la composante principale du signal mesuré. Le rayonnement diffus est un terme de premier ordre dans le visible, et les éclairissements réfléchis et de couplage sont des termes de second ordre sur l'ensemble du spectre, quelle que soit la position du pixel sur le relief. Pour estimer la luminance diffuse montante, le rayon R_{max} est de 50 km,

afin de prendre en compte la quasi-totalité des pixels contribuant au rayonnement diffus montant. Les valeurs d'albédo sphérique obtenues en sortie de SIERRA sont représentées Figure 44.

La première étape considère la réflectance de l'environnement égale à celle du pixel cible. Cette approximation a un impact important sur la réflectance inversée à 450 nm. La réflectance de l'herbe est ainsi fortement surestimée (+45% pour le pixel 1) et celle du sable sous-estimée (-20% pour le pixel 400). Ces effets sont accentués aux alentours des frontières entre l'herbe et le sable (pixels 1, 200 et 400), ce qui engendre cette forme incurvée de la réflectance en fonction de la position sur le relief, due à la non prise en compte de la réflectance de l'environnement. La contribution au signal de la luminance diffuse diminuant avec la longueur d'onde, son impact sur l'inversion est moindre à 850 nm et 1600 nm. On remarque cependant qu'aux abords des séparations entre l'herbe et le sable, la réflectance inversée diminue pour le sol dont la réflectance est la plus élevée, et augmente pour celui dont la réflectance est la plus faible. Aux trois longueurs d'onde étudiées, de fortes variations de la réflectance inversée sont observées sur les pentes où l'incidence solaire est rasante (entre 20% et 30% pour l'herbe, et environ 10% sur le sable). A 850 nm et 1600 nm, la réflectance est sous-estimée sur le sol plat et les versants exposés au soleil (environ 10%). Ces variations de réflectance sont essentiellement dues à l'approximation d'un sol lambertien.

La seconde étape permet une meilleure prise en compte de l'environnement du pixel cible. Par rapport à l'étape précédente, la forme incurvée de la réflectance inversée disparaît aux trois longueurs d'onde, et la transition de réflectance entre l'herbe et le sable est mieux retranscrite. Les effets bidirectionnels de la réflectance n'étant pas pris en compte, l'impact du relief sur l'inversion est toujours important (aux trois longueurs d'onde, la réflectance varie de 10% à 15% environ entre le versant ouest et le versant est des montagnes), et la réflectance est sous-estimée de 10% à 20% en sol plat et sur les versants exposés au soleil.

Les deux étapes suivantes ont pour but de corriger la réflectance des effets bidirectionnels. Dans un premier temps, cette correction est uniquement appliquée sur la luminance directe. L'impact du relief sur la réflectance est fortement réduit par rapport aux étapes précédentes. Ces variations sont inférieures à 5% quelle que soit la longueur d'onde. Elles sont maximales entre les pentes en incidence rasante et le sol plat adjacent. Elles sont essentiellement dues à des erreurs d'estimation de l'éclairement incident (sur la pente, l'éclairement est sous-estimé de 2% à 450 nm et de 4% à 850 nm et 1600 nm, et il est surestimé de 1% sur le sol plat aux trois longueurs d'onde). A 450 nm, la réflectance en sortie de la troisième étape est surestimée sur l'ensemble du relief. Ce biais est en partie corrigé par la prise en compte des effets directionnels de la réflectance sur la luminance diffuse montante dans la quatrième étape. En sortie de SIERRA (après les trois itérations de l'étape 4), à 450 nm, la réflectance de l'herbe est estimée avec une erreur maximale de 12% (soit une erreur absolue sur la réflectance de 0,005), et celle du sable avec moins de 1% d'erreur. A 850 nm et 1600 nm, la contribution au signal de la luminance diffuse étant plus faible, la plus importante source d'erreur sur la réflectance est donc l'estimation de l'éclairement incident. Les erreurs maximales sont observées sur les versants où l'incidence solaire est rasante, et sont de l'ordre de 5%.

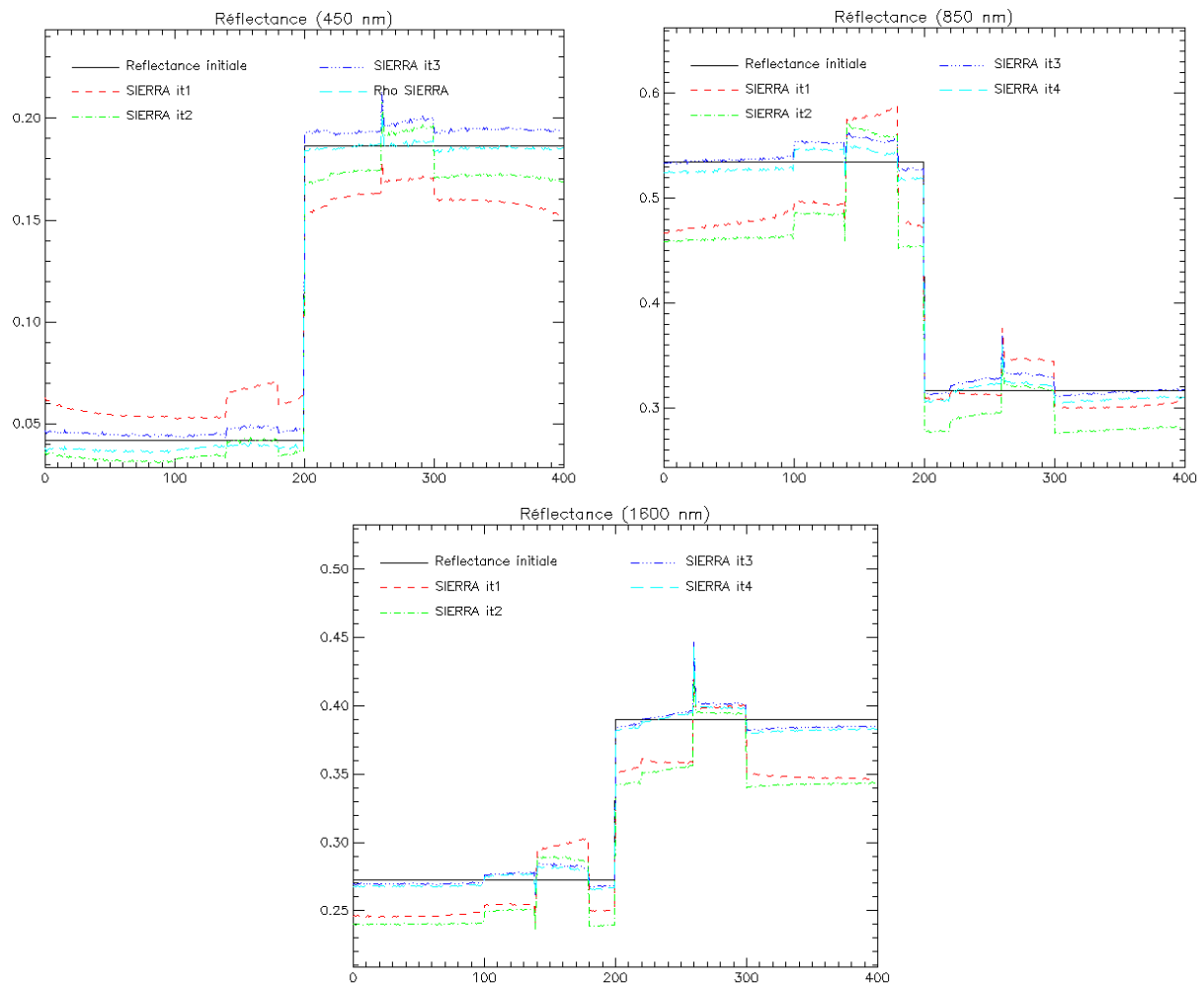


Figure 44: Résultats de l'inversion du premier scénario avec SIERRA

Dans le paragraphe 3.2.2, on a vu que les valeurs de luminance diffuse dépendaient du rayon R_{\max} choisi pour déterminer la taille du voisinage. Afin d'évaluer l'impact de ce rayon sur l'inversion, l'image de luminances simulée pour le paysage décrit Figure 43, est inversée par SIERRA avec des rayons R_{\max} de 5 km et de 10 km. Les réflectances obtenues en sortie de SIERRA (après les trois itérations de la dernière étape) sont représentées respectivement Figure 45 et Figure 46.

A 850 nm et 1600 nm, la réflectance restituée avec ces deux rayons est identique à celle obtenue avec un rayon R_{\max} de 50 km. A 450 nm, on observe de légères différences sur la réflectance restituée. Les erreurs sur la réflectance sont cependant du même ordre de grandeur, puisque l'erreur relative sur la réflectance de l'herbe atteint au maximum 10%, et celle sur la réflectance du sable est d'environ 3%.

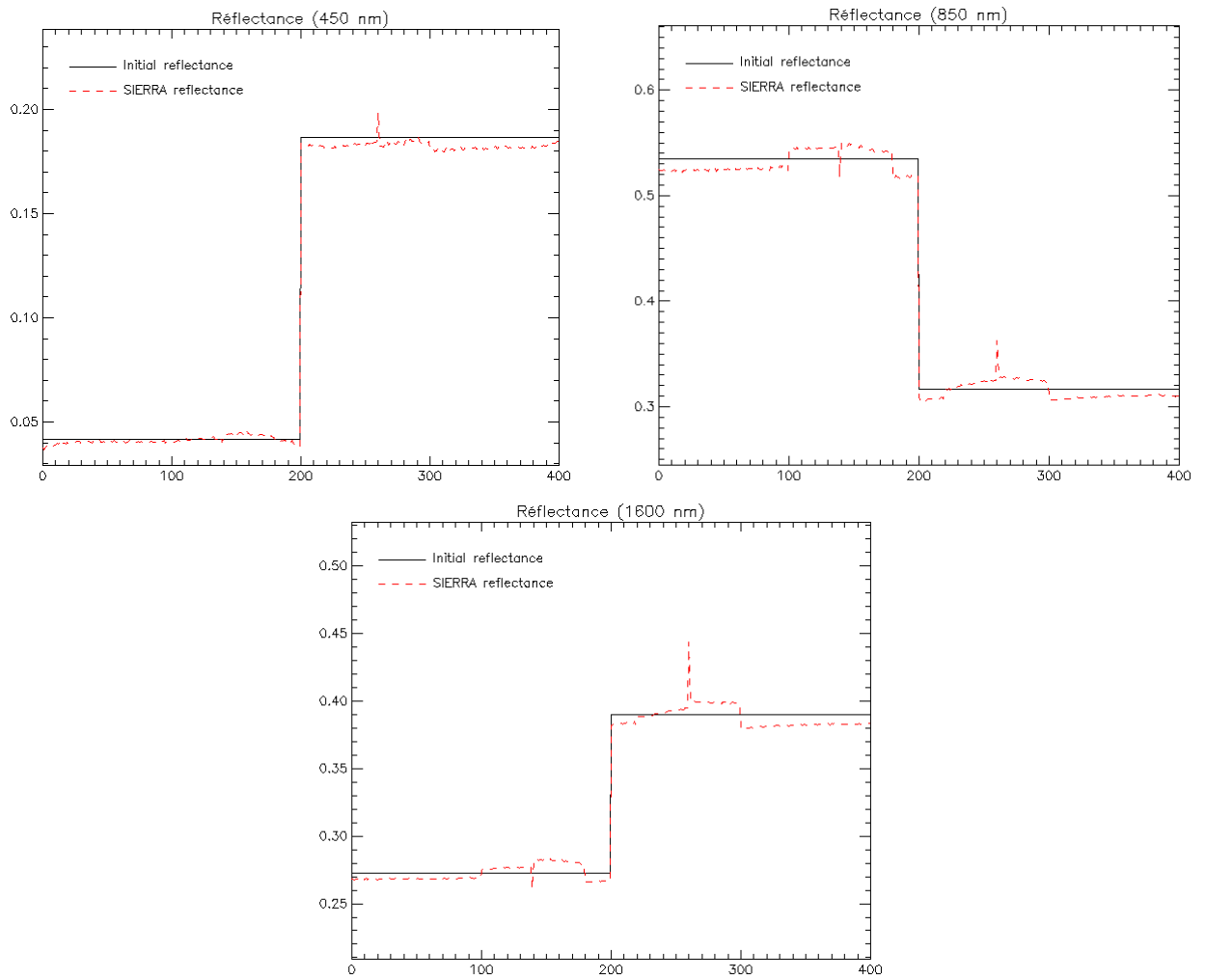


Figure 45: Réflectances restituées par SIERRA avec un rayon R_{max} de 5 km.

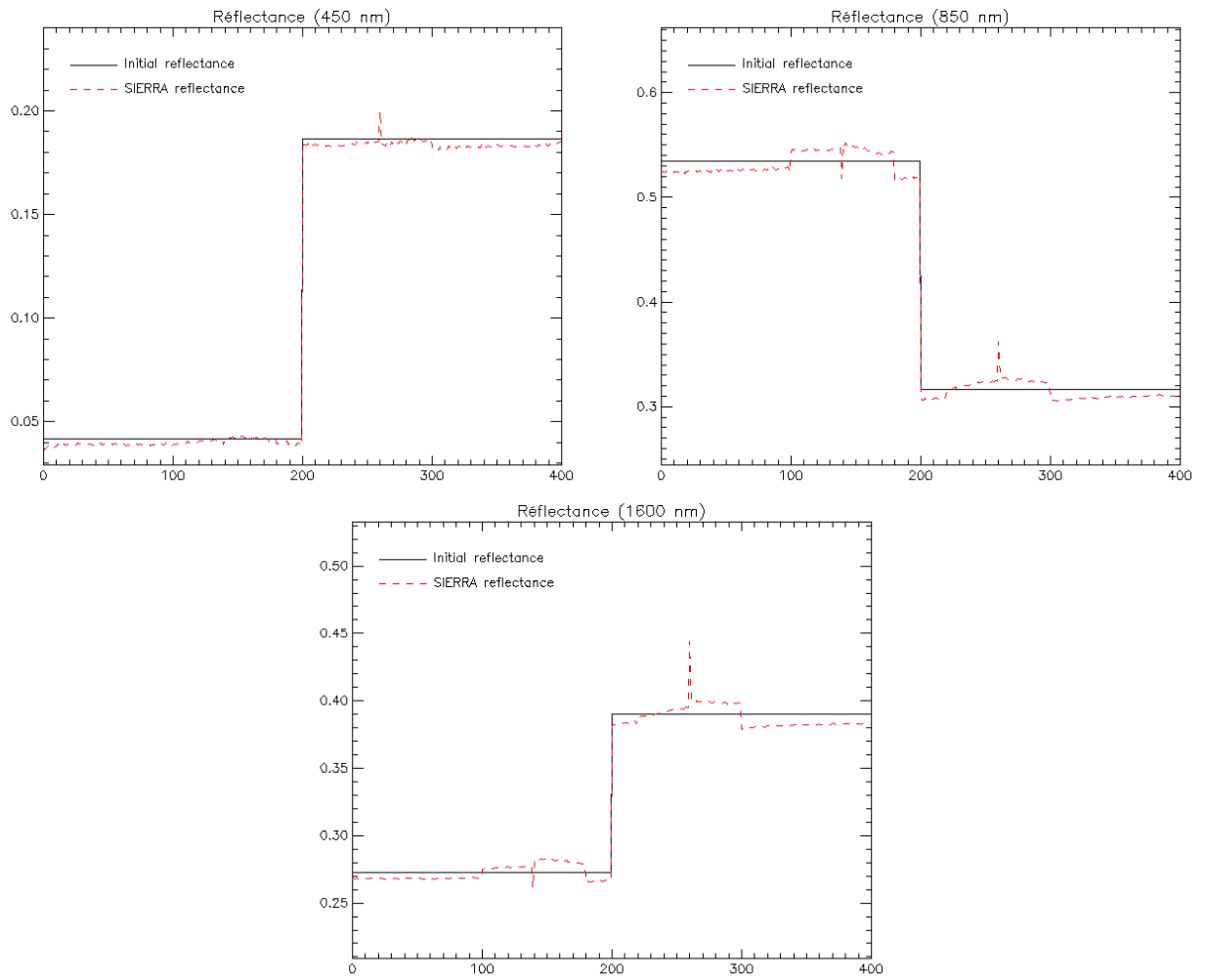


Figure 46: Réflectances restituées par SIERRA avec un rayon R_{max} de 10 km.

1.2.2. Seconde scène de validation

Pour cette simulation, le relief est identique au précédent. L'éclairement provient de l'est ($\varphi_s=90^\circ$) avec une incidence θ_s de 55° . L'atmosphère, de type tropical été, est composée d'aérosols maritimes dont la quantité correspond à une visibilité de 9 km (Figure 47SEQARABIC). Cette scène permet notamment d'évaluer l'algorithme d'inversion du code SIERRA dans de fortes conditions d'incidence et pour une atmosphère opaque. Dans cette configuration, l'éclairement diffus et la luminance diffuse sont des composantes importantes du signal sur l'ensemble du domaine réflectif.

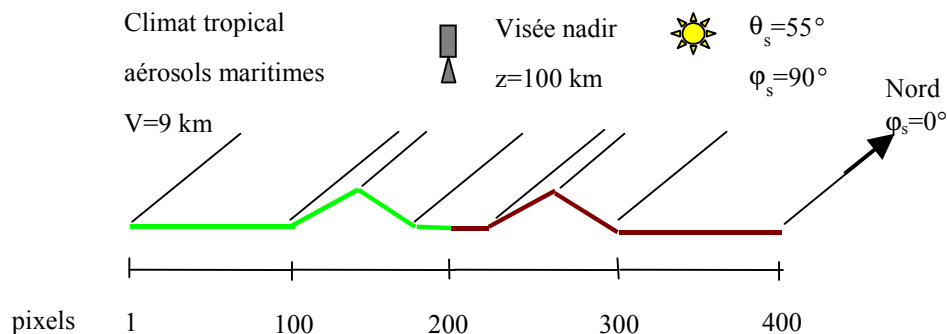


Figure 47: Seconde scène de validation

Sur la première étape, l'impact des effets d'environnement est plus marqué que dans le cas précédent. A 450 nm, ces effets engendrent des erreurs maximales sur les bords de l'image, qui sont de l'ordre de 70% pour l'herbe et 20% pour le sable. Ces erreurs sont d'environ 10% à 850 nm et 5% à 1600 nm. Aux trois longueurs d'onde étudiées, l'écart de réflectance entre l'herbe et le sable est plus faible sur les réflectances restituées que sur les réflectances initiales. La variation de réflectance imputable au relief atteint 40% à 450 nm (herbe), 35% à 850 nm (sable) et 25% à 1600 nm (herbe). Cette variation est observée entre les pixels situés en sol plat et les pixels situés sur les pentes où l'incidence solaire est rasante.

En sortie de la seconde étape, le palier de réflectance entre l'herbe et le sable est bien retranscrit. Sur l'herbe, la réflectance est au maximum sous-estimée de 25% à 450 nm, en raison d'une surestimation de la luminance diffuse et de l'approximation d'un sol lambertien. L'erreur la plus faible est observée sur le versant en incidence rasante, où la réflectance bidirectionnelle du sol est quasiment égale à l'albédo sphérique. Sur le sable, l'erreur sur la réflectance est inférieure à 10%. A 850 nm, l'erreur sur la réflectance atteint 15% sur les deux types de sol. Sur l'herbe, la réflectance du sol varie de 15% entre le sol plat et la pente orientée vers l'ouest. A 1600 nm, comme les effets bidirectionnels de la réflectance ne sont pas pris en compte, la réflectance du sol est sous-estimée sur l'ensemble du relief, avec des erreurs relatives maximales de 15% sur l'herbe et le sable. La variation de réflectance due au relief est de l'ordre de 10% sur les deux types de sol.

Contrairement à la seconde étape, la luminance diffuse est sous-estimée sur l'herbe dans la troisième étape, ce qui engendre jusqu'à 40% d'erreur sur la réflectance à 450 nm, sur le versant où l'incidence solaire est rasante. L'impact de la luminance diffuse est plus faible sur le sable, avec une surestimation maximale de 12%. A 850 nm, la réflectance du sol est surestimée d'environ 15% sur les versants exposés à l'ouest. L'erreur sur le reste du relief est inférieure à 5%. Les variations de réflectance sont dues à des erreurs

d'estimation de l'éclairement incident, entre -5% et $+5\%$, et à des erreurs sur la luminance diffuse, qui est sous-estimée. La réflectance du sol est calculée à 10% près à 1600 nm . La présence de relief engendre des variations de réflectance de l'ordre de 10% .

Dans la quatrième étape, à 450 nm , la prise en compte des variations directionnelles de la réflectance dans le calcul de la luminance diffuse montante, permet d'optimiser l'estimation de ce terme, et donc la précision de l'inversion. Ainsi, sur l'herbe, la réflectance du sol est estimée à 10% près sur le versant le moins éclairé, et avec moins de 5% d'erreur sur le reste du relief. Sur le sable, l'erreur sur la réflectance est inférieure à 5% . A titre de comparaison, le modèle d'ATCOR4 pour le calcul de la luminance diffuse (Figure 20, paragraphe 2.2), engendre des erreurs oscillant entre -70% et $+120\%$ pour l'herbe, et entre 0 et 60% sur le sable. A 850 nm et 1600 nm , l'erreur de SIERRA sur la réflectance est au maximum de 7% , sur la portion de sol plat adjacente au versant exposé à l'ouest. Sur le reste du relief, l'erreur est inférieure à 5% . Ces erreurs sont essentiellement dues à des imprécisions sur l'estimation de l'éclairement réfléchi par le voisinage, et de l'éclairement diffus.

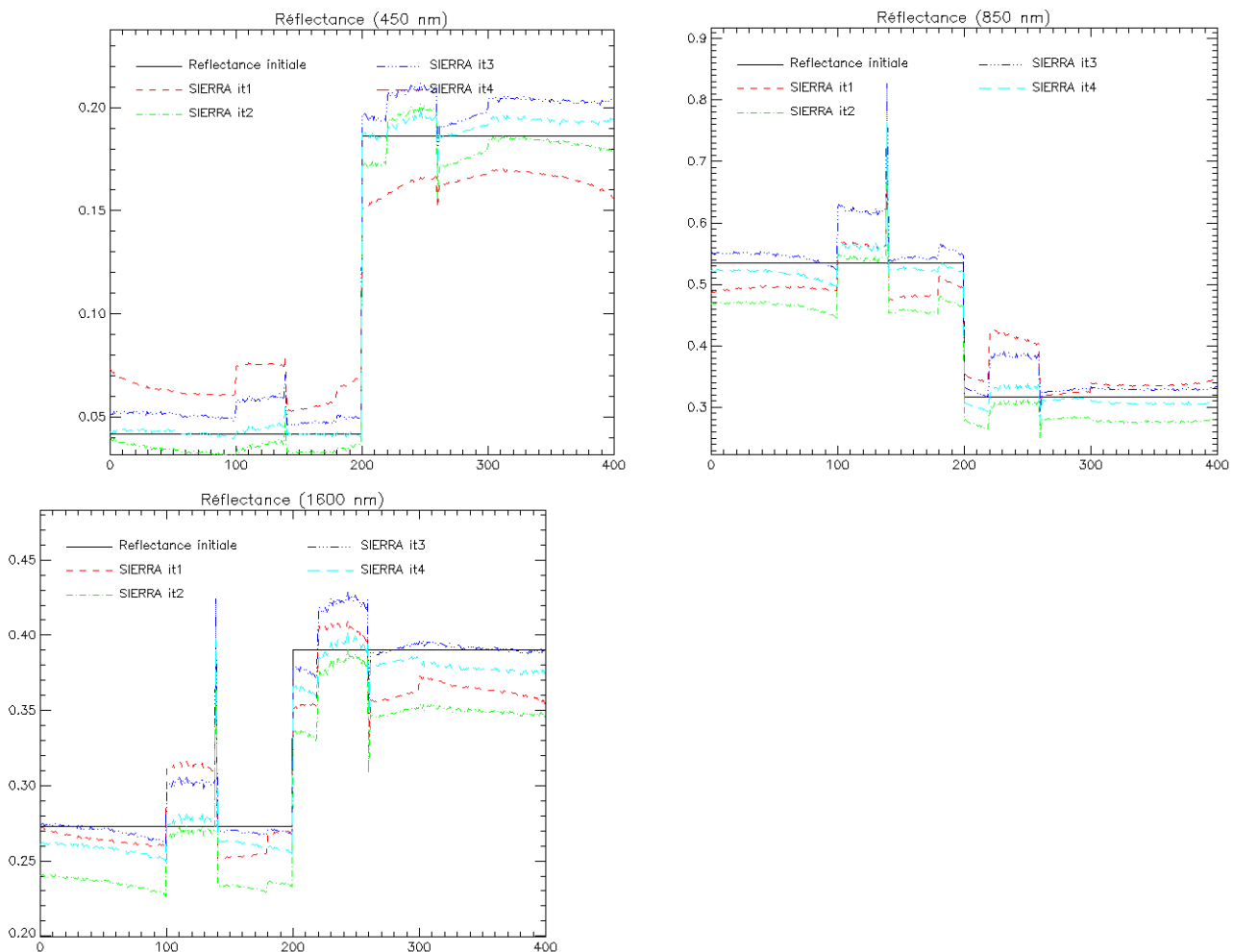


Figure 48: Résultats de l'inversion du second scénario avec SIERRA

1.2.3. Troisième scène de validation

Toujours sur un profil de 4 km composé d'herbe et de sol nu, le troisième scénario simule l'inversion d'une scène acquise au-dessus de deux montagnes culminant à 1000m, et dont les pentes sont de 45°. L'éclairage provient du nord est ($\varphi_s=50^\circ$) avec une incidence de 10°. L'atmosphère est de type tempéré été, avec des aérosols ruraux dont la charge correspond à une visibilité de 15 km (Figure 49SEQARABIC).

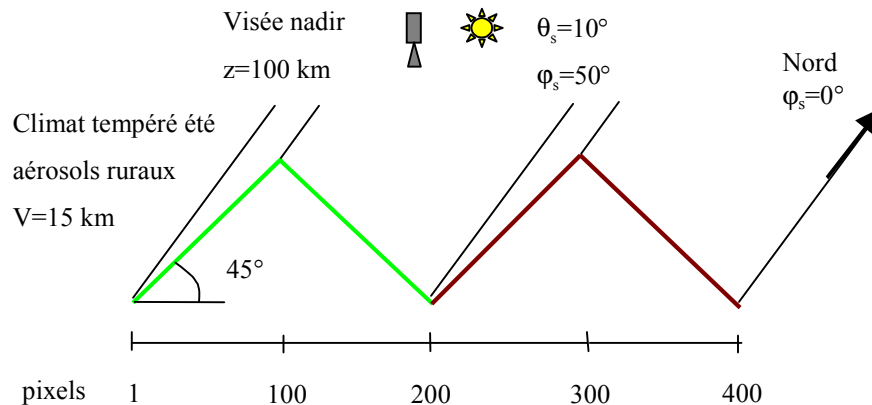


Figure 49: Troisième scène de validation

En sortie de la première étape, les erreurs sur la réflectance sont particulièrement importantes, et atteignent 100% à 450 nm, et 50% dans le proche infrarouge. Ces erreurs diminuent nettement avec une meilleure prise en compte des effets d'environnement. Ainsi, dans la seconde étape, les erreurs maximales sont de 20% à 450 nm, 25% à 850 nm, et 30% à 1600 nm. Elles sont principalement dues à des erreurs d'estimation des éclairagements diffus et réfléchis, ainsi qu'à l'approximation d'un sol lambertien. Les effets bidirectionnels de la réflectance engendrent des variations de réflectance entre deux versants, qui sont de l'ordre de 10% aux trois longueurs d'onde étudiées.

La prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance dans les deux étapes suivantes permet de réduire ces variations de réflectance dues à la pente. La quatrième étape réduit légèrement les erreurs relatives sur la réflectance par rapport à la troisième. En sortie de SIERRA, la réflectance du sol ne varie plus qu'avec l'altitude. Ces variations sont dues essentiellement au calcul de l'éclairage incident. A 450nm, la réflectance de l'herbe est calculée avec une erreur maximale de 15%, alors que celle du sable est obtenue avec une précision de 5%. A 850 nm, l'erreur sur la réflectance de l'herbe varie entre -5% et +7%, alors que sur la réflectance du sable elle varie entre 5% et 10%. A 1600 nm, la réflectance du sol est calculée à 6% près.

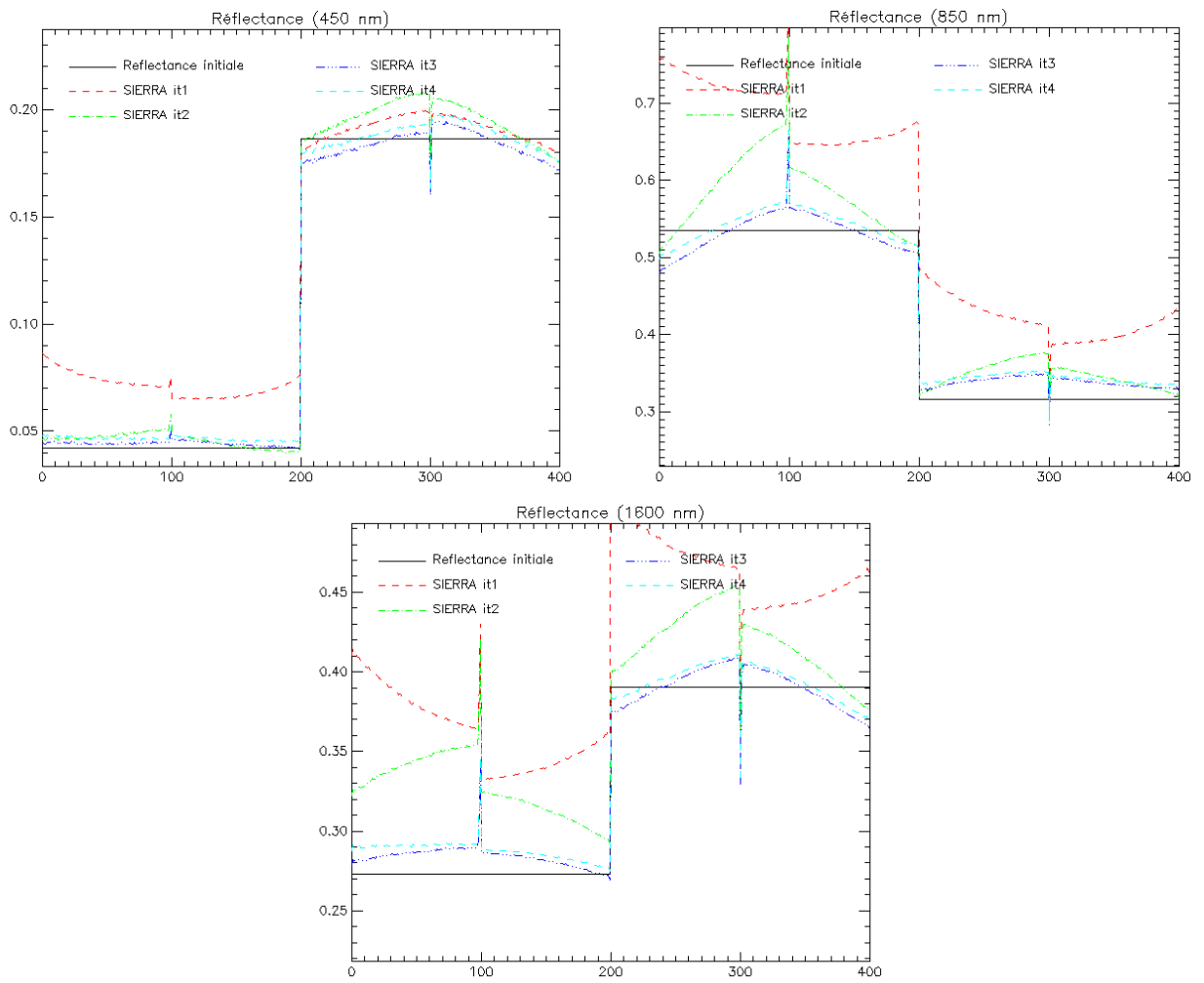


Figure 50: Résultats de l'inversion du troisième scénario avec SIERRA

2. ETUDE DE SENSIBILITE

2.1. Impact du modèle numérique de terrain sur la réflectance estimée.

Pour prendre en compte correctement le relief d'une scène, l'image de luminance doit être orthorectifiée de manière précise par rapport à un modèle numérique de terrain. En réalité, le pas d'échantillonnage du MNT peut être différent de celui de l'image, ou décalé. Ces différences peuvent engendrer des erreurs sur l'orthorectification de l'image, et dans la procédure d'inversion, sur le calcul des pentes des pixels, notamment sur ceux situés aux abords des ruptures de pente. Les MNT sont obtenus à partir de couples d'images panchromatiques acquises par satellite, l'altitude de chaque pixel est donc déterminée avec une certaine précision. Des imprécisions sur l'altitude des pixels peuvent également créer une erreur sur la pente de chaque pixel de l'image.

Pour cette étude, la scène présentée dans le paragraphe 1.2.1 de ce chapitre, est simulée en entrée d'instrument par AMARTIS pour un capteur situé à 100 km d'altitude en visée nadir. Les erreurs d'orthorectification de l'image liés au MNT sont donc négligeables, et l'étude de sensibilité se limite aux erreurs engendrées dans les calculs inhérents à l'inversion. La réflectance du sol est restituée par SIERRA, à partir des mêmes données atmosphériques, et des mêmes angles d'incidence et de visée que dans AMARTIS. Par contre, le modèle numérique de terrain fourni en entrée de SIERRA est imparfait.

Quatre types d'erreur sont évalués. Les deux premiers types d'erreur sont dus à des imprécisions sur l'orthorectification. Dans un premier temps, l'inversion est réalisée avec un modèle de terrain échantillonné avec un pas différent de celui de l'image. La seconde étape consiste à inverser l'image à partir d'un modèle de terrain décalé par rapport au relief réel. Dans les deux cas suivants, on évalue l'impact d'un bruit sur le modèle de terrain: ce bruit est d'abord aléatoire sur chaque pixel du modèle, puis périodique.

2.1.1. Impact d'une différence d'échantillonnage entre le MNT et l'image

Dans un premier temps, le relief de la scène est toujours le même mais le modèle de terrain présente un pas d'échantillonnage plus grand que celui de l'image (Figure 51).

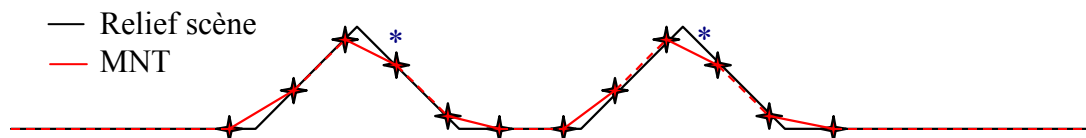


Figure 51: Comparaison entre le relief de la scène et le MNT utilisé pour la deuxième inversion

Les résultats de ce test sont présentés Figure 52. Les différences d'échantillonnage engendrent un décalage de 30 m vers l'est des sommets, et un étalement des montagnes. Au niveau des sommets, de fortes variations de la réflectance apparaissent. Elles sont de l'ordre de 30% à 450 nm et 50% dans le proche infrarouge. Sur les versants en incidence rasante, du fait d'erreurs sur l'estimation de la pente, (Figure 51, *), la réflectance de surface est sous-estimée de 10% à 450 nm et d'environ 15% à 850 nm et 1600 nm.

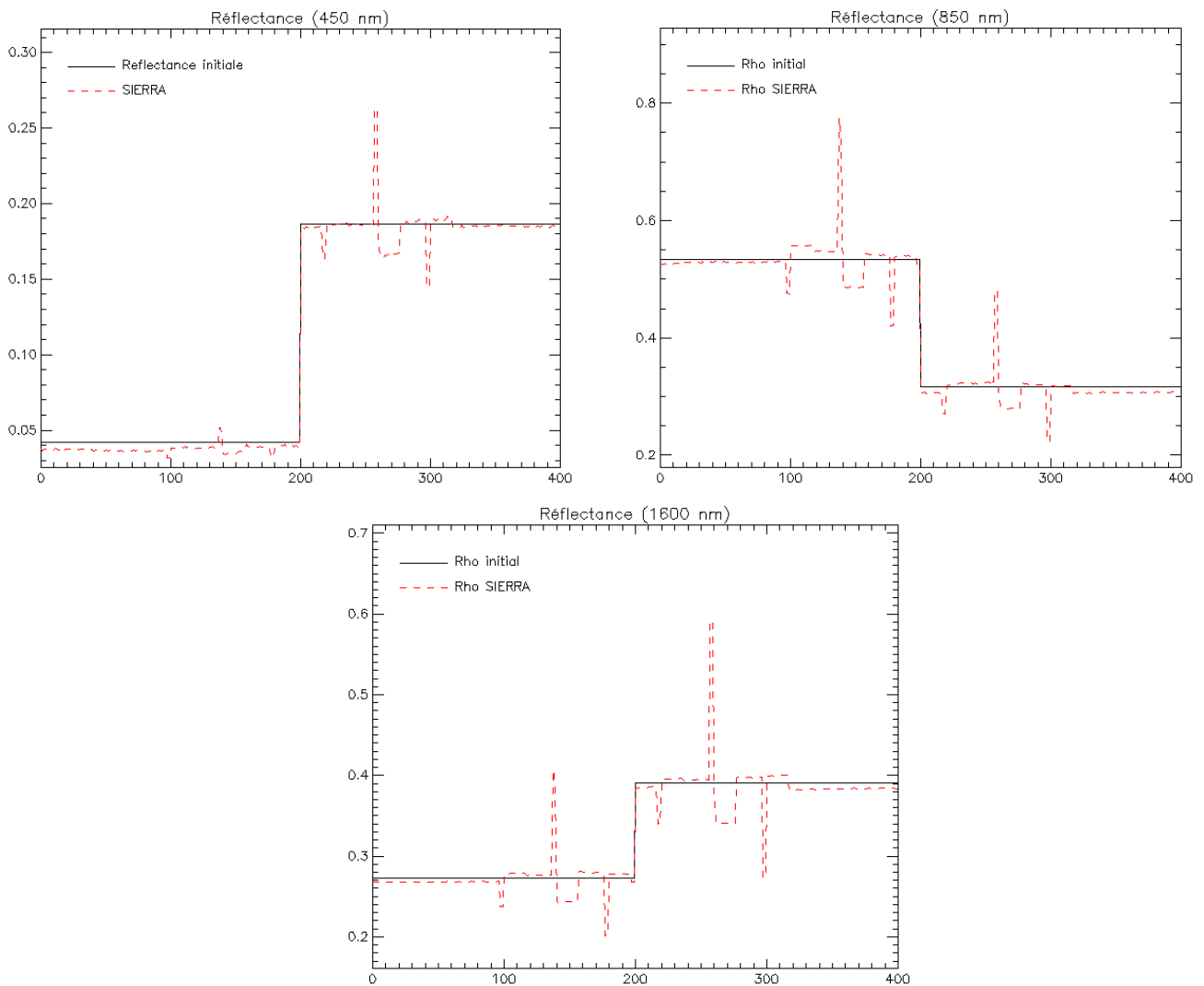


Figure 52: Résultats de l'inversion effectuée avec un MNT mal échantillonné par rapport au relief.

2.1.2. MNT décalé par rapport à l'image

Dans ce cas, l'inversion est effectuée avec un modèle de terrain identique à celui utilisé pour simuler l'image, mais décalé de 30 mètres (soit trois pixels) vers l'est (Figure 53).



Figure 53: Comparaison entre le relief de la scène et le modèle numérique de terrain utilisé pour l'inversion.

Les résultats de l'inversion sont présentés Figure 54. Des erreurs sur la réflectance restituée se produisent lorsque les pentes des pixels sont mal estimées, notamment pour les pixels situés au sommet ou au pied des montagnes. Les erreurs sont maximales dans le proche infrarouge (850 nm et 1600 nm), du fait d'une mauvaise estimation de l'éclairement direct et de la réflectance bidirectionnelle. Aussi, les erreurs observées atteignent 50% à 450 nm et 70% à 850 nm et 1600 nm, pour les pixels proches des sommets. Pour les pixels affectés uniquement d'une erreur sur l'altitude (de l'ordre d'une vingtaine de mètres), l'impact sur la réflectance estimée est négligeable.

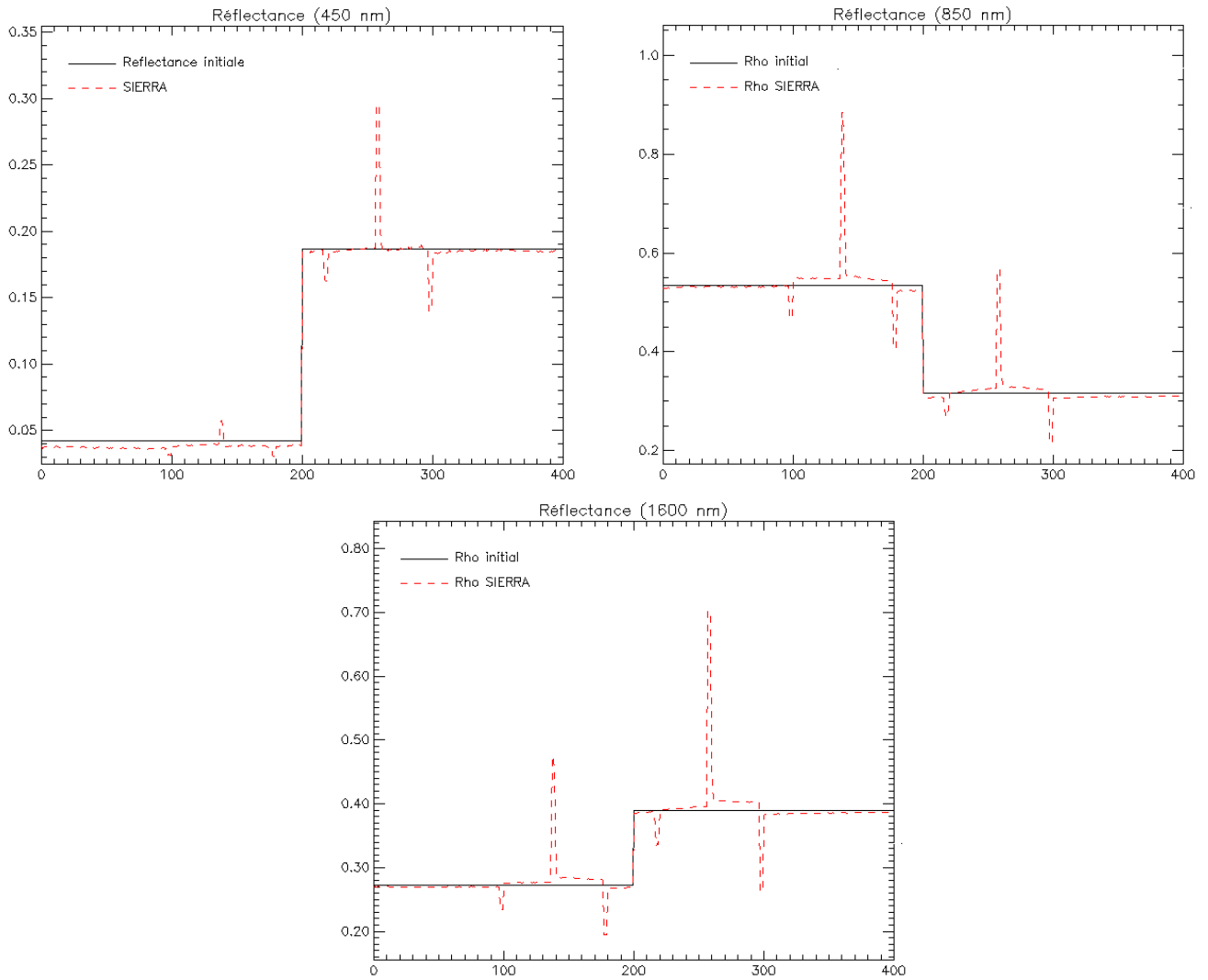


Figure 54: Inversion effectuée avec un MNT décalé par rapport au relief initial.

2.1.3. Incertitude sur les altitudes

Cette étude consiste à inverser l'image de luminances avec en entrée de SIERRA, un modèle de terrain bruité par rapport au relief de la scène. Dans ce cas, le MNT est formé par des pixels de 10 m. Un bruit de type gaussien est appliqué sur l'altitude de chaque pixel du MNT, dont l'écart-type est de 3 m: l'erreur maximale sur l'altitude est de 7 m. L'ordre de grandeur des erreurs en altitude est comparable à celui d'un modèle de terrain obtenu à partir de deux images SPOT de résolution 5 m, comme c'est le cas du modèle de terrain employé pour l'inversion des images HYMAP acquises au cours de la campagne de mesures en Oman.

Dans ce cas, la pente calculée pour l'inversion de chaque pixel diffère de celle utilisée pour simuler l'image. Les résultats fournis par le code SIERRA sont présentés Figure 55. Sur sol plat et sur les pentes exposées au soleil, les variations de réflectances observées sur deux pixels adjacents atteignent 50% à 450 nm et 80% dans le proche infrarouge. Ces erreurs sont plus importantes que celles causées par l'hypothèse d'un sol plat (Tableau 1, chapitre 1, paragraphe 2.1.2.2). L'impact du bruit sur la réflectance estimée est encore plus grand sur les versants où l'incidence solaire est rasante. Dans certains cas, l'erreur sur la réflectance estimée peut atteindre 80% à 450 nm, 250% à 850 nm et 450% à 1600 nm.

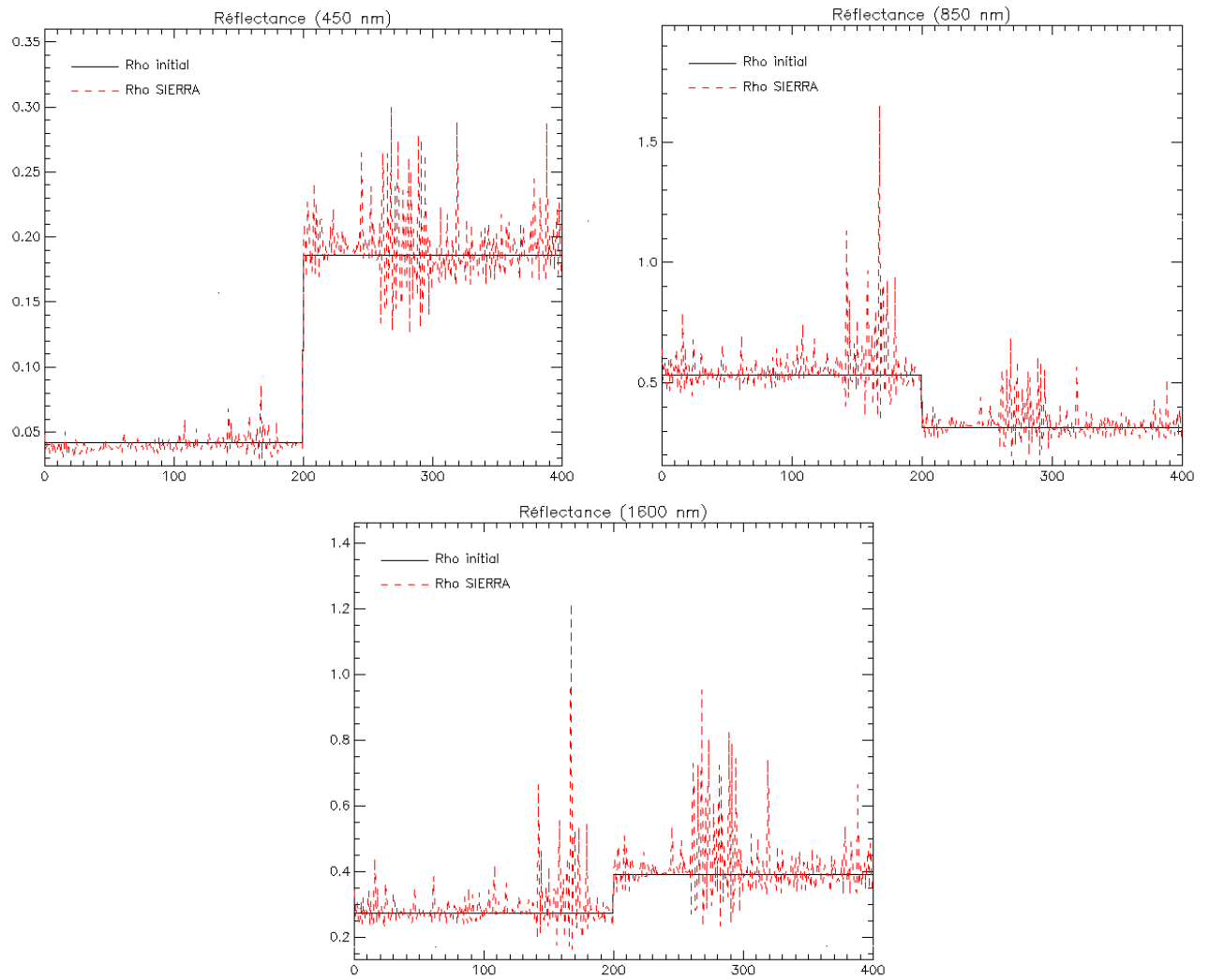


Figure 55: Résultats de l'inversion réalisée à partir d'un MNT bruité (bruit gaussien).

Dans le dernier cas étudié, on a ajouté un bruit périodique aux altitudes du modèle de terrain initial. Tous les quarante mètres (quatre pixels), une erreur de 3 m est ajoutée sur l'altitude. Ces erreurs sont du même ordre de grandeur que celles introduites par le bruit quasi-périodique observé sur le modèle de terrain SPOT5, utilisé pour traiter les images HYMAP de la campagne effectuée en Oman. Les oscillations de réflectance dues à ce bruit sont elles-même périodiques et d'amplitudes quasiment constantes sur une même pente. A 450 nm, elles sont de l'ordre de 10% sur le versant exposé au soleil, de 20% en sol plat, et de 30% sur les versants les moins éclairés. Dans le proche infrarouge, elles sont respectivement de 10%, 30%, et 50%. Comme précédemment, l'amplitude des erreurs de réflectance induites par ce bruit périodique est plus forte que sur la réflectance estimée par COCHISE, qui suppose le sol plat (Tableau 1, chapitre 1, paragraphe 2.1.2.2).

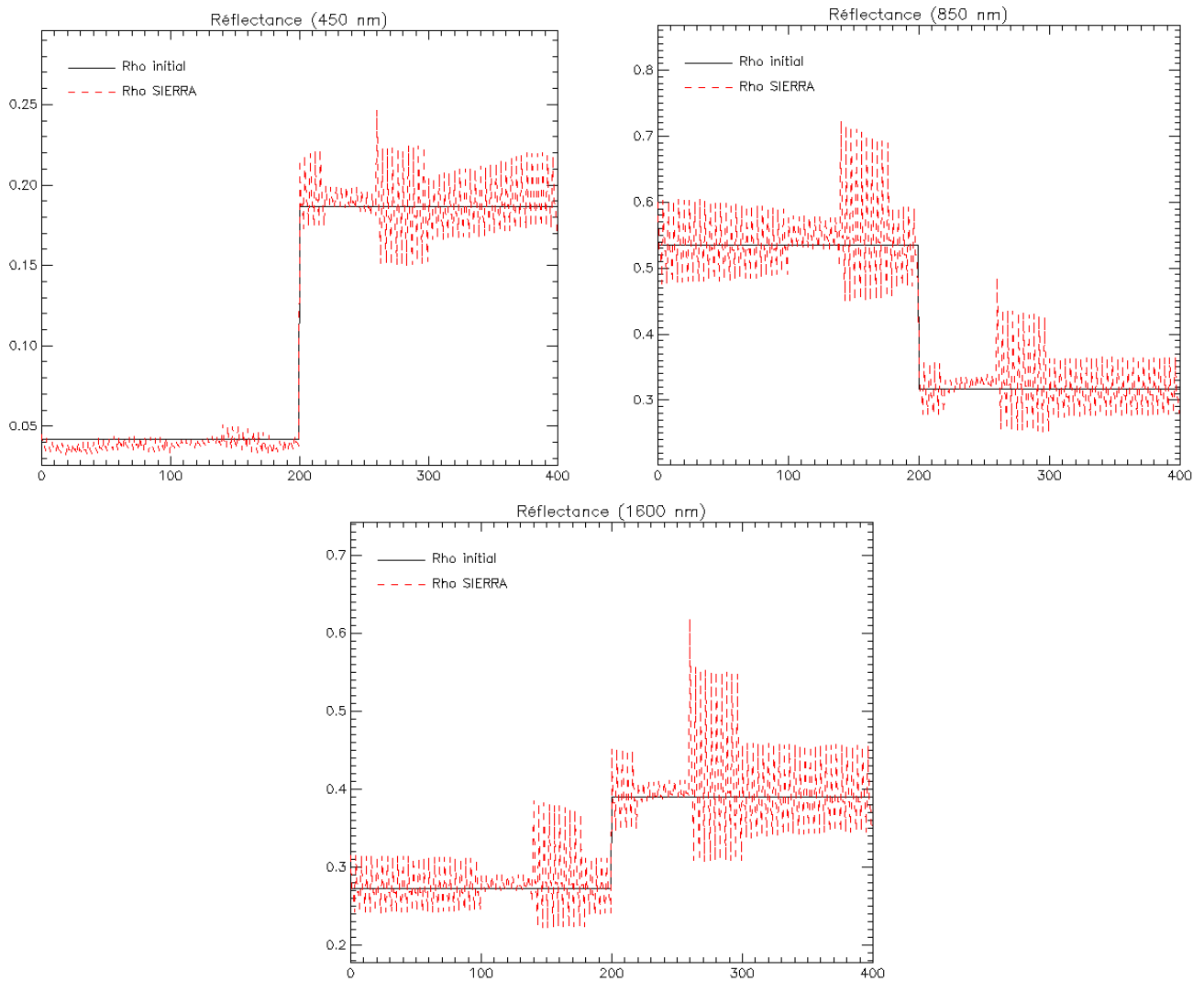


Figure 56: Inversion effectuée avec un MNT bruité (bruit périodique)

2.2. Impact d'une erreur sur le type d'atmosphère

Le type d'aérosols et la visibilité atmosphérique sont des entrées du code SIERRA. Ces deux paramètres permettent de calculer les transmissions directes et diffuses, montantes et descendantes, de déterminer la fonction de phase de la diffusion, et de calculer l'albédo atmosphérique. Ce paragraphe a pour objectif d'étudier l'impact qu'une erreur sur ces entrées aurait sur la réflectance restituée par SIERRA. Pour cela, la scène décrite dans le paragraphe 1.2.1 de ce chapitre, est simulée en entrée capteur par le code AMARTIS. L'inversion est effectuée par le code SIERRA avec les mêmes entrées, en modifiant soit le type d'aérosol, soit la visibilité atmosphérique.

2.2.1. Impact d'une erreur sur le type d'aérosols.

Dans un premier temps, l'inversion est effectuée avec des aérosols de type maritime alors que l'image a été simulée avec des aérosols de type continental. La visibilité atmosphérique est de 15 km. Les résultats de l'inversion sont présentés Figure 57.

A 450 nm, les coefficients d'extinction des deux types d'aérosols sont du même ordre de grandeur. L'impact sur la réflectance restituée est faible, et les réflectances de l'herbe et du sable sont restituées avec une précision de 5%. Par contre, à 850 nm et 1600 nm, les coefficients d'extinction des aérosols maritimes sont respectivement 2 et 3 fois plus grands que ceux des aérosols continentaux. Les luminances diffuses et atmosphériques montantes sont nettement surestimées et, même si ces termes sont de second ordre, l'impact de ces erreurs est significatif sur les zones de faible réflectance ou de faible éclairement incident. Ainsi, les erreurs cumulées de ces termes, correspondent au maximum à 25% de la luminance directe à 850 nm, et 30% à 1600 nm. Ces erreurs sont en parties compensées par la surestimation de l'éclairement incident. L'erreur sur la réflectance estimée atteint ainsi 15% aux deux longueurs d'onde, et varie suivant la position du pixel sur le relief.

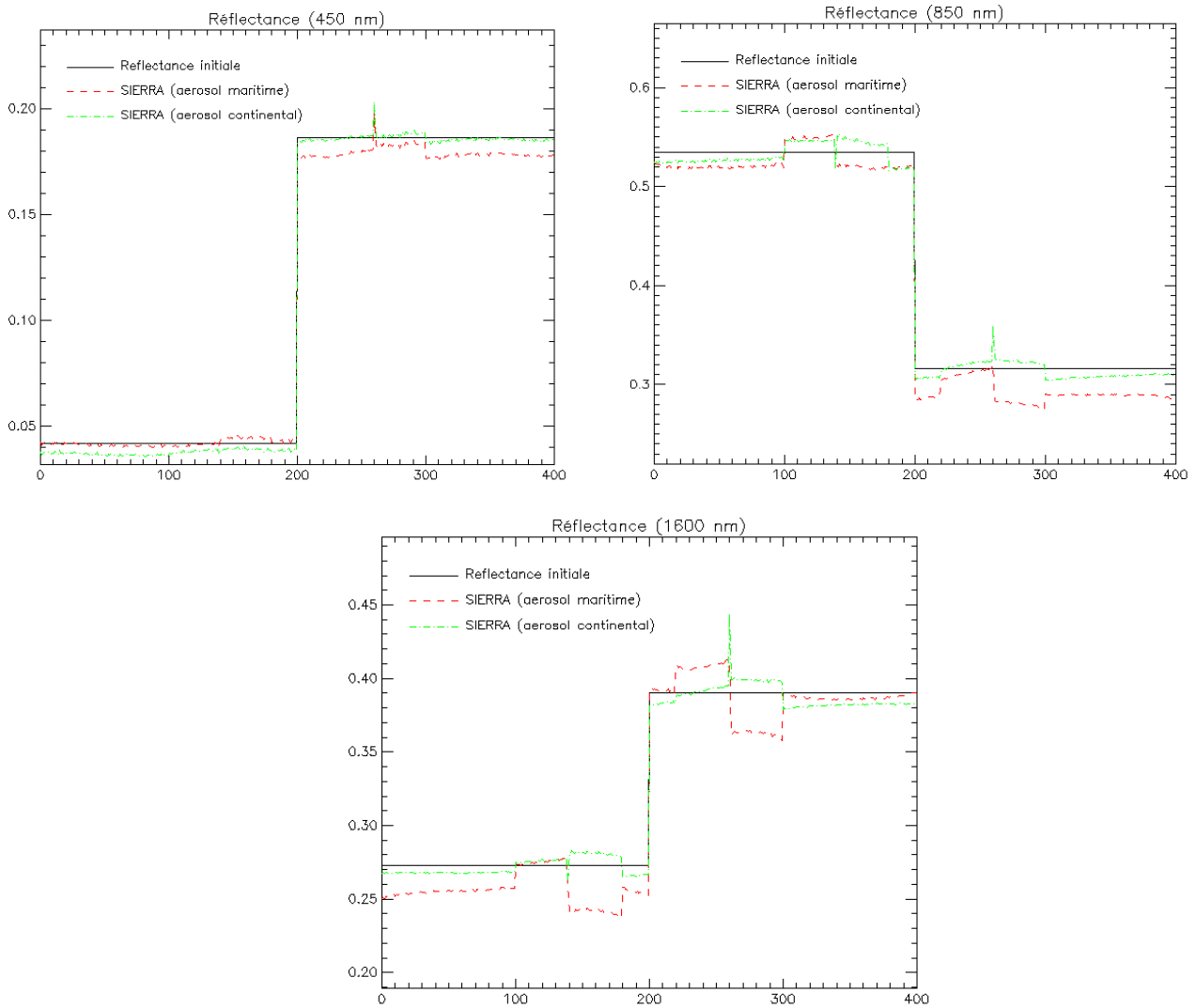


Figure 57: Inversion de la scène définie paragraphe 1.2.1 avec des aérosols de type maritime.

On a ensuite effectué l'inversion avec des aérosols de type urbain. Les résultats sont présentés Figure 58. A 450 nm, les luminances atmosphérique et diffuse montantes sont légèrement sous-estimées, et l'éclairement incident est quasiment identique à celui calculé pour un aérosol de type continental. Ainsi, les réflectances de l'herbe et du sable sont surestimées, avec des erreurs atteignant respectivement 20% et 15%. Par rapport à une inversion effectuée avec le bon type d'aérosol, les réflectances sont également surestimées d'environ 5% à 850 nm et 1600 nm.

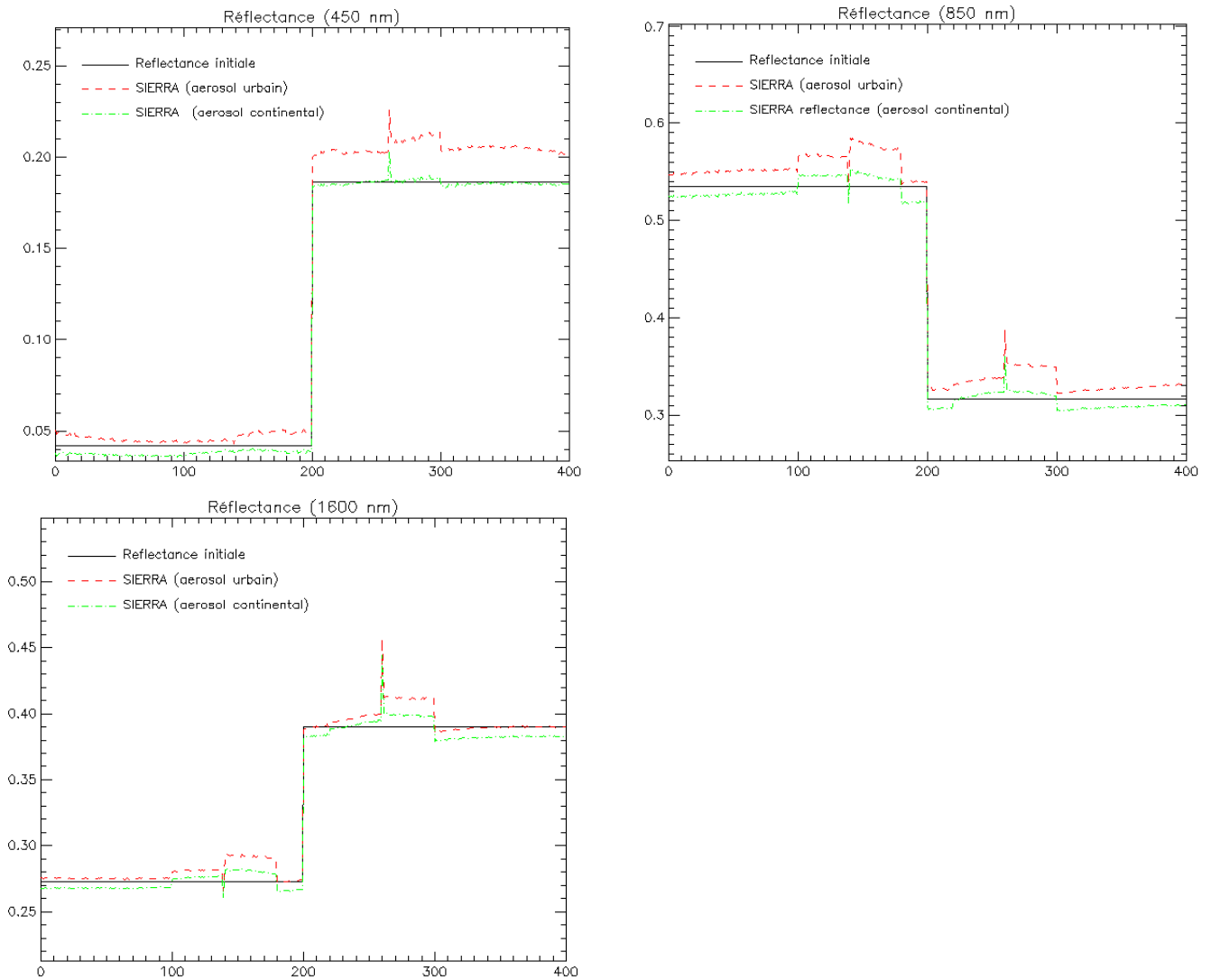


Figure 58: Inversion de la scène décrite paragraphe 1.2.1 avec des aérosols de type urbain.

2.2.2. Impact d'une erreur sur la visibilité atmosphérique.

Dans les deux cas présentés, l'inversion de l'image simulée sur la scène décrite dans le paragraphe 1.2.1 de ce chapitre, est effectuée en introduisant une erreur sur la visibilité atmosphérique, qui est de 15 km en entrée d'AMARTIS.

Dans un premier temps, l'inversion est effectuée avec une visibilité de 20 km. Les résultats sont présentés Figure 59. A 450 nm, l'impact d'une erreur modérée de la visibilité sur la réflectance est surtout visible pour le sol composé d'herbe. Au lieu d'être sous-estimée, comme c'est le cas si l'on considère la bonne visibilité dans l'inversion, la réflectance de l'herbe est surestimée avec une erreur relative maximale de 20% sur le versant en incidence rasante, due essentiellement à l'erreur sur la luminance atmosphérique montante. La réflectance du sable est obtenue avec une précision de 5%. A 850 nm et 1600 nm, la réflectance est très proche de celle obtenue avec la bonne visibilité, l'erreur relative maximale sur la réflectance étant de 7% aux deux longueurs d'onde.

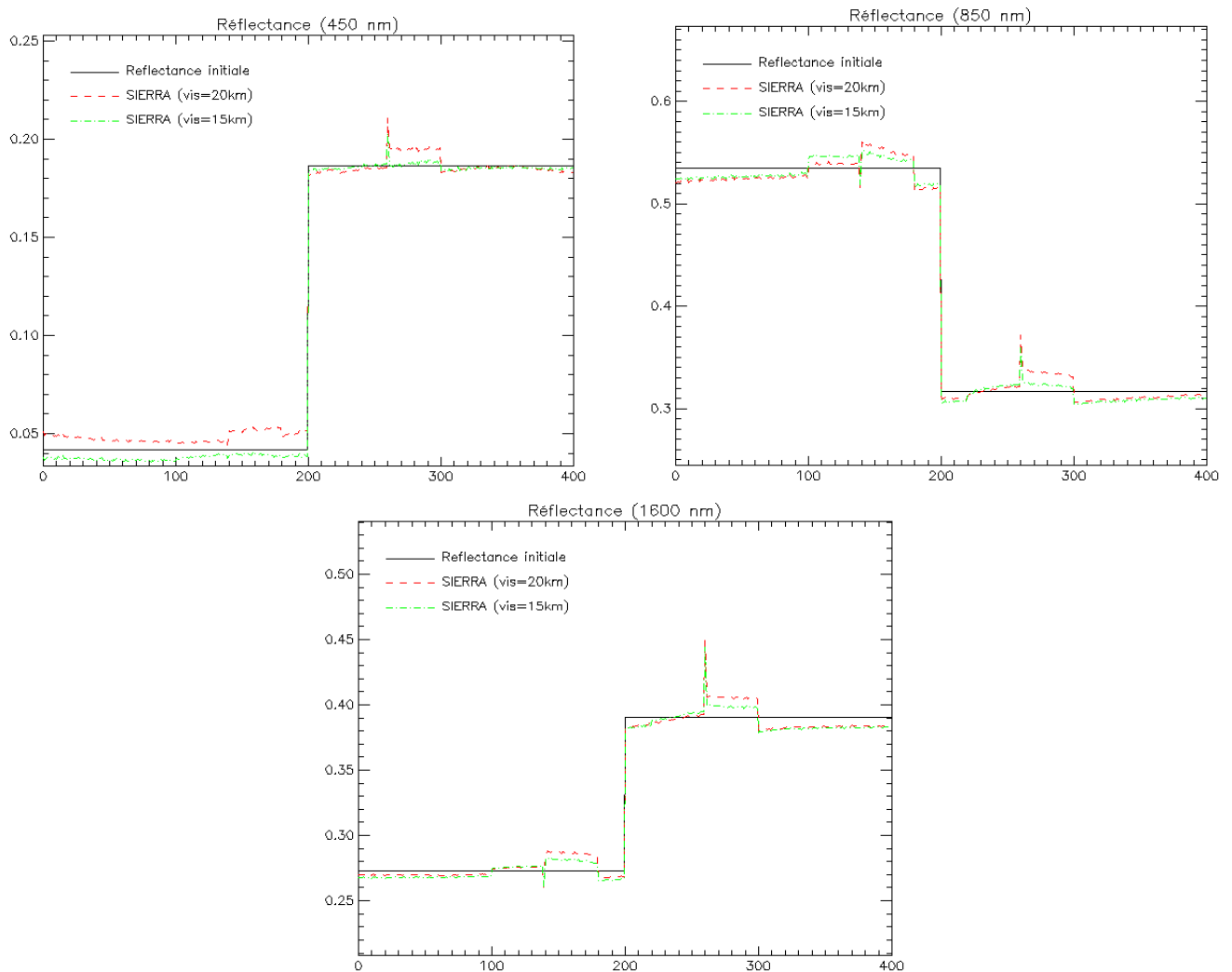


Figure 59: Inversion de la scène décrite paragraphe 1.2.1 avec une visibilité de 20 km.

La seconde inversion est effectuée avec une visibilité de 9 km. Dans ce cas, les luminances diffuses et atmosphériques montantes sont nettement surestimées. Les conséquences sur la réflectance sont surtout significatives à 450 nm, où les luminances diffuses et atmosphériques sont des termes de premier ordre. Ainsi, la réflectance de l'herbe est restituée par SIERRA avec une erreur relative atteignant 90% sur le versant éclairé en incidence rasante. Pour le sable, la réflectance est estimée avec une précision 10%. A 850 nm, l'erreur sur la réflectance est au maximum de 7%, et elle est inférieure à 5% à 1600 nm.

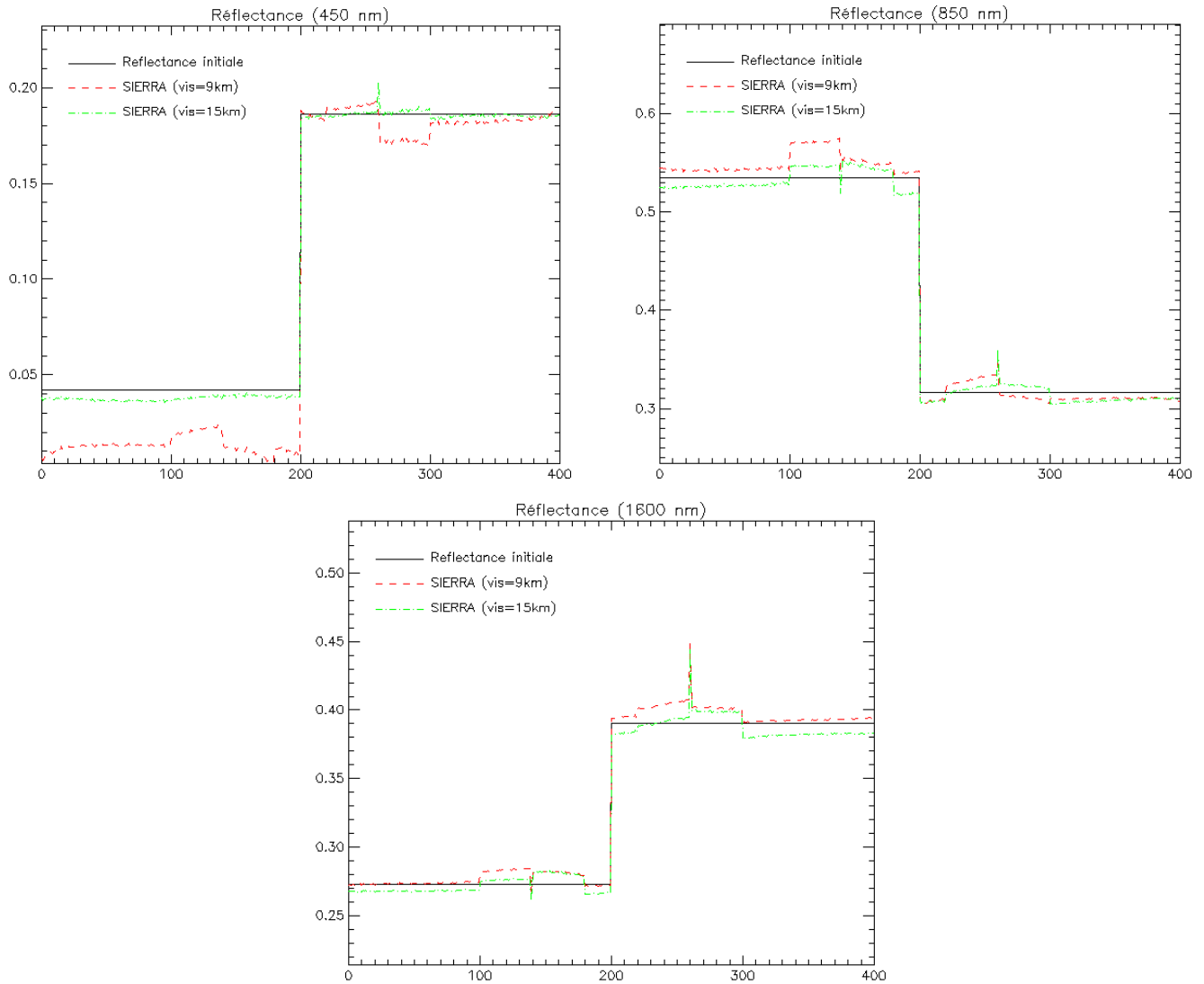


Figure 60: Inversion de la scène décrite paragraphe 1.2.1 avec une visibilité de 9 km.

2.3. Conclusion

Dans ce paragraphe, on a étudié l'impact sur la réflectance restituée, des principales sources d'erreur sur les données d'entrée du code SIERRA.

L'imprécision sur le modèle numérique de terrain est le principal poste d'erreurs sur l'inversion. Une orthorectification imparfaite de l'image sur le modèle de terrain (différence d'échantillonnage entre le MNT et l'image, décalage de l'image par rapport au MNT), ou des incertitudes sur l'altitude (bruit aléatoire ou périodique), engendrent des erreurs sur la réflectance restituée par SIERRA qui sont supérieures à celles obtenues lorsque l'inversion est effectuée en supposant le sol plat. Ces erreurs sont maximales dans le proche infrarouge (850 nm et 1600 nm) et sur les versants de montagnes opposés au soleil. Dans chaque cas étudié, on observe des erreurs sur la réflectance supérieures à 50%.

L'impact d'une erreur sur le type d'aérosols ou sur la visibilité atmosphérique, est surtout significatif lorsque les luminances diffuses et atmosphériques montantes sont des termes de premier ordre de la luminance en entrée capteur, c'est à dire à 450 nm pour le sol composé d'herbe. Dans les autres cas, l'erreur introduite est inférieure à 15%.

ONERA



CHAPITRE 4:

CAMPAGNE DE VALIDATION

Le volet expérimental de cette thèse est présenté dans ce chapitre. Les mesures effectuées sur le terrain sont décrites et analysées dans un premier temps. Ensuite, les images HYMAP acquises au-dessus du massif montagneux de Maqsad (Oman) sont inversées par le code SIERRA, afin d'évaluer l'apport d'une correction topographique, et la précision des réflectances spectrales restituées par SIERRA. Les résultats sont comparés avec les mesures de réflectance réalisées sur le terrain, et avec les réflectances obtenues par deux codes de correction atmosphérique adaptés pour un sol plat (HYCORR et COCHISE).

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La campagne de mesures sur le massif de Maqsad (Oman) a eu lieu dans le cadre de l'ACI "Observation de la Terre", dont le volet HYPERGEMME (HYPERspectral pour la GEologie et Minéralogie de Massifs et Environnement minier) regroupe plusieurs laboratoires français: le Laboratoire de Dynamique Terrestre et Planétaire (LDTP, de l'OMP Toulouse), le Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes (LPG), et l'ONERA/DOTA. Un des objectifs est d'évaluer l'intérêt de l'imagerie hyperspectrale pour l'exploration géologique. Dans cette optique, le massif ophiolitique de Maqsad, en Oman, a été choisi notamment pour son aridité et son fort intérêt géologique, qui en fait un site particulièrement bien renseigné depuis une vingtaine d'années. Ce massif présente un relief accidenté avec une altitude oscillant entre 700 m et 1500 m sur la zone étudiée. Il est surtout composé de petits reliefs avec des dénivelés de quelques dizaines de mètres et des pentes variant entre 15° et 20°.

La campagne de mesures effectuée sur ce site s'est déroulée du 3 au 7 décembre 2002. Au cours de cette campagne deux survols hyperspectraux réalisés avec l'instrument HYMAP ont été effectués les 4 et 6 décembre sur la même zone. Ces acquisitions doivent permettre notamment d'obtenir une cartographie géologique précise de la zone, qui sera comparée aux cartes existantes. Une équipe du LPG et du LDTP a notamment effectué des mesures, et des prélèvements d'échantillons sur le terrain, afin de valider la cartographie géologique dérivée des mesures HYMAP.

D'autre part, des mesures ont été réalisées par l'ONERA afin de déterminer les conditions atmosphériques présentes au cours du survol, mais aussi pour mesurer les propriétés de réflectance du sol. Les mesures atmosphériques sont utilisées pour ajuster le contenu en aérosols et la visibilité atmosphérique dans le code SIERRA, afin d'inverser les images HYMAP. Les mesures de réflectance bidirectionnelle sont réalisées pour valider les résultats obtenus avec ce code, ainsi que pour la prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance dans SIERRA (création d'un jeu de paramètres $k_0^{\#}$, $k_1^{\#}$, et $k_2^{\#}$ pour le modèle de Rahman).

Ces mesures sont présentées en annexe 2, paragraphe 2.4. Des mesures de transmission atmosphérique descendante, d'éclairement incident, de luminance au niveau du sol, et d'inter-étalonnage ont également été réalisées au cours de cette campagne.

2. DESCRIPTION DES MESURES AEROPORTEES

Le survol hyperspectral est effectué par l'imageur HYMAP (Figure 61) développé par la société australienne HYVISTA [3]. Cet instrument permet d'acquérir des images dans 128 bandes spectrales comprises entre 0,45 μm et 2,48 μm . La largeur des bandes est comprise entre 15 et 20 nm. Cet instrument a un excellent rapport signal sur bruit, supérieur à 500 sur quasiment l'ensemble du domaine spectral (pour une réflectance de 50%). Le champ de vue total de HYMAP est de 61,2° échantillonné sur 512 pixels.

Un système DGPS ainsi qu'un système inertiel de navigation permettent de positionner précisément l'avion et de déterminer l'orientation de l'instrument. Ces données sont utilisées pour le géoréférencement de l'image sur un modèle numérique de terrain.



Figure 61: imageur hyperspectral HYMAP

Huit traces orientées Nord/Sud et deux Est/Ouest sont acquises sur la zone de Maqсад (Figure 62). Ce quadrillage a été effectué le 04/12/02 et le 06/12/02, sur la même zone. Dans chacun des cas, l'acquisition débute par les deux traces Est/Ouest, continue avec les traces Nord/Sud, et finit par une nouvelle acquisition sur les deux traces Est/Ouest. La largeur des traces est d'environ 3 km, avec un recouvrement d'environ 15% entre deux traces juxtaposées. Le capteur a survolé le massif à une altitude de 4140 m, la taille des pixels variant ainsi entre 5 m et 8 m. Les mesures ont été acquises aux alentours du midi solaire, l'incidence solaire variant entre 45° et 55° pendant l'acquisition.

HYVISTA a fourni, en plus des images de luminances, les images de réflectance correspondantes obtenues par le code de correction atmosphérique HYCORR (ATREM + EFFORT [6] [25]).

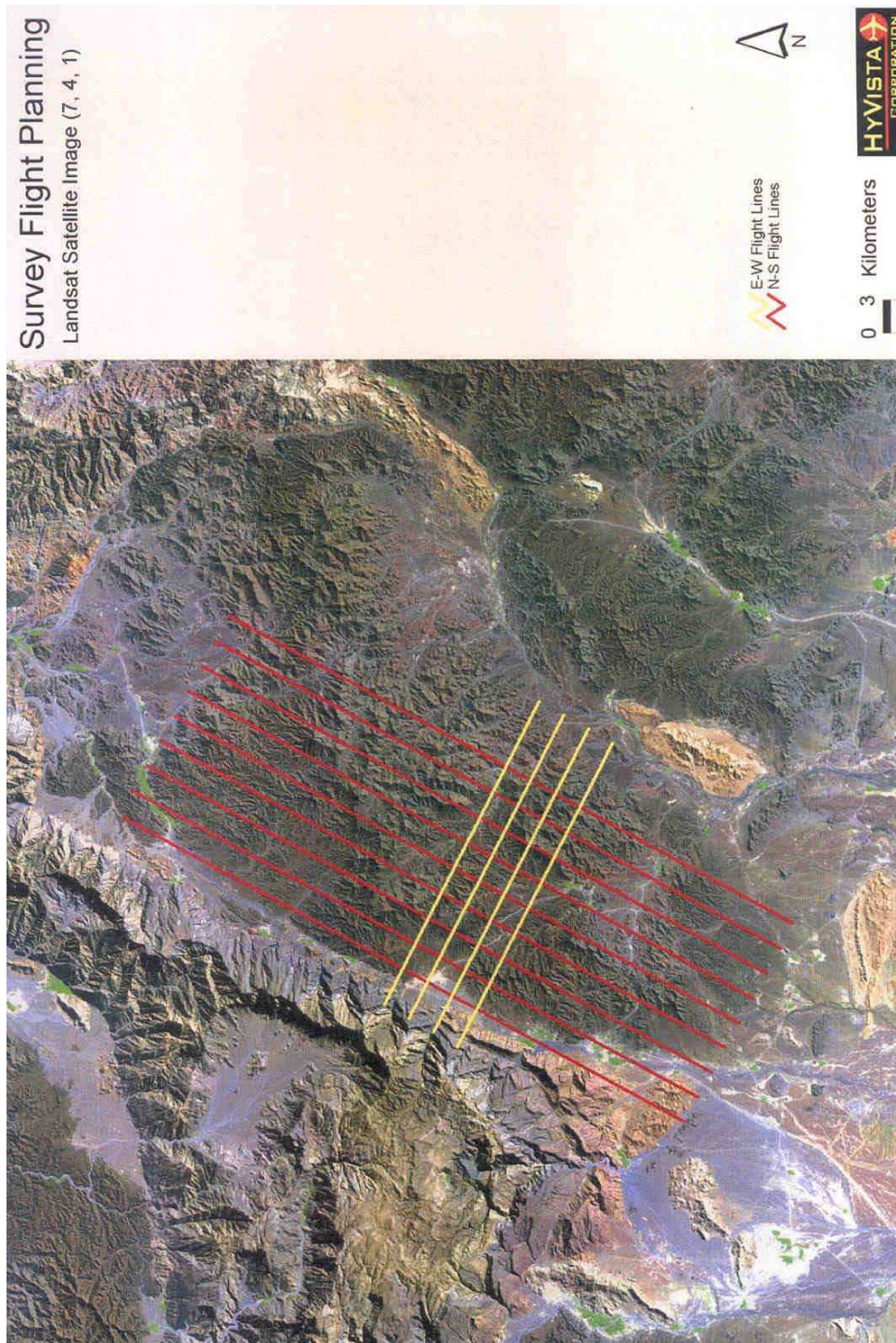


Figure 62: Carte du survol effectué avec l'instrument HYMAP sur le massif de Maqsad

3. DESCRIPTION DES MESURES REALISEES PAR L'ONERA

3.1. Mesures de réflectance bidirectionnelle

Le site de mesure, est un sol approximativement plat (une légère pente de 1° à 2°) sur une centaine de mètres, et entouré de reliefs de 20 à 30 mètres de dénivelés (Photo 1). Ce site est choisi notamment pour sa position par rapport à la grille de survol de HYMAP. Il est positionné aux abords de l'intersection entre la trace EO 02 (Est-ouest) et la trace NS 05 (Nord-sud). Son accessibilité ainsi que sa composition quasi homogène ont été d'autres facteurs déterminants pour ce choix. Le sol est composé essentiellement de cailloux et de poussières issues de péridotites. Des graviers de différentes tailles (entre 0,5 et 5 cm de diamètre pour la plupart) recouvrent un sol de poussière claire.



Photo 1: Site de mesures (à gauche) et photo représentative du sol sur le site (à droite)

3.1.1. Principe de mesure

Les mesures de réflectance bidirectionnelle sont obtenues à l'aide du banc de mesures CHAMO (CHArriot Mobile Orientable) équipé d'un GER 3700, de l'ONERA (Photo 2). CHAMO permet de réaliser des mesures de réflectance pour des angles d'émergence variant entre -80° et $+80^\circ$ dans un même plan azimutal, selon un pas de 5° . Le GER est un spectro-radiomètre de terrain comportant 640 canaux de mesures compris entre $0,3 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$ (largeur des bandes comprise entre 1,5 nm et 9,5 nm suivant la longueur d'onde).



Photo 2: Système de mesures CHAMO-GER avec le panneau d'ombre utilisé

Lorsque cela est possible, les mesures de BRDF sont obtenues dans trois plans azimutaux, le plan principal, le plan perpendiculaire et un plan décalé de 30° du plan principal.

Un logiciel développé à l'ONERA est utilisé pour l'acquisition et le traitement des données. L'acquisition débute par une mesure de l'éclairement total réfléchi par le spectralon $L_{tot}^{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)$, puis par une mesure de l'éclairement diffus réfléchi par le spectralon $L_{dif}^{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)$. Cette dernière opération est réalisée en coupant l'éclairement direct à l'aide d'un panneau d'ombre. Ce panneau d'ombre doit recouvrir entièrement la zone visée par le GER et doit être identique pour chaque mesure obtenue dans un plan azimutal (l'ombre portée doit être la même pour une émergence de 0° et une émergence de 80°). Un panneau d'ombre d'un mètre de large est utilisé afin d'obtenir des mesures de réflectance bidirectionnelle pour de grands angles d'incidence (annexe 2, paragraphe 2.1). La luminance réfléchie par le sol est ensuite mesurée suivant la même démarche en deux temps (avec et sans panneau d'ombre), avec des acquisitions effectuées pour des angles de visée variant entre 0° et 80° suivant un pas de 10° . On obtient ainsi l'éclairement total réfléchi par le sol $L_{tot}^{sol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ et l'éclairement diffus réfléchi par le sol $L_{dif}^{sol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ pour chaque angle zénithal et azimutal de visée (θ_v, φ_v) . On termine ensuite l'acquisition par une nouvelle mesure en deux temps sur le spectralon en visée nadir.

La luminance issue de l'éclairement direct, et réfléchi par le spectralon, est obtenue par combinaison linéaire temporelle entre les deux mesures sur la référence:

$$L_{dir}^{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda) = \alpha(L_{tot}^{ref2}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda) - L_{dif}^{ref2}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)) + (1 - \alpha)(L_{tot}^{ref1}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda) - L_{dif}^{ref1}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)) \quad (73)$$

α est égal à $\frac{1}{2}$ si les deux mesures de référence sont correctes, à 1 si la première mesure est erronée et à 0 si c'est la deuxième mesure.

Ensuite, la réflectance bidirectionnelle pour une incidence fixe se déduit:

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{(L_{tot}^{sol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) - L_{dif}^{sol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda))\rho_{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)}{L_{dir}^{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)} \quad (74)$$

Un certain nombre de facteurs liés au protocole de mesures ou aux conditions de terrain peuvent perturber de manière significative les mesures de réflectance bidirectionnelle:

- Les nuages qui coupent l'éclairement direct et engendrent des variations de l'éclairement incident.
- Les angles d'incidence solaire qui varient au cours des séquences de mesures.
- Le vent qui perturbe l'utilisation du panneau d'ombre et soulève les poussières.
- La variation de la tâche au sol (sol hétérogène) vue par le GER, et donc de la forme de la cible, en fonction des angles zénithaux et azimutaux de visée.
- La taille importante du panneau d'ombre, qui coupe une partie de l'éclairement diffus en même temps que l'éclairement direct. L'éclairement direct incident est ainsi surestimé.

Les différentes mesures de réflectance bidirectionnelle effectuées à l'ONERA sur CHAMO, montrent que l'erreur relative sur la réflectance est de l'ordre de 10% à 15%.

Le Tableau 4 répertorie les mesures de BRDF réalisées. Les conditions de mesure et les problèmes rencontrés y sont explicités. L'abréviation « pp » est utilisée pour plan principal, l'abréviation « perp » pour le plan perpendiculaire et « 30° » pour le plan décalé de 30° du plan principal. L'angle de visée est représenté par θ_v . L'incidence donnée correspond à l'angle zénithal solaire au moment des mesures.

Sept mesures de BRDF sont acquises au cours de cette mission. Elles sont présentées en annexe 2, paragraphe 2.4. Les types de sol, conditions d'incidence, et les plans de mesures diffèrent d'une séquence de mesures à l'autre. Les mesures sont effectuées pour trois tailles de grains différentes: les grains fins, dont le diamètre est inférieur à 0,5 cm, les grains moyens dont le diamètre est compris entre 0,5 cm et 2 cm, et les gros grains dont le diamètre est supérieur à 2 cm. Outre les nuages, on remarque des problèmes récurrents d'ombre portée pour les grands angles d'émergence (70° et 80°).

BRDF	Type de sol	date	Plans de mesure	Incidence	Remarques
1	Péridotite Grains moyens	03/12 à 06H20	pp, perp, 30° De -80° à +80°	51° à 45.5°	Rien à signaler
2	Péridotite Grains moyens	03/12 à 08H05	pp, perp De -80° à +80°	45° à 46°	Nuages (pp, $\theta_v > 30^\circ$) Nuages (perp, $30^\circ < \theta_v < 70^\circ$)
3	Péridotite Même site que 1	04/12 à 05H00	pp, perp, 30° De -80° à +80°	62° à 55°	Problème d'ombre (perp et 30°)
4	Péridotite Gros grains	04/12 à 06H40	pp, perp De -80° à +80°	49° à 47°	Nuages (pp)
5	Péridotite Grains fins	06/12 à 04H45	pp, perp, 30° De -80° à +80°	65° à 58°	Nuages (pp)
6	Péridotite Poussière blanche	06/12 à 07H05	pp De -80° à +80°	47°	Nuages Mesures inexploitable
7	Péridotite Poussière blanche	06/12 à 07H55	pp, perp De -80° à +80°	45°	Problème d'ombre (perp)

Tableau 4: Détail des mesures de BRDF obtenues sur le site de Maqsad

En raison de la présence de nuages, de nombreuses mesures sont incomplètes. D'autre part, les mesures effectuées en extérieur ne sont exploitables qu'entre 0,75 μm et 2,35 μm en raison de phénomènes de saturation du signal dans les courtes longueurs d'onde (entre 0,4 et 0,75 μm). Afin de compléter notre étude, des mesures en laboratoire sont également réalisées sur un échantillon composé de grains fins et de poussières de péridotites prélevé sur le site de mesures.

Ces mesures sont obtenues à l'aide du goniomètre de l'ONERA/DOTA (Photo 3, [24]). Ce banc permet d'effectuer des mesures de BRDF pour des angles d'incidence et d'émergence variant entre 0° et 60° avec un pas minimal de 1°. La source est une lampe Quartz Tungstène Halogène incohérente. La source définit le plan principal avec un azimut de 0° et les mesures de BRDF peuvent être réalisées pour des azimuts compris entre 0° et 180°.

Le spectro-radiomètre utilisé fournit des données sur 1024 bandes spectrales de 3 nm de largeur et comprises entre 0,42 μm et 0,95 μm . Le champ de vue du capteur est circulaire au nadir avec un diamètre de 4,5 cm et devient ellipsoïdal lorsque l'angle de visée augmente. La précision des mesures est de l'ordre de 5%.

La cible est constituée de grains fins de péridotite recueillis sur le site de mesures. Deux séries de mesures sont réalisées en effectuant une rotation de la cible de 90° entre la première et la deuxième série, afin d'étudier l'impact de la disposition des grains et de l'étendue du champ de vue sur les mesures. Ces mesures sont obtenues pour des incidences variant entre 0° et 60°, des angles d'émergence compris entre 0° et 60°, et des angles azimutaux de visée compris entre 0° et 180° (le plan d'incidence est le plan d'azimut 0°).

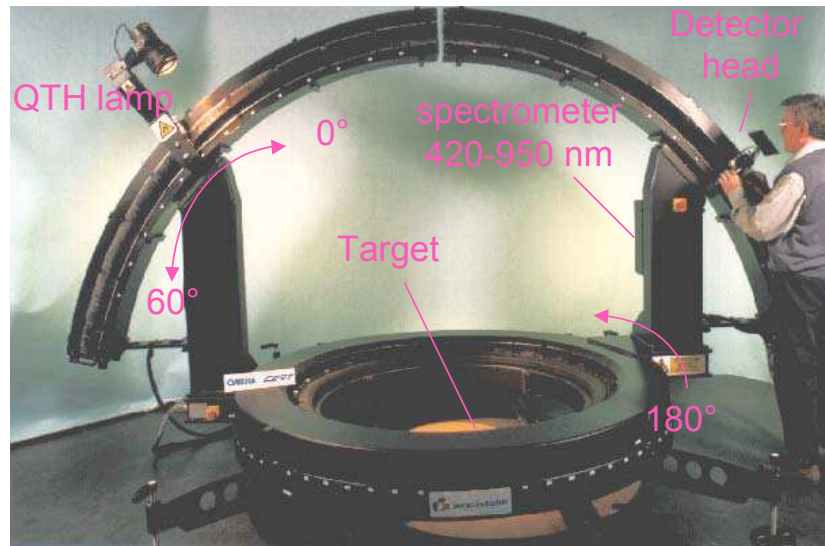


Photo 3: Goniomètre de l'ONERA/DOTA

Avec les notations utilisées précédemment, la BRDF en laboratoire est obtenue suivant l'équation:

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{(L_{tot}^{sol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) - L_{dif}^{sol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda)) \rho_{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)}{\pi L_{dir}^{ref}(\theta_i, \varphi_i, 0, 0, \lambda)} \quad (75)$$

La principale limitation de ces deux dispositifs (terrain et laboratoire) est qu'ils ne permettent pas d'obtenir des mesures dans la direction exacte de hot-spot.

3.1.2. Analyse des mesures de réflectance bidirectionnelle

Les mesures de réflectance bidirectionnelle acquises en Oman sont effectuées dans différentes conditions d'incidence solaire et de prise de vue (Tableau 4). Les caractéristiques des surfaces mesurées varient par la taille des grains mais aussi par la disposition de ces grains sur la scène. Ces facteurs ont tous une influence sur les spectres mesurés, aussi bien sur leur forme que sur le niveau de réflectance obtenu.

Le sol étudié, composé essentiellement de péridotite, est fortement rétro-diffusant (comme tout sol nu rugueux). Dans le plan principal, on observe l'effet de hot-spot qui se traduit par un pic de réflectance dans un cône centré sur la direction d'incidence (Figure 63a). Il engendre une réflectance deux à trois fois plus importante que celle obtenue au nadir. Il est plus faible sur les mesures effectuées en laboratoire où les grains sont plus fins, et l'écart minimal entre l'angle de visée et la direction Hot-Spot est de 10°. Ce pic

apparaît également dans des plans de visée décalés de 15° (laboratoire, Figure 64) et de 30° (terrain, Figure 63b) du plan principal.

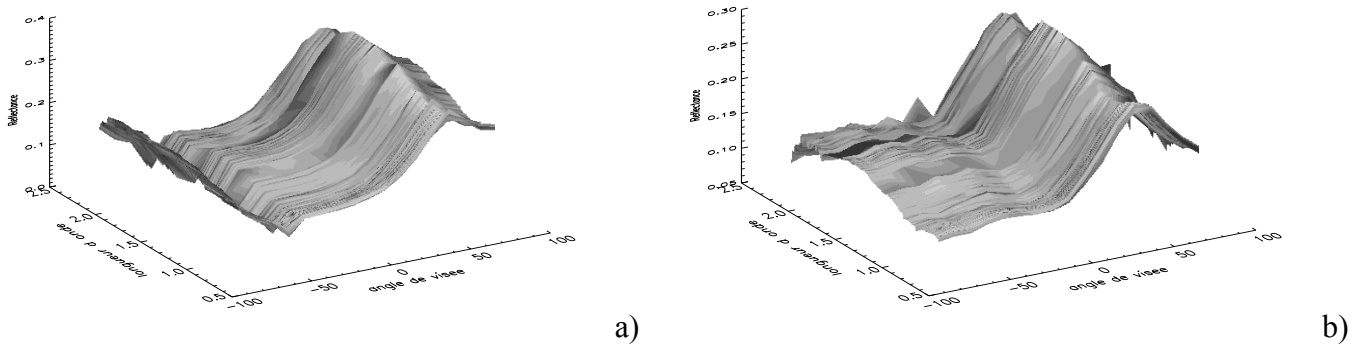


Figure 63: Réflectance bidirectionnelle de péridotite mesurée sur CHAMO, dans le plan principal (à gauche) et dans un plan décalé de 30° du plan principal (à droite)

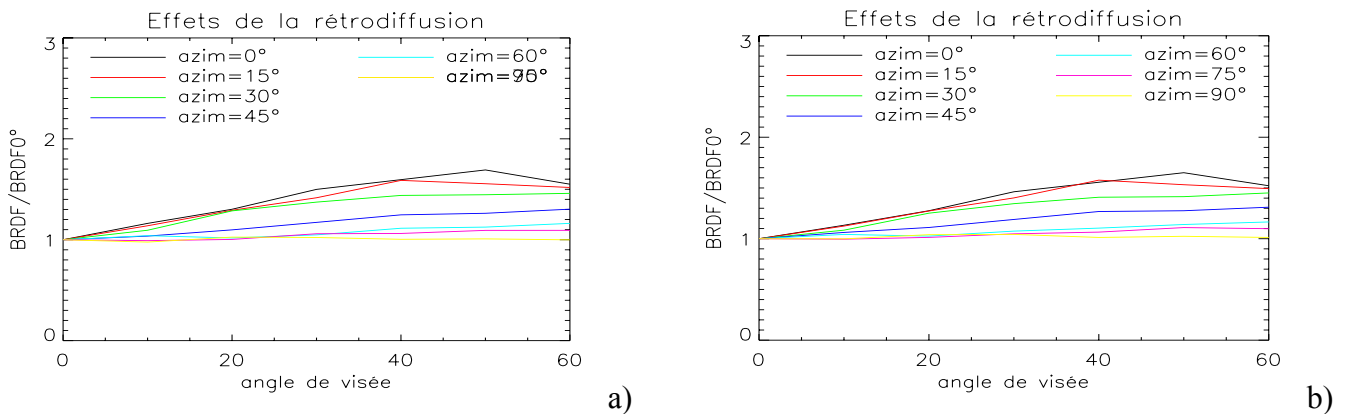


Figure 64: Rapport BRDF mesurée sur BRDF au nadir en fonction des angles zénithal et azimutal de visée, à 750 nm (à gauche) et 900 nm (à droite) (mesures laboratoire, incidence de 40°).

En diffusion avant, les variations de réflectance observées sont nettement plus faibles qu'en rétrodiffusion (Figure 63). On observe dans la plupart des cas un minimum de réflectance obtenu pour des angles de visée compris entre 20° et 50° (entre 0,8 et 0,9 fois la réflectance au nadir). Pour des angles de visée supérieurs, la réflectance augmente de nouveau.

Si l'on observe les spectres obtenus au nadir sur une même cible dans différents plans azimutaux, on remarque des variations importantes du niveau de réflectance, pouvant atteindre 30% sur les mesures terrain (Figure 65) et 10% pour les mesures effectuées en laboratoire (Figure 66). Ces variations s'expliquent par la disposition des grains et poussières sur la cible, et par la forme du champ de vue des instruments. Le champ de vue du GER, qui est ellipsoïdal, engendre des variations de réflectance plus importantes que celles observées avec le goniomètre, dont le champ de vue est circulaire au nadir. La cible utilisée en laboratoire

est aussi plus homogène (il y a peu de poussière, et la taille des grains varie peu sur la cible) que celles visées sur le site de mesure.

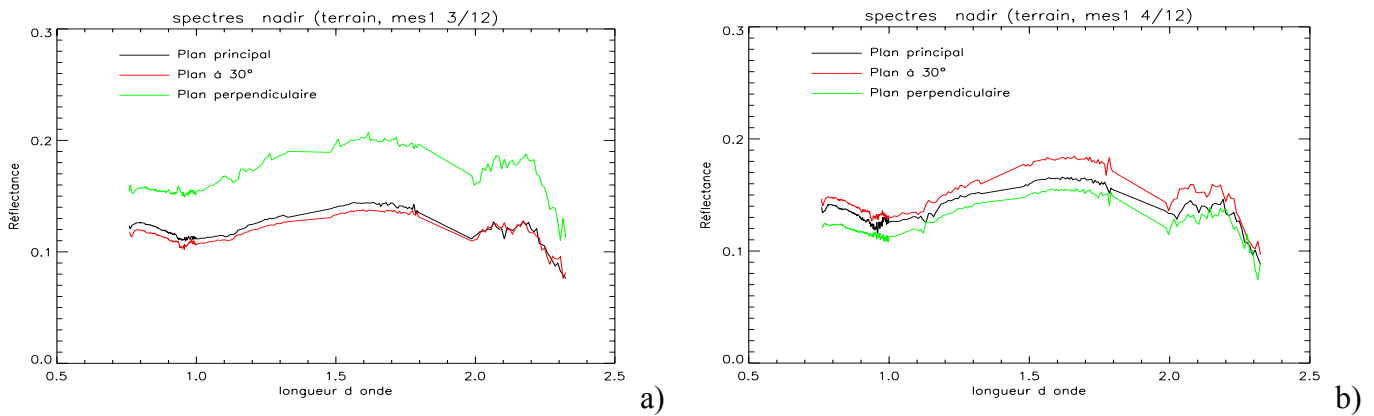


Figure 65: Comparaison entre les spectres nadir obtenus pour deux BRDF mesurées au cours de la campagne, en fonction du plan azimuthal de visée.

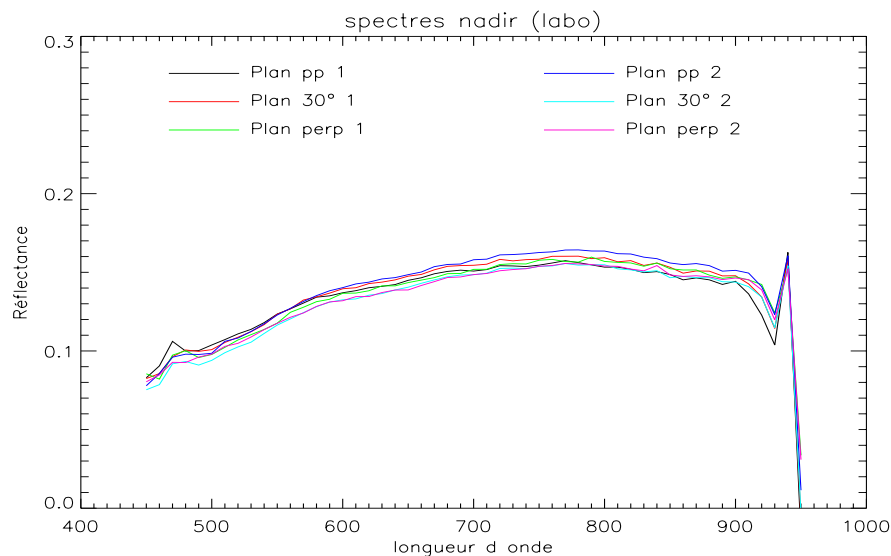


Figure 66: Spectres nadir obtenus en laboratoire dans le plan principal, le plan à 30° et le plan perpendiculaire, pour les deux séquences de mesures réalisées.

D'autre part, le niveau (Figure 67a) et les effets bidirectionnels de la réflectance (Figure 67b et c) sont nettement plus importants pour la poussière que pour les grains. Par contre, on ne peut rien conclure sur les variations de réflectance dues à la taille des grains, car celles-ci sont plus faibles que celles dues au champ de vue de l'instrument. Comme le champ de vue du GER est ellipsoïdal et augmente avec l'angle de visée, la zone visée varie donc quand on change de plan azimuthal et d'angle d'émergence, ce qui engendre des variations de réflectance importantes.

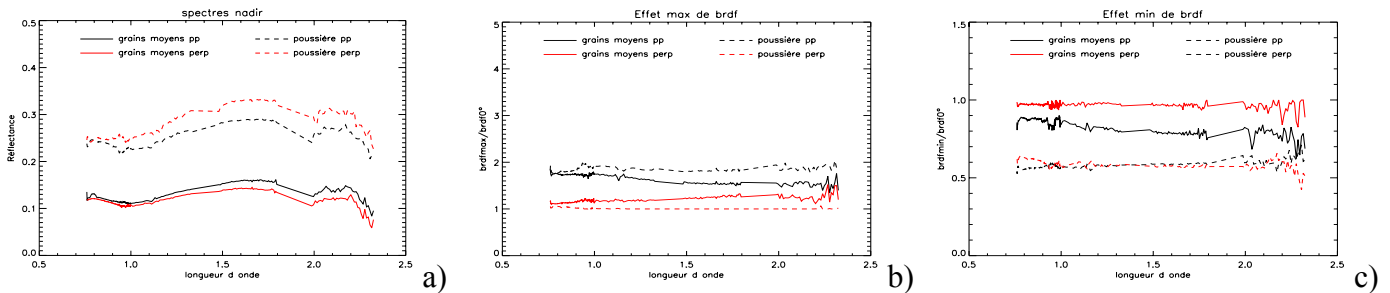


Figure 67: Réflectances au nadir (a), rapports réflectance maximale mesurée sur réflectance nadir (b), et réflectance minimale mesurée sur réflectance au nadir (c), pour des grains moyens et de la poussière.

Les mesures effectuées en laboratoire mettent davantage en évidence les variations de la réflectance avec l'angle d'incidence. Le niveau de réflectance augmente légèrement avec l'incidence du rayonnement (Figure 68a). Ces variations sont assez faibles et n'excèdent pas 10%. La rétrodiffusion devient plus importante lorsque l'angle d'incidence augmente (Figure 68b), par contre, il n'y a pas de mise en évidence d'une tendance concernant l'influence de l'angle d'incidence du rayonnement sur la diffusion avant (entre 0° et 60°, Figure 68c). Sur les mesures effectuées en extérieur, l'effet de l'angle d'incidence est difficile à mettre en évidence, car l'hétérogénéité du sol et le champ de vue de l'instrument semblent avoir plus d'influence sur la réflectance.

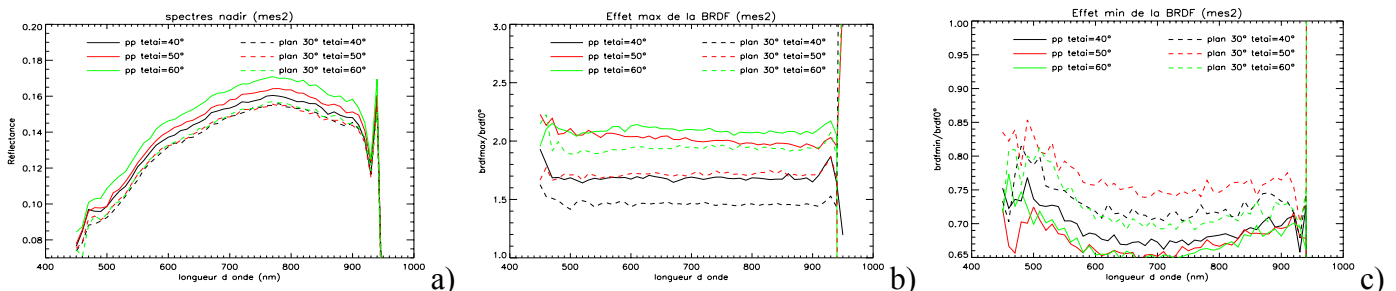


Figure 68: Réflectances au nadir (a), rapports réflectance maximale mesurée sur réflectance au nadir (b), et rapports réflectance minimale mesurée sur réflectance au nadir (c), pour des grains fins et trois angles d'incidence (40°, 50°, et 60°).

3.1.3. Utilisation des mesures de BRDF pour SIERRA

La correction des effets bidirectionnels de la réflectance dans SIERRA nécessite la connaissance des paramètres k_0 , k_1 , et k_2 du modèle de Rahman. Ces paramètres sont fournis en entrée du code SIERRA. Pour l'inversion des images HYMAP, les paramètres de Rahman sont déterminés à partir des mesures de BRDF effectuées sur le site de référence. Les mesures au sol ne recouvrant pas l'ensemble du domaine réflectif, les paramètres de Rahman sont aussi estimés à partir des mesures effectuées en laboratoire. Dans un premier temps, les BRDF mesurées en Oman le 03/12, le 04/12 et le 06/12, dans trois plans azimutaux de visée (mesures 1, 3, et 5 dans le Tableau 4), et les deux mesures effectuées en laboratoire (correspondant aux

deux orientations de la cible), sont ajustées sur le modèle de Rahman, afin d'estimer les paramètres qui modélisent le mieux la BRDF du sol. Les albédos sphériques calculés à partir de chaque jeu de paramètres sont représentés Figure 69a.

En raison d'écarts importants sur l'albédo sphérique, le jeu de paramètres estimé à partir de la BRDF mesurée en extérieur le 06/12 (grains fins) n'est pas utilisé. Entre 0,75 μm et 0,9 μm , des écarts relatifs atteignant 15% sont observés entre les albédos sphériques estimés à partir des mesures laboratoires, et ceux obtenus à partir des mesures effectuées sur le site de mesures. Pour obtenir un jeu de paramètres cohérent, les paramètres estimés à partir des mesures laboratoire sont recalés par rapport à ceux obtenus à partir des mesures en extérieur. Pour chaque paramètre k_i , on estime dans la zone de recouvrement des spectres (entre 0,75 μm et 0,9 μm), le rapport $k_i^{\text{ext}} / k_i^{\text{labo}}$. Les paramètres calculés à partir des mesures laboratoire sont multipliés par ce rapport pour chaque longueur d'onde. L'albédo sphérique résultant est représenté Figure 69b.

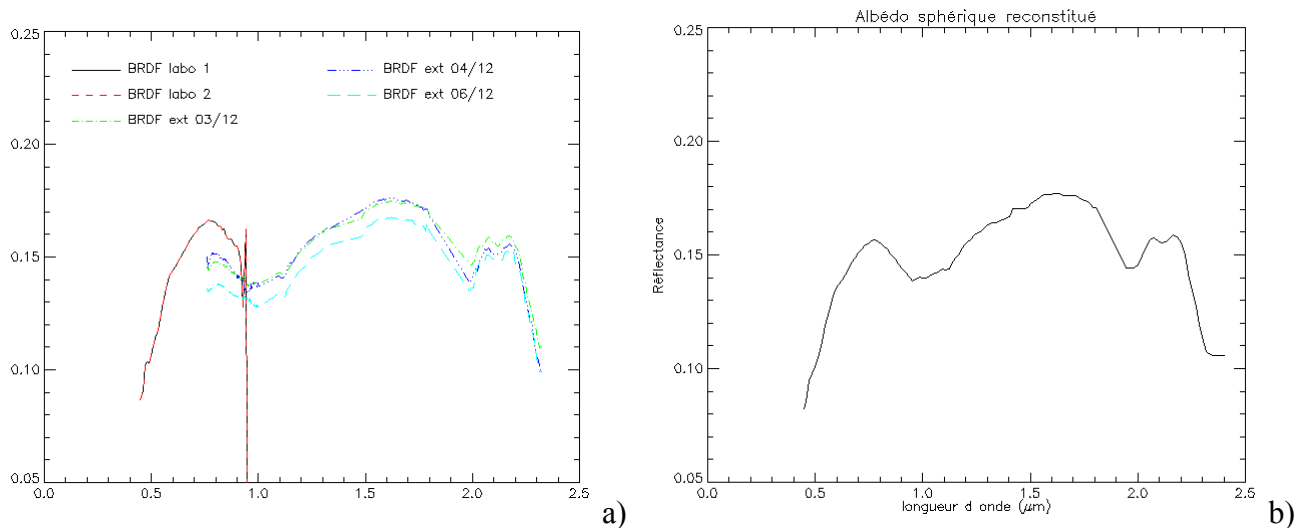


Figure 69: Albédos sphériques calculés à partir de jeux de paramètres déduits de mesures de BRDF de péridotite.

Les réflectances restituées par SIERRA en inversant les images HYMAP au dessus du site de référence, ne sont pas comparées avec le spectre reconstitué, mais uniquement avec les mesures de BRDF effectuées sur le site de référence, entre 0,75 μm et 2,35 μm . En effet, les mesures laboratoires sont effectuées sur des grains fins, disposés de manière homogène, avec peu de poussière, et sont donc moins représentatives du sol survolé, que les mesures réalisées sur le site.

3.2. Mesures d'épaisseur optique

Ces mesures sont effectuées avec un héliophotomètre CIMEL fourni par le LOA, qui permet de mesurer les épaisseurs optiques dans la direction d'incidence solaire. Les épaisseurs optiques sont obtenues à trois longueurs d'onde : 440 nm, 670 nm et 870 nm. Elles sont utilisées pour fixer le type d'aérosol et la visibilité atmosphérique dans le code SIERRA, lors de l'inversion des images HYMAP.

Les épaisseurs optiques à 550 nm sont déduites des mesures réalisées à 440 nm et 870 nm par le CIMEL, à l'aide de la loi d'Angström (Figure 70). Le canal à 670 nm donne des mesures aberrantes et n'a donc pas été utilisé. L'épaisseur optique à 550 nm permet ensuite de déterminer la visibilité atmosphérique.

Les mesures CIMEL témoignent d'une atmosphère parfaitement claire en dehors des périodes nuageuses (entre 7H et 8H30 le 4/12), correspondant à une visibilité variant entre 30 et 60 km (avec la définition utilisée dans MODTRAN4 [2]) pour le 4/12, soit des épaisseurs optiques à 550 nm comprises entre 0,15 et 0,25. Les 6 et 7 décembre, l'atmosphère présente une visibilité proche des 100 km, soit une épaisseur optique à 550 nm de l'ordre de 0,09.

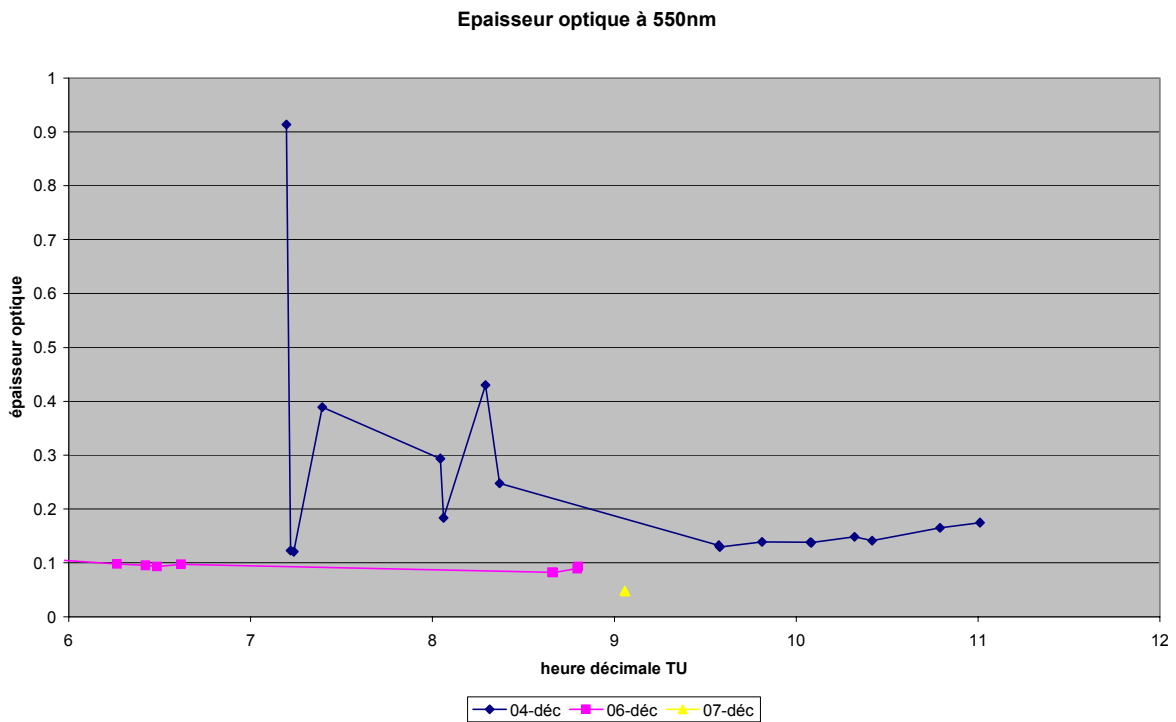


Figure 70: Epaisseur optique à 550nm déduite des mesures CIMEL

4. INVERSION DES IMAGES HYPERSPECTRALES AVEC SIERRA

Les images étalonnées en luminance acquises par le capteur aéroporté HYMAP ne sont pas directement exploitables pour une prise en compte du relief. Elles doivent être au préalable orthorectifiées. L'orthorectification consiste à re-dimensionner les pixels de manière à former une grille régulière, et à les positionner dans un repère UTM (Universal Transverse Mercator). Cette opération est effectuée à partir du positionnement GPS de l'avion, en prenant en compte les mouvements de tangage et de roulis, l'angle de vue du capteur, et le relief de la scène par l'intermédiaire d'un Modèle Numérique de Terrain positionné dans le même repère UTM. Dans le cadre de cette campagne de mesures, les images HYMAP sont orthorectifiées à l'aide d'un modèle numérique de terrain fourni par le satellite ASTER. La taille des pixels de ce MNT est de 30 m, et la précision de l'altitude est également de 30 m. L'étude de sensibilité présentée paragraphe 2.1, chapitre 3, montre que ce MNT n'est pas adapté à une correction topographique sur le paysage de Maqsad, puisque le pas d'échantillonnage est environ 5 fois plus grand que celui des images HYMAP orthorectifiées, et l'incertitude sur l'altitude est trop importante pour permettre une estimation précise de la pente de chaque pixel.

Un nouveau MNT a été créé à partir d'images stéréoscopiques Spot5. Ce MNT a une résolution spatiale de 10 m pour une précision en altitude de 7 m. Les deux modèles numériques de terrain, et les représentations du relief correspondantes, sont présentés Figure 71. Leurs coordonnées extrêmes théoriques sont quasiment identiques (le décalage en ordonnée est de 3 m, et il est négligeable en abscisse). Or on note un décalage important entre les reliefs constitués à partir des deux MNT. D'autre part, les estompages des MNT présentés Figure 71, montrent un gain en précision du MNT Spot par rapport au MNT ASTER. La forme des reliefs, en particulier du massif situé au centre de l'image, semble également différente. Les profils d'altitude selon un axe x , extraits des MNT sur une distance de 5000 m (Figure 72), montrent d'importantes différences. L'écart en altitude entre les deux modèles oscille entre 30 m et 200 m. On remarque également des décalages entre les sommets, atteignant 200 m.

Si on observe le MNT SPOT à une échelle plus petite, on aperçoit de légères oscillations de l'altitude, entre 1 m et 3 m, quasi-périodiques (tous les 4 à 6 pixels). Sur un profil situé sur un versant opposé au soleil, la Figure 73 montre l'impact de ces fluctuations (Figure 73a) sur le facteur correctif de pente $\cos(\theta_i)/\cos(\theta_s)$ (Figure 73b). De nombreux filtres (médian, gaussien, FTM) ont été testés sur ce MNT afin d'enlever le bruit, mais sans succès. L'étude de sensibilité présentée paragraphe 2.1, a montré que sur les versants de montagnes opposés au soleil, des oscillations de ce type engendrent des erreurs sur la réflectance estimée, qui sont supérieures à celles obtenues en supposant un sol plat.

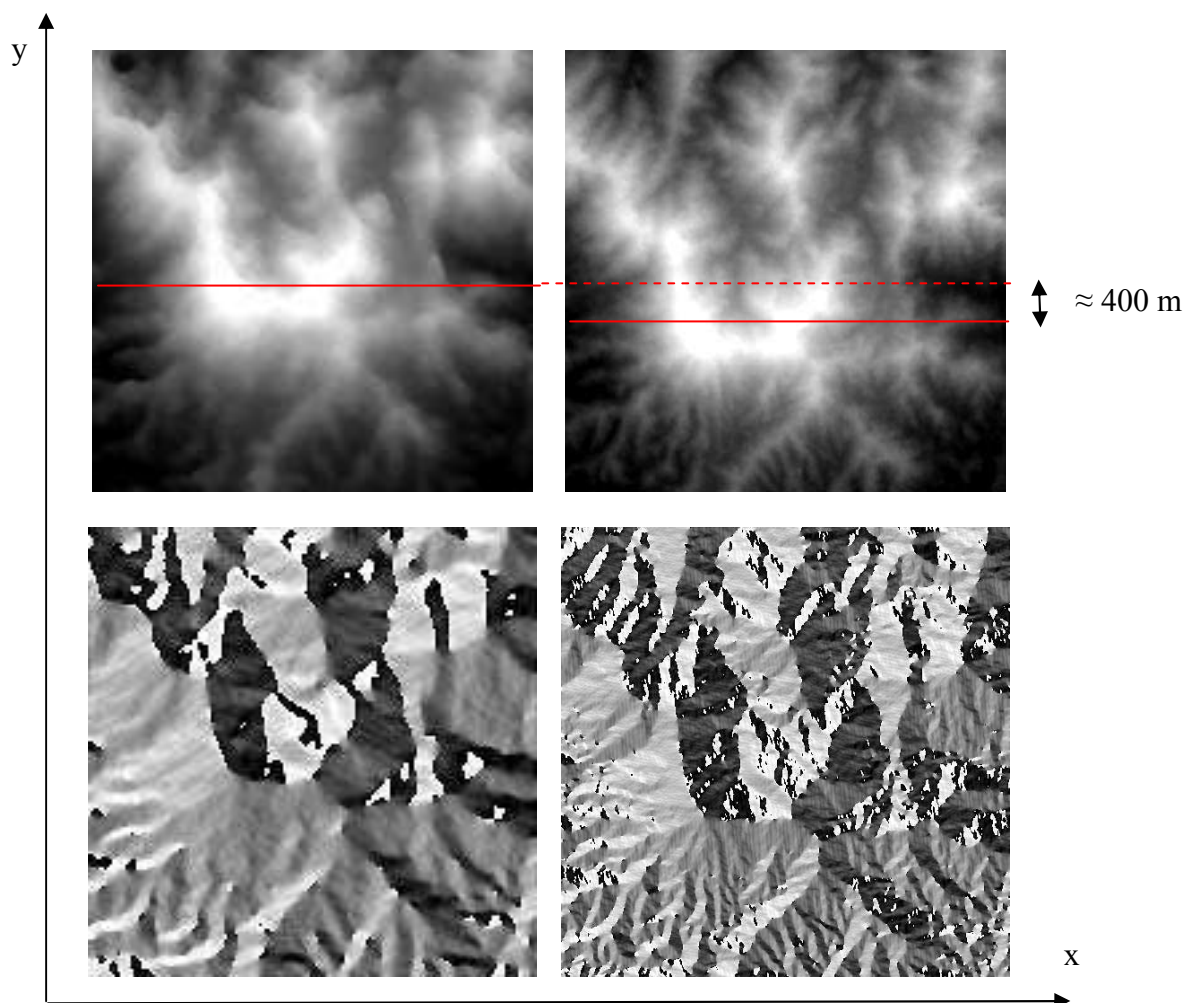


Figure 71: comparaison entre les MNT ASTER (à gauche) et SPOT5 (à droite). En haut, les altitudes des MNT ASTER et SPOT5 sont représentées en niveau de gris. En bas, ce sont les estompages correspondants.

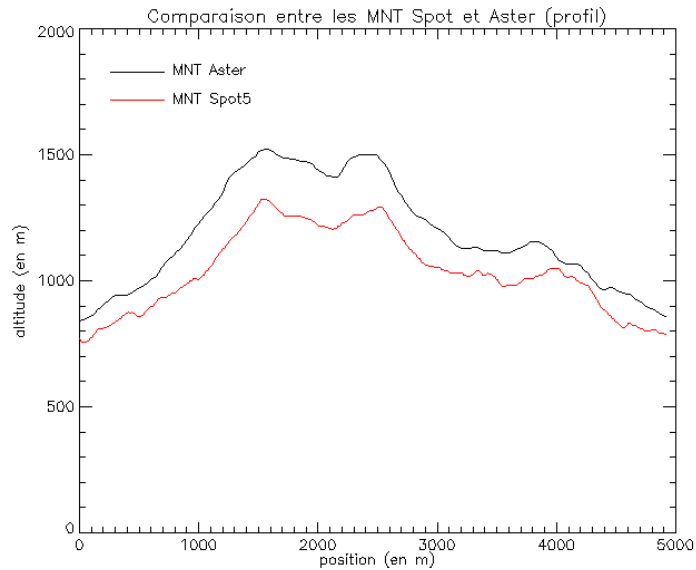


Figure 72: Profils en altitude des MNT sur un même relief.

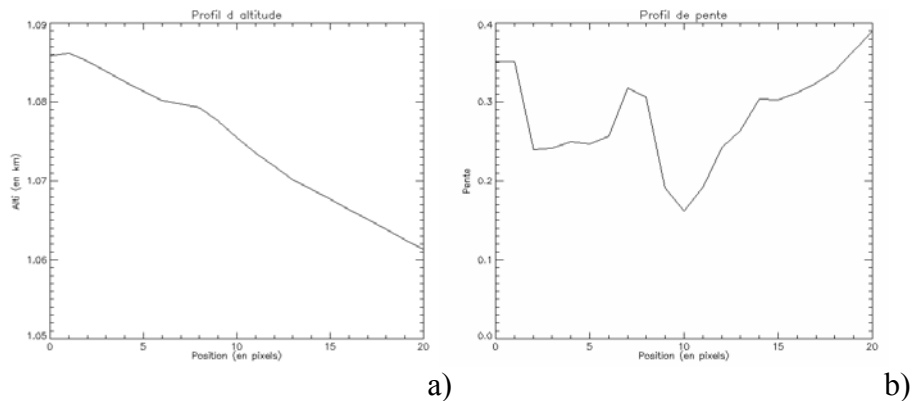


Figure 73: Impact des fluctuations d'altitude observées sur le MNT SPOT5 (a) sur l'estimation du facteur correctif de pente (b).

Les traces recouvrant une même zone ne sont pas superposables après orthorectification sur le MNT ASTER, et les écarts observés entre deux traces atteignent dans certains cas plusieurs centaines de mètres. Pour réaliser un mosaïquage des images HYMAP, les traces orthorectifiées ont été recalées par le logiciel Medicis sur une image panchromatique du massif acquise par LANDSAT7. L'orthorectification sur le MNT Spot5 n'a pas pu être réalisée dans le temps aparti à cette thèse. Aussi, afin de limiter les erreurs de positionnement des pixels, le MNT Spot5 a également été recalé par le programme Medicis sur la même image LANDSAT7. Pour effectuer ces opérations, la résolution spatiale des traces orthorectifiées passe de 5,6 m à 6m, et celle du MNT SPOT5 de 10 m à 14,25 m.

Le positionnement des traces HYMAP par rapport aux deux MNT est alors évalué. Une imagerie de 100 pixels par 90 est d'abord extraite de la trace EO 01. A partir des coordonnées de cette imagerie, deux images sont modélisées par le code direct de SIERRA en s'appuyant sur les MNT ASTER et SPOT5. La Figure 74 présente l'image de luminances mesurée par HYMAP dans la bande 10 (0,57 µm), et les images

simulées. Ces comparaisons montrent un décalage entre les images simulées et l'image extraite. Ce décalage est représenté Figure 75: sur l'image de luminance acquise par HYMAP, l'imagette extraite est délimitée par un cadre rouge, l'image simulée à partir du MNT ASTER est positionnée par un cadre bleu, et celle obtenue à partir du MNT SPOT5 par un cadre vert. Dans le paragraphe 2.1 du chapitre 3, l'étude de sensibilité montre que de tels décalages entre l'image et le MNT, engendrent des erreurs sur la réflectances supérieures à celles obtenues en supposant un sol plat.

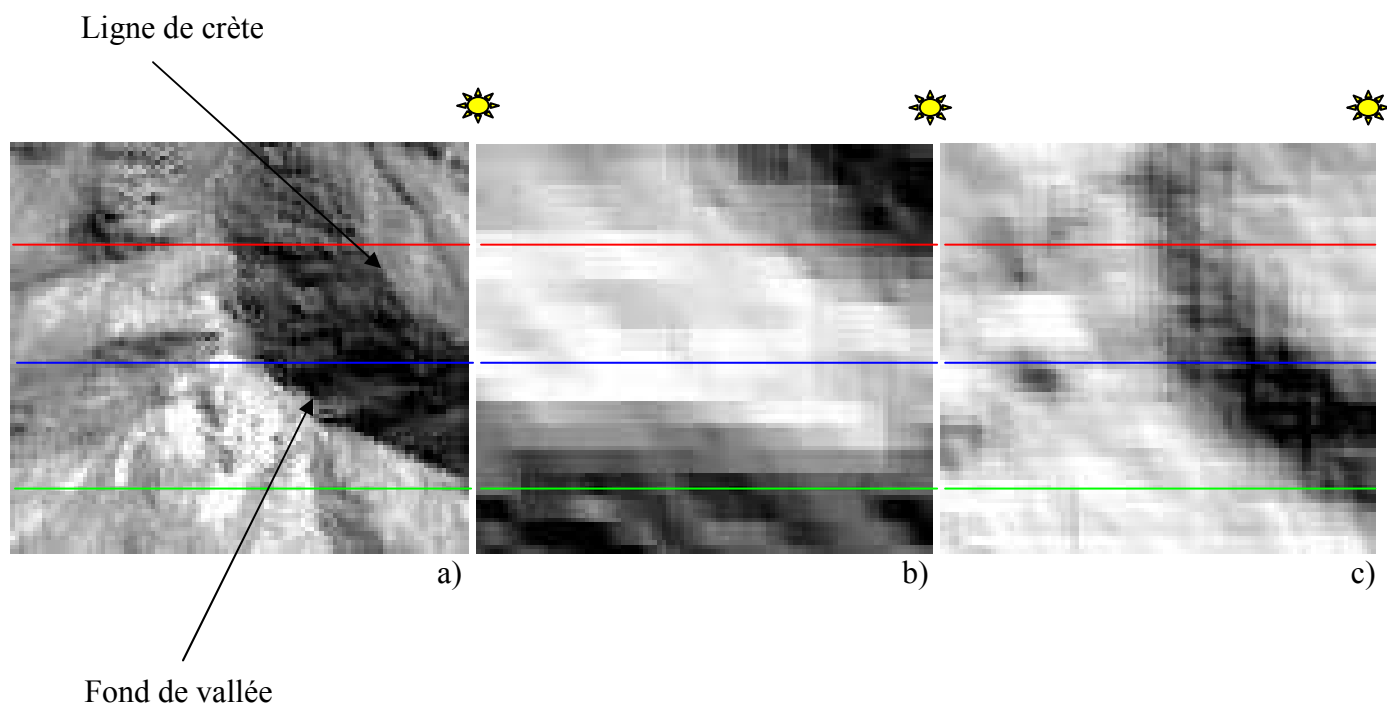


Figure 74: Comparaison entre l'image mesurée par HYMAP (à gauche), et les images simulées par le code direct de SIERRA, en considérant les MNT ASTER (au centre) et SPOT5 (à droite). Les lignes bleu, rouge et verte sont commentées dans le paragraphe 4.1.

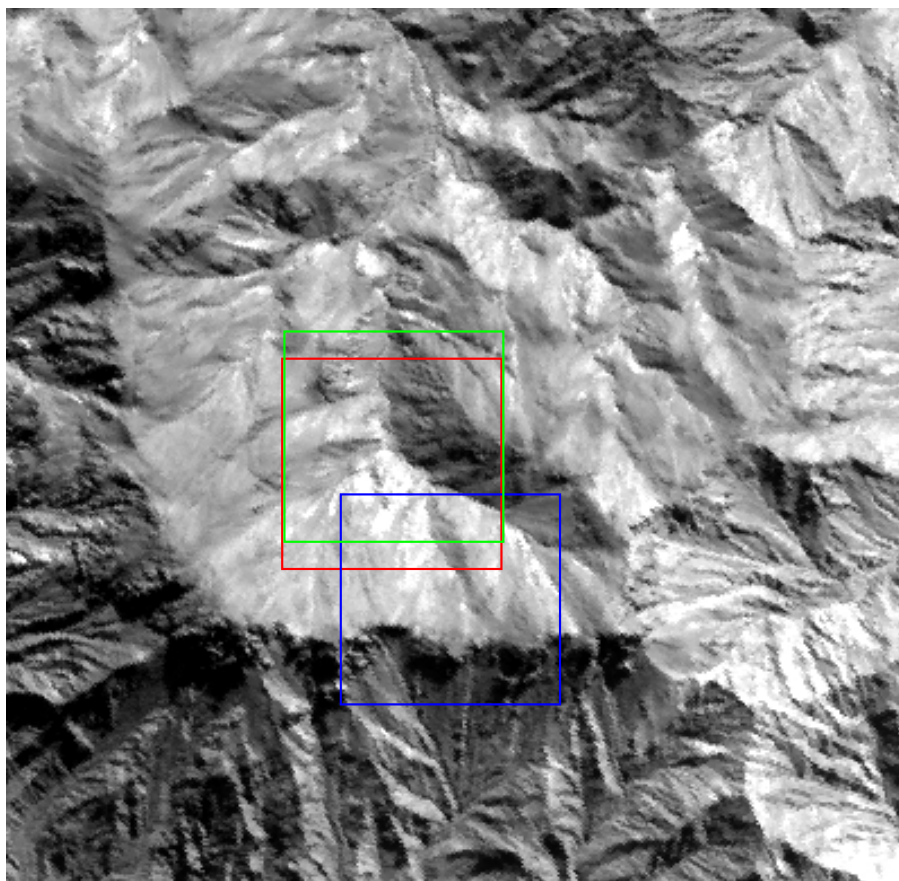


Figure 75: Position des imagerie extraite (en rouge), et simulées (bleu pour ASTER et vert pour SPOT5).

4.1. Correction topographique des images HYMAP

Le code SIERRA est appliqué sur la trace Est-Ouest 01 (EO 01) acquise le 6 décembre à 06H37 TU. La taille des pixels au sol est de 5,6 m lorsque l'on considère le MNT ASTER pour l'inversion, et de 6 m si l'on considère le MNT SPOT5. L'atmosphère est claire (visibilité de 92 km, pas de cirrus), et composée d'aérosols continentaux. L'angle zénithal solaire est de 50°. Le capteur survole la scène à une altitude de 4140 m avec un angle de visée variant entre -32° et +32°. Une grande variété de reliefs, ainsi que le site de mesures de BRDF, sont survolés sur cette trace de 10 km de long et 3 km de large.

Dans un premier temps, l'imagette présentée Figure 74a est inversée par SIERRA, en considérant les MNT ASTER et SPOT5. Les cartes de réflectance obtenues (bande 10, 0,57 μm) sont présentées Figure 76, et comparées à celle restituée par HYCORR. Sur cette zone, le sol est homogène et composé de périclites. A partir des mesures de réflectance effectuées en laboratoire et sur le site de mesures, on estime que l'albédo sphérique du sol à 0,57 μm est compris entre 0,1 et 0,15. Les réflectances restituées à 0,57 μm sont comparées sur trois profils (tracés en rouge, bleu et vert sur la Figure 76) pour évaluer l'apport d'une prise en compte du relief sur l'inversion.

Inversion avec HYCORR:

Le sol étant considéré plat pour l'inversion, les variations de réflectance sont fortement corrélées au relief (Figure 76a): la réflectance de surface est notamment sous-estimée sur les zones de faible éclairage (Figure 77a).

Inversion avec SIERRA, en s'appuyant sur le MNT ASTER:

Sur les 450 premiers mètres du profil rouge, les pixels sont situés sur un versant où l'éclairage est relativement constant (Figure 74b), aussi, l'inversion est réalisée dans des conditions proches d'un sol plat, et l'on retrouve des variations de réflectance assez corrélées au relief (Figure 76b et Figure 77b). Par contre, sur le reste du profil, les pixels sont situés à tort sur un versant peu éclairé (Figure 74b), et donc, par compensation, la réflectance est nettement surestimée (Figure 77b).

Le profil bleu est entièrement situé sur un flanc éclairé du MNT (Figure 74b), et les variations de réflectance sont donc corrélées au relief (Figure 76b).

En revanche, le profil vert est considéré à tort sur un versant faiblement éclairé (Figure 74b), ce qui engendre une forte surestimation de la réflectance sur l'ensemble du profil (Figure 77b).

Inversion avec SIERRA, en s'appuyant sur le MNT SPOT 5:

Les images de luminances n'ayant pas le même pas d'échantillonnage suivant le MNT considéré pour l'inversion (ASTER ou SPOT5), certaines oscillations de réflectance sont légèrement décalées par rapport à la réflectance restituée à partir du MNT ASTER.

Lorsque le relief correspondant au MNT est bien recalé par rapport à l'image de luminance (profil rouge, profil bleu sur les 350 premiers mètres, et profil vert sur les 450 premiers mètres), l'impact du relief sur la réflectance est globalement bien corrigé (Figure 77c). Cependant, de fortes erreurs sont observées sur la réflectance, sur les portions de l'image où le décalage du MNT affecte fortement la position de la ligne de crête, ou du fond de vallée, sur le relief modélisé pour l'inversion (Figure 76c et Figure 77c).

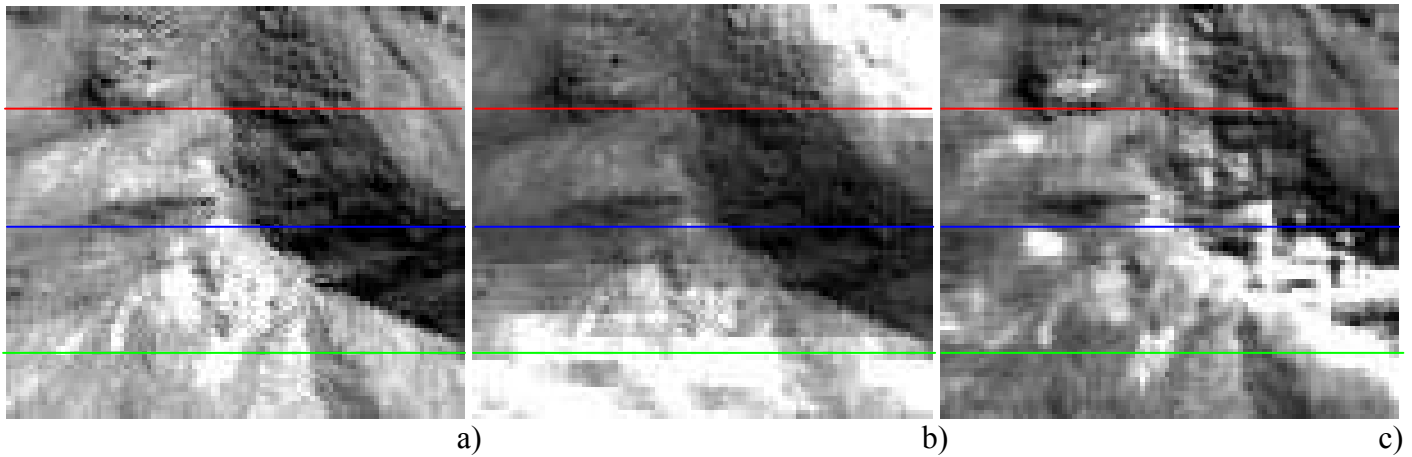


Figure 76: Images de réflectance restituées par HYCORR (à gauche), SIERRA avec ASTER (au centre), et SIERRA avec SPOT5 (à droite)

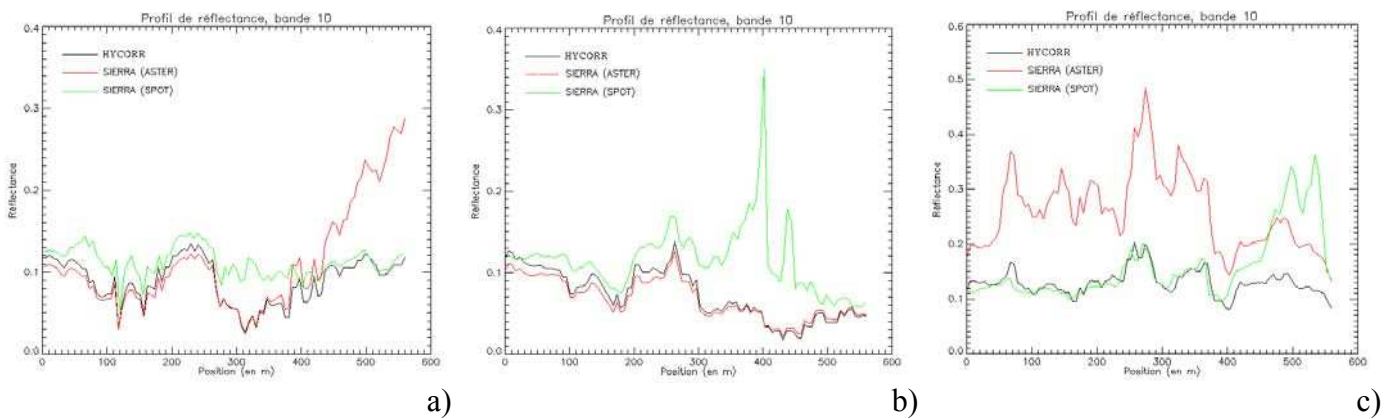


Figure 77: Réflectances obtenues à $0,57 \mu\text{m}$ sur les trois profils en x illustrés Figure 76. Le profil rouge est à gauche, le bleu au centre, et le vert à droite.

Pour limiter les erreurs sur la réflectance restituée, dues aux imprécisions de l'orthorectification et aux incertitudes du MNT, les images HYMAP et le MNT Spot5 sont dégradés à une résolution spatiale de 100 m. Cette opération permet également d'effectuer l'inversion sur une portion de la trace HYMAP longue de 10 km et large de 3 km. La Figure 78 montre la carte de réflectances restituée par HYCORR (Figure 78a) et par SIERRA (Figure 78b) à $0,57 \mu\text{m}$. Un profil en x de réflectance, positionné en rouge sur les images, est également représenté Figure 79.

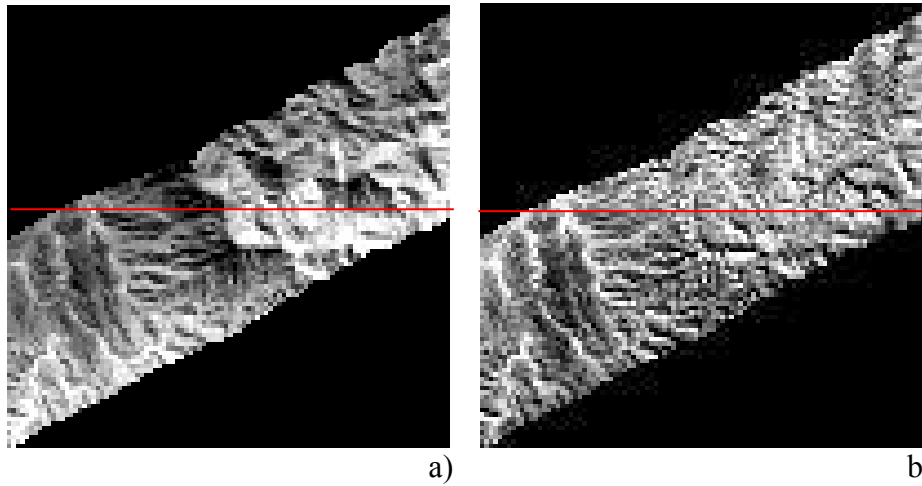


Figure 78: comparaison entre l'image de réflectance restituée à $0,57 \mu\text{m}$ par HYCORR (à gauche) et par SIERRA (à droite).

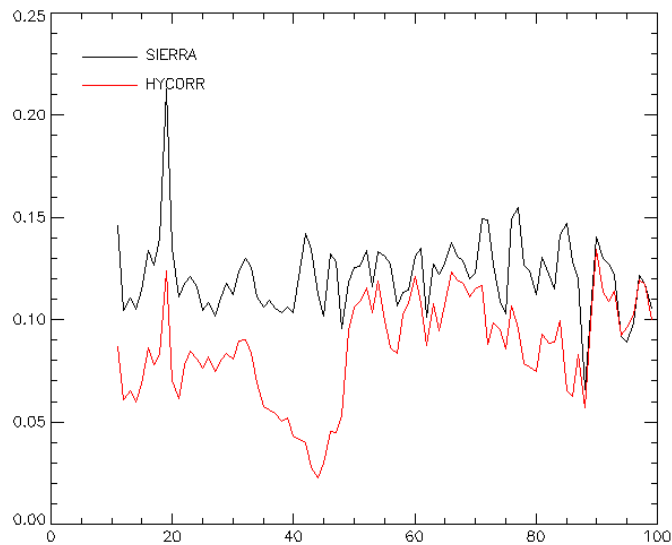


Figure 79: Profils de réflectance restitués à $0,57 \mu\text{m}$ par HYCORR et SIERRA.

Les images de réflectance montrent que dans ce cas, les reliefs importants, longs de quelques centaines de mètres, sont bien pris en compte: le contraste entre les versants exposés au soleil et les versants opposés disparaît sur l'image de réflectance restituée par SIERRA. Sur le profil présenté Figure 79, les variations de réflectance corrélées aux larges structures du relief observées en sortie du code HYCORR, n'apparaissent pas sur la réflectance estimée par SIERRA. D'autre part, avec HYCORR, la réflectance est inférieure à 0,1 sur la majorité des pixels du profil, alors que pour 95% des pixels, la réflectance calculée par SIERRA est comprise entre 0,1 et 0,15.

4.2. Analyse spectrale des résultats

Dans ce paragraphe, on compare les spectres de réflectance restitués à partir des images HYMAP avec les spectres de réflectance acquis sur le terrain. L'inversion est effectuée au dessus du site de référence, où sont acquises les mesures de réflectance bidirectionnelle. Ces mesures sont faites sur un site approximativement plat (une pente de 1° à 2° , exposée au soleil), délimité par deux bâches bleues qui permettent la localisation du site de mesures sur l'image. L'angle de visée est de 12° et les conditions atmosphériques sont celles décrites paragraphe 3.2.

Les luminances acquises par HYMAP au dessus du site de mesures sont moyennées sur 9 pixels situés entre les deux bâches (Figure 80). La luminance moyenne est ensuite inversée par SIERRA avec le MNT Spot5 recalé, et aussi en considérant le sol plat, situé à l'altitude du site (700 m). L'inversion est également effectuée avec le code COCHISE à partir des mêmes données d'entrée.

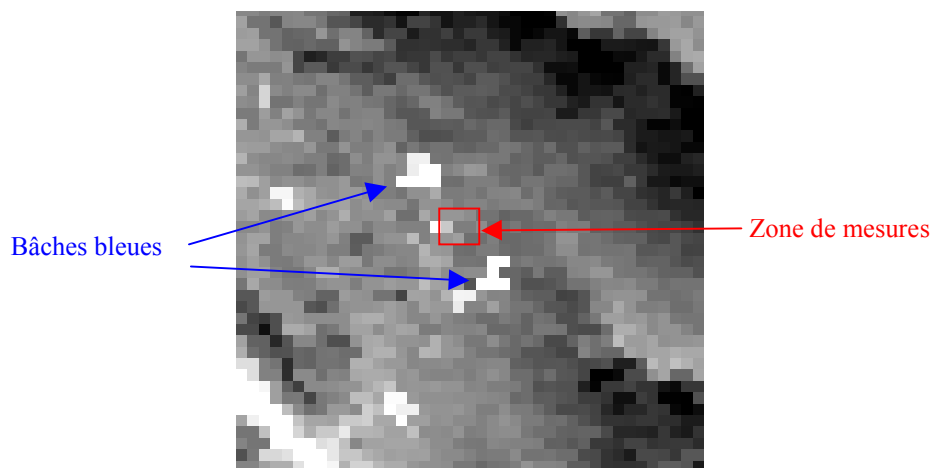


Figure 80: Positionnement du site de mesures.

La Figure 81 compare les albédos sphériques du sol estimés par SIERRA, à partir du MNT Spot5 ou en considérant le sol plat, avec l'albédo sphérique déduit des mesures de BRDF effectuées sur le site. Les réflectances calculées par HYCORR et COCHISE sont également représentées. Dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau à $1,4 \mu\text{m}$ et $1,9 \mu\text{m}$, les réflectances ne sont pas restituées.

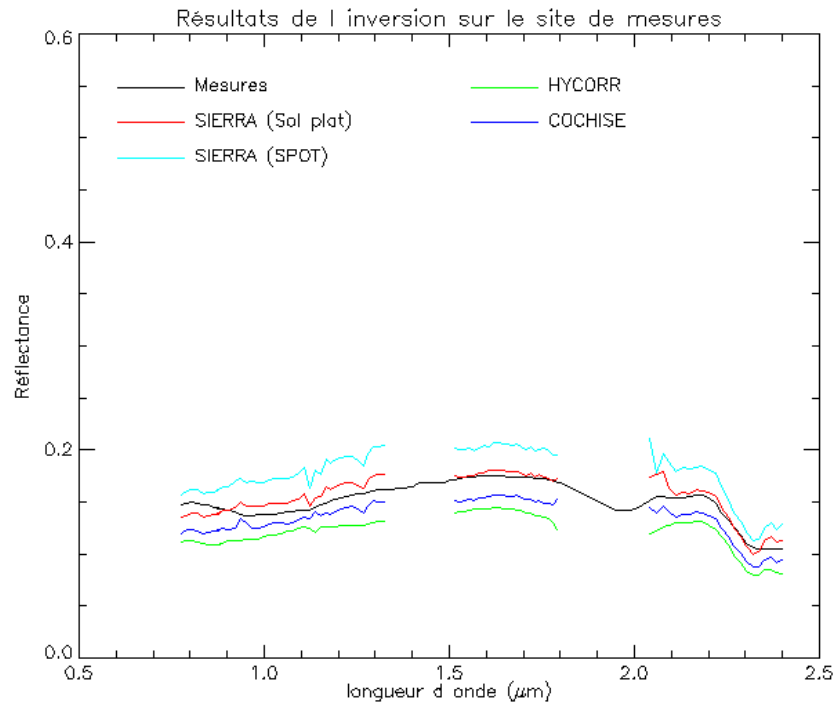


Figure 81: Comparaison entre le spectre de réflectance mesuré et les spectres restitués.

Trois critères sont utilisés pour comparer les spectres restitués par SIERRA avec le spectre déduit des mesures effectuées sur le terrain:

- L'angle spectral: les spectres ρ_1 et ρ_2 sont représentés sous la forme de vecteurs dans l'espace des bandes spectrales. L'angle entre ces deux vecteurs est ensuite calculé. Dans des applications de type classification, deux spectres de réflectance appartiennent à la même classe lorsque l'angle spectral θ_{spec} est inférieur à 0,1 radian. Ce critère fournit uniquement des informations sur la forme des spectres.

$$\theta_{spec} = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{\rho}_1 \cdot \vec{\rho}_2}{\|\vec{\rho}_1\| \|\vec{\rho}_2\|} \right)$$

- L'écart moyen relatif:

$$\delta = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right|$$

Avec N le nombre de bandes spectrales

- Maximum de l'écart relatif:

$$\delta_{max} = \max \left(\left| \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right| \right)$$

Dans le domaine spectral considéré, les réflectances restituées par HYCORR et COCHISE, qui supposent la surface lambertienne pour l'inversion, s'apparentent à des réflectances bidirectionnelles puisque le seul terme de premier ordre de la luminance en entrée capteur est la luminance directe-directe (l'atmosphère est très claire et les effets de diffusion sont donc très faibles). Les valeurs de ces réflectances ne sont donc pas directement comparables avec les albédos sphériques calculés par SIERRA et celui déduit des mesures au sol. Seule la forme de ces spectres est donc prise en compte.

Les résultats des comparaisons effectuées entre les albédos sphériques restitués par SIERRA, et celui déduit des mesures au sol, sont répertoriés dans le Tableau 5. En supposant un sol plat, l'écart relatif moyen avec les mesures est de 5%, ce qui est l'ordre de grandeur de l'erreur engendrée par une erreur de 2° sur la pente au sol (La pente sur le site de mesures est comprise entre 1° et 2°). Lorsque le relief de la scène est pris en compte par le MNT SPOT5, le site de mesures est considéré sur une pente de 6° opposée au soleil en raison du décalge du MNT par rapport à l'image. Aussi, l'éclairement direct calculé à partir du MNT est inférieur de 13% à celui estimé en considérant le sol plat, d'où la différence observée entre les albédos sphériques restitués.

	Angle spectral	Ecart relatif moyen	Maximum de l'écart relatif
SIERRA (MNT)	0,048	18%	39%
SIERRA (Sol plat)	0,047	5%	14%

Tableau 5: Comparaison entre les spectres restitués par SIERRA et le spectre mesuré.

L'albédo sphérique estimé par SIERRA est en très bon accord avec les mesures réalisées au sol, compte tenu de la précision de l'étalonnage absolu des deux dispositifs (10% à 15% pour le GER sur CHAMO, non communiqué pour HYMAP). La différence maximale (14%) correspond à une bande spectrale située en limite de la bande d'absorption de la vapeur d'eau centrée sur 1,9 μm .

L'angle spectral entre la réflectance calculée par SIERRA et la réflectance mesurée est quasiment identique pour les deux inversions (sol plat, ou avec un MNT), et nettement inférieur à 0,1 radian. De plus, il est également du même ordre de grandeur que les angles spectraux calculés à partir des spectres de réflectance restitués par HYCORR ou COCHISE (environ 0,04).

ONERA



CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse est de développer un code de correction atmosphérique et topographique d'images hyperspectrales étalonnées en luminance, acquises dans le domaine réflectif ($0,4 \mu\text{m}$ à $2,5 \mu\text{m}$), par un capteur embarqué survolant un paysage hétérogène et montagneux. A partir de l'image de luminances, on cherche à extraire une image de réflectances, indépendante des angles d'incidence et d'émergence du rayonnement, de l'atmosphère, et du relief. La démarche de travail pour l'élaboration et la validation de ce code se décompose en plusieurs étapes successives.

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier l'ensemble des composantes de l'éclairement incident sur le relief, et de la luminance montante mesurée par un capteur aéroporté ou satellitaire. Cette analyse permet de poser l'équation d'inversion, sur laquelle est basée la méthode de correction atmosphérique développée dans ces travaux. Une étude a ensuite été réalisée pour déterminer l'impact sur la réflectance restituée, de chaque grandeur radiative intervenant dans l'équation, et pour évaluer l'ensemble des approches adaptées à un processus d'inversion qui permettent de calculer ces grandeurs. Ces travaux ont motivé la prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance, et de chaque composante intervenant dans le signal mesuré par un capteur embarqué, ainsi que le développement de nouveaux modèles pour estimer l'éclairement incident sur le relief et la luminance diffuse montante, dans le code de correction atmosphérique et topographique.

L'éclairement au niveau du sol se décompose en quatre composantes. L'éclairement direct, qui est la composante principale de l'éclairement dans la majorité des cas, est calculé suivant une formule analytique précise, tenant compte de la pente du pixel, et des zones d'ombre créées par le relief. L'éclairement diffus est estimé par intégration angulaire dans l'angle de vue du ciel, des luminances atmosphériques descendantes. La sphère de luminances est découpée en dix-huit zones centrées sur la direction d'incidence solaire, définies de manière à prendre en compte l'anisotropie de la diffusion, et dans lesquelles la luminance atmosphérique est supposée constante. L'éclairement réfléchi par le voisinage, calculé suivant le modèle de Sandmeier, et l'éclairement de couplage terre-atmosphère, obtenu en supposant le sol plat et homogène, permettent d'estimer un ordre de grandeur de ces contributions.

Pour estimer la luminance diffuse montante, la luminance montante au niveau du sol, issue de chaque pixel, est pondérée par la fonction d'environnement modélisée pour le code de transfert radiatif 6S. Cette fonction dépend de la distance entre le pixel cible et les pixels du voisinage, de l'angle de vue du capteur, et des conditions atmosphériques. Dans les autres codes de correction atmosphérique, la fonction d'environnement est appliquée sur les réflectances de chaque pixel, et les variations d'éclairement sur la scène ne sont donc pas prises en compte.

Ces méthodes sont validées par comparaison avec le code AMARTIS, qui permet de simuler en monochromatique des images de luminances observées par un capteur embarqué dans le domaine réflectif, au-dessus de scènes hétérogènes avec relief, et qui sert de référence dans cette thèse. Les variations d'éclairement sur le relief sont bien modélisées par SIERRA. Les erreurs relatives maximales, de l'ordre de 10%, sont observées sur les versants de montagne les moins éclairés, lorsque l'éclairement réfléchi par le voisinage est un terme de premier ordre de l'éclairement. En ce qui concerne la luminance diffuse montante, les calculs effectués par SIERRA sont en bon accord avec les calculs Monte-Carlo effectués par AMARTIS, quel que soit le paysage considéré.

Le code de correction atmosphérique et topographique, dénommé SIERRA (Spectral reflectance Image Extraction from Radiance with Relief and Atmospheric correction), a ensuite été développé. A partir

d'une image de luminances orthorectifiée sur un Modèle Numérique de Terrain, ce code permet de remonter à la réflectance de surface par étapes successives. Le contenu intégré en vapeur d'eau est estimé avant de procéder à l'inversion, puis utilisé pour ajuster le profil en vapeur d'eau fourni en entrée du code. Une première étape permet d'obtenir une carte de réflectance en supposant l'environnement homogène à la cible, et la surface du sol lambertienne. L'hétérogénéité de la scène est prise en compte dans une seconde étape. Deux étapes supplémentaires sont nécessaires pour la prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance. Dans ce cas, une classification simple, basée sur le calcul du NDVI, est effectuée en sortie de la seconde étape. Trois types de sol sont alors considérés: les sols rugueux tels que les sols nus, la végétation, et les sols spéculaires comme la neige et l'eau. Dans SIERRA, la réflectance bidirectionnelle se décompose sous la forme d'un produit entre une composante lambertienne, et une fonction dépendante des conditions d'incidence et d'émergence du rayonnement, basée sur le modèle de Rahman. Les paramètres intervenant dans la fonction angulaire sont fournis en entrée de SIERRA en fonction de la longueur d'onde et du type de sol, alors que l'on cherche à estimer le paramètre lambertien dans les deux dernières étapes du processus d'inversion. La troisième étape permet de prendre en compte les variations directionnelles de la réflectance sur le trajet direct montant de la luminance, alors que ces variations sont prises en compte sur le trajet diffus montant dans la quatrième étape. Quelle que soit la méthode de résolution choisie (hypothèse lambertienne ou avec prise en compte de la BRDF), la sortie de SIERRA est donnée sous la forme d'une carte d'albédos sphériques de la scène, obtenue après trois itérations de la dernière étape.

Pour valider l'algorithme d'inversion du code SIERRA, on a étudié dans un premier temps la réciprocité entre les modèles direct et inverse de SIERRA. Une image de luminances est simulée au-dessus de deux montagnes (les pentes sont de 30°), pour de grands angles d'incidence et d'émergence, et une atmosphère turbide. La réflectance est restituée par SIERRA avec une précision de 1% aux trois longueurs d'onde étudiées (450 nm, 850 nm, et 1600 nm). Dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau, l'inversion d'une luminance simulée par MODTRAN4, montre que la réflectance est restituée avec une précision de 5%, pour de forts angles d'incidence (60°) et de visée (50°) (cas défavorable), et un contenu intégré en vapeur d'eau de $2,92 \text{ g/cm}^2$. La prise en compte du relief et de l'hétérogénéité de la scène par SIERRA, est validée par inversion d'images synthétiques obtenues par AMARTIS, pour trois longueurs d'onde (450 nm, 850 nm, et 1600 nm), sur des montagnes de 30° ou 45° de pente, pour des angles d'incidence variant entre 20° et 55° , et une atmosphère plus ou moins turbide. Les simulations effectuées ont pour but d'évaluer la robustesse du code SIERRA dans des situations courantes d'acquisition d'images en paysage montagneux, et de majorer les erreurs dues à la modélisation en étudiant des cas plus extrêmes et rarement rencontrés. Les principales sources d'erreur dans l'inversion sont reliées à la luminance diffuse montante à 450 nm, et à l'éclairement réfléchi par le voisinage à 850 nm et 1600 nm. Lorsque le signal issu d'un pixel cible est très faible, ces termes contribuent de manière significative au signal et l'écart entre la réflectance restituée et la réflectance initiale atteint 15% à 450 nm et 10% à 850 nm et 1600 nm. Cependant, dans ces situations, le signal mesuré par un capteur aéroporté n'est généralement pas exploitable. Dans le cas extrême où le relief est composé de deux montagnes juxtaposées, culminant à 1000 m d'altitude avec des pentes de 45° , l'éclairement réfléchi par le relief est également une contribution importante du signal à 850 nm et 1600 nm, et l'erreur relative sur la réflectance restituée atteint également 10%. Dans les cas plus standards, la réflectance de surface est estimée par SIERRA avec une précision de 5%, aux trois longueurs d'onde considérées, ce qui est de l'ordre de grandeur des incertitudes sur les mesures aéroportées.

L'étude de sensibilité a montré que les sources principales d'erreurs sur l'inversion sont le Modèle Numérique de Terrain et l'orthorectification de l'image. Les différentes imprécisions étudiées (différence d'échantillonnage entre le MNT et l'image, décalage de l'image par rapport au MNT, imprécision en altitude sur le MNT) engendrent des erreurs sur la réflectance qui sont plus grandes que celles obtenues lorsque l'inversion est effectuée en supposant le sol plat. Une erreur (en restant dans des conditions réalistes) sur la visibilité atmosphérique ou le type d'aérosol a par contre moins d'impact sur la réflectance, car lorsque la luminance directe est un terme de premier ordre de la luminance en entrée capteur, l'erreur engendrée sur la réflectance n'excède pas 15%.

Au cours de cette thèse, dans le cadre du volet HYPERGEMME de l'ACI « Observation de la Terre », une campagne de mesures a eu lieu dans le massif montagneux de Maqсад, en sultanat d'Oman. Un des objectifs de cette campagne de mesures est notamment la validation du code SIERRA. Les mesures effectuées sur le terrain sont dans un premier temps utilisées pour fixer certaines données d'entrée de SIERRA. Les mesures de réflectance bidirectionnelle permettent ainsi de déterminer les paramètres de Rahman fournis en entrée du code, et la visibilité atmosphérique, qui est proche de 100 km pendant les mesures hyperspectrales, est estimée à partir des mesures d'épaisseur optique réalisées avec le CIMEL. La géométrie d'observation est fixée en fonction des données fournies par HYVISTA. Dans un premier temps, les images HYMAP sont orthorectifiées sur un MNT ASTER. La résolution spatiale de ce MNT, et l'incertitude sur l'altitude, ne sont cependant pas adaptées à une correction topographique des images HYMAP. Un second MNT, obtenu à partir d'images Spot5 stéréoscopiques, a alors été utilisé pour l'inversion. L'orthorectification sur ce MNT n'ayant pas été possible, les traces HYMAP et le MNT sont recalés par le logiciel MEDICIS, sur une image panchromatique du site de Maqсад acquise par LANDSAT7.

Avec le MNT Spot5, la correction topographique de SIERRA permet de résorber sur les reliefs importants (quelques centaines de mètres), les variations de réflectance dues à la différence d'éclairement entre deux versants opposés d'une montagne. Sur les mêmes massifs, la réflectance estimée par HYCORR, qui considère un sol plat, varie d'un facteur trois entre les deux flancs de montagne. Par contre, sur les petites structures du relief (quelques dizaines de mètres), les incertitudes en altitude du MNT, ainsi que le décalage observé entre le MNT et l'image, engendrent des erreurs importantes sur la réflectance estimée.

Les mesures de réflectance bidirectionnelle sont comparées aux réflectances restituées par SIERRA. Les écarts constatés sont de l'ordre de 5%, ce qui est inférieur aux incertitudes liées aux dispositifs de mesures. La forme du spectre restitué par SIERRA est également en bon accord avec celles des spectres de réflectance calculés par HYCORR et COCHISE.

La prise en compte du relief pour la correction atmosphérique d'images hyperspectrales ouvre de nouvelles perspectives à la télédétection en zone montagneuse. Les corrections effectuées par SIERRA permettent de diminuer les contrastes de réflectance entre deux versants de montagne, ce qui devrait améliorer la précision des méthodes de classification et de détection, notamment sur les versants les moins éclairés. Cependant, certaines limitations, notamment sur les données d'entrée du code SIERRA, ne permettent pas d'exploiter au maximum les capacités de l'imagerie hyperspectrale (haute résolution spatiale et spectrale).

Les travaux effectués au cours de cette thèse ont mis en évidence la nécessité d'améliorer la précision altimétrique des Modèles Numériques de Terrain, ainsi que l'orthorectification des images sur ces MNT, afin de tirer profit au maximum des caractéristiques de l'imagerie hyperspectrale. Actuellement, ces données

ne sont pas adaptées à une correction topographique d'images de haute résolution spatiale, et notamment dans le cadre de massifs formés par des reliefs chaotés. Afin d'obtenir un MNT cohérent avec les images hyperspectrales, l'altitude de chaque pixel peut être estimée à partir de la bande d'absorption de l'oxygène, ce qui nécessite une résolution spectrale des instruments inférieure à 10 nm. Une autre approche consisterait à acquérir des images stéréoscopiques à partir d'un système de prise de vue embarqué avec l'imageur hyperspectral.

Quelques évolutions dans la modélisation du code SIERRA sont également envisageables, afin d'en élargir le champ d'applications..

Tout d'abord, seule une caractérisation du contenu intégré en vapeur d'eau est réalisée dans SIERRA, alors que de nouvelles méthodes, adaptées à l'imagerie hyperspectrale, ont été développées pour estimer les contenus totaux de gaz tels que le méthane ou le dioxyde de carbone, ou encore pour caractériser les aérosols (type et visibilité). Ces méthodes implémentées dans certains algorithmes d'inversion en sol plat, pourraient être adaptées pour SIERRA aux cas de sols montagneux, ceci dans le but de limiter le nombre de données exogènes nécessaires à l'inversion, et d'étudier les caractéristiques de l'atmosphère.

D'autre part, la méthode de classification employée ne permet pas de différencier les différents types de couverts végétaux, ou les grandes classes de sols rugueux. Une classification plus complexe, couplée à une plus grande base de données de réflectances bidirectionnelles, permettrait une meilleure estimation de la réflectance de surface.

Enfin, le code SIERRA a été développé dans un contexte de recherche, et non dans un contexte opérationnel. Actuellement, il ne permet donc pas l'inversion d'un grand nombre d'images en un temps limité, et un travail important est nécessaire pour adapter ce code à un mode opérationnel.

ONERA



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Anderson G.P, Felde G.W., Hoke M.L., Ratkowski A.J., Cooley T., Chetwind J.H., Gardner J.A., Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Berk A., Bernstein L.S., Acharya P.K., Miller D., Lewis P., “MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm: FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)”, SPIE Proceedings, , Vol. 4725, p. 65-71, 2002.
- [2] A.Berk, G.P.Anderson, L.S.bernstein, P.K.Acharya, H.Dothe, M.W.Matthew, S.M.Adler-Golden, J.H.Chetwynd, S.C.Richtsmeier, B.Pukall, C.L.Allred, L.S.Jeong, and M.L.Hoke, “ MODTRAN4 Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction”, AVIRIS Workshop Proceedings, 1999
- [3] Cocks T., Jenssen R., Stewart A., Wilson I., Shields T., “The Hymap airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance”, EARSeL Workshop on imaging spectroscopy, Zurich, 1998.
- [4] J.Dozier, J.Bruno, “A faster solution to the horizon problem”, Computer and Geosciences, Vol 7, p 145-151, 1981
- [5] J.Dozier, J.Frew, “Atmospheric corrections to satellite radiometric data over rugged terrain”, Remote sensing of environment, Vol 11, p 191-205, 1981
- [6] Goetz A.F.H., Boardman J.W., Kindel B., Heidebrecht K.B., “Atmospheric corrections: on deriving surface reflectance from hyperspectral imagers”, SPIE Proceedings, Vol 3118, p 14-22, 1997.
- [7] A.F.H.Goetz, B.Kindel, M.Ferri, E.Gutmann, “Relative performance of HATCH and three other techniques for atmospheric correction of HYPERION and AVIRIS data”, AVIRIS Workshop, février 2003
- [8] J.E.Hay, “Solar energy system design: the impact of mesoscale variations in solar radiation”, Atmosphere-Ocean, Vol 21, p 138-157, 1983
- [9] J.E.Hay et J.A.Davies, “Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface”, First Canadian Solar radiation data Workshop, p 59-72, 1978
- [10] Lenot X., Achard V., Miesch C., Poutier, L., Pinet P., “Irradiance calculation over mountainous areas in the reflective domain – Comparison with an accurate radiative transfer model”, SPIE Proceedings, , Vol 5157, p 220-230, 2003.
- [11] M.W.Matthew, S.M.Adler-Golden, A.Berk, G.Felde, G.P.Anderson, D.Gorodetski, S.Paswaters, M.Shippert, “Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data”, SPIE Proceedings, Vol 5093, 2003

- [12] C.Miesch, X.Briottet, Y.H.Kerr, F.Cabot, "A radiative transfer solution for rugged and heterogeneous scene observations", *Applied Optics*, Vol 39, p 6830-6846, décembre 2000
- [13] C.Miesch, L.Poutier, X.Briottet, V.Achard, X.Lenot, Y.Boucher, "Direct and inverse radiative transfer solutions for visible and near-infrared hyperspectral imagery", prochainement publié dans *IEEE Trans.Geosc.Remote sensing*.
- [14] Miller C.J., "Performance assessment of ACORN atmospheric correction algorithm", *SPIE Proceedings*, Vol 4725, p 438-449, 2002.
- [15] M.Minnaert, "The reciprocity principle in lunar photometry", *Astrophysical Journal*, p 403-410, 1941
- [16] L.Poutier, C.Miesch, X.Lenot, V.Achard, Y.Boucher, "COMANCHE and COCHISE, two reciprocal atmospheric codes for hyperspectral remote sensing", *AVIRIS Workshop Proceedings*, 2002
- [17] Z.Qu, A.F.H.Goetz, K.B.Heidebrecht, "High-accuracy atmosphere correction for hyperspectral data (HATCH)", *AVIRIS Workshop Proceedings*, 2000
- [18] H.Rahman, B.Pinty, M.M.Verstraete, "Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model, 2, semi-empirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data", *Journal of geophysical Research*, Vol 98, p 790-801, 1993
- [19] R.Richter, "Correction of satellite imagery over mountainous terrain", *Applied Optics*, Vol 37, p 4004-4015, 1998
- [20] Richter R., Schläpfer D., "Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, p 2631-2649, 2002.
- [21] J.L.Roujean, M.Leroy, P.Y.Deschamps, "A bidirectionnal reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data", *Journal of Geophysical research*, Vol 97, p 20455-20468, 1992
- [22] S.Sandmeier and K.Itten, "A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain", *IEEE Trans.Geosc.Remote sensing*, Vol 35, p 708-717, 1997
- [23] D.Schläpfer, C.C.Borel, J.Keller, K.I.Iten, "Atmospheric pre-corrected differential absorption techniques to retrieve columnar water vapor: application to AVIRIS data", *Remote Sensing of Environment*, Vol 65, p 353-366, 1998

- [24] G.Serrot, M.Bodilis, X.Briottet, H.Cosnefroy, "Presentation of a new BRDF measurement device", Europto, "Atmospheric propagation, Adaptive systems, and Lidar techniques for remote sensing II", Vol 3494, p 23-33, 1998
- [25] A.Stewart, R.Kaiser,"Performance assessment of atmospheric correction algorithms for VIS-SWIR hyperspectral data", SPIE Proceedings, Vol 4049, 2000
- [26] D.Tanre, M.Herman, P.Y.Deschamps, "Influence of background contribution upon space measurements of ground reflectance", Applied Optics, Vol 20, p 733-741, 1981
- [27] R.C.Temps, K.L.Coulson, "Solar radiation upon slopes of different orientations", Solar Energy, Vol 19, p179-184, 1977
- [28] E.Vermote, D.Tanre, J.L.Deuzé, M.Herman, J.J.Morcrette, " Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S : an overview", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 35, p 675-686, 1997

ANNEXES

1. ANNEXE 1: VALIDATION DES ETAPES INTERMEDIAIRES DE SIERRA

1.1. Calcul de l'éclairement incident

Un nouveau modèle de calcul de l'éclairement incident en zone montagneuse a été développé pour le code SIERRA. Les différentes composantes de l'éclairement, de même que l'éclairement total au niveau du sol, sont comparées avec les mêmes termes calculés par AMARTIS, qui nous sert de référence, et par ATCOR4, qui est l'unique code d'inversion prenant en compte le relief. Pour ces calculs, les données fournies en entrée de chaque modèle sont identiques, et les calculs de transfert radiatif sont tous effectués avec 6S.

Les calculs d'éclairement direct de SIERRA et d'ACOR4 étant identiques, seul les résultats de SIERRA sont exposés.

Ces comparaisons sont effectuées à trois longueurs d'onde (450 nm, 850 nm et 1600 nm), sur différents reliefs et pour des conditions atmosphériques et d'incidence solaire variables.

1.1.1. Première scène de validation

Pour cette première scène de validation, le relief est composé de sol plat et de deux collines dont les pentes sont de 30° . Quatre cent pixels de 10 m forment le profil de la scène, la première moitié étant recouverte d'herbe verte et la seconde de sol nu. Les réflectances du sol sont modélisées à partir de l'approche de Rahman, dont les paramètres sont ajustés sur des mesures de BRDF effectuées à l'ONERA. L'atmosphère est un milieu tempéré été et les aérosols sont de type rural, pour une visibilité de 15 km. L'incidence solaire provient du sud-ouest, avec un angle zénithal solaire de 35° .

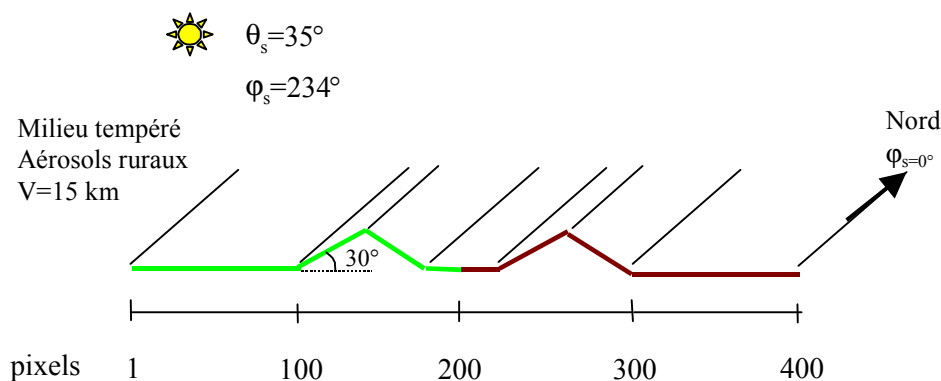


Figure 82: Première scène de validation de l'éclairement incident

Dans cette configuration, l'éclairement direct est la composante principale de l'éclairement sur l'ensemble du relief, aux trois longueurs d'onde considérées.

A 450 nm, l'éclairement diffus incident est du même ordre de grandeur que l'éclairement direct. La différence entre le modèle de SIERRA et AMARTIS est inférieure à 4% sur l'ensemble du relief. Elle est maximale sur la pente exposée au soleil, où l'éclairement direct est le plus important, l'erreur engendrée sur l'éclairement total est donc très faible (<2%). Sur cette pente le modèle d'ATCOR4 estime plus précisément l'éclairement diffus, mais ce n'est pas le cas sur les versants où l'incidence solaire est rasante, puisque l'éclairement diffus y est sous-estimé d'environ 12%, ce qui correspond à 6% de l'éclairement total. Les deux autres composantes de l'éclairement sont de second ordre. L'éclairement de couplage contribue au maximum à 3% de l'éclairement incident. Dans SIERRA, il est obtenu avec une erreur maximale de 3W/m²/sr sur la pente en incidence rasante, ce qui est négligeable. L'éclairement réfléchi est sous-estimé par les modèles d'ATCOR4 et de SIERRA, qui fournissent des résultats similaires. Ces erreurs correspondent à moins de 2% de l'éclairement total.

Au final, avec le modèle de SIERRA, l'éclairement total est calculé avec des erreurs maximales de 2%, sur les pentes des montagnes. Le modèle d'ATCOR4 sous-estime l'éclairement incident de plus de 10% sur le versant en incidence rasante, et d'environ 2% sur le reste du relief.

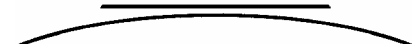
A 850 nm, l'éclairement direct est du même ordre de grandeur qu'à 450 nm, l'éclairement diffus est nettement plus faible et les éclairagements réfléchis et de couplage sont toujours des termes de second ordre. L'éclairement diffus de SIERRA est surestimé de 8% en sol plat et 12% sur les pentes en incidence rasante. Sur le versant exposé, l'erreur est au maximum de 5%. L'impact sur l'éclairement total reste cependant très faible, ces erreurs correspondant à moins de 2% de l'éclairement total. Les erreurs obtenues avec le modèle d'ATCOR4 sont du même ordre de grandeur. L'éclairement de couplage, qui est négligé dans ATCOR4, contribue jusqu'à 5% de l'éclairement total, sur la pente en incidence rasante. Suivant le modèle de SIERRA, il est estimé avec moins de 15% d'erreur, ce qui est quasiment négligeable sur l'éclairement total (<1%). L'éclairement réfléchi est sous-estimé sur les pentes, avec des erreurs correspondant au maximum à 4% de l'éclairement total.

L'éclairement total de SIERRA est obtenu avec une précision de 2% sur le relief. Cependant, sur le versant où l'incidence solaire est rasante, ce résultat découle d'une surestimation de l'éclairement diffus qui compense en partie la sous-estimation de l'éclairement réfléchi. La même observation est faite avec le modèle ATCOR4, sur la portion de sol plat comprise entre les montagnes, où l'éclairement total apparaît sans erreur grâce à des erreurs qui se compensent. Sur le reste du relief, ce modèle sous-estime l'éclairement de 3% en sol plat, de 6% sur la pente exposée au soleil, et de 8% sur la pente en incidence rasante.

A 1600 nm, l'éclairement direct est 5 à 10 fois supérieur à la somme des trois autres composantes. Ainsi, l'éclairement diffus qui est surestimé d'environ 20% avec SIERRA sur le sol plat et les pentes en incidence rasante, ce qui correspond à moins de 2% de l'éclairement total. Avec ATCOR4, l'erreur sur l'éclairement diffus correspond au maximum à 1% de l'éclairement total. L'erreur la plus importante est engendrée par l'éclairement réfléchi. Elle est de l'ordre de 6% de l'éclairement total, avec les modèles d'ATCOR4 et de SIERRA. L'éclairement de couplage contribue à moins de 2% de l'éclairement total.

Avec SIERRA, l'erreur sur l'éclairement total ne dépasse pas 4%. Cependant, comme à 850 nm, elle aurait pu être plus importante sur le versant en incidence rasante, puisque l'erreur sur l'éclairement diffus compense en partie celle sur l'éclairement réfléchi. Le modèle d'ATCOR4 induit une erreur de 8% sur ce

versant, puisque les éclairements diffus, réfléchis et de couplage sont chacun sous-estimés. Sur le reste du relief, l'erreur sur l'éclairage total est inférieure à 2% avec les deux modèles.



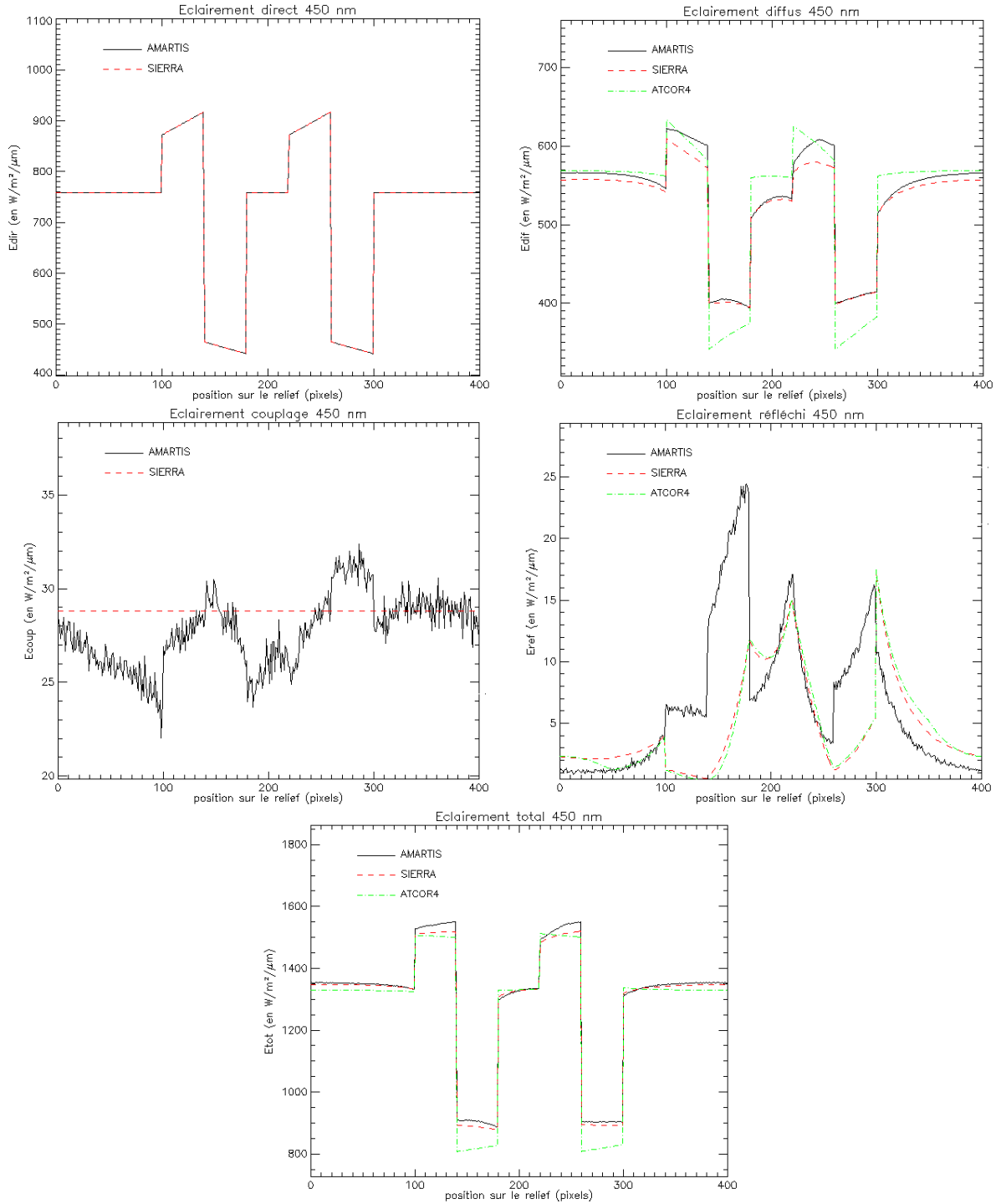


Figure 83: Eclairage incident à 450 nm, scène 1

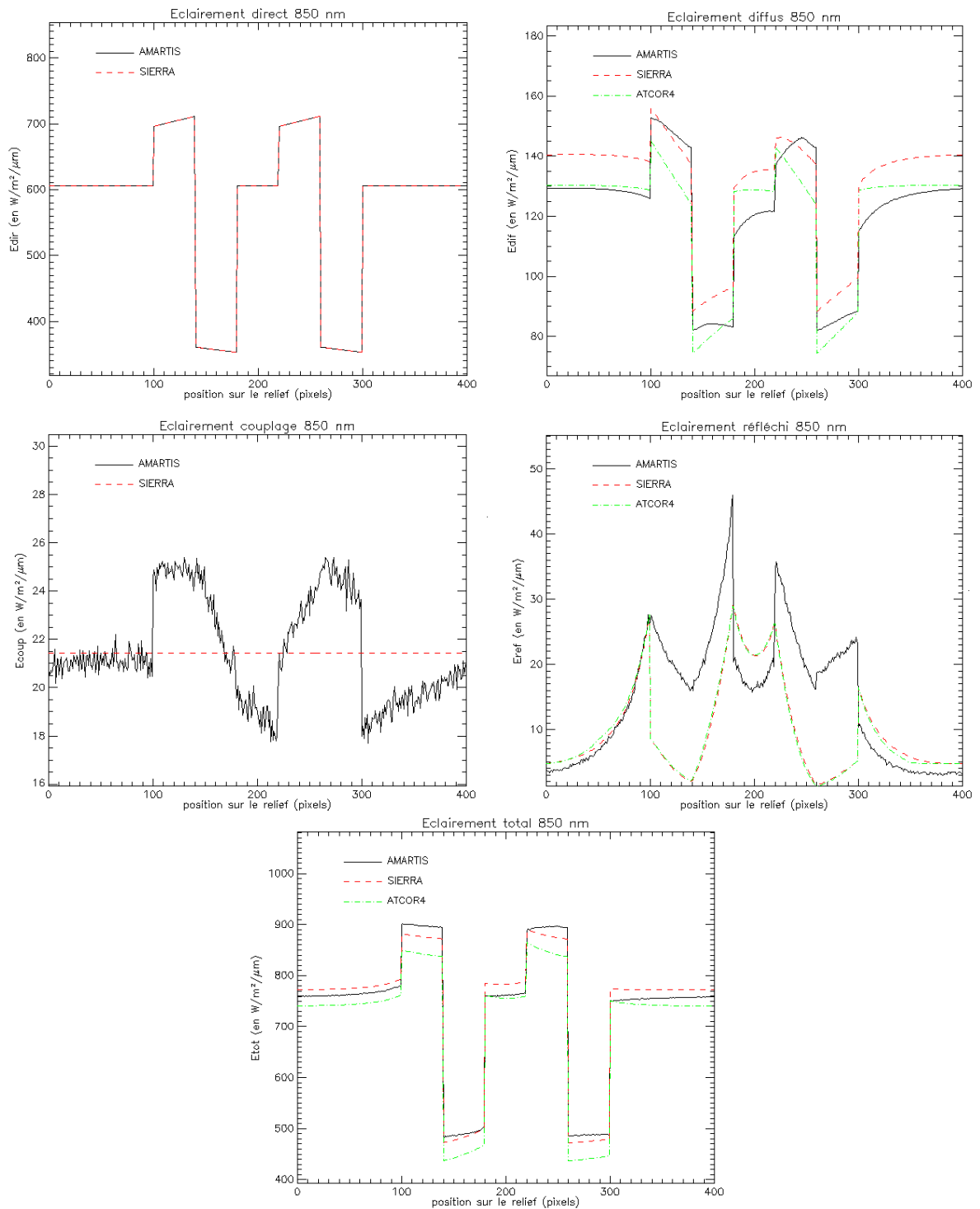


Figure 84: Eclaircement incident à 850 nm, scène 1.

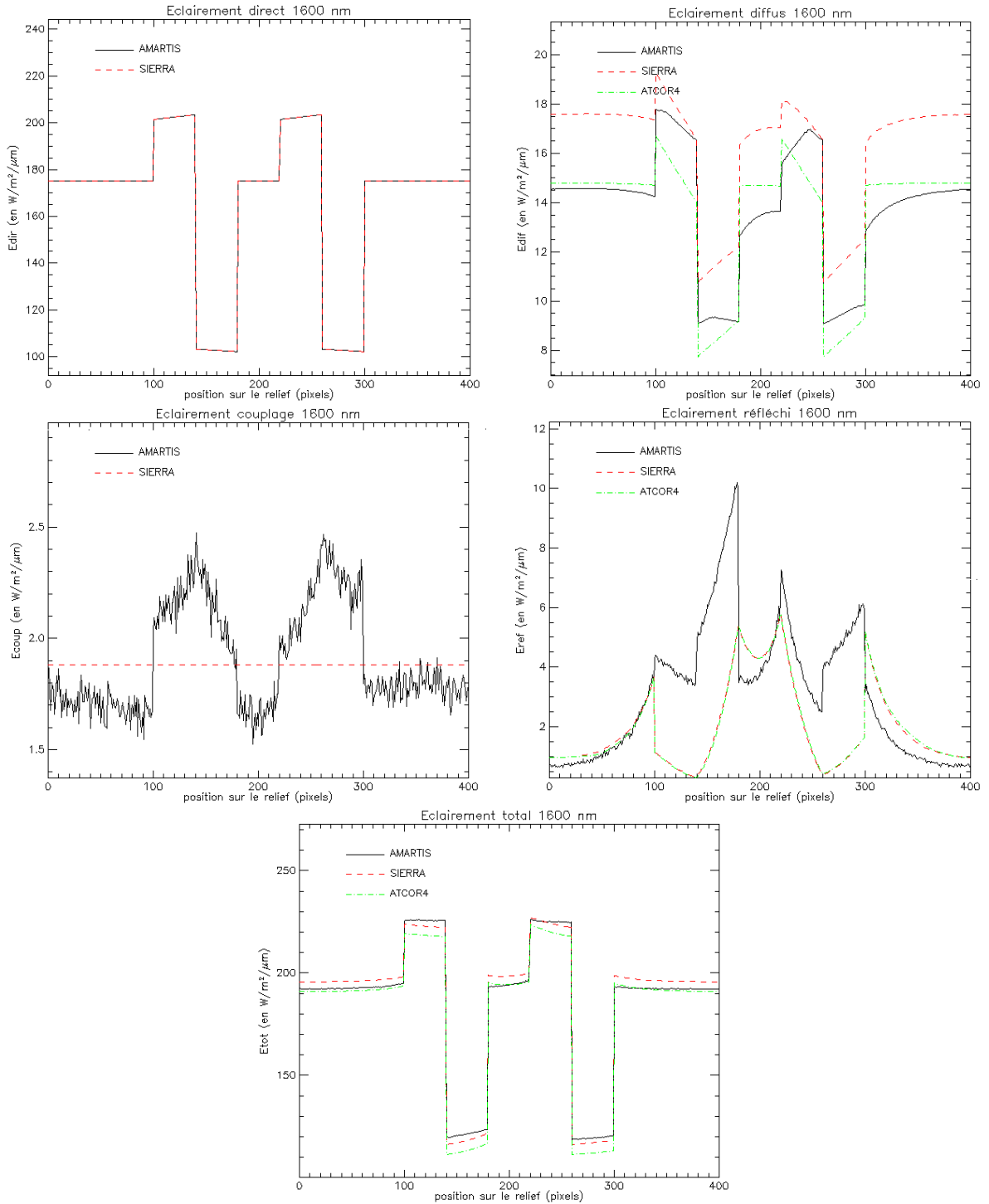


Figure 85: Eclairage incident à 1600 nm, scène1.

1.1.2. Deuxième scène de validation

Par rapport à la scène précédente, seul le type d'atmosphère a été modifié. Dans ce cas, l'atmosphère est de type tropical avec une charge en aérosols maritimes définie par une visibilité de 9 km. Cette scène permet notamment de vérifier que le modèle d'éclairement diffus de SIERRA est adapté pour tout type d'aérosol. L'atmosphère étant plus opaque que dans le cas précédent, la contribution de l'éclairement direct à l'éclairement incident est donc plus faible, et l'impact d'erreurs d'estimation sur les autres termes d'éclairement (notamment l'éclairement diffus, et l'éclairement de couplage dont la valeur est plus élevée en raison d'un albédo atmosphérique plus grand) est donc plus conséquent.

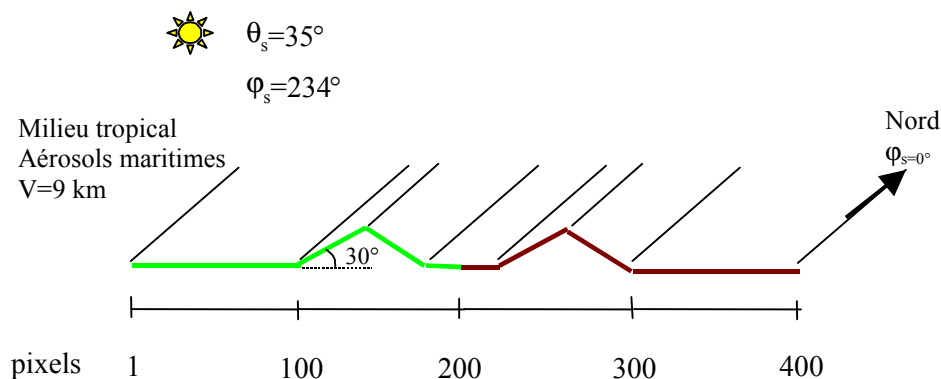


Figure 86: Paysage du deuxième scénario de validation de l'éclairement

A 450 nm, l'éclairement diffus est légèrement supérieur à l'éclairement direct sur les pentes où l'incidence solaire est rasante. Avec SIERRA, il est estimé à 2% près sur ces versants, alors qu'avec ATCOR4, l'erreur atteint 13%. En sol plat, et aux abords des reliefs, l'éclairement diffus est surestimé de 5% avec ATCOR4, et de 2% par SIERRA. L'erreur la plus importante du modèle de SIERRA est de 4%, sur le versant exposé au soleil, et donc où l'éclairement direct est le plus grand. L'éclairement de couplage est plus important que dans le cas précédent, il contribue jusqu'à 4% de l'éclairement total. L'éclairement réfléchi correspond à moins de 2% de l'éclairement total.

Avec le modèle de SIERRA, l'erreur sur l'éclairement total est inférieure à 2% sur l'ensemble du relief, alors qu'avec ATCOR4, elle atteint 10% sur les versants mal éclairés et 4% sur les pentes exposées au soleil.

A 850 nm, l'éclairement direct est deux fois plus grand que l'éclairement diffus, et les contributions des éclairagements réfléchi et de couplage augmentent. Avec SIERRA, l'éclairement diffus est sous-estimé de 8% sur le versant exposé au soleil et surestimé au maximum de 5% sur les versants en incidence rasante. Ces erreurs correspondent à 3% de l'éclairement total sur le versant exposé au soleil, et 1% sur la pente en incidence rasante. Avec ATCOR4, l'éclairement diffus est sous-estimé de 13% sur le versant exposé au soleil, et surestimé de 10% sur l'autre versant, soit 4% de l'éclairement total. L'éclairement de couplage est négligé dans ATCOR4, alors que ce terme contribue à 6% de l'éclairement total sur les pentes exposées au soleil, et 12% sur les pentes en incidence rasante. L'approximation sur l'éclairement réfléchi engendre une erreur maximale de 4% de l'éclairement total, sur la pente la moins éclairée.

Avec SIERRA, l'éclairement total est calculé à 1% près en sol plat, et 6% sur les versants de montagne. ATCOR4 calcule l'éclairement incident avec une erreur de 5% en sol plat, 12% sur le versant exposé au soleil, et 13% sur le versant où l'incidence est rasante. Sur ces pixels, la surestimation de l'éclairement diffus compense en partie la sous-estimation des éclairagements réfléchis et de couplage.

A 1600 nm, les deux modèles de calcul de l'éclairement diffus fournissent des résultats assez proches, avec une erreur correspondant à moins de 2% de l'éclairement total. L'éclairement de couplage, négligé dans ATCOR4, contribue jusqu'à 5% de l'éclairement total, alors qu'avec le modèle de SIERRA, l'erreur sur ce terme correspond à moins de 1% de l'éclairement total. L'approche utilisée pour l'éclairement réfléchi engendre une erreur maximale sur les versants où l'incidence solaire est rasante, correspondant à 3% de l'éclairement total,

Avec SIERRA, l'éclairement total est calculé avec moins de 1% d'erreur en sol plat, moins de 3% sur le versant exposé au soleil, et moins de 4% sur la pente où l'incidence solaire est rasante. Sur les mêmes zones du relief, les erreurs d'ATCOR4 sur l'éclairement total sont respectivement de 4%, 7% et 10%.

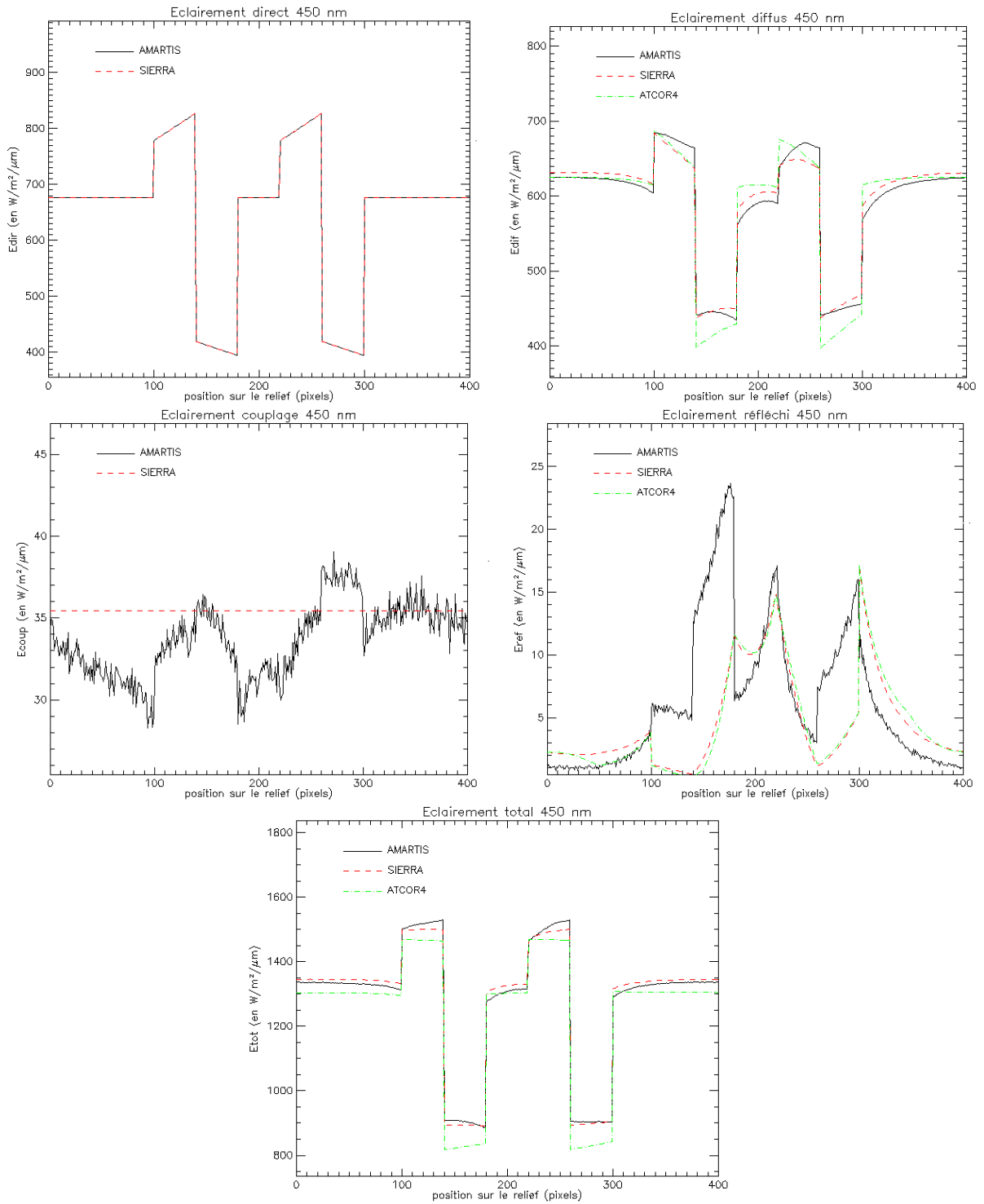


Figure 87: Eclairage incident à 450 nm, scène 2.

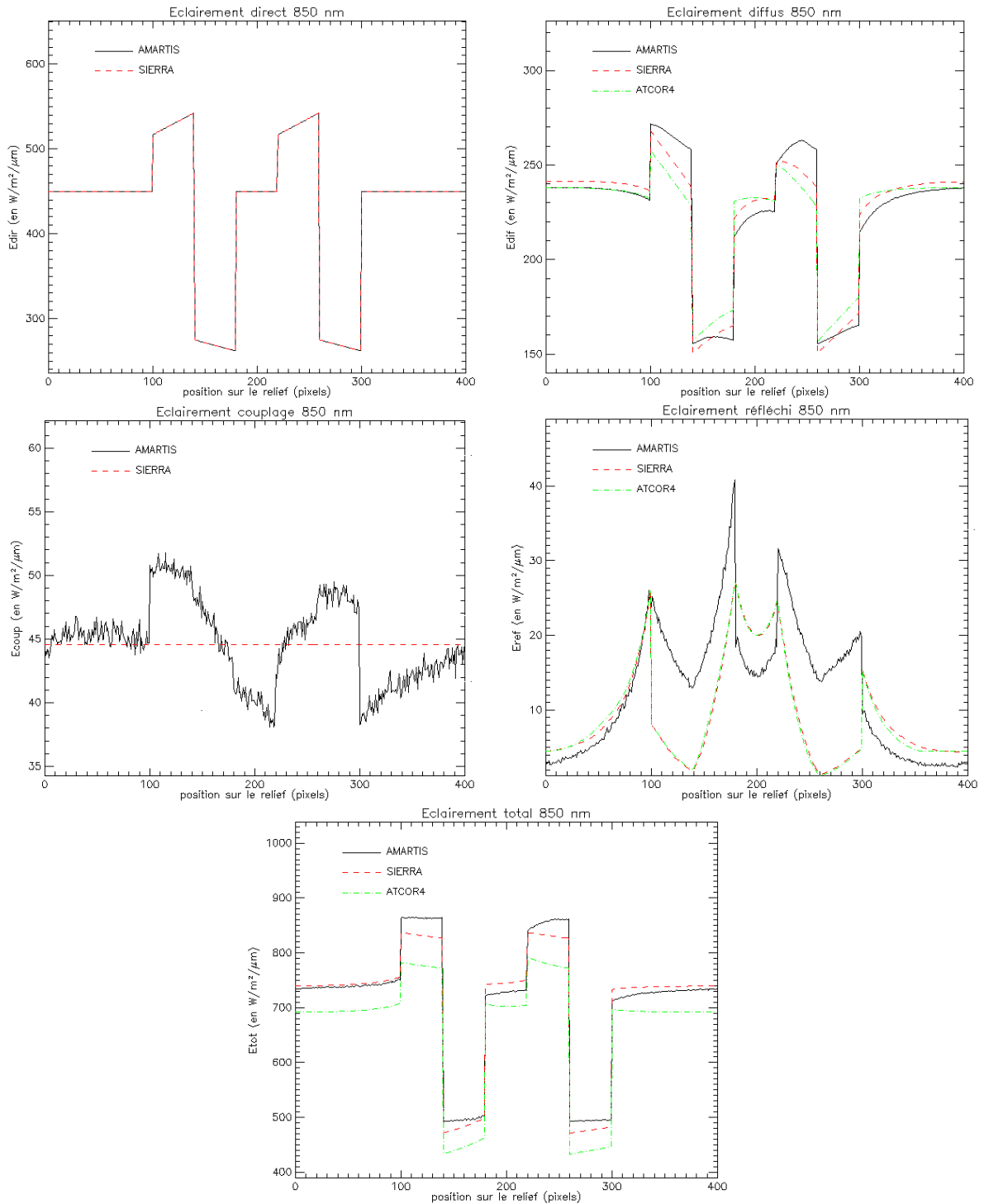


Figure 88: Eclairage incident à 850 nm, scène 2.

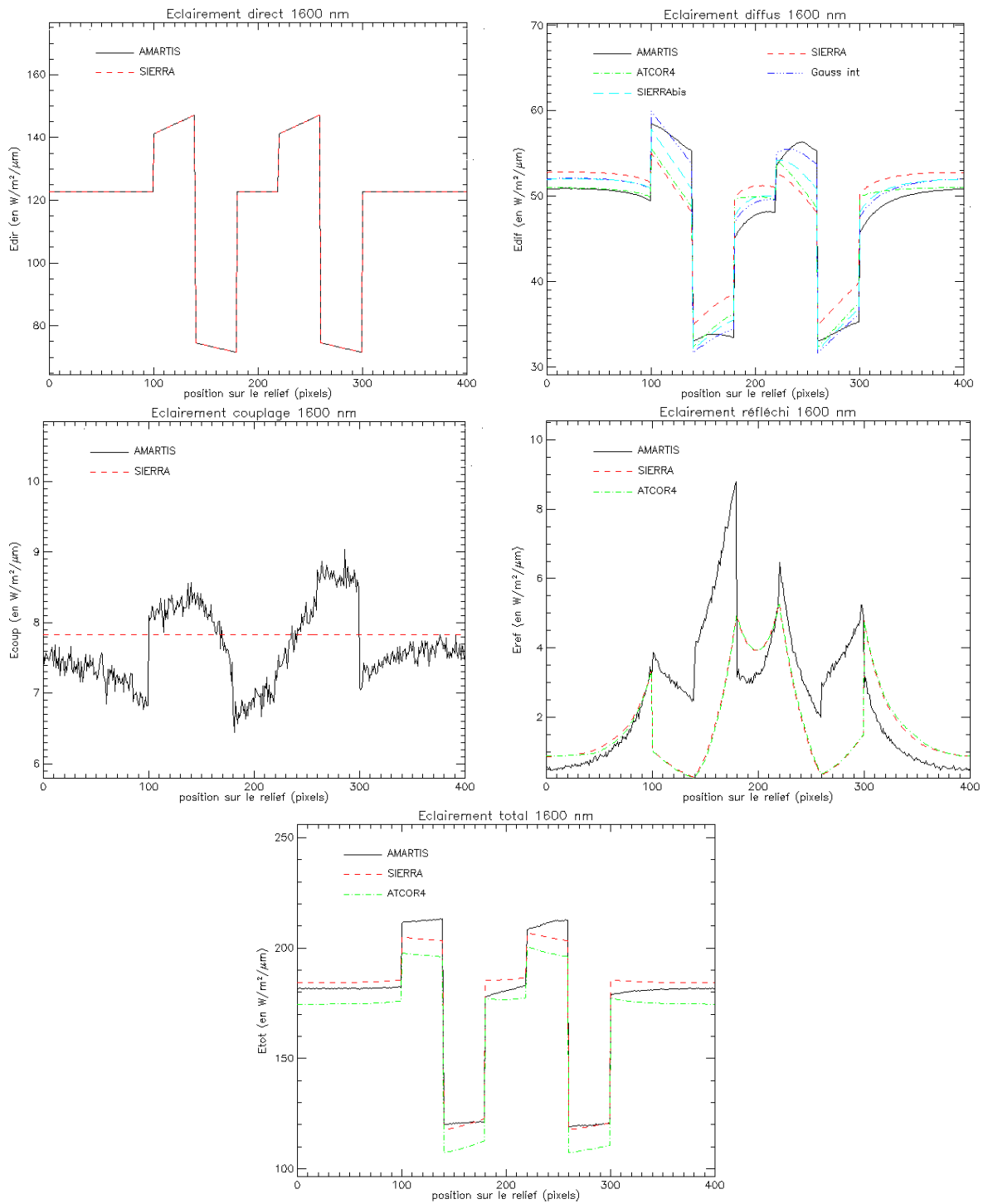


Figure 89: Eclairage incident à 1600 nm, scène 2.

1.1.3. Troisième scène de validation

Dans ce cas, le relief choisi est le même que dans les simulations précédentes. L'atmosphère est identique à la première scène, mais l'incidence solaire est plus grande. L'éclairement provient de l'est avec un angle zénithal solaire de 55° . Cette simulation permet de vérifier la précision du modèle d'éclairement diffus de SIERRA pour des angles d'incidence solaire rasants, et d'estimer l'impact sur l'éclairement total, de l'approche utilisée pour calculer l'éclairement réfléchi.

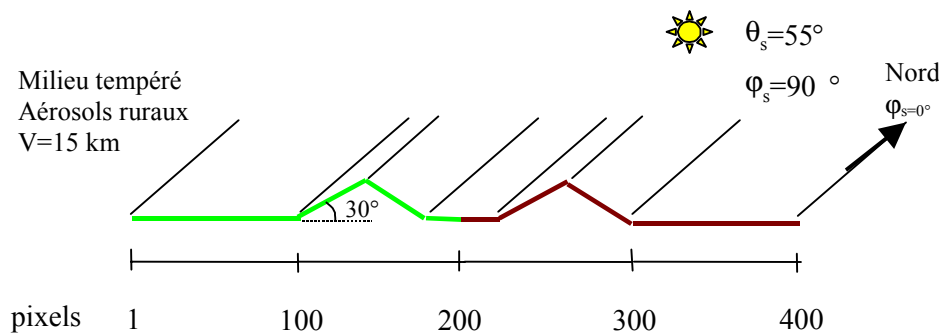


Figure 90: Troisième scène de validation de l'éclairement incident

A 450 nm, l'éclairement diffus est plus important que l'éclairement direct sur le sol plat, et les pentes où l'incidence solaire est rasante. Sur ces pentes, l'éclairement diffus est cinq fois plus grand que l'éclairement direct. Avec le modèle de SIERRA, l'éclairement diffus est calculé avec une erreur maximale de 3%, observée sur le versant exposé au soleil. Avec ATCOR4, l'erreur d'estimation de ce terme peut atteindre 12% en sol plat, et 23% sur les pentes où l'incidence solaire est rasante. L'éclairement de couplage est calculé à 15% près avec SIERRA, ce qui correspond à moins de 1% de l'éclairement total, alors que ce terme contribue jusqu'à 5% de l'éclairement total. Les erreurs du modèle pour calculer l'éclairement réfléchi correspondent à moins de 2% de l'éclairement total.

L'éclairement total est calculé à 3% près dans SIERRA, alors qu'avec ATCOR4, l'erreur atteint 8% en sol plat et 24% sur les pentes en incidence rasante.

A 850 nm, l'éclairement direct est à nouveau la composante principale de l'éclairement, quelle que soit la position sur le relief. Avec SIERRA, l'éclairement diffus est surestimé de 4% en sol plat, sous-estimé de 6% sur les versants exposés au soleil, et l'erreur atteint 4% sur les versants où l'incidence solaire est rasante. Avec ATCOR4, sur les mêmes portions de relief, l'éclairement diffus est respectivement surestimé de 20%, sous-estimé de 13%, et sous-estimé de 26%. L'éclairement de couplage, négligé dans ATCOR4, contribue jusqu'à 12% de l'éclairement incident. L'approche pour estimer ce terme dans SIERRA, fait une erreur correspondant à moins de 3% de l'éclairement total. L'erreur du modèle de calcul de l'éclairement réfléchi, correspond à 13% de l'éclairement total sur le versant composé d'herbe, et 17% sur celui composé de sable, et pour lesquels l'incidence solaire est rasante.

Avec SIERRA, l'éclairement total est calculé avec une erreur de 2% en sol plat et sur les versants exposés au soleil, mais cette erreur atteint 20% sur la pente en incidence rasante. Avec ATCOR4, l'erreur en

sol plat est inférieure à 2% puisque la surestimation des éclairagements diffus et réfléchis est compensée par la négligence de l'éclairage de couplage. Elle atteint 5% sur le versant exposé au soleil et dépasse 35% sur l'autre versant.

A 1600 nm, l'éclairage diffus est calculé par SIERRA avec une précision de 8%. L'erreur est maximale en sol plat, où cette grandeur est sous-estimée, et elle est de l'ordre de 3% sur le versant où l'incidence solaire est rasante, soit moins de 1% de l'éclairage total sur l'ensemble du relief. ATCOR4 fait une erreur de 50% sur le versant en incidence rasante, soit 10% de l'éclairage total, et une erreur de l'ordre de 20% sur le reste du relief. L'éclairage de couplage contribue à 6% de l'éclairage incident sur les versants en incidence rasante, et à moins de 1% sur le reste du relief. L'impact du modèle de SIERRA sur l'éclairage total est négligeable. Par contre, l'approche utilisée pour calculer l'éclairage réfléchi fait une erreur correspondant au maximum à 13% de l'éclairage incident, sur les pentes orientées à l'ouest.

Les deux codes calculent l'éclairage total à 1% près sur le sol plat et les pentes exposées au soleil. Par contre, sur le reste du relief, l'éclairage incident est estimé par SIERRA avec 15% d'erreur, et par ATCOR4 avec 30% d'erreur.

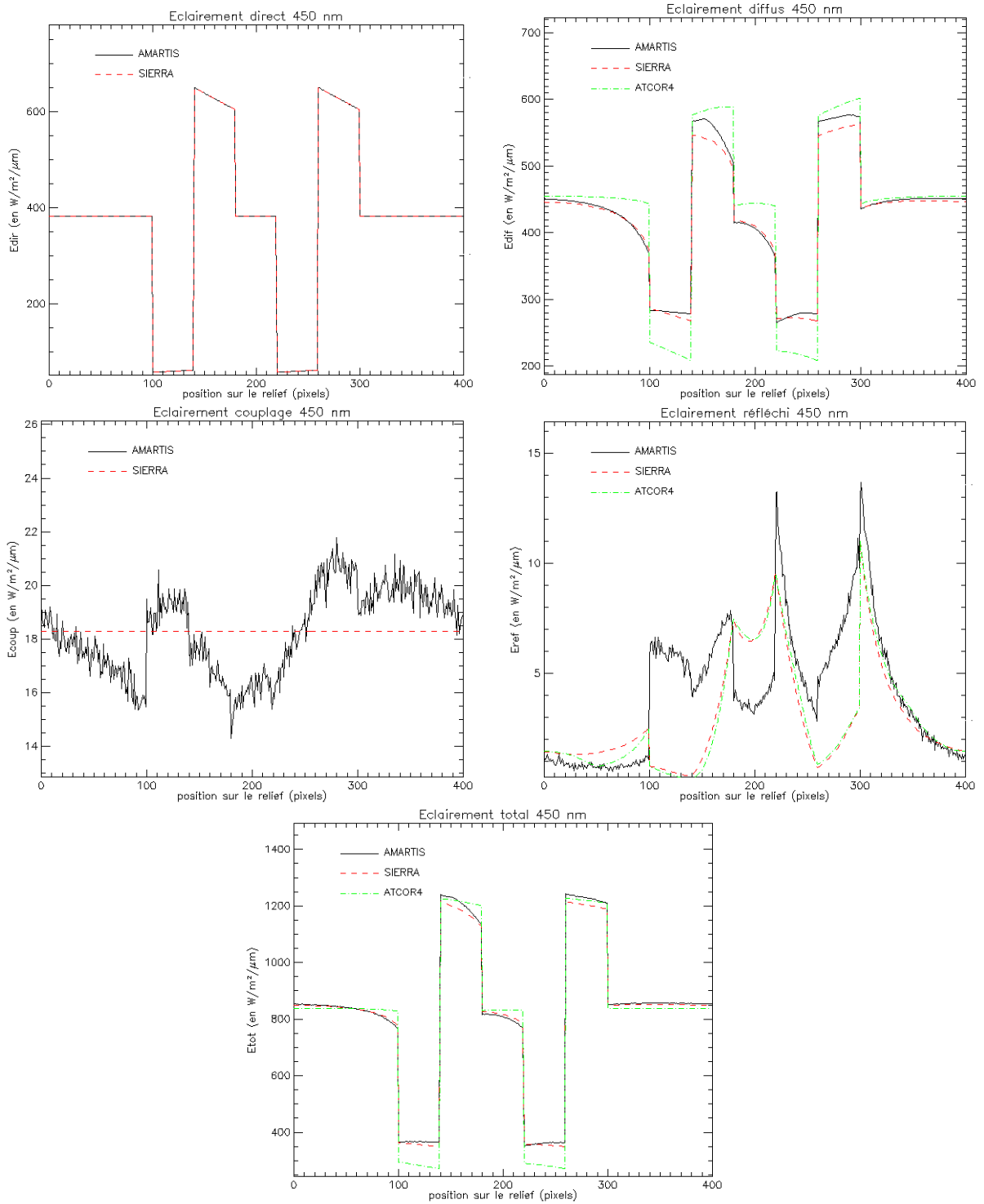


Figure 91: Eclairage incident à 450 nm, scène 3.

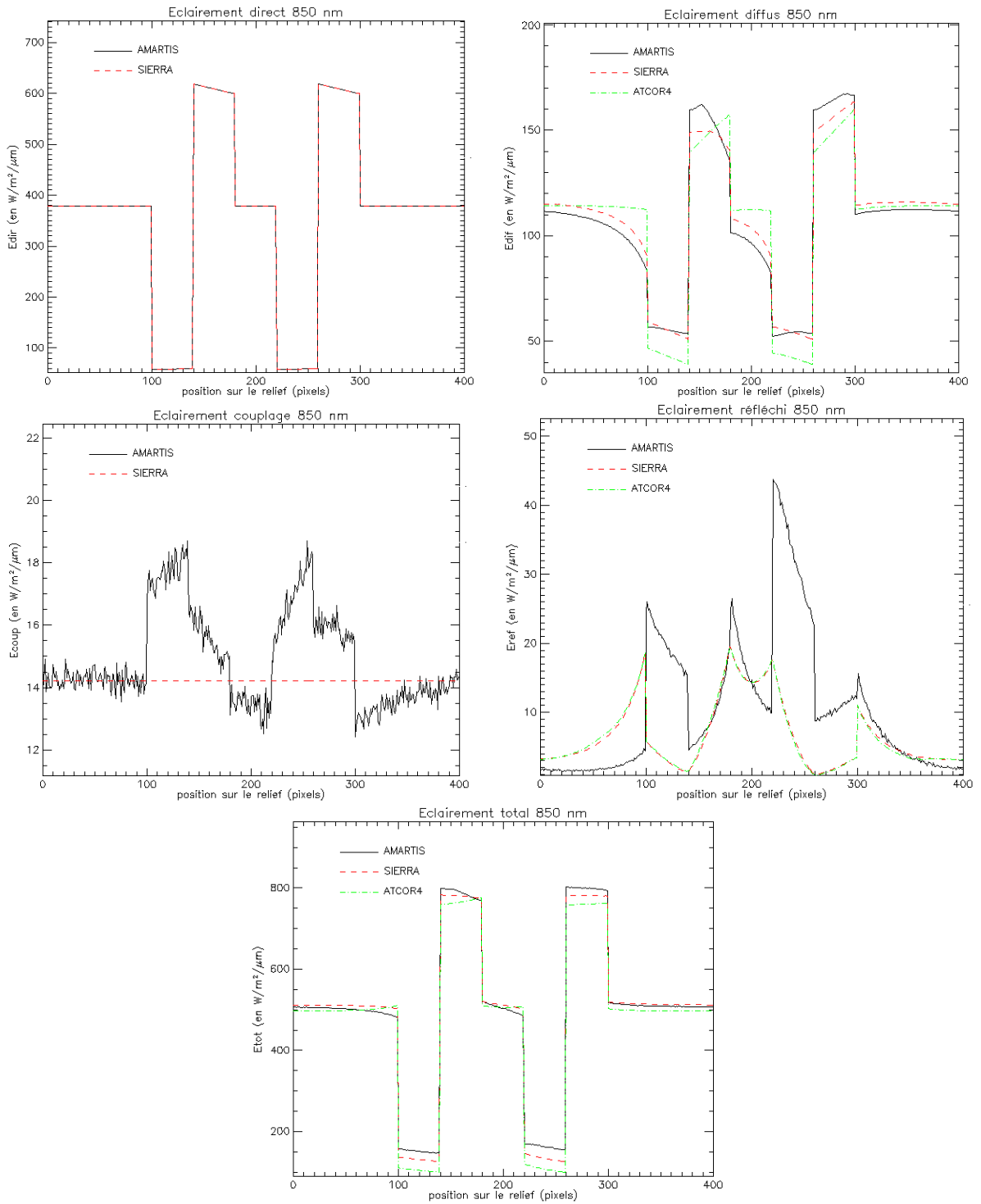


Figure 92: Eclairage incident à 850 nm, scène 3.

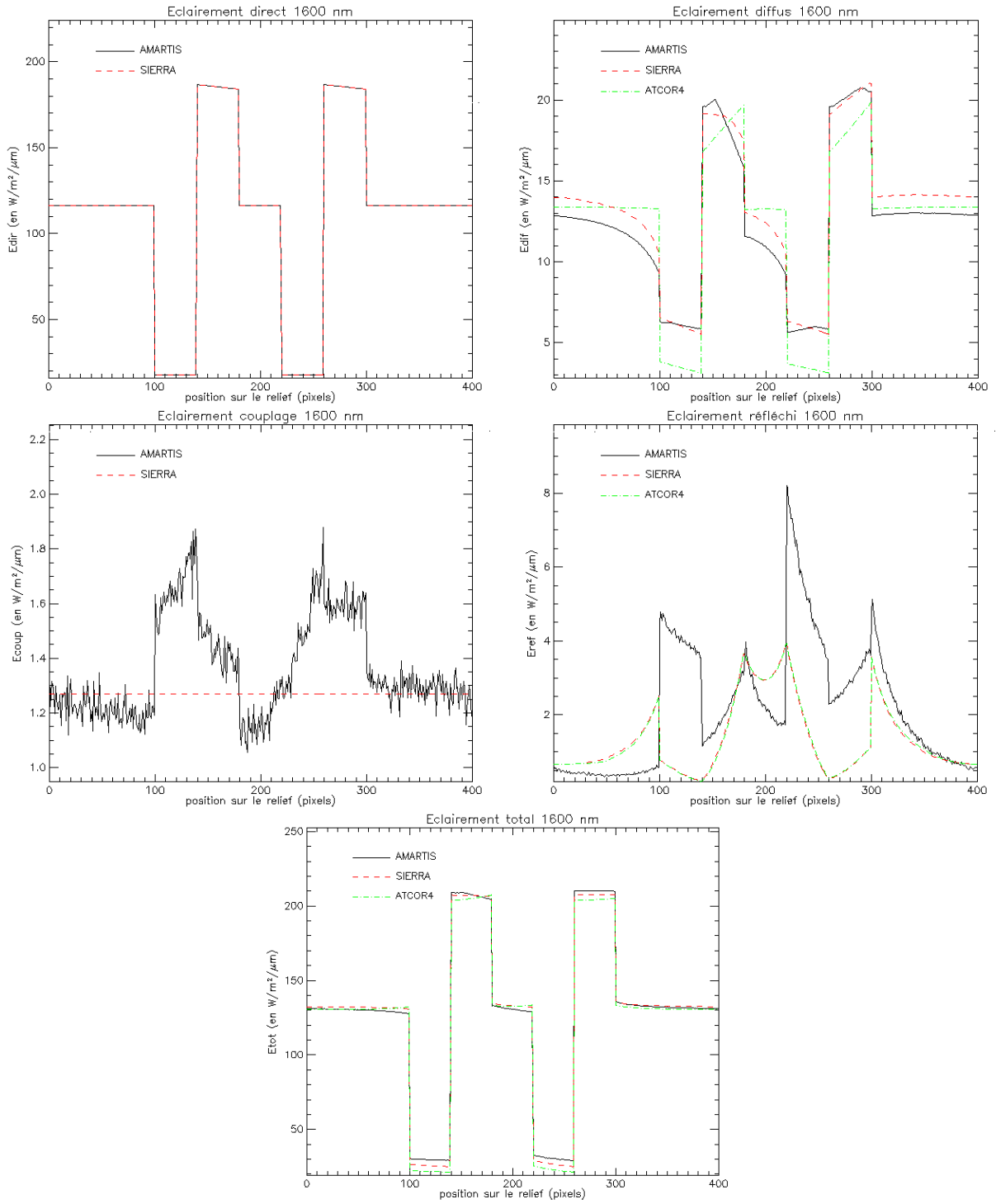


Figure 93: Eclairage incident à 1600 nm, scène 3.

1.1.4. Quatrième scène de validation

La dernière scène est également simulée avec une atmosphère de type tempéré été, avec des aérosols ruraux dont la densité est définie par une visibilité de 15 km. Le relief est composé de deux montagnes adjacentes, avec des pentes de 45° . Il est construit sur un profil de 4 km, formé par 400 pixels de 10 m. Les deux cent premiers pixels sont composés d'herbe et les deux cents suivants de sol nu. L'éclairement provient du nord-est, avec un angle zénithal solaire de 20° . Cette dernière scène de validation permet d'estimer l'impact d'un fort relief sur l'approche de calcul de l'éclairement incident implémentée dans SIERRA.

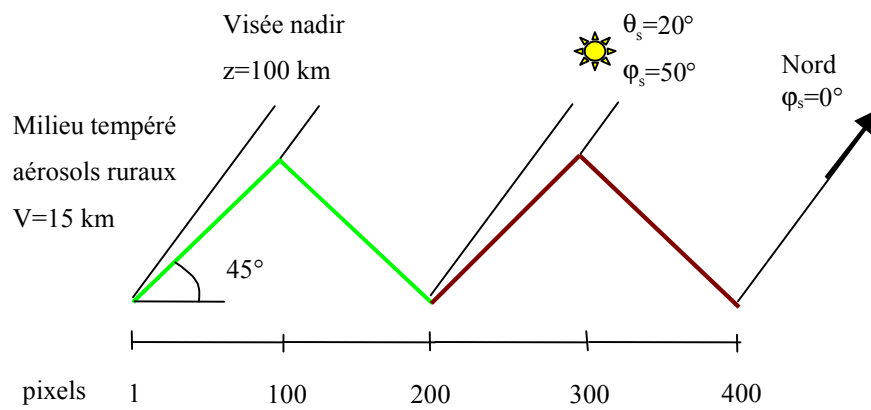


Figure 94: Quatrième scène de validation de l'éclairement incident

A 450 nm, l'éclairement direct est deux fois plus grand que l'éclairement diffus. Avec SIERRA, l'éclairement diffus est estimé précisément sur le bas du relief (moins de 2% d'erreur sur les pixels situés à moins de 200 m d'altitude). Lorsque l'altitude augmente, l'erreur d'estimation augmente également et atteint 20% sur les deux versants. Cette erreur est due à la portion d'atmosphère comprise entre le pixel cible et le relief (Figure 29, paragraphe 3.1.2), qui diffuse le rayonnement mais qui n'est pas pris en compte dans SIERRA. Les erreurs du modèle d'ATCOR4 sont plus importantes, puisque l'éclairement diffus peut être surestimé de 40% à basse altitude, et sous-estimé de 50% à haute altitude. En raison du relief important, l'éclairement réfléchi par le relief est cinq fois plus grand que dans les simulations précédentes. Cependant les erreurs d'estimation de ce paramètre correspondent à moins de 5% de l'éclairement total. L'éclairement de couplage contribue à moins de 3% du signal, et l'erreur du modèle de SIERRA correspond à 1% de l'éclairement total.

L'éclairement total de SIERRA est estimé à 7% près sur le versant le moins éclairé, et à 12% près sur l'autre versant. Les erreurs maximales sont observées aux alentours des sommets, alors qu'elles sont inférieures à 5% à basse altitude. A haute altitude, ATCOR4 sous-estime l'éclairement incident de près de 20% sur les versants exposés à l'ouest, et de 12% près sur ceux qui sont exposés à l'est. A basse altitude, l'éclairement total est surestimé jusqu'à 16%.

A 850 nm, l'éclairement diffus contribue à environ 10% de l'éclairement total incident. Comme à 450 nm, l'éclairement diffus calculé par SIERRA est précis à basse altitude mais les erreurs au sommet atteignent 40%. A haute altitude, SIERRA et ATCOR4 ont des résultats quasiment identiques. Par contre, à basse

altitude, les erreurs maximales d'ATCOR4 sont de l'ordre de 40% également. L'éclairement réfléchi est plus grand que l'éclairement diffus sur les versants les moins éclairés. L'erreur sur ce terme correspond jusqu'à 10% de l'éclairement total sur ces pentes. L'éclairement de couplage contribue au maximum à 5% du signal. Il est nettement sous-estimé par SIERRA, engendrant une erreur maximale correspondant à 3% de l'éclairement total sur les pentes en incidence rasante.

Les erreurs maximales sur l'éclairement total sont de l'ordre de 12% avec SIERRA et 16% avec ATCOR4. A basse altitude, les deux codes ont des résultats similaires, puisque dans ATCOR4, la surestimation de l'éclairement diffus compense en partie le fait que l'éclairement de couplage n'est pas pris en compte.

L'éclairement diffus contribue à moins de 5% du signal à 1600 nm, soit 3% de l'éclairement total avec les deux modèles. L'erreur sur l'éclairement de couplage correspond à moins de 2% de l'éclairement total avec SIERRA, et moins de 3% avec ATCOR4. L'éclairement réfléchi est une composante de premier ordre. Les approches de calcul peuvent créer des erreurs de l'ordre de 8% de l'éclairement total.

Les deux modèles obtiennent donc des résultats similaires sur le calcul de l'éclairement incident, avec des erreurs maximales de l'ordre de 10%, observées aux alentours des sommets, sur les versants les moins éclairés.

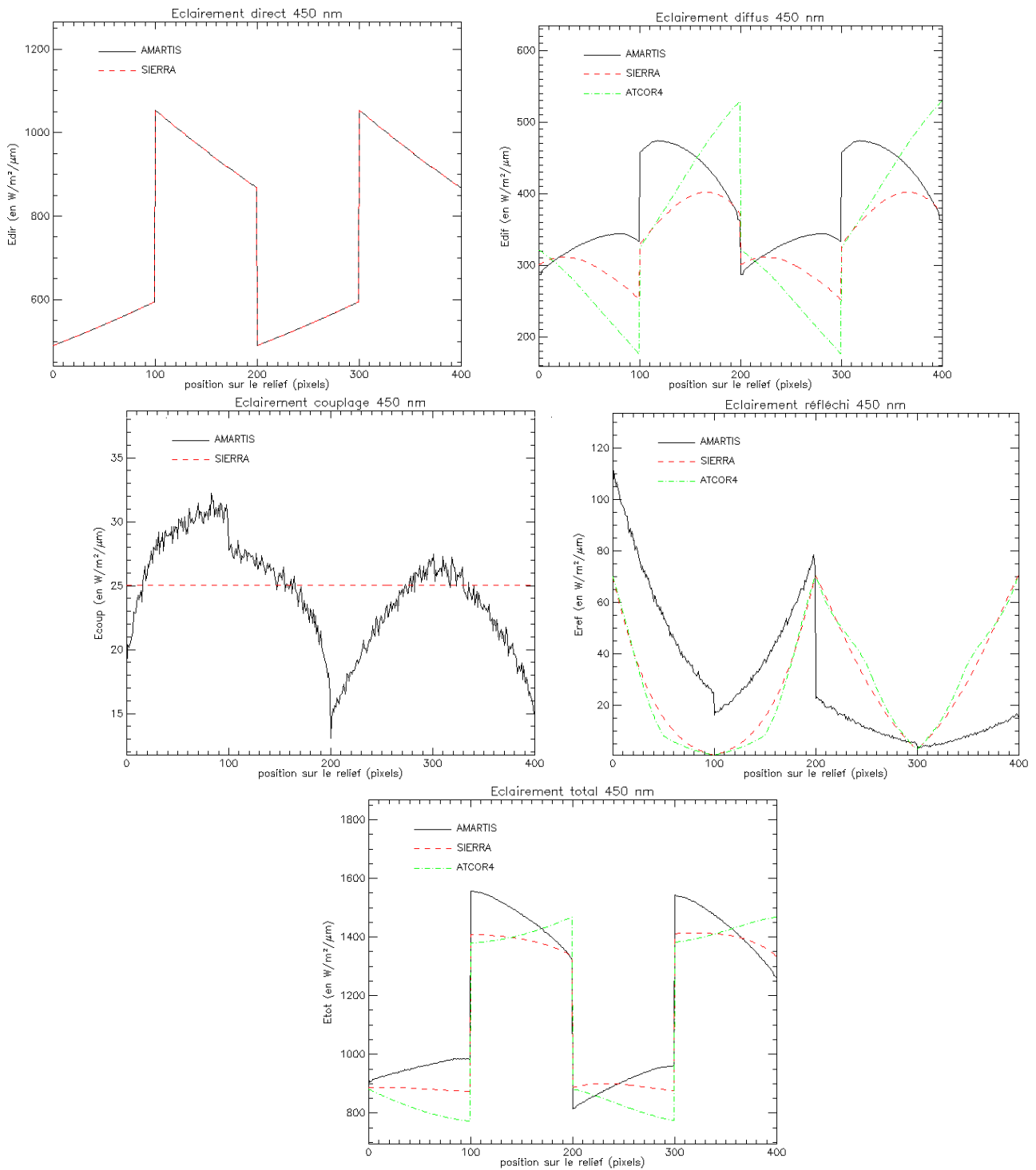


Figure 95: Eclairage incident à 450 nm, scène 4.

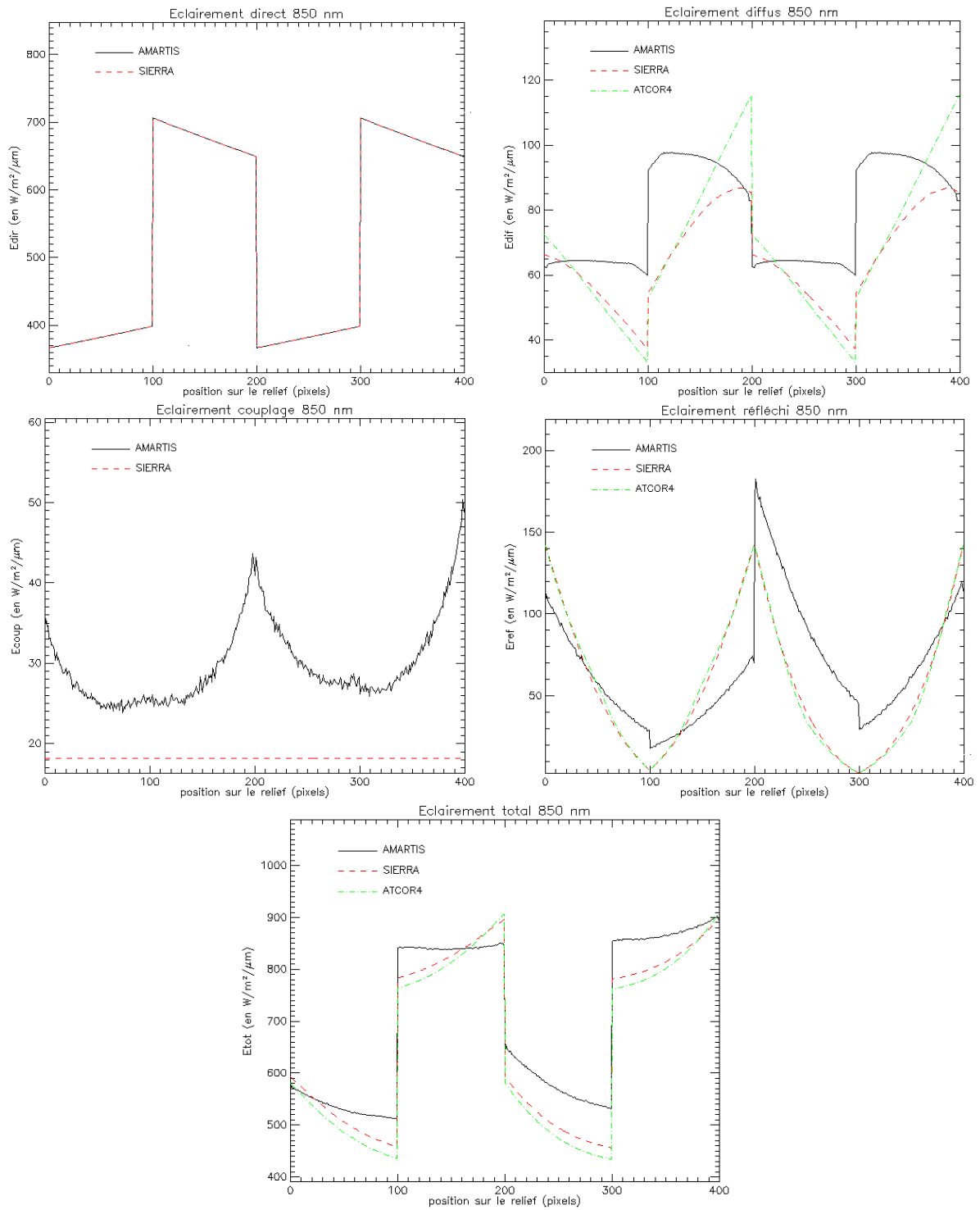


Figure 96: Eclairage incident à 850 nm, scène 4.

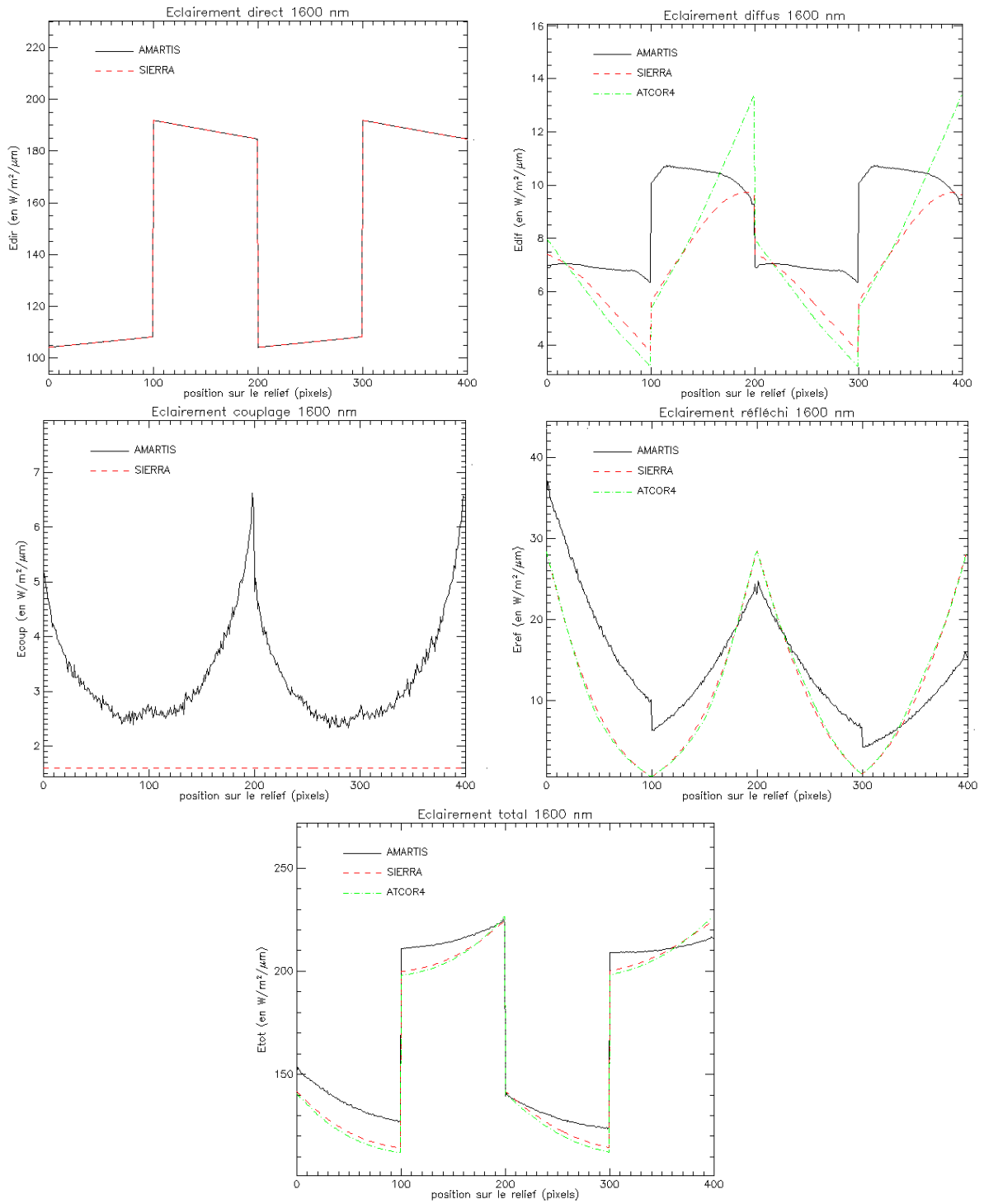


Figure 97: Eclairage incident à 1600 nm, scène4.

1.2. Calcul de la luminance diffuse montante

Dans ce paragraphe, les résultats obtenus avec le modèle de SIERRA, décrit paragraphe 3.2.2 du chapitre 2, sont comparés avec les résultats d'AMARTIS, qui calcule la luminance diffuse par des modules Monte-carlo. Une autre approche est également présentée: la luminance diffuse est calculée à partir de la fonction d'environnement d'ATCOR4, décrite paragraphe 2.2 dans le chapitre 2, pour quatre rayons de voisinage différents (0,5 km, 1 km, 1,5 km, et 2 km), en prenant en compte les variations de l'éclairement et des réflectances sur le voisinage du pixel cible:

$$L_{dif}(P, \lambda) = \frac{\iint_{M \in V(P)} E_{tot}(M, \lambda) s_p(M, \lambda) F_{envt}^{ATCOR4}(M, \lambda) dS_M}{\iint_{M \in V(P)} F_{envt}^{ATCOR4}(M, \lambda) dS_M} \quad (76)$$

La validation est effectuée sur cinq scènes différentes, sur plusieurs reliefs dont la surface est considérée lambertienne, et pour des conditions atmosphériques et d'incidence solaire variables. Elle est effectuée à deux longueurs d'onde, à 450 nm et 850 nm.

1.2.1. Première scène de validation

L'image est simulée pour un relief formé par du sol plat et 2 collines dont les pentes sont de 30°. Il est défini par 400 pixels sur un profil de 4 km. L'atmosphère est de type tempéré été avec une charge en aérosols ruraux correspondant à une visibilité de 15 km. L'éclairement provient de l'est ($\varphi_s=90^\circ$) avec un angle zénithal solaire de 30°. Le capteur est positionné en visée nadir à une altitude de 90 km.

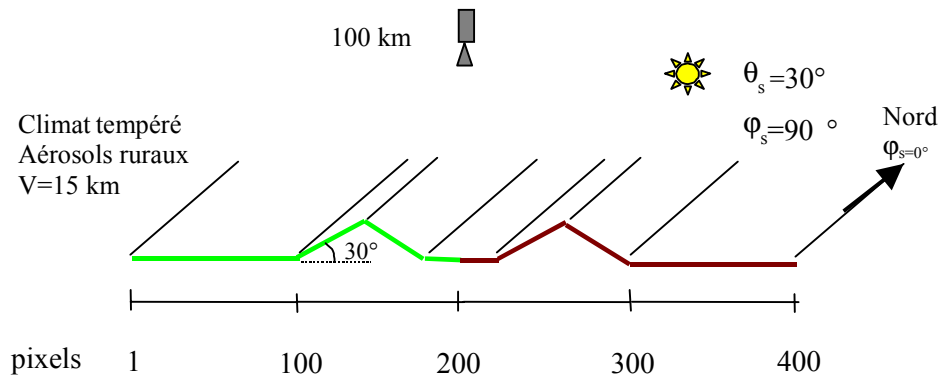


Figure 98: Scène simulée pour la validation du modèle de SIERRA.

Les résultats du calcul de la luminance diffuse montante dans cette configuration sont présentés Figure 99. La luminance diffuse calculée par SIERRA varie sur la scène de la même manière que celle calculée par AMARTIS. Cette grandeur est estimée par SIERRA avec une erreur absolue inférieure à $1 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$, et une erreur relative qui n'excède pas 7%. Avec la fonction d'environnement d'ATCOR4, l'estimation de la luminance diffuse montante dépend fortement du rayon choisi pour le voisinage. Les meilleurs résultats sont obtenus pour un rayon de 1,5 km. Dans ce cas, les variations de luminance diffuse sur la scène sont modélisées de manière approximative, et les erreurs d'estimation de la luminance diffuse atteignent 20% à 450 nm et 10% à 850 nm. Sinon, avec les trois autres rayons de voisinage considérés, l'erreur sur la luminance diffuse est supérieure à 50% à 450 nm et à 20% à 850 nm.

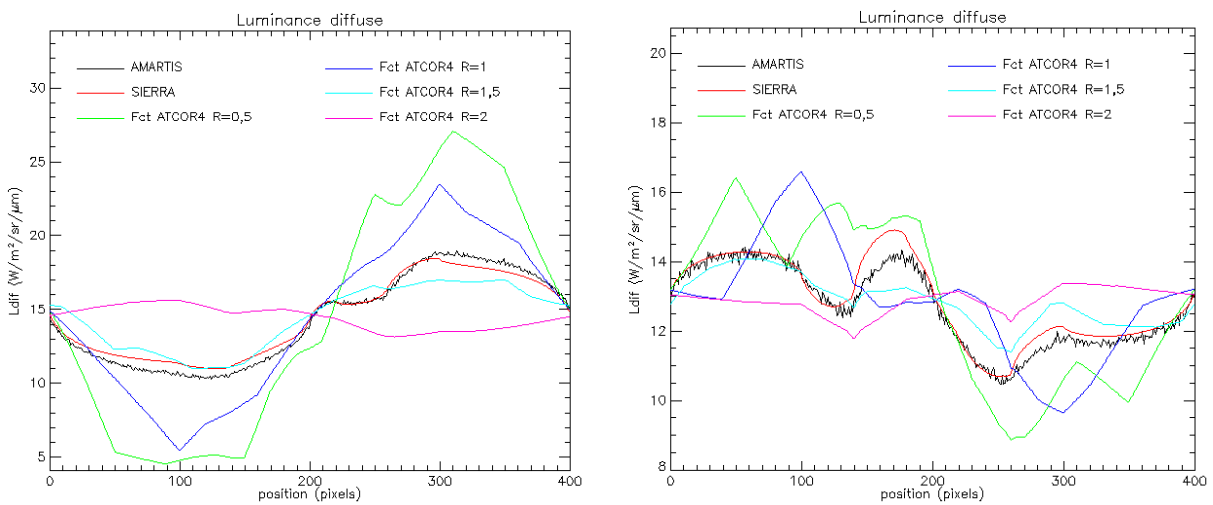


Figure 99: Luminance diffuse montante à 450 nm (à gauche) et 850 nm (à droite), scène 1.

1.2.2. Seconde scène de validation

Dans ce paragraphe, le scénario est identique à celui détaillé paragraphe 1.2.1, à l'exception du type d'atmosphère, de sa composition en aérosols, et de la visibilité atmosphérique. L'atmosphère de type tropical, est composée d'aérosols de type maritime dont la charge correspond à une visibilité de 9 km.

La luminance diffuse est calculée par SIERRA avec une précision de 4% aux deux longueurs d'onde étudiées. Comme dans le cas précédent, les variations de luminance diffuse sur la scène sont moins bien modélisées avec la fonction d'ATCOR4 qu'avec le modèle de SIERRA. Pour un rayon de voisinage de 1,5 km, l'erreur d'estimation sur la luminance diffuse montante atteint 14% à 450 nm et 8% à 850 nm, alors que pour les autres rayons considérés, les résultats ne sont pas en accord avec ceux d'AMARTIS.

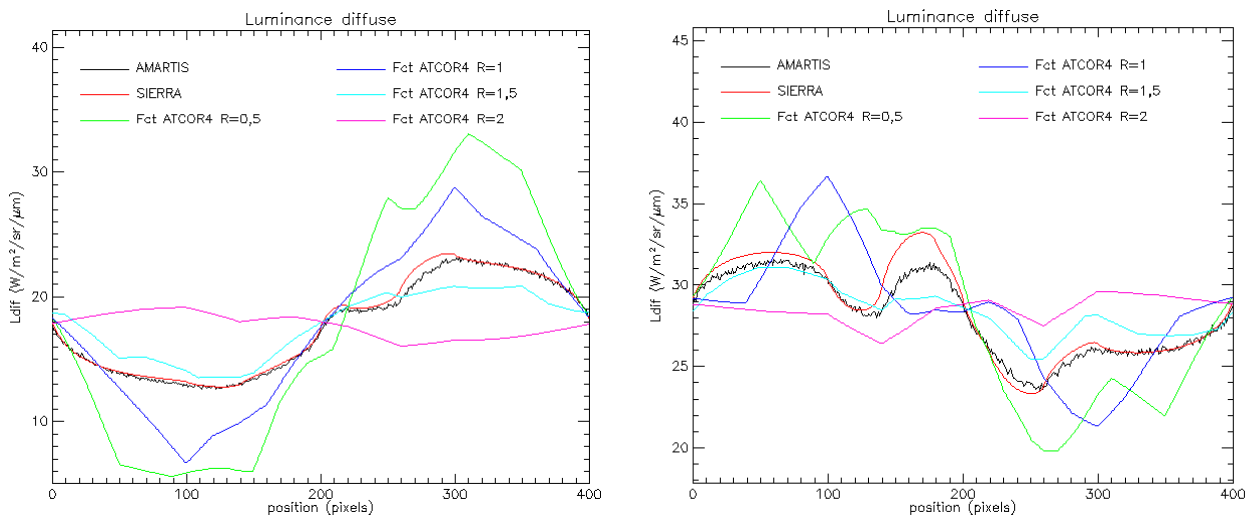


Figure 100: Luminance diffuse montante à 450 nm (à gauche) et 850 nm (à droite), scène 2.

1.2.3. Troisième scène de validation

Dans ce cas, le paysage, la position du capteur, et les paramètres atmosphériques sont les mêmes que dans le premier scénario. Par contre, l'angle zénithal d'incidence solaire est de 55° . La luminance diffuse calculée dans ces conditions est présentée Figure 101.

Dans le cas d'un angle d'incidence solaire important, l'éclairement au niveau du sol est faible, de même que la luminance diffuse montante. Les variations de luminance diffuse en fonction de la position sur le relief sont cependant de même amplitude que dans les cas précédents. Avec SIERRA, ces variations sont bien modélisées, mais les faibles erreurs absolues sur la luminance diffuse (moins de $1 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$ aux deux longueurs d'onde), engendrent des erreurs relatives d'environ 10% à 450 nm et 13% à 850 nm. Avec la fonction d'ATCOR4, les variations de luminance sur la scène sont lissées dans le meilleur des cas, pour un rayon de voisinage de 1,5 km. Avec ce rayon, les erreurs relatives sur la luminance diffuse atteignent 20% aux deux longueurs d'onde étudiées. Pour les autres rayons étudiés, la luminance diffuse calculée est très éloignée de celle obtenue par AMARTIS.

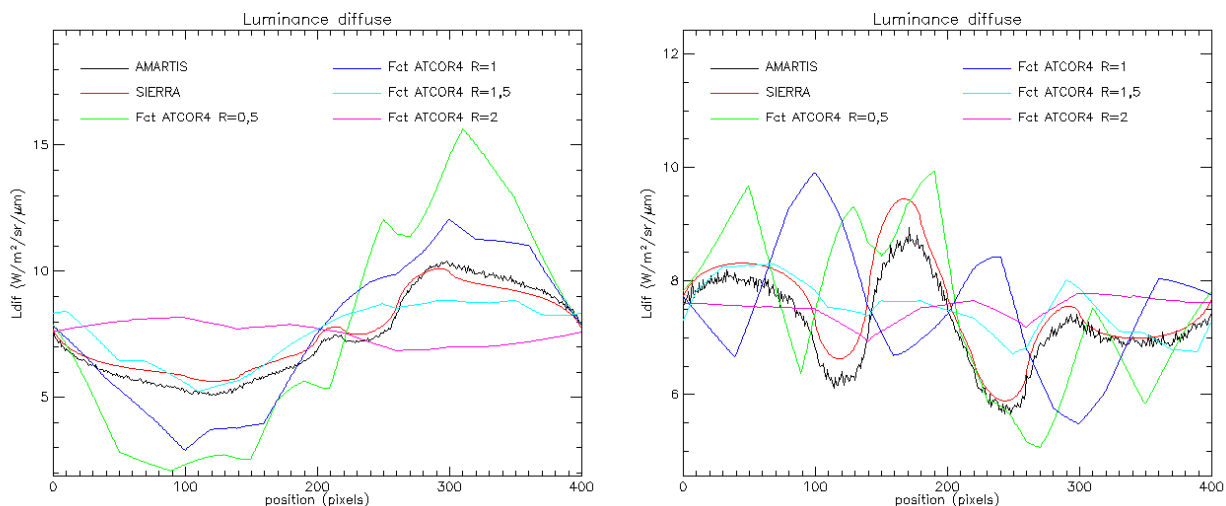


Figure 101: Luminance diffuse montante à 450 nm (à gauche) et 850 nm (à droite), scène 3.

1.2.4. Quatrième scène de validation

Pour ce scénario, le relief est différent des cas précédents. Toujours composé d'herbe verte et de sol nu, il est défini sur un profil de 4 km par une succession de petits reliefs dont la pente varie entre 0° et 40° . Les autres paramètres de la simulation sont identiques à ceux décrits paragraphe 1.2.1. Les résultats sont présentés Figure 102.

Avec SIERRA, la luminance diffuse montante est calculée avec une précision de 7% à 450 nm et 4% à 850 nm. Les variations de luminance sur la scène observées sur la luminance diffuse calculée par AMARTIS, sont bien retranscrites par SIERRA, alors qu'avec ATCOR4, elles sont modélisées de manière approximative pour un rayon de 1,5 km, et pas du tout retranscrites pour les autres rayons. Pour la meilleure estimation, la luminance diffuse calculée avec la fonction d'ATCOR4 est obtenue avec des erreurs relatives atteignant 15% aux deux longueurs d'onde.

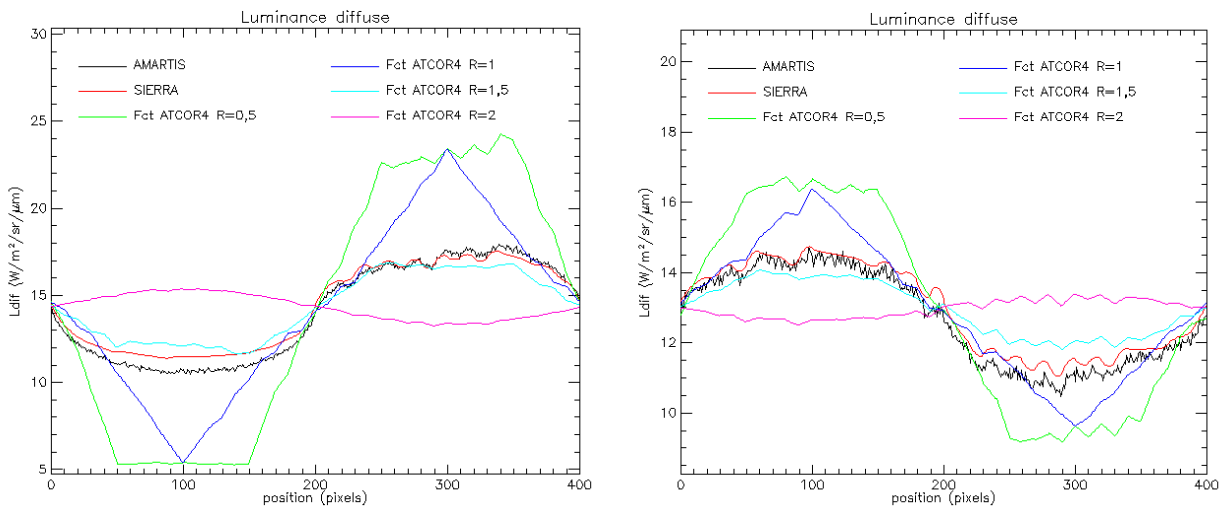


Figure 102: Luminance diffuse montante à 450 nm (à gauche) et 850 nm (à droite), scène4.

1.2.5. Cinquième scène de validation

Comme dans le scénario précédent, l'unique variante par rapport au premier scénario réside dans le relief. Dans ce cas, il est composé par deux montagnes adjacentes, culminant à 1000 m d'altitude, et dont les pentes sont de 45°. Le calcul de la luminance diffuse est présenté Figure 103.

Les variations de luminance diffuse sur la scène sont bien modélisées par SIERRA, avec cependant des erreurs relatives atteignant 15% aux deux longueurs d'onde étudiées. Avec la fonction d'environnement d'ATCOR4, la luminance diffuse calculée pour des rayons de voisinage de 0,5, 1, et 1,5 km n'est pas du tout en adéquation avec la luminance diffuse calculée par AMARTIS. La meilleure approximation est obtenue pour un rayon de 2 km, avec des erreurs relatives sur la luminance diffuse atteignant 35% à 450 nm et 30% à 850 nm.

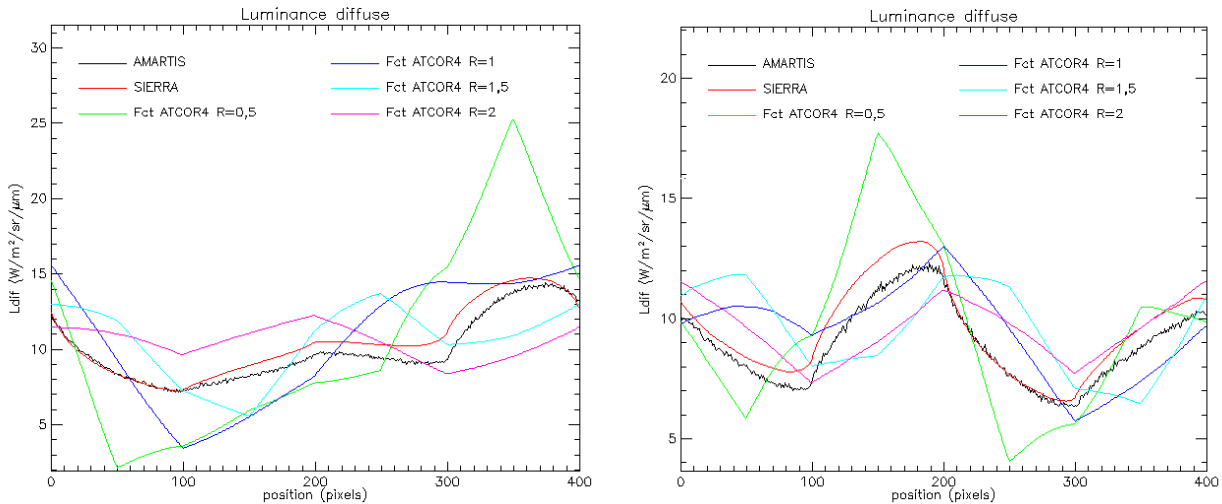


Figure 103: Luminance diffuse montante à 450 nm (à gauche) et 850 nm (à droite), scène5.

1.2.6. Synthèse des résultats

Pour tout type de relief, et dans toutes les conditions d'observation envisageables (incidence solaire, type d'aérosol, visibilité atmosphérique), le modèle proposé par SIERRA permet de modéliser précisément la luminance diffuse issue d'un paysage hétérogène et montagneux, et donne des résultats proches de ceux obtenus par AMARTIS.

1.3. Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance

Dans ce chapitre, le modèle de SIERRA permettant de calculer la luminance directe et la luminance directe-diffuse avec prise en compte des variations directionnelles de la réflectance (effets Hot-Spot et spéculaire, fortes variations de réflectance pour de grands angles d'incidence et d'émergence), est comparé avec AMARTIS. On présente également les résultats obtenus par SIERRA en considérant la réflectance comme lambertienne. Tous les calculs sont effectués avec les mêmes données d'entrée, les calculs de transfert radiatif sont effectués avec 6S, et l'éclairement incident sur la scène est obtenu par AMARTIS.

Les trois simulations sont réalisées sur le même relief, composé de sol plat et de deux montagnes. Le sol est recouvert d'herbe sur les deux cents premiers pixels, et de sable sur les deux cents autres. Le capteur est positionné au nadir à 100 km d'altitude. L'atmosphère est de type tempéré été avec une charge en aérosols ruraux correspondant à une visibilité de 15 km. Dans les trois cas simulés, l'éclairement provient de l'est. Le seul paramètre variable entre les simulations est l'angle zénithal solaire, qui est d'abord de 10° afin de simuler une acquisition dans une configuration proche du Hot-spot, puis de 35° , et enfin de 55° pour avoir de forts angles d'incidence sur le relief.

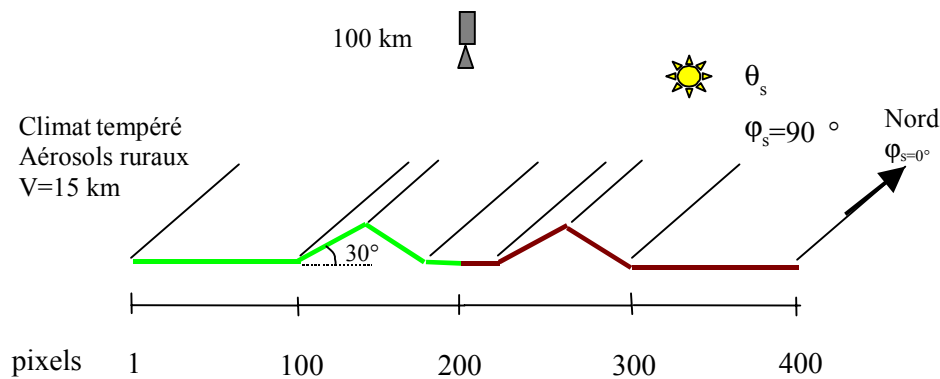


Figure 104: Scène de validation pour le calcul des luminances montantes

1.3.1. Première scène de validation

Les résultats obtenus à 450 nm, 850 nm, et 1600 nm sont présentés Figure 105 à Figure 107. Les quatre composantes de la luminance sont tracées: la luminance directe-directe dans laquelle intervient la réflectance bidirectionnelle, la luminance directe issue des éclairagements diffus, réfléchi, et de couplage, et la luminance directe-diffuse, qui font intervenir respectivement les réflectances hémisphériques-directionnelles et directionnelles-hémisphériques, et la luminance diffuse issue des éclairagements diffus, réfléchi, et de couplage, qui est calculée avec l'albédo sphérique.

La luminance directe-directe calculée par SIERRA avec la réflectance bidirectionnelle, est identique à celle d'AMARTIS aux trois longueurs d'onde.

Avec l'approximation d'un sol lambertien, cette grandeur est surestimée d'environ 20% en sol plat à 450 nm. Sur la montagne de sable, l'erreur sur ce terme est inférieure à 4%, alors qu'elle atteint 20% sur la pente en incidence rasante composée d'herbe. On remarque que selon les conditions d'incidence, la luminance directe-directe est soit sous-estimée soit surestimée. A 850 nm, l'erreur sur la luminance directe-directe oscille entre -6% et +22%, alors qu'à 1600 nm, où ce terme représente 90% du signal, l'erreur varie entre -9% et +7%.

A 450 nm, sur la luminance directe issue des éclairagements diffus, réfléchis et de couplage, considérer une surface lambertienne engendre environ 10% d'erreur. Avec l'approche de SIERRA, ce terme est calculé avec moins de 0,5% d'erreur, sauf sur la pente en incidence rasante composée d'herbe, où cette erreur est de 3%. L'impact des erreurs de SIERRA sur la luminance directe totale est négligeable. A 850 nm, la luminance directe issue des éclairagements diffus, réfléchi et de couplage, est sous-estimée d'environ 2% sur l'ensemble du relief avec le modèle de SIERRA, ce qui n'a presque pas d'incidence sur la luminance directe totale. Le calcul de ce terme avec l'approximation d'un sol lambertien est réalisé avec une précision de 10%, ce qui engendre moins de 2% d'erreur sur la luminance directe totale. A 1600 nm, les erreurs d'estimation de ce terme de luminance directe ont un impact négligeable sur la luminance directe totale.

La prise en compte des effets directionnels sur la luminance directe-diffuse diminue les erreurs relatives sur l'estimation de ce terme. A 450 nm, si le sol est considéré lambertien, la luminance diffuse au-dessus de l'herbe est calculée avec une erreur atteignant 12%, et au-dessus du sable, avec une erreur maximale de 3% (l'erreur due à l'approximation d'un sol lambertien compense l'erreur d'estimation de la luminance diffuse due à la fonction d'environnement). Avec une prise en compte des effets bidirectionnels, cette erreur est inférieure à 3% sur l'herbe, et 7% sur le sable. A 850 nm et 1600 nm, la luminance diffuse est calculée de manière précise avec prise en compte des variations directionnelles de la réflectance, alors qu'elle est estimée avec une erreur d'environ 10% lorsque la surface est supposée lambertienne.

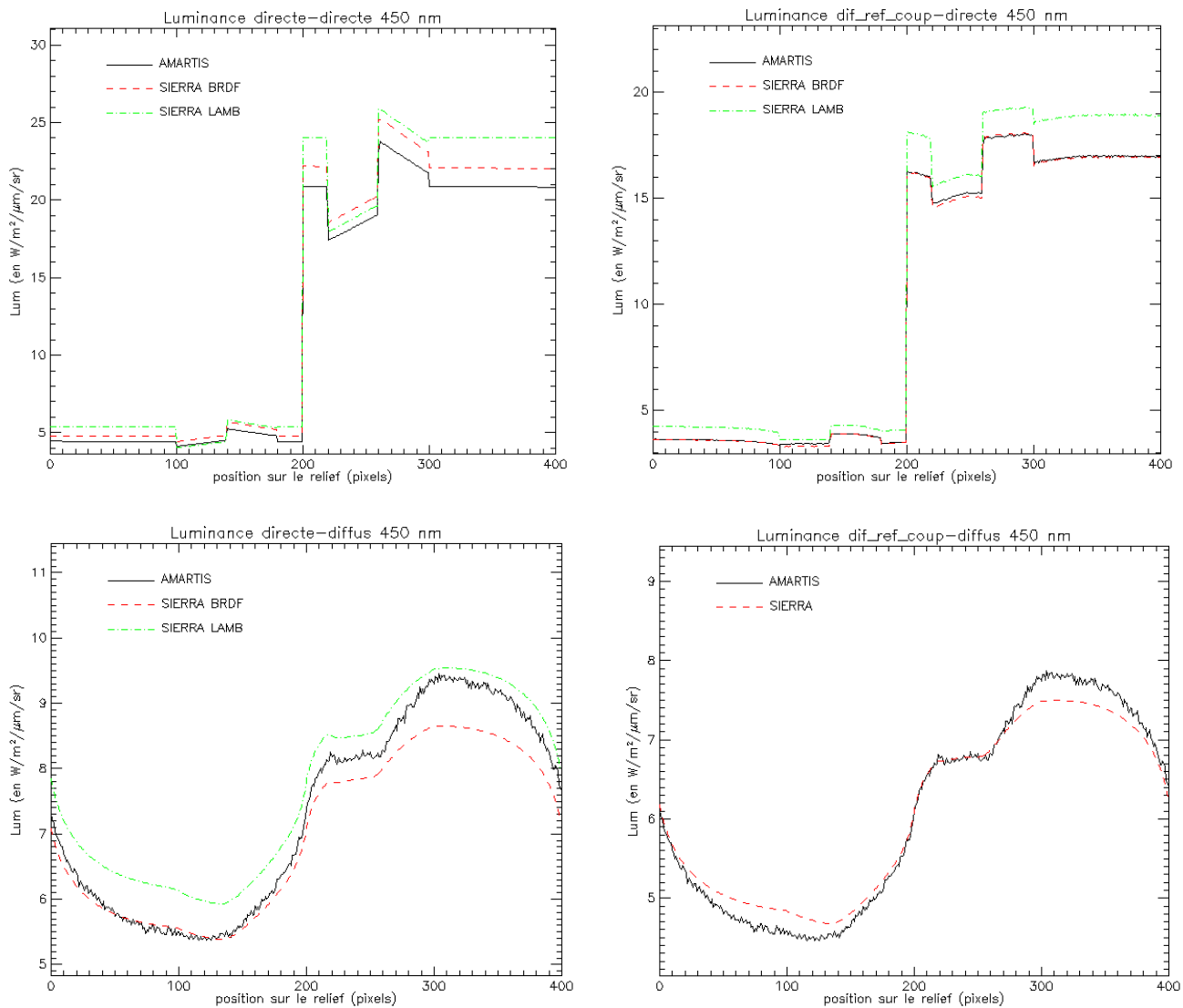


Figure 105: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 450 nm, scène 1.

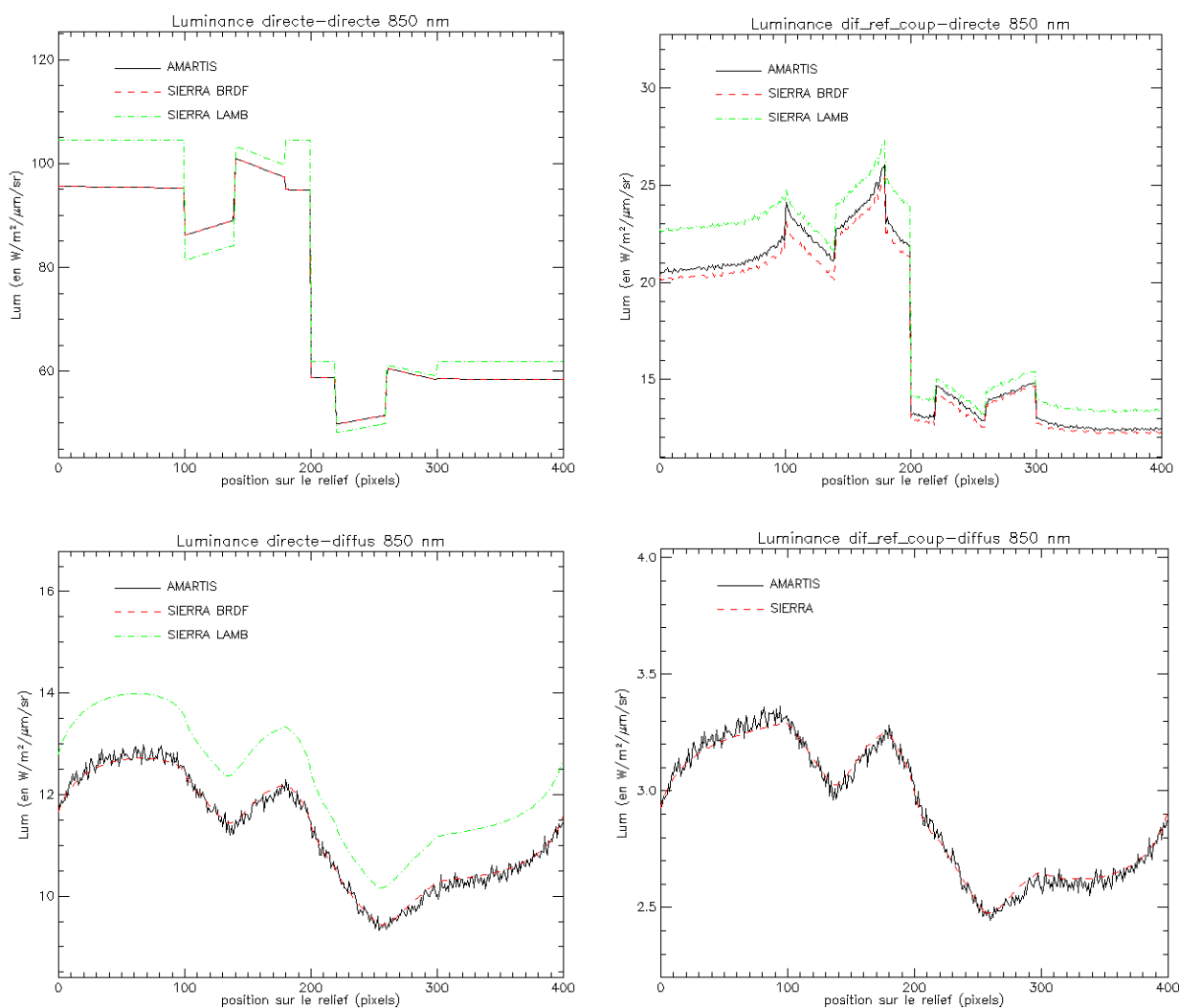


Figure 106: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 850 nm, scène 1.

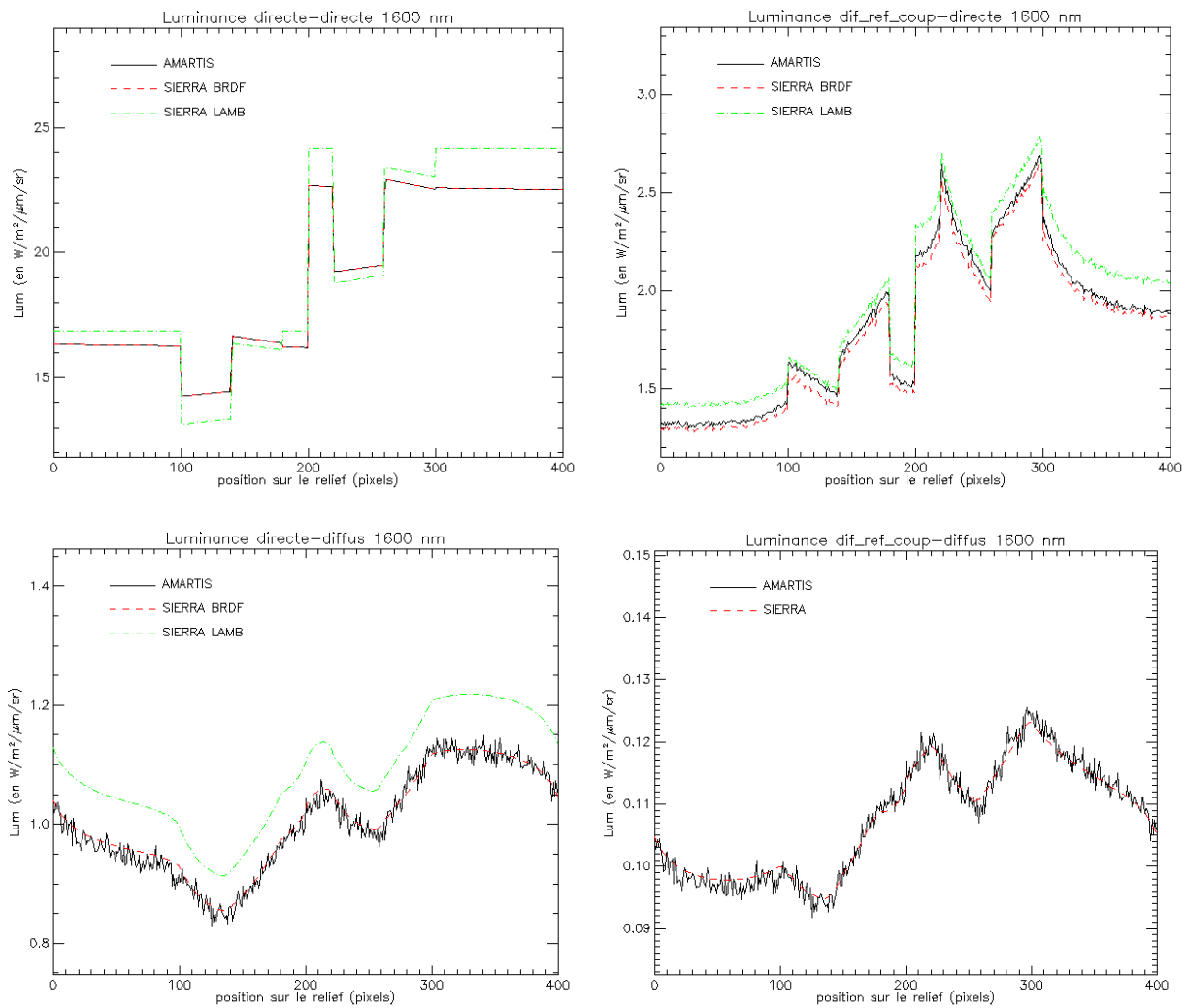


Figure 107: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 1600 nm, scène 1.

1.3.2. Deuxième scénario de validation

Dans le second scénario, l'angle zénithal solaire est de 35° . Les résultats obtenus à 450 nm, 850 nm, et 1600 nm sont présentés Figure 108 à Figure 110. Les quatre composantes de la luminance sont tracées.

La luminance directe-directe calculée par SIERRA avec prise en compte des effets bidirectionnels est identique à celle d'AMARTIS aux trois longueurs d'onde considérées. La luminance directe-directe calculée avec l'approximation d'un sol lambertien est surestimée sur l'ensemble du relief, excepté sur la pente d'herbe exposée à l'ouest, où les différences avec AMARTIS sont négligeables. L'erreur sur l'herbe atteint 22% à 450 nm, 18% à 850 nm et 13% à 1600 nm, alors qu'elle est respectivement de 14%, 13%, et 12% sur le sable.

Comme dans le scénario précédent, pour le calcul de la luminance directe issue des éclairagements diffus, réfléchi et de couplage, l'erreur maximale du modèle de SIERRA est de l'ordre de 2%, soit une erreur correspondant à 1% de la luminance directe totale. L'approximation lambertienne engendre jusqu'à 20% d'erreur sur ce terme, soit 10% de la luminance directe totale. Dans le proche infrarouge, cette approximation crée moins de 2% d'erreur sur la luminance directe, et l'erreur créée par le modèle de SIERRA est négligeable.

La luminance directe-diffuse contribue à la moitié du rayonnement diffus montant à 450 nm. Sur l'herbe (où une estimation précise de la luminance diffuse est nécessaire pour l'inversion puisque la luminance directe est faible), une prise en compte des effets directionnels de la réflectance dans le calcul de la luminance diffuse montante, permet de réduire les erreurs d'estimation: avec un sol lambertien, l'erreur d'estimation atteint 12%, alors qu'avec le modèle de SIERRA, elle est d'environ 7%. Sur le sable, le calcul effectué à partir d'une surface lambertienne fournit de meilleurs résultats par le biais d'erreurs qui se compensent. Dans le proche infrarouge, cette correction améliore de 4% l'estimation de la luminance diffuse montante.

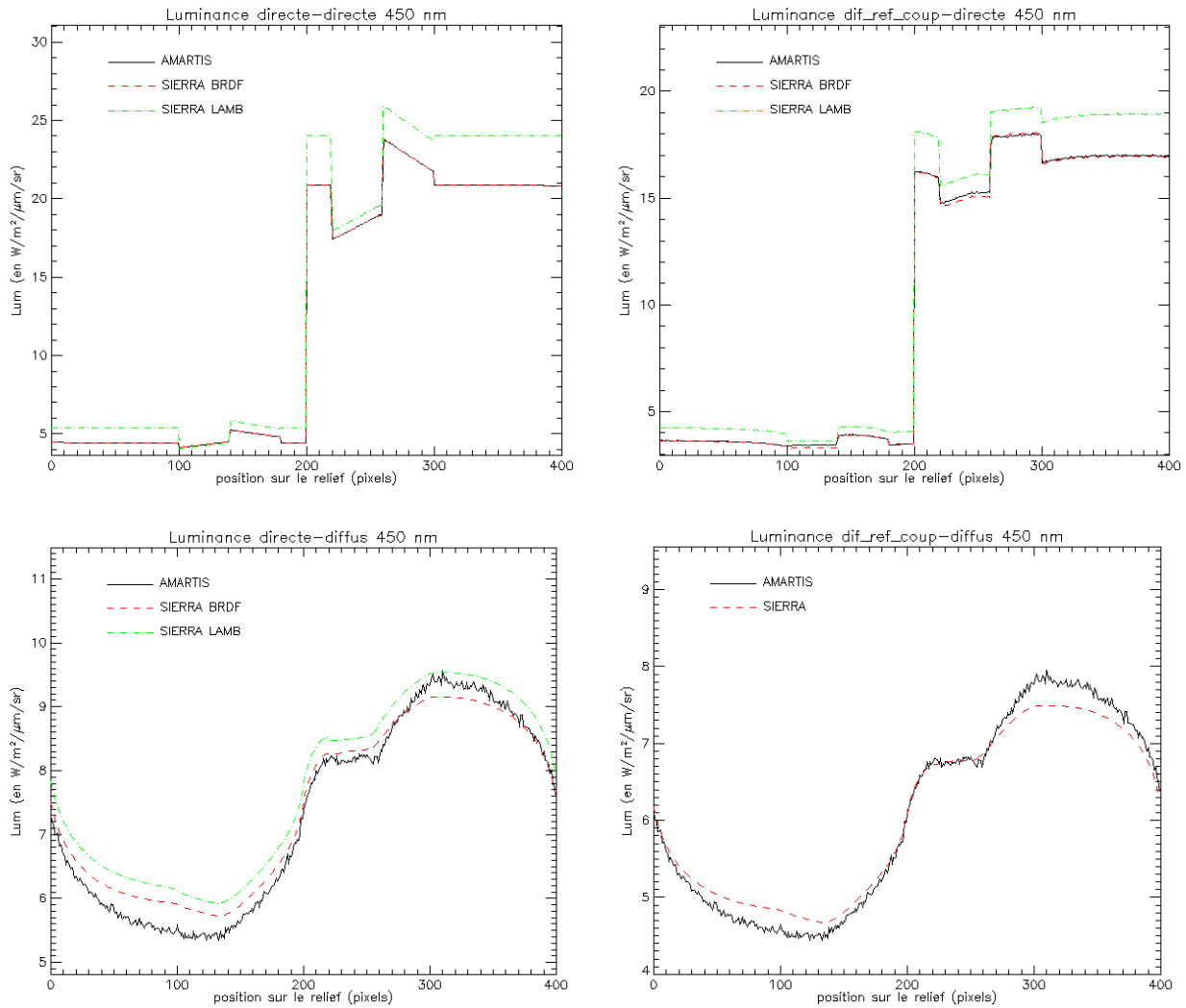


Figure 108: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 450 nm, scène 2.

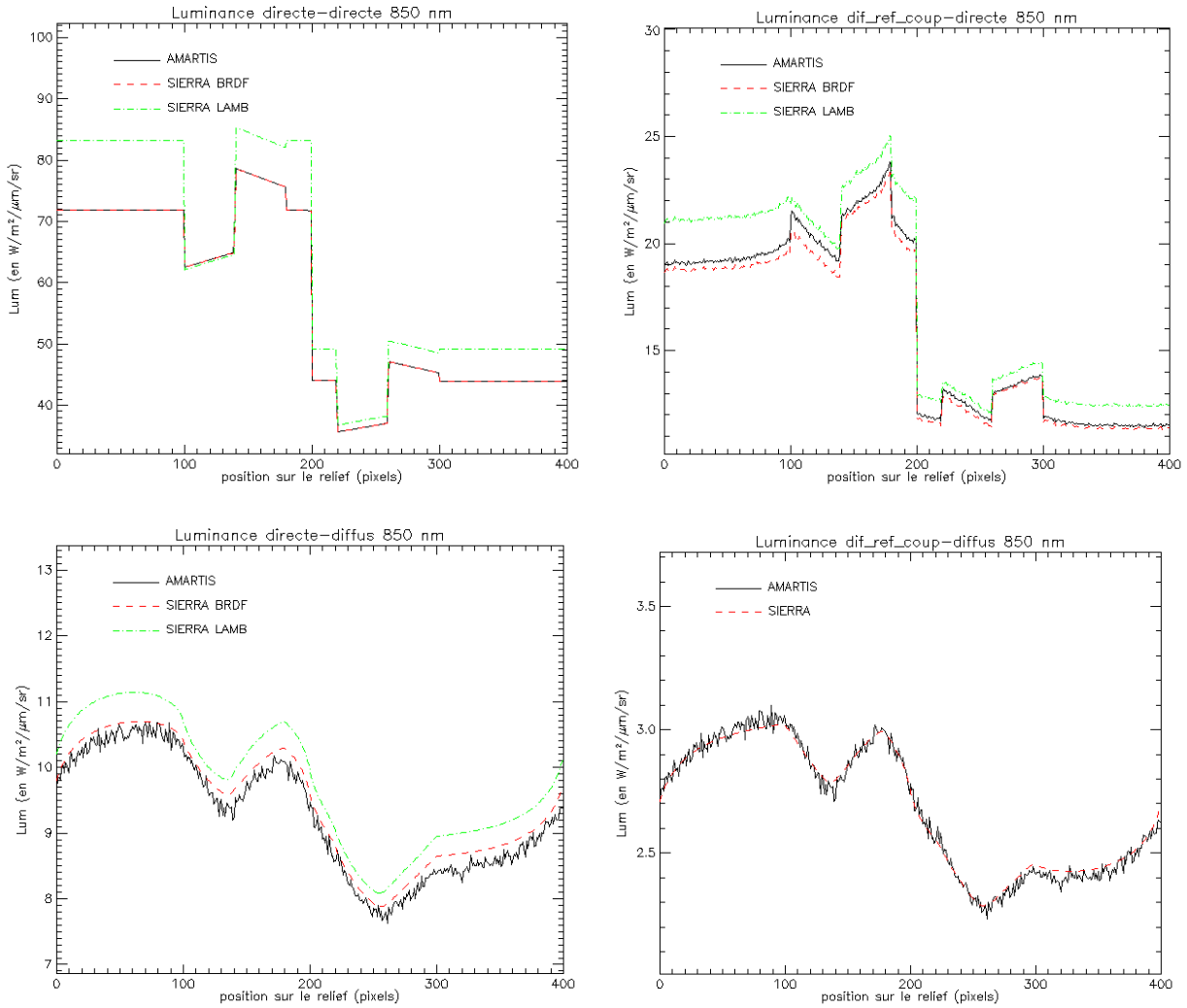


Figure 109: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 850 nm, scène 2.

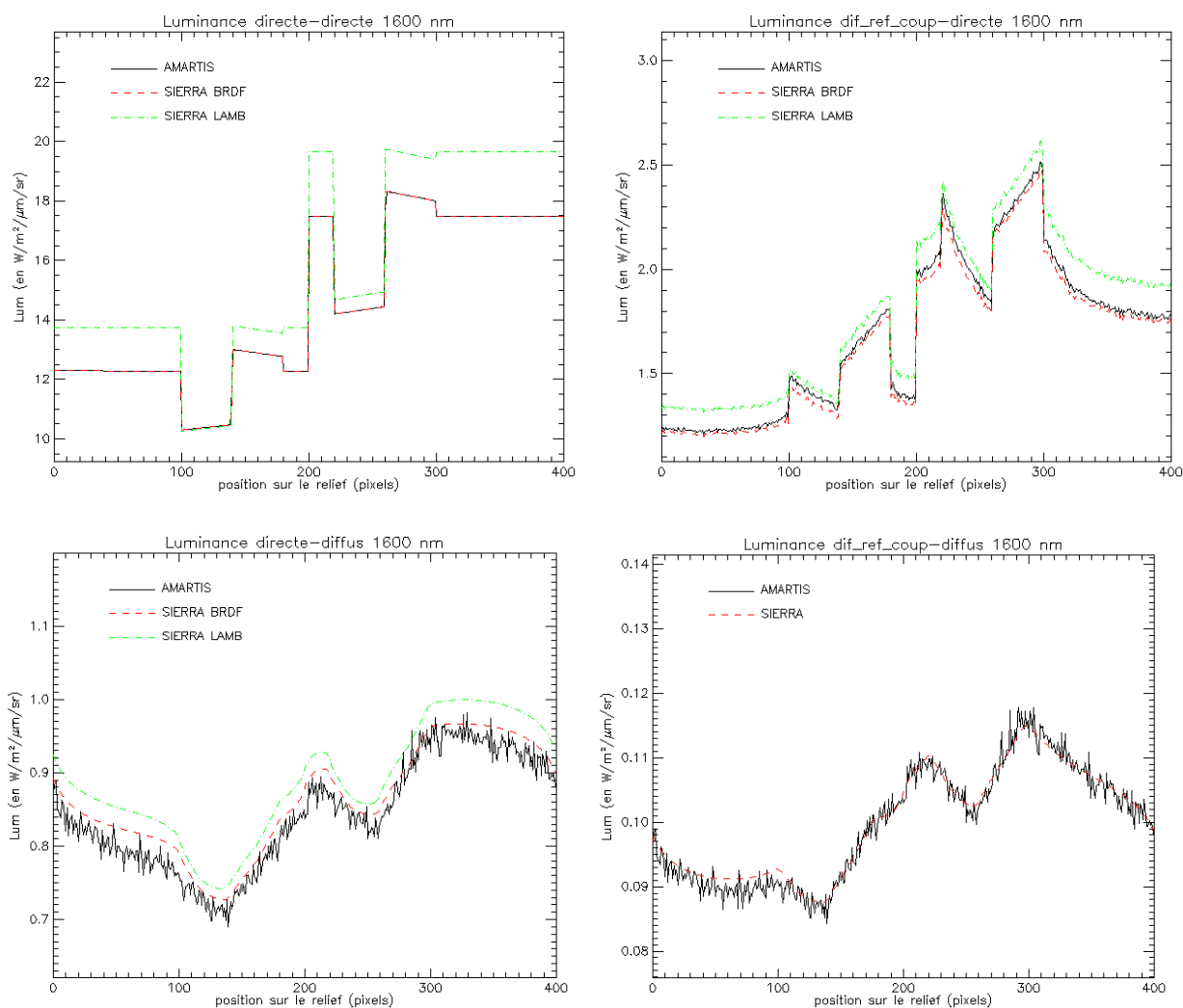


Figure 110: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 1600 nm, scène 2.

1.3.3. Troisième scène de validation

L'angle zénithal d'incidence solaire est de 55° dans ce scénario. Les résultats obtenus à 450 nm, 850 nm, et 1600 nm, sont présentés Figure 111 à Figure 113. Les quatre composantes de la luminance sont tracées.

La luminance directe-directe calculée par SIERRA à partir de réflectances bidirectionnelles est identique à celle d'AMARTIS aux trois longueurs d'onde considérées. En considérant la réflectance lambertienne, les erreurs d'estimation de cette grandeur sont de l'ordre de 20% à 450 nm et 850 nm, et de 16% à 1600 nm. Elles sont observées sur les pentes exposées au soleil, sur les deux types de sol de la scène. Sur sol plat, la luminance directe-directe est surestimée d'environ 10% et elle est calculée précisément sur les versants où l'incidence solaire est rasante.

La luminance directe issue des éclairagements diffus, réfléchi et de couplage, est calculée avec une précision de 4% avec SIERRA. En sol plat, ce terme, qui contribue pour moitié à la luminance directe à 450 nm, est calculé précisément. Avec l'approximation d'un sol lambertien, ce terme est surestimé dans le visible d'environ 12% en sol plat et sur les pentes exposées au soleil, et de 6% sur les versants où l'incidence solaire est rasante. Les erreurs sur la luminance directe totale à 850 nm et 1600 nm, sont inférieures à 3%.

La luminance directe-diffuse avec ou sans prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance, donne des résultats similaires aux trois longueurs d'onde. Les erreurs relatives maximales engendrées sur le calcul de la luminance diffuse montante, sont de l'ordre de 10% à 450 nm, et 5% à 850 nm et 1600 nm.

1.3.4. Synthèse des résultats

Dans la majorité des cas, la prise en compte des effets directionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance directe-diffuse, améliore l'accord entre les résultats fournis par SIERRA et AMARTIS. Lorsque l'on suppose la surface lambertienne, l'erreur sur le calcul de la luminance directe atteint 20% dans les cas considérés.

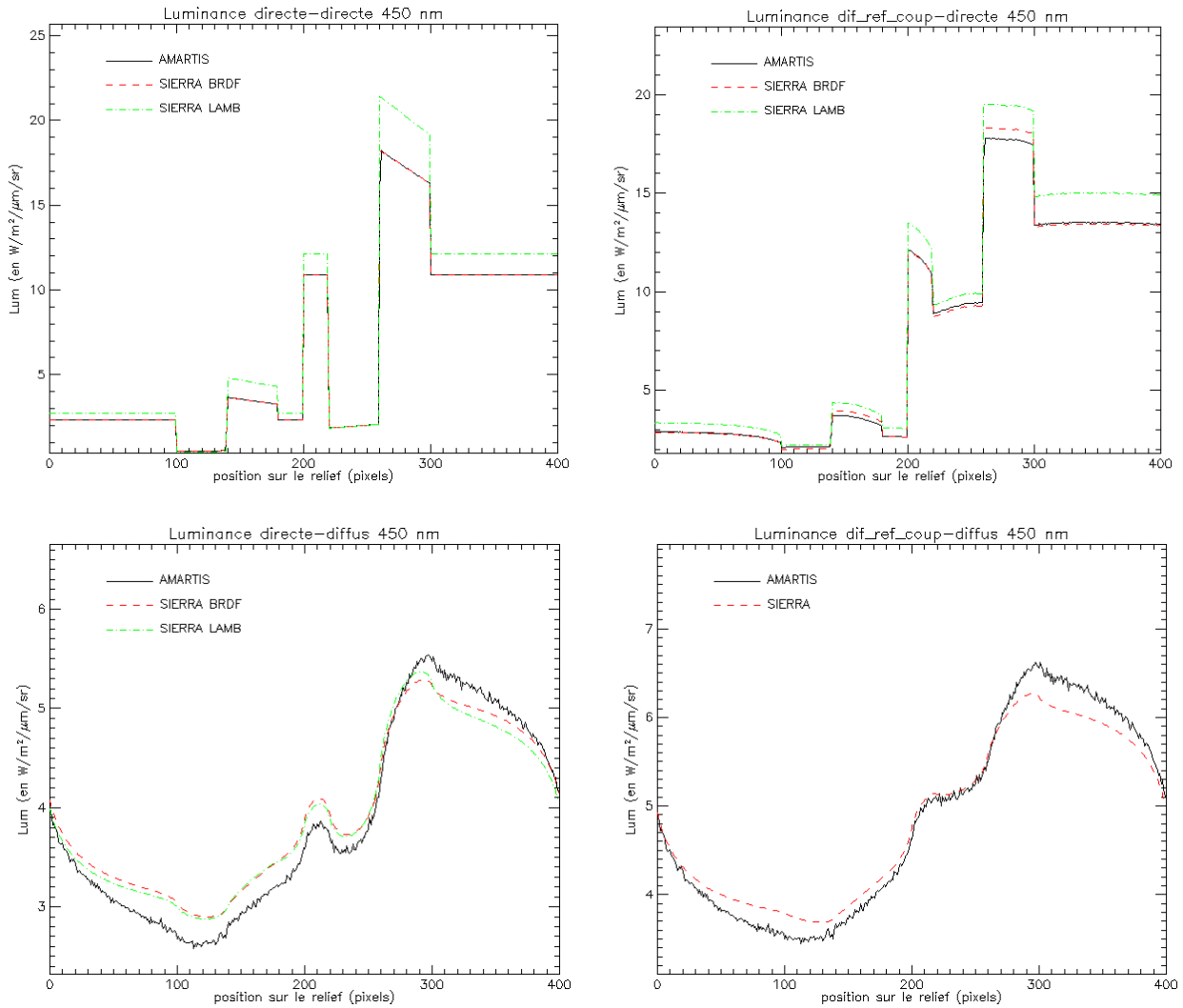


Figure 111: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 450 nm, scène 3.

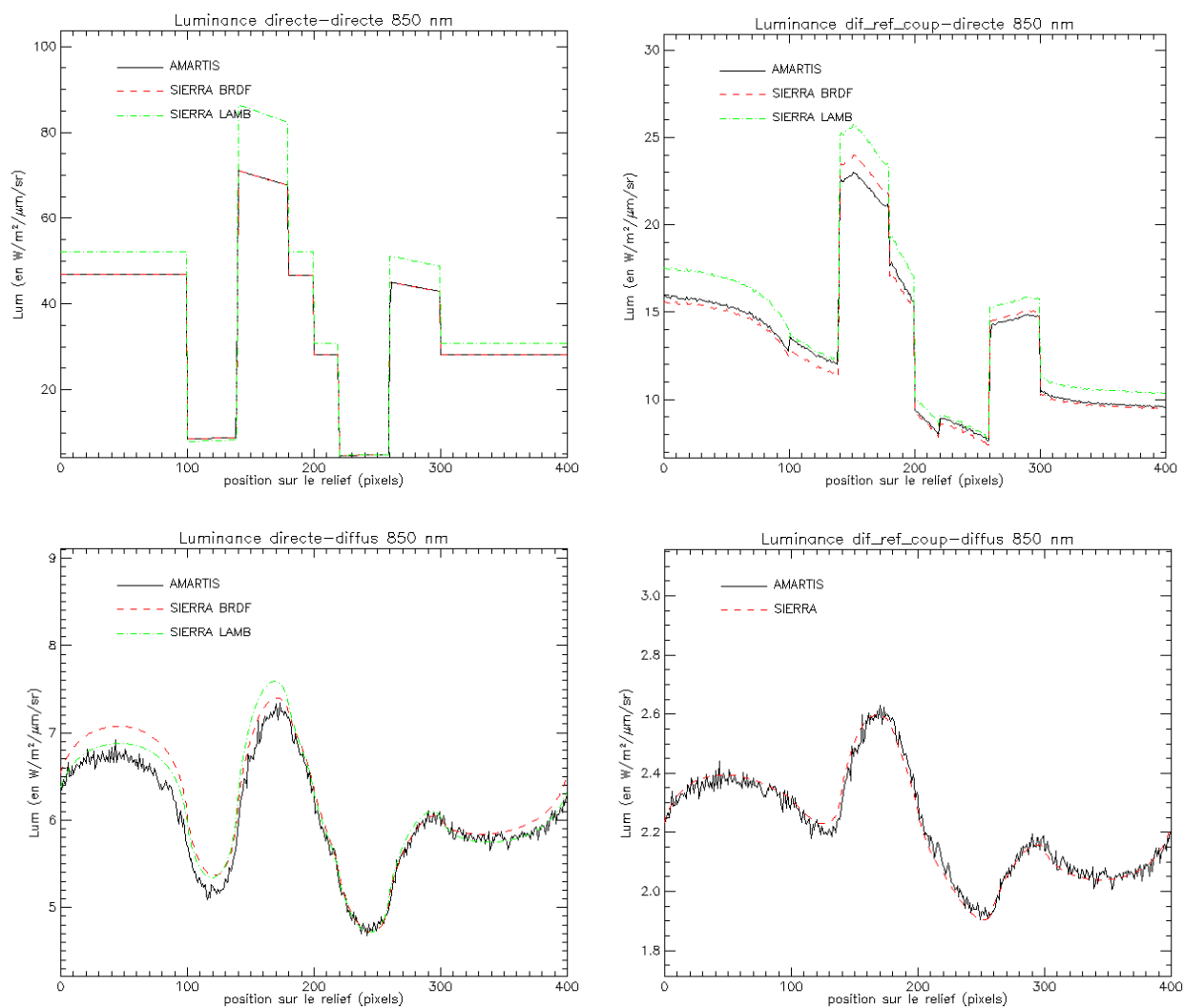


Figure 112: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 850 nm, scène 3.

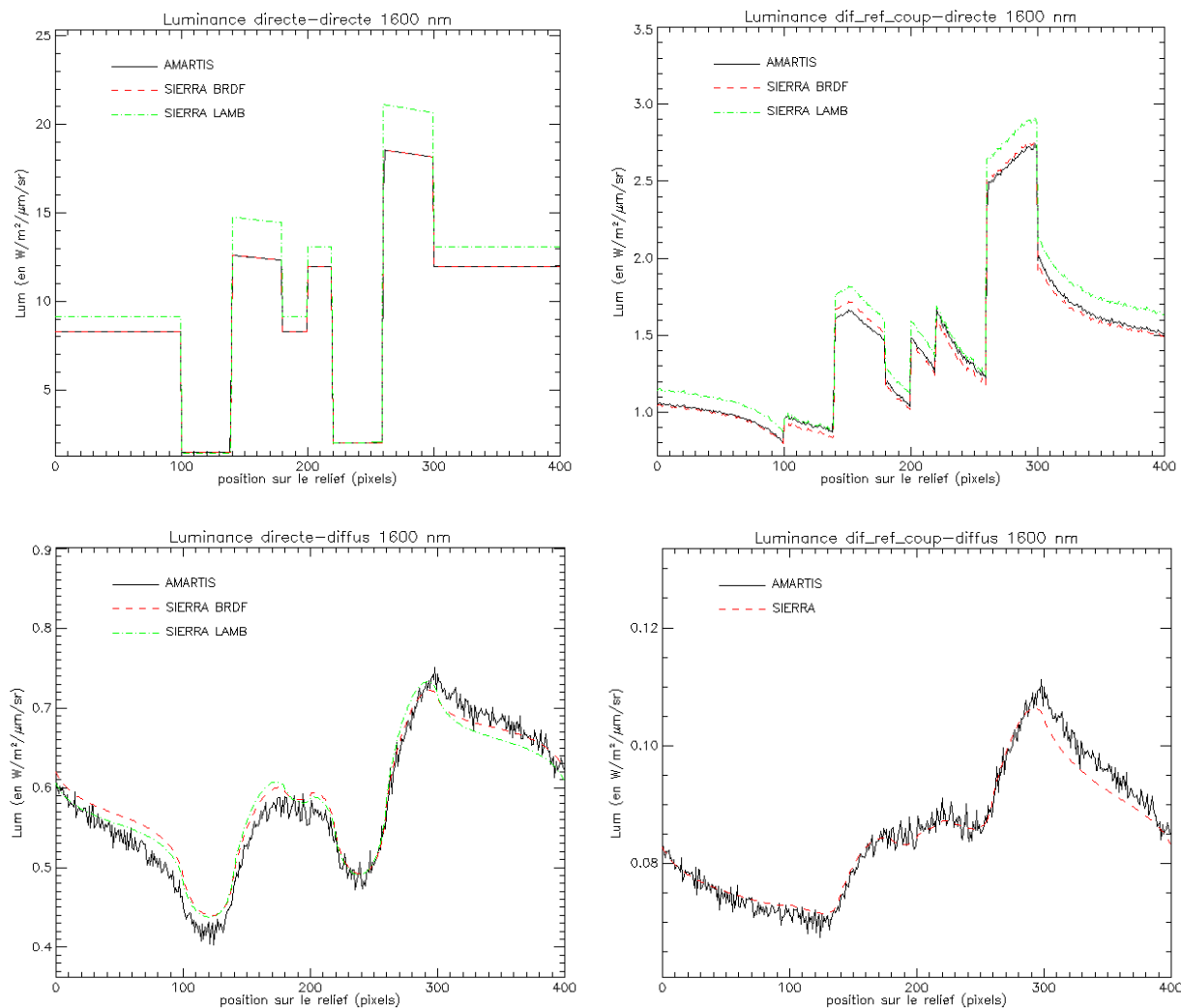


Figure 113: Prise en compte des effets bidirectionnels de la réflectance pour le calcul de la luminance à 1600 nm, scène 3.

1.4. Inversion de spectres de luminances simulés par MODTRAN4

Dans les deux scénarios présentés, la luminance spectrale issue d'un pixel situé dans un environnement homogène est simulée en entrée capteur dans le domaine réflectif par le code MODTRAN4, puis intégrée sur des canaux de type HYMAP. La réflectance est ensuite restituée par le code SIERRA, après estimation du contenu en vapeur d'eau. L'objectif principal de ces simulations est d'évaluer en fonction du contenu en vapeur d'eau estimé, l'impact dans les bandes d'absorption, de l'approche utilisée dans SIERRA qui consiste à multiplier les transmissions descendantes et montantes sur les trajets diffus-direct, direct-diffus, et diffus-diffus. D'autre part, ces simulations permettent également d'estimer l'erreur engendrée sur la réflectance par la méthode de calcul de l'éclairement diffus dans SIERRA.

L'angle zénithal d'incidence solaire est de 60° et l'angle zénithal de visée est de 50° . Le capteur est situé dans le plan principal, en diffusion avant, à une altitude de 90 km. L'atmosphère est de type tempéré été avec des aérosols de type rural. Le contenu intégré en vapeur d'eau est de $2,92 \text{ g/cm}^2$ et la visibilité atmosphérique de 23 km. La luminance en entrée capteur est calculée à partir d'une réflectance égale à 0,5 sur l'ensemble du spectre, puis à partir d'un sol composé de végétation verte. Les réflectances restituées par SIERRA sont comparées avec les réflectances initiales Figure 114.

Le contenu intégré en vapeur d'eau est estimé avec une précision de 2% pour la réflectance constante, et de 3% dans le cas de la végétation. Dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau à $1,4 \mu\text{m}$ et $1,9 \mu\text{m}$, la luminance issue de la surface mesurée par le capteur est nulle, la réflectance de surface ne peut donc pas être estimée dans ces canaux.

L'approche de SIERRA pour estimer l'éclairement diffus induit une erreur de l'ordre de 2% sur la réflectance du sol en dehors des bandes d'absorption de la vapeur d'eau, et pour les deux types de sol étudiés. Dans les bandes d'absorption, l'erreur atteint 5%.

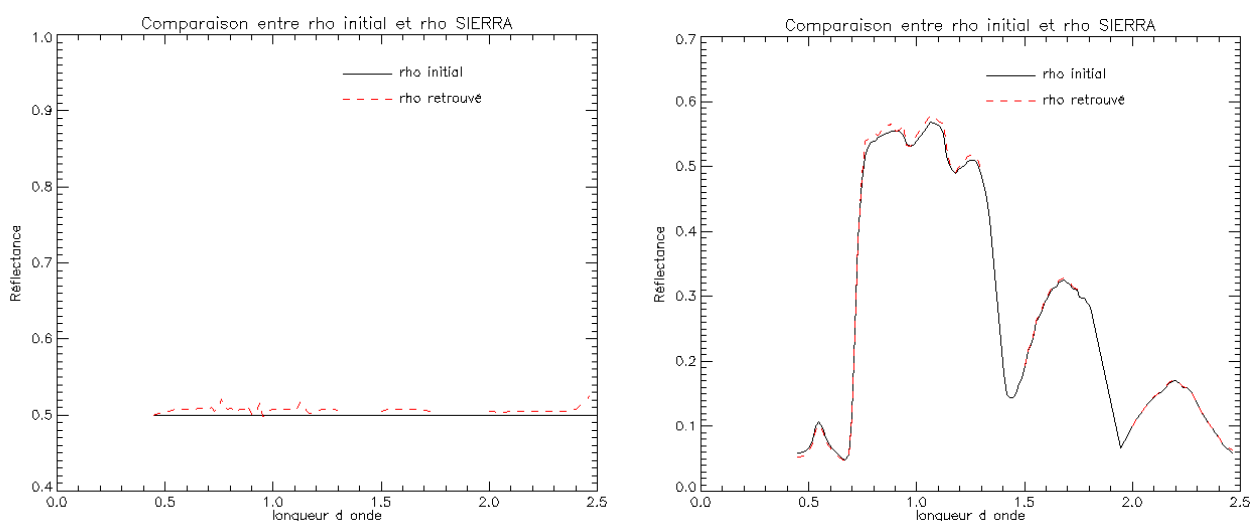


Figure 114: Inversion par SIERRA d'images simulées par COMANCHE.

2. ANNEXE 2: CAMPAGNE EN OMAN

2.1. Détermination du champ de vue du GER sur CHAMO

Les mesures de réflectance bidirectionnelles sont réalisées en deux temps, avec une mesure au soleil, et une mesure où l'on coupe l'éclairement direct incident avec un panneau d'ombre. Celui-ci doit recouvrir entièrement la zone visée par le GER et doit être identique pour chaque mesure obtenue dans un plan azimutal (l'ombre portée doit être la même pour une émergence de 0° et une émergence de 80°). Dans le cas d'un sol parfaitement plat, le GER se trouve à 2,05 m du sol en visée nadir. Dans ces conditions la tâche au sol, de forme ellipsoïdale est de 10 cm dans l'axe du plan de mesure et de 6 cm dans l'axe perpendiculaire. Pour une incidence de 60° , le grand axe de la tâche au sol a doublé par rapport au nadir et sa taille diverge ensuite pour de plus grands angles (Figure 116).

Un de nos objectifs était d'obtenir des mesures pour de forts angles d'incidence. On a donc choisi de prendre un panneau d'ombre capable de recouvrir le champ de vue du GER pour une émergence de 80° . Afin de limiter la taille du panneau, les mesures sont réalisées par demi-plan azimutal. La taille du champ de vue du GER en fonction de l'angle de visée pour un demi-plan azimutal est représenté Figure 116. Ces abaques tiennent compte de la hauteur du centre de rotation du bras de CHAMO par rapport au sol; des écarts de 5 cm et 10 cm sont ainsi considérés. Les calculs sont également effectués en considérant une pente au sol de 1° , pour deux inclinaisons différentes dans le demi-plan azimutal de visée (Figure 115). La pente + est ascendante alors que la pente - est descendante.

Un panneau d'un mètre de large a ainsi été réalisé pour tenir compte de ces contraintes.

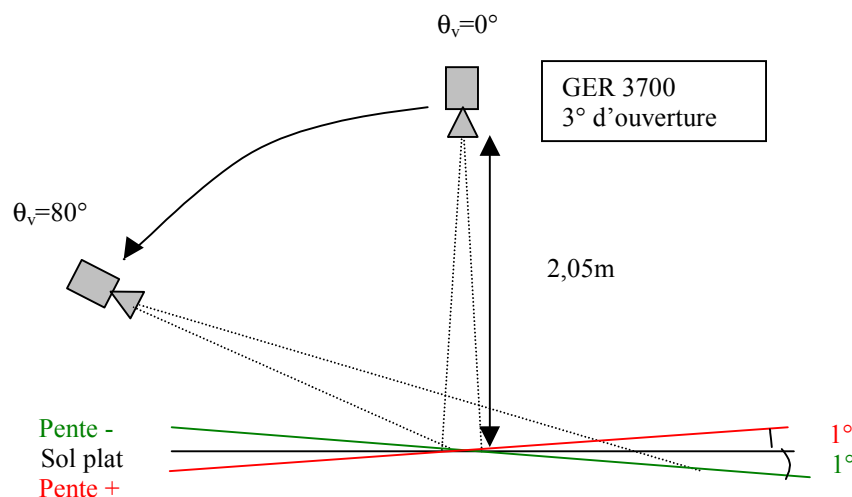


Figure 115: Schéma de prise de vue considéré pour calculer le champ de vue du GER en fonction de l'angle de visée et de la pente au sol

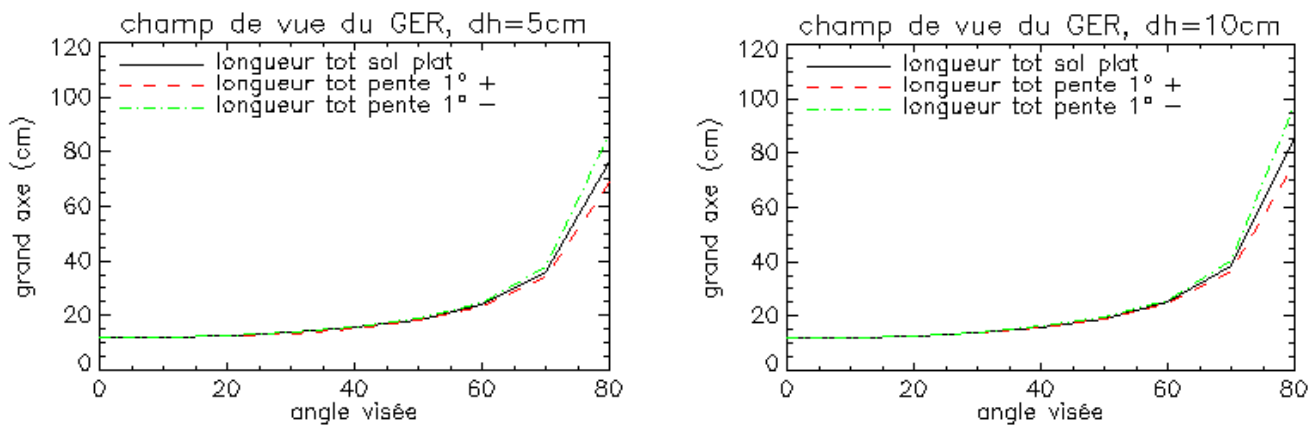


Figure 116: Champ de vue du GER positionné sur CHAMO, en fonction de l'angle zénithal de visée, pour un demi plan azimuthal.

2.2. Mesures de la luminance réfléchiée par le sol, de l'éclairement incident et de la transmission atmosphérique descendante.

Les mesures de transmission atmosphérique et d'épaisseur optique étaient couplées dans la plupart des cas. Ces mesures étaient réalisées au début et à la fin de chaque acquisition de luminances afin de caractériser au mieux les aérosols atmosphériques (type d'aérosol et visibilité) présents au moment des mesures.

Les mesures de transmission sont effectuées à l'aide d'un GER 3700, d'un spectralon et d'un panneau d'ombre de faible superficie (30 cm de longueur et 20 cm de largeur), afin de couper le moins possible l'éclairement diffus. Le GER est placé sur un pied photométrique à environ 1,50 m du spectralon disposé sur le sol. La mesure est obtenue en deux temps en visée nadir sur le spectralon. Les comptes numériques fournis par le GER sont ensuite exprimés en luminances (en $W/m^2/\mu m/sr$) à l'aide des coefficients d'étalonnage du GER.

Les deux mesures, effectuées avec ou sans panneau d'ombre, permettent d'estimer l'éclairement direct E_{dir} :

$$E_{dir}(\lambda) = \pi \frac{(L_{tot}^{ref}(\lambda) - L_{dif}^{ref}(\lambda))}{\rho_{ref}(\lambda)} \quad (77)$$

Connaissant, l'éclairement hors atmosphère E_{toa} , on en déduit:

$$T_{dir}(\lambda, \theta_i) = \frac{E_{dir}(\lambda)}{E_{TOA} \cos(\theta_i)} \quad (78)$$

$$T_{dir}(\lambda, 0) = \exp(-\cos(\theta_i) \ln(T_{dir}(\lambda, \theta_i))) \quad (79)$$

Les mesures de luminance réfléchiée par le sol sont réalisées pour la plupart en même temps que le survol HYMAP. L'objectif de ces mesures est de valider les valeurs de luminance au sol calculées par le code SIERRA. Les mesures de luminance sont encadrées de mesures de transmission et donc d'éclairement au niveau du sol.

$$E_{dir}(\lambda) = \pi \frac{(L_{tot}^{ref}(\lambda) - L_{dif}^{ref}(\lambda))}{\rho_{ref}(\lambda)} \quad \text{et} \quad E_{tot}(\lambda) = \pi \frac{L_{tot}^{ref}(\lambda)}{\rho_{ref}(\lambda)} \quad (80)$$

Les mesures ont été effectuées sur des zones de 15 m par 15 m (soit approximativement la surface de 4 pixels HYMAP) sur du sol plat ou en pente. La zone de mesures est localisée à l'aide de bâches bleues de taille conséquente afin d'être visibles sur les images HYMAP. Après avoir mesuré la transmission

atmosphérique, une mesure de la luminance réfléchiée par le sol est réalisée environ tous les trois mètres, pour prendre en compte la variabilité du sol sur la zone considérée (le sol est composé surtout de péridotites, c'est essentiellement la taille des grains qui varie).

La luminance montante au niveau du sol s'écrit:

$$L_{mes}(\lambda) \approx \frac{\rho_{sol}(\lambda)E_{tot}(\lambda)}{\pi} \tag{81}$$

avec $\rho_{sol}(\lambda)$ la réflectance du sol, et $E_{tot}(\lambda)$ l'éclairement total incident.

Pour chaque séquence de mesure, on calcule la luminance moyenne sur la zone ainsi que l'écart type des variations. Les différentes acquisitions montrent une forte variabilité de la luminance réfléchiée par le sol. L'écart type sur l'ensemble du spectre est de l'ordre de 15% et 50% de la luminance moyenne, selon les séquences de mesures (Figure 117). Ces variations importantes constatées lors d'une séquence de mesure, sont notamment dues à la forme du champ de vue du GER et à la présence plus ou moins importante de poussière. La taille des grains, importante notamment sur le second site de mesures, peut engendrer de fortes variations locales de l'éclairement incident. Certaines mesures de luminance sont également acquises sur des zones comportant de la végétation rase, éparse et sèche, ou sur des roches différentes de la péridotite. Ces mesures représentent cependant une faible proportion de l'ensemble des luminances acquises.

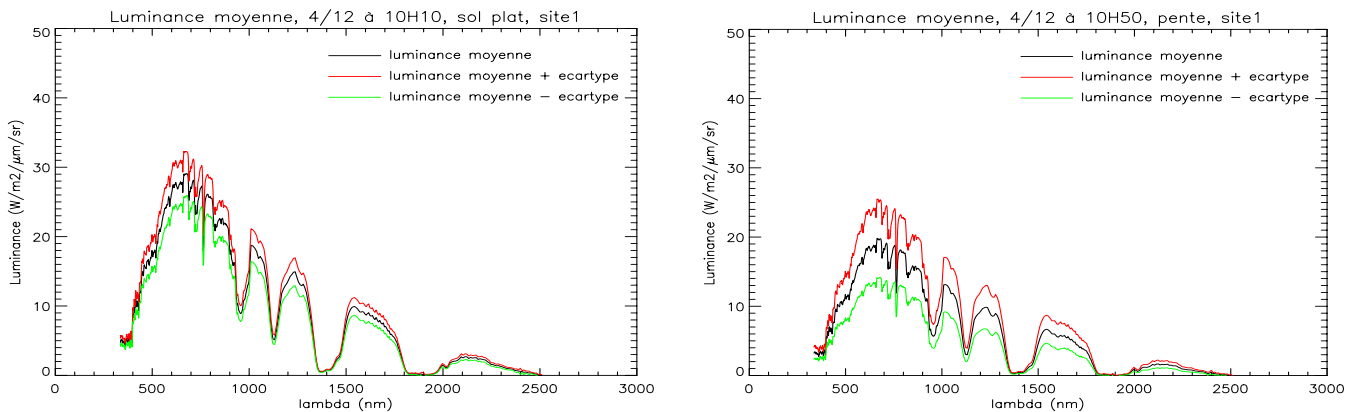


Figure 117: Exemples de valeurs moyennes et écarts types des luminances acquises le 4/12

L'objectif de ces mesures de luminances est de valider une étape intermédiaire du code SIERRA. Dans cette optique, les luminances montantes au niveau du sol sont transférées au niveau du capteur HYMAP par le code MODTRAN4. La valeur moyenne des luminances mesurées lors de la 3^{ème} séquence de mesures du 6/12, acquise sur le sol plat et à une heure proche du survol de la zone, plus ou moins l'écart-type des variations, est utilisée pour ce transfert. Le type d'aérosol et la visibilité atmosphérique sont déduits des mesures CIMEL. La luminance ainsi obtenue est représentée Figure 118, SEQARABIC et comparée avec les luminances acquises par HYMAP sur la zone de mesures. La luminance simulée en partant de la somme entre la luminance moyenne et son écart type, est celle qui se rapproche le plus des données HYMAP. Si la forme des spectres et des signatures spectrales sont en bon accord, les différences entre les spectres HYMAP

et les spectres simulés sont significatives. Cet écart oscille entre 20% et 50% dans le visible selon le pixel considéré. Cette différence diminue ensuite avec la longueur d'onde.

Ces différences peuvent être en partie imputables aux incertitudes d'étalonnage des deux instruments HYMAP et GER 3700. L'étalonnage du GER 3700 dans le domaine du silicium (0,3 à 1 μm), est notamment sujet à caution vers les courtes longueurs d'onde. Si l'utilisation du GER 3700 est fiable pour des mesures relatives comme les mesures de réflectance bidirectionnelle, la précision des mesures en absolu, tel que l'éclairement incident ou la luminance montante, est plus discutable. D'autre part, les mesures GER 3700 ne sont pas acquises à la même échelle que celles de HYMAP.

Les comparaisons portant sur l'éclairement incident et la transmission atmosphérique se heurtent aux mêmes difficultés. Aussi les résultats ne sont pas exposés dans ce document.

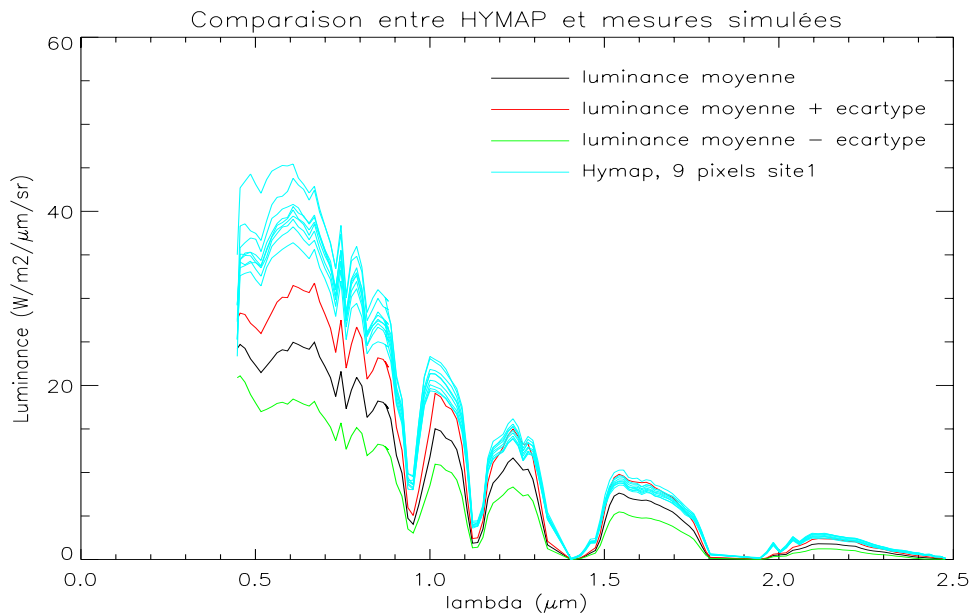


Figure 118 : Comparaison entre les mesures HYMAP et une simulation effectuée à partir des luminances mesurées au sol

2.3. Inter-étalonnage entre les deux GER

Des comparaisons ont été réalisées entre les mesures obtenues avec le GER du LPG et celles obtenues avec celui de l'ONERA. Cette étude est effectuée sur sept types de sol différents. Les mesures acquises sur chaque type de sol sont moyennées pour chaque instrument. Pour chaque cible, on calcule ensuite le rapport entre la moyenne des comptes numériques fournis par le GER du LPG, et la moyenne de ceux fournis par le GER de l'ONERA. Ce rapport, α , qui dépend de la longueur d'onde, est représenté SEQARABIC. Le rapport moyenné sur toutes les cibles y est aussi représenté avec son écart-type.

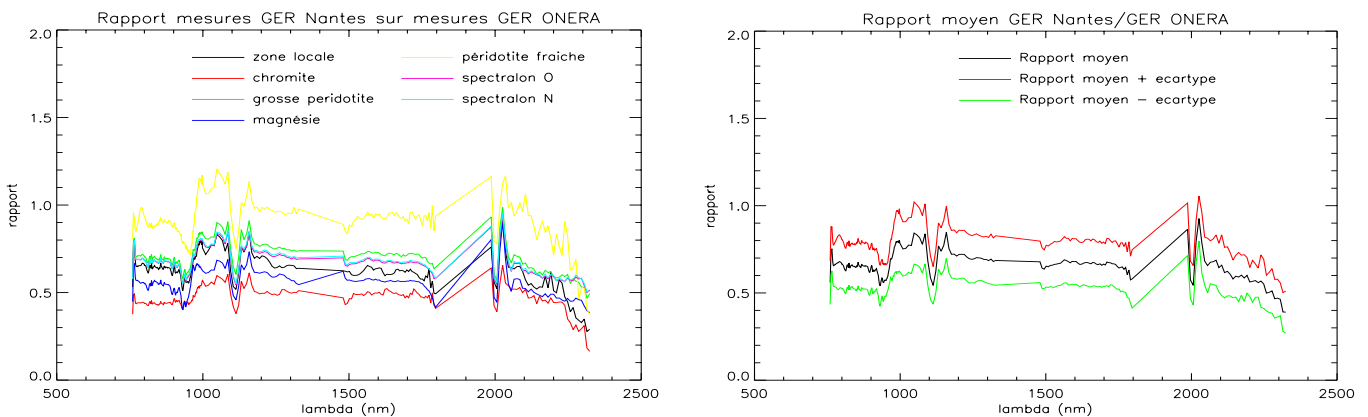


Figure 119: Comparaison entre les mesures obtenues avec les GER du LPG et de l'ONERA

Les mesures réalisées sur les deux spectralons fournissent les mêmes valeurs de α . Les spectralons étant plats et homogènes, les champs de vue différents de chaque instrument n'ont donc pas d'influence. Par contre, les mesures effectuées sur les roches montrent une forte disparité du coefficient α , qui varie entre 0,5 et 1. Ces variations sont dues à l'hétérogénéité du sol et aux différences de champ de vue entre les deux instruments.

Cet inter-étalonnage est réalisé dans l'objectif d'utiliser indifféremment les mesures de luminances fournies pendant le survol par le GER du LPG et de l'ONERA, afin de valider le calcul de la luminance au sol dans le code SIERRA. Les variations importantes observées en raison du champ de vue du GER montrent l'impossibilité d'utiliser ces mesures pour la validation, l'échantillon mesuré par le GER n'étant pas représentatif d'un pixel HYMAP. Par contre, l'ensemble des mesures obtenues avec les deux GER permet la validation de la carte géologique du massif, ce qui est un des objectifs de la mission.

2.4. Principales mesures réalisées: mesures de BRDF

Les mesures de BRDF répertoriées dans le Tableau 4 sont exposées dans ce paragraphe. Dans chaque plan de mesures, trois courbes sont présentées:

- Une courbe représentant les variations directionnelles de réflectance en trois dimension (valeur de réflectance en fonction de l'angle de visée et de la longueur d'onde).
- Une courbe représentant les variations de réflectance en fonction de l'angle de visée, pour une longueur d'onde donnée (0,76 μm).
- La réflectance spectrale mesurée au nadir.

Liste des figures:

- Figure 120: 1^{ère} mesure BRDF 3/12 (péridotites, grains moyens), plan principal
Figure 121: 1^{ère} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan décalé de 30° du plan principal
Figure 122: 1^{ère} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan perpendiculaire
Figure 123: 2^{ème} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan principal
Figure 124: 2^{ème} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan perpendiculaire
Figure 125: 1^{ère} mesure du 4/12 (même cible que mesure 1 du 3/12), plan principal
Figure 126: 1^{ère} mesure du 4/12 (même cible que mesure 1 du 3/12), plan décalé de 30° du plan principal
Figure 127: 1^{ère} mesure du 4/12 (même cible que mesure 1 du 3/12), plan perpendiculaire
Figure 128: 2^{ème} mesure du 4/12 (péridotites, gros grains), plan principal
Figure 129: 2^{ème} mesure du 4/12 (péridotites, gros grains), plan perpendiculaire
Figure 130: 1^{ère} mesure du 6/12 (péridotites, grains fins), plan principal
Figure 131: 1^{ère} mesure du 6/12 (péridotites, grains fins), plan décalé de 30° du plan principal
Figure 132: 1^{ère} mesure du 6/12 (péridotites, grains fins), plan perpendiculaire
Figure 133: 2^{ème} mesure du 6/12 (péridotites, poussière), plan principal
Figure 134: 3^{ème} mesure du 6/12 (péridotites, poussière), plan principal
Figure 135: 3^{ème} mesure du 6/12 (péridotites, poussière), plan perpendiculaire

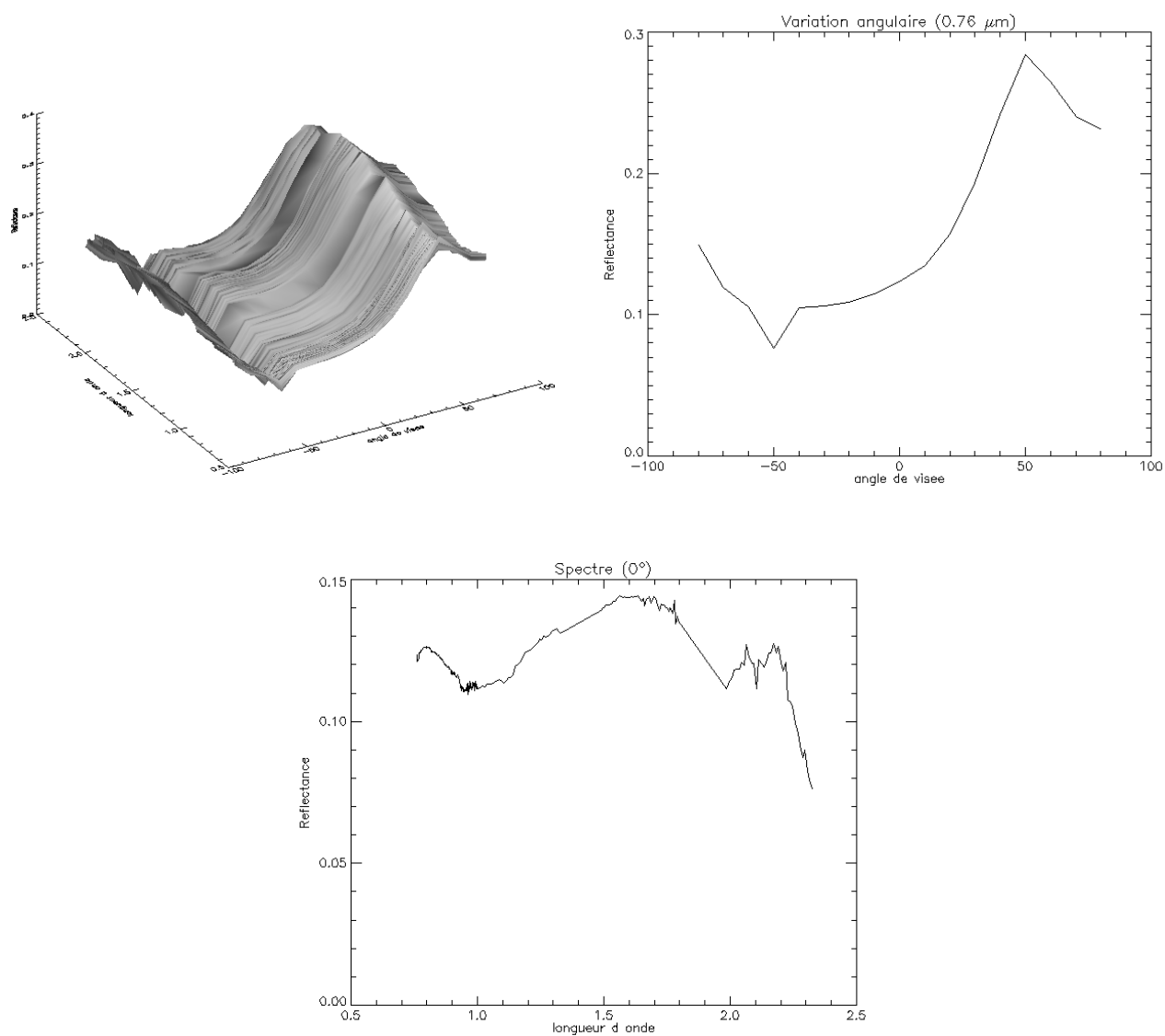


Figure 120: 1^{ère} mesure BRDF 3/12 (péridotites, grains moyens), plan principal

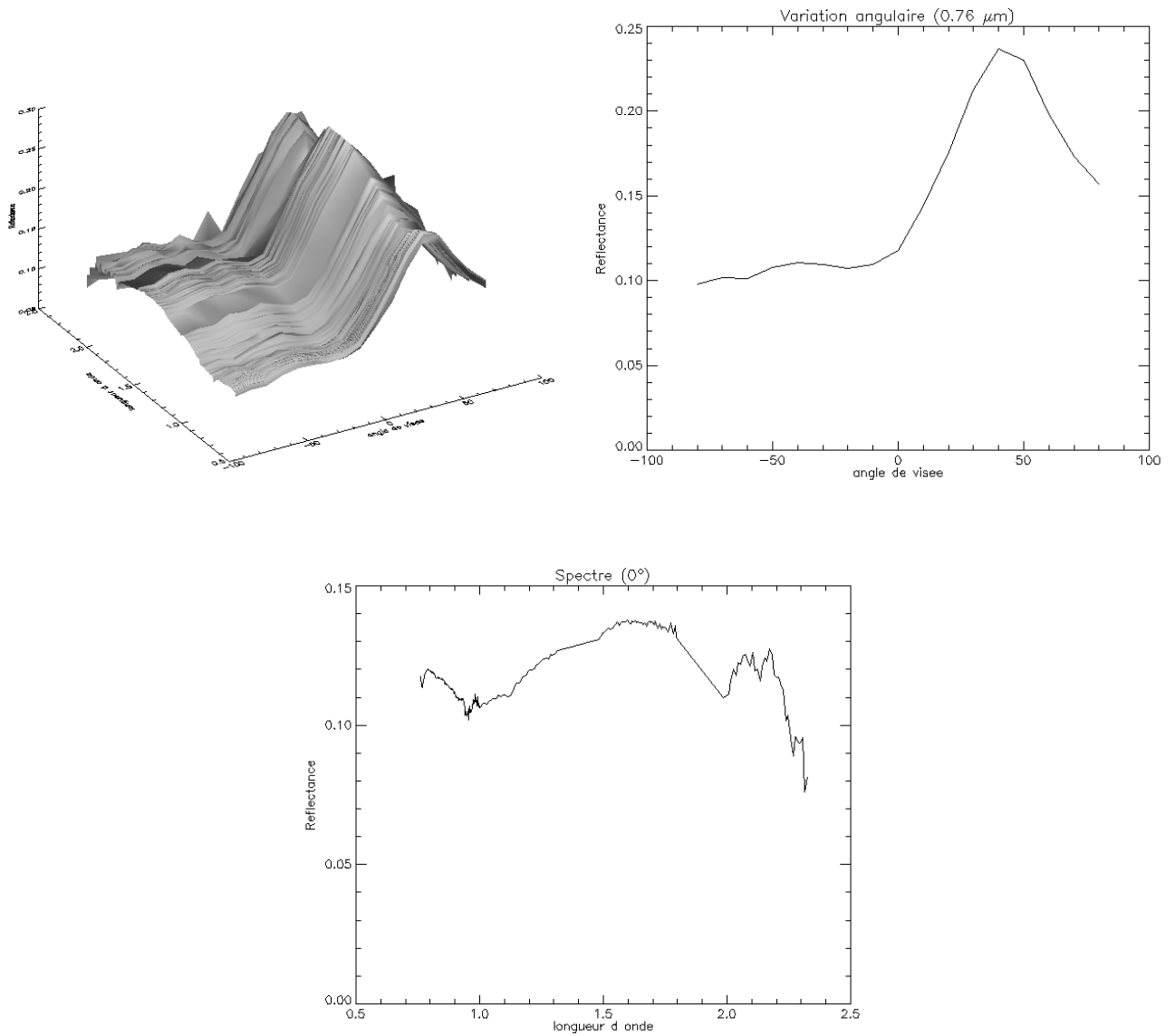


Figure 121: 1^{ère} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan décalé de 30° du plan principal

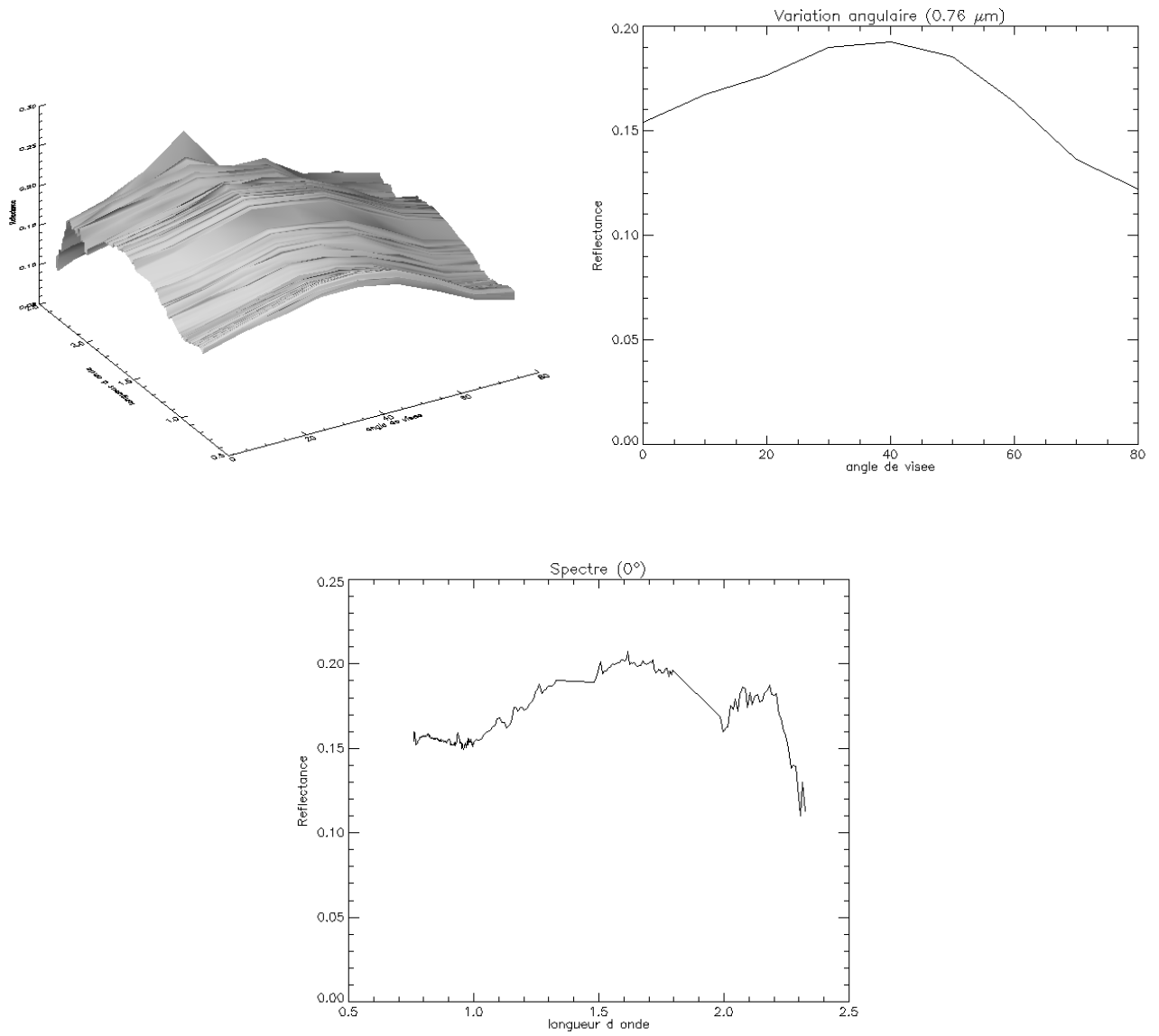


Figure 122: 1^{ère} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan perpendiculaire

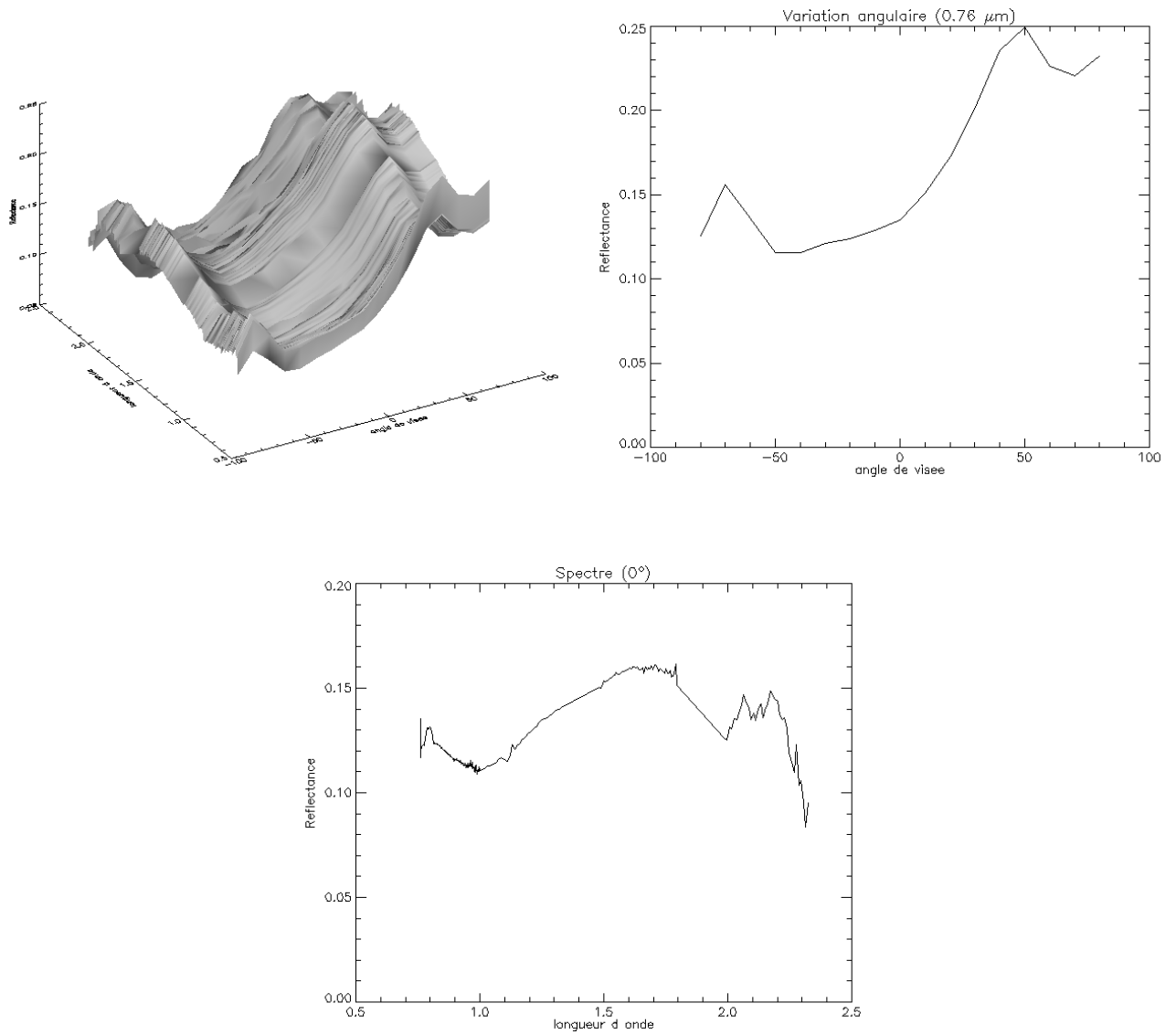


Figure 123: 2^{ème} mesure du 3/12 (péridotites, grains moyens), plan principal

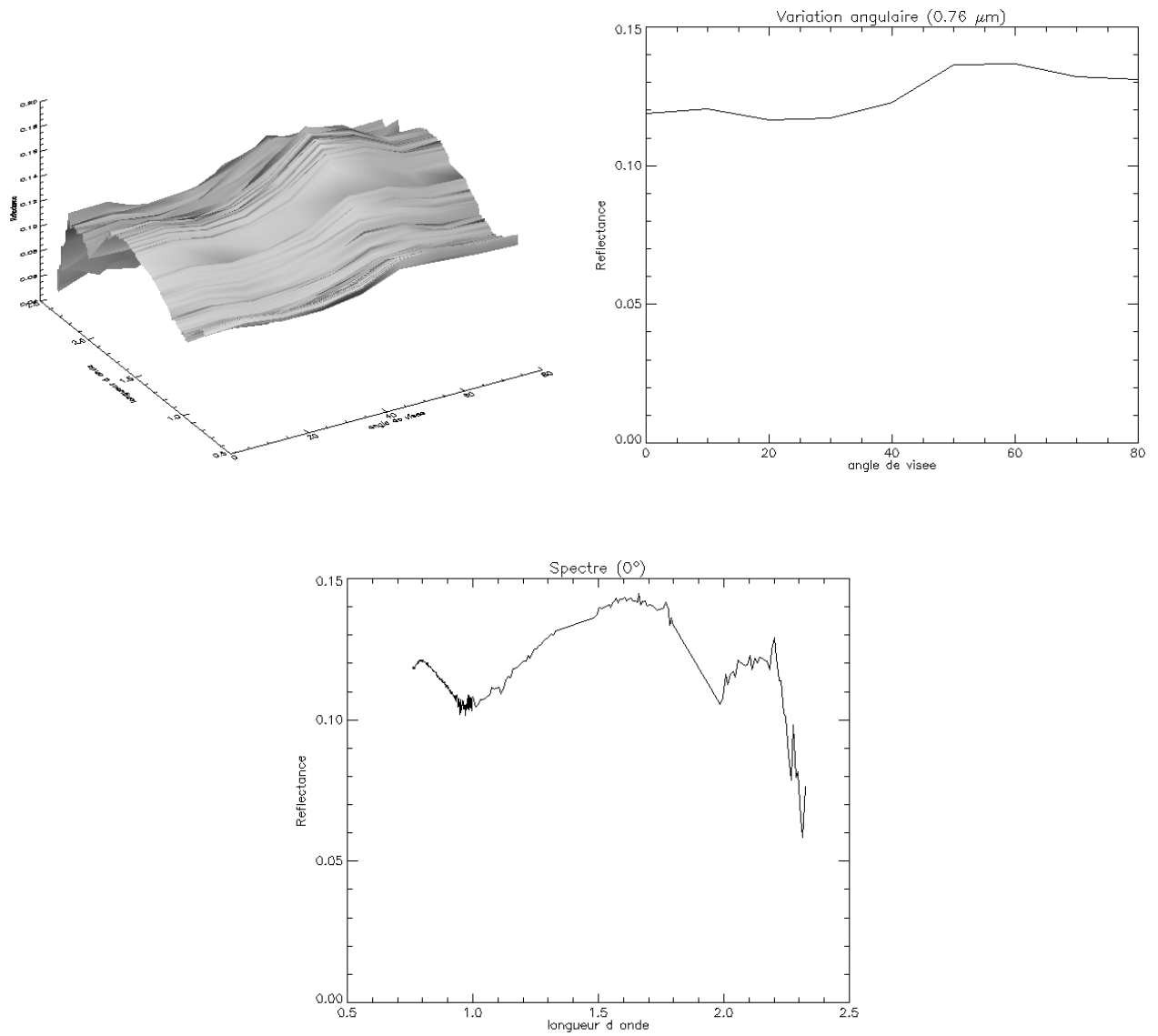


Figure 124: 2^{ème} mesure du 3/12 (peiridotites, grains moyens), plan perpendiculaire

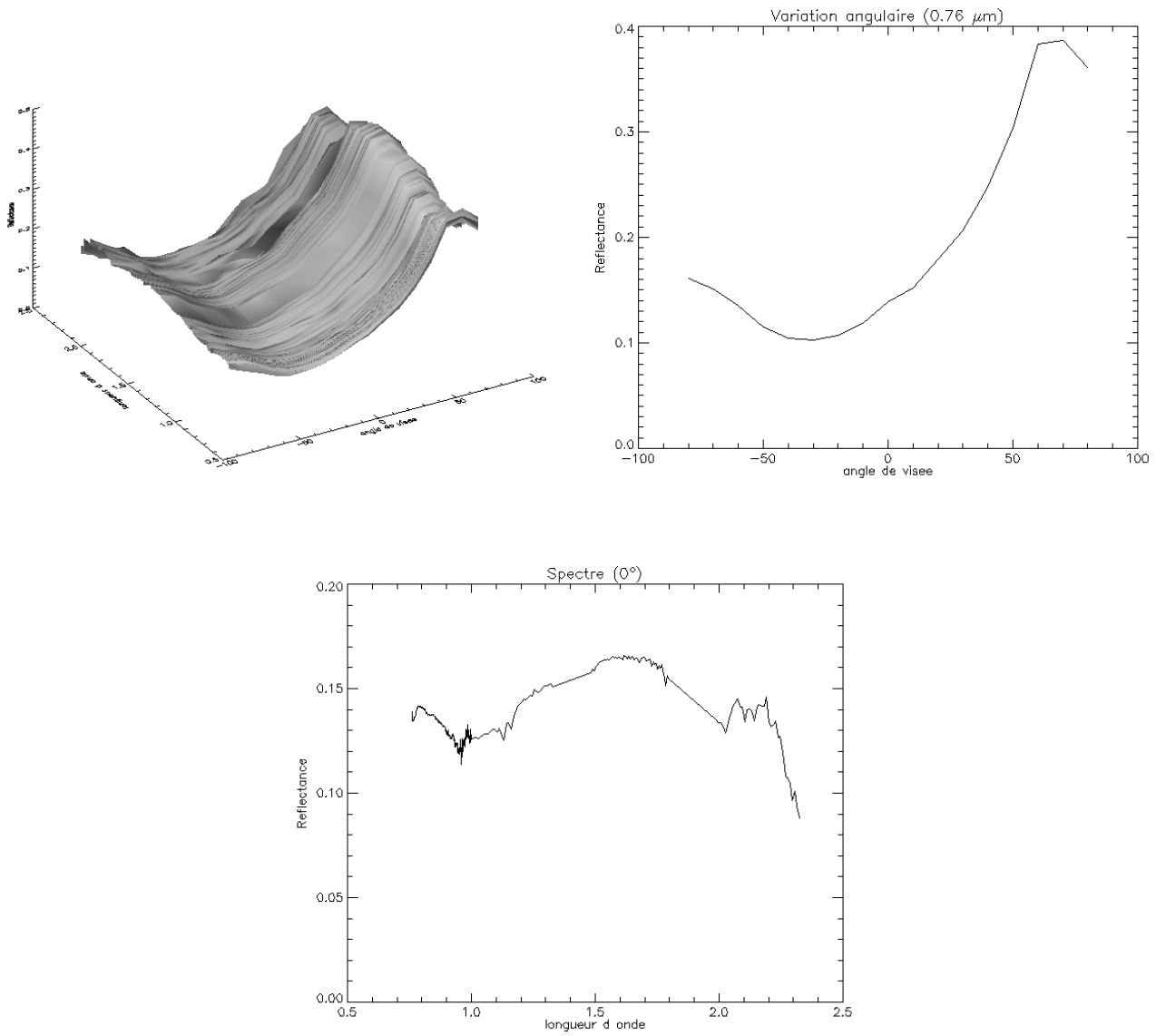


Figure 125: 1^{ère} mesure du 4/12 (même cible que mesure 1 du 3/12), plan principal

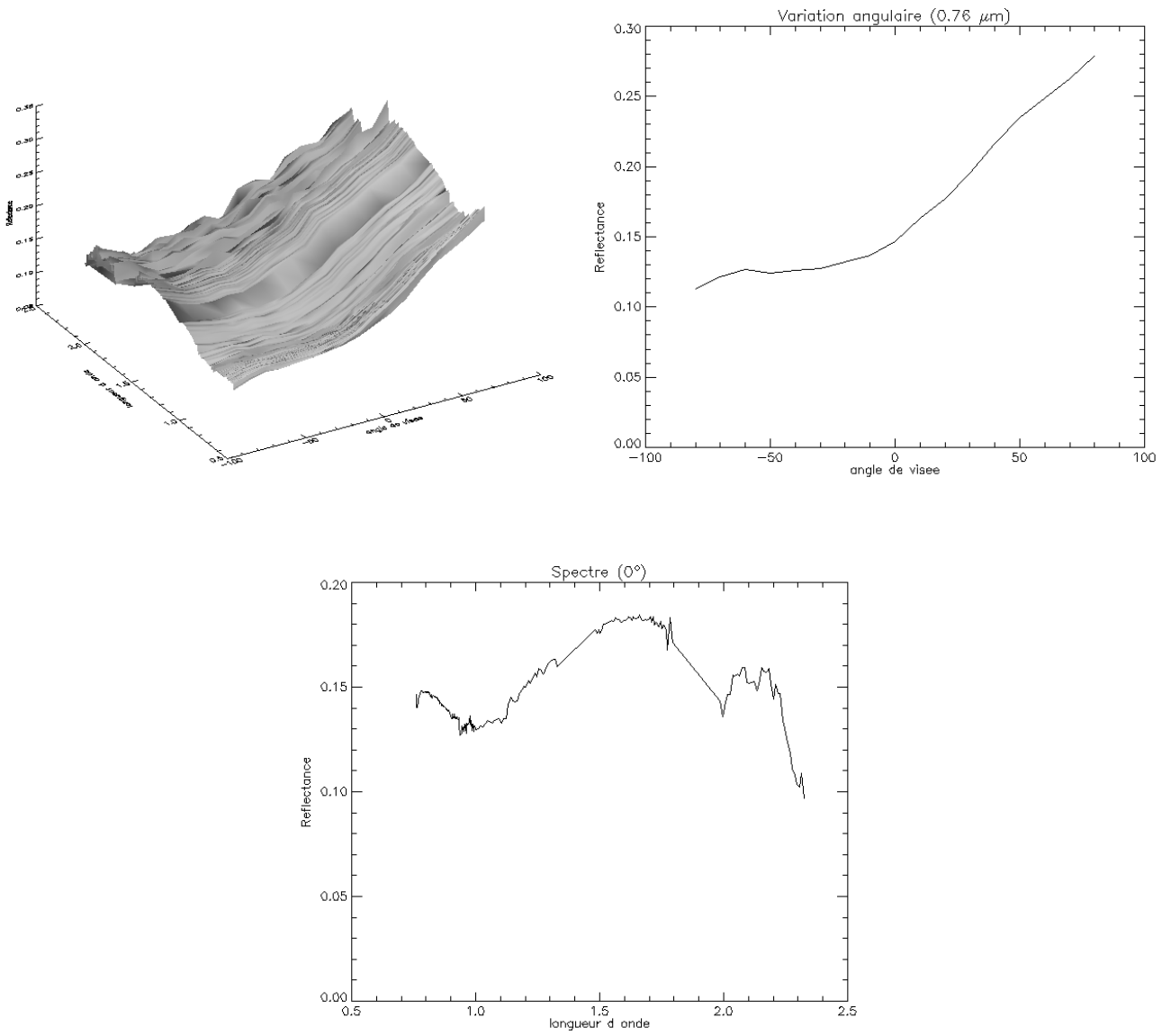


Figure 126: 1^{ère} mesure du 4/12 (même cible que mesure 1 du 3/12), plan décalé de 30° du plan principal

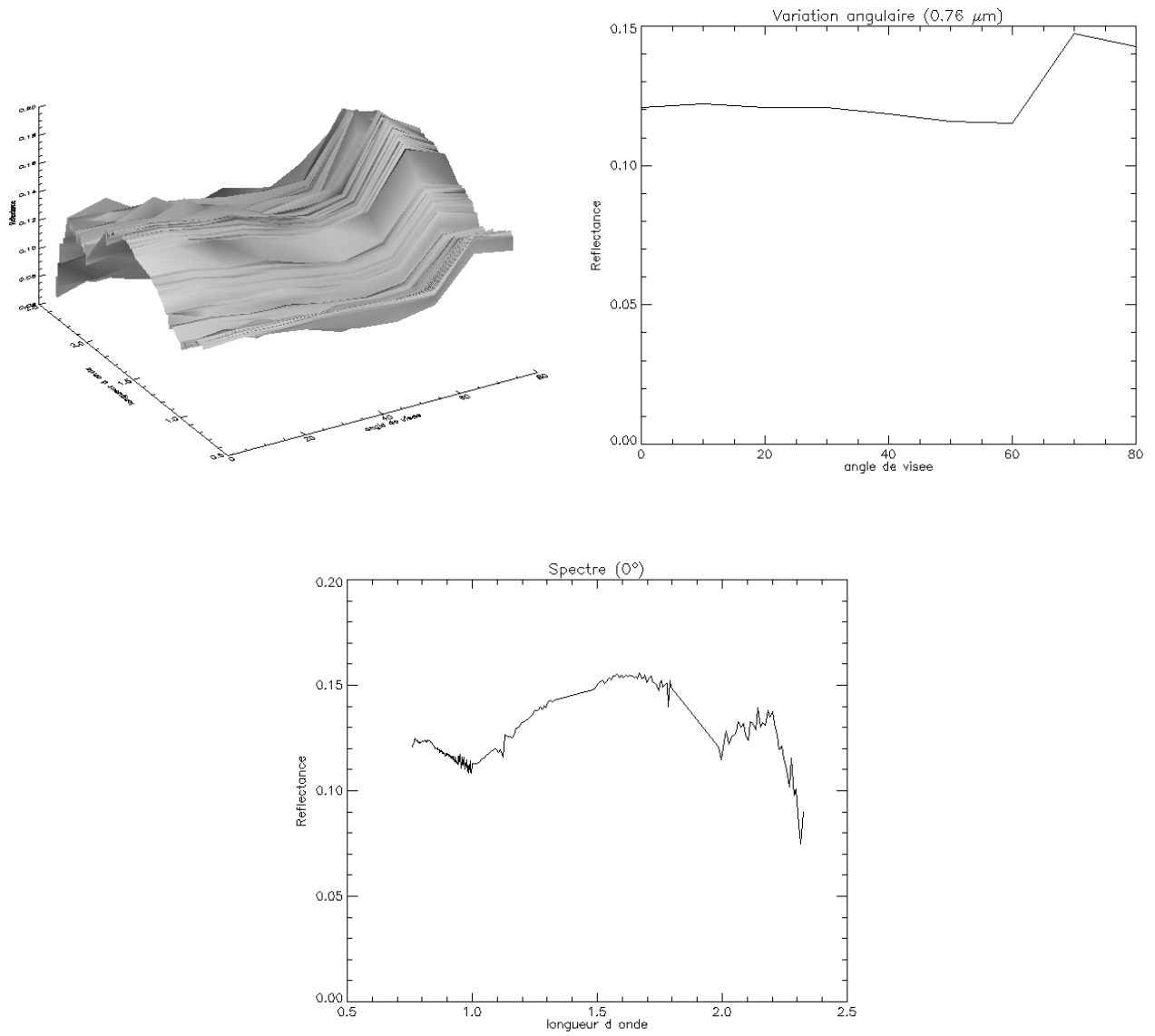


Figure 127: 1^{ère} mesure du 4/12 (même cible que mesure 1 du 3/12), plan perpendiculaire

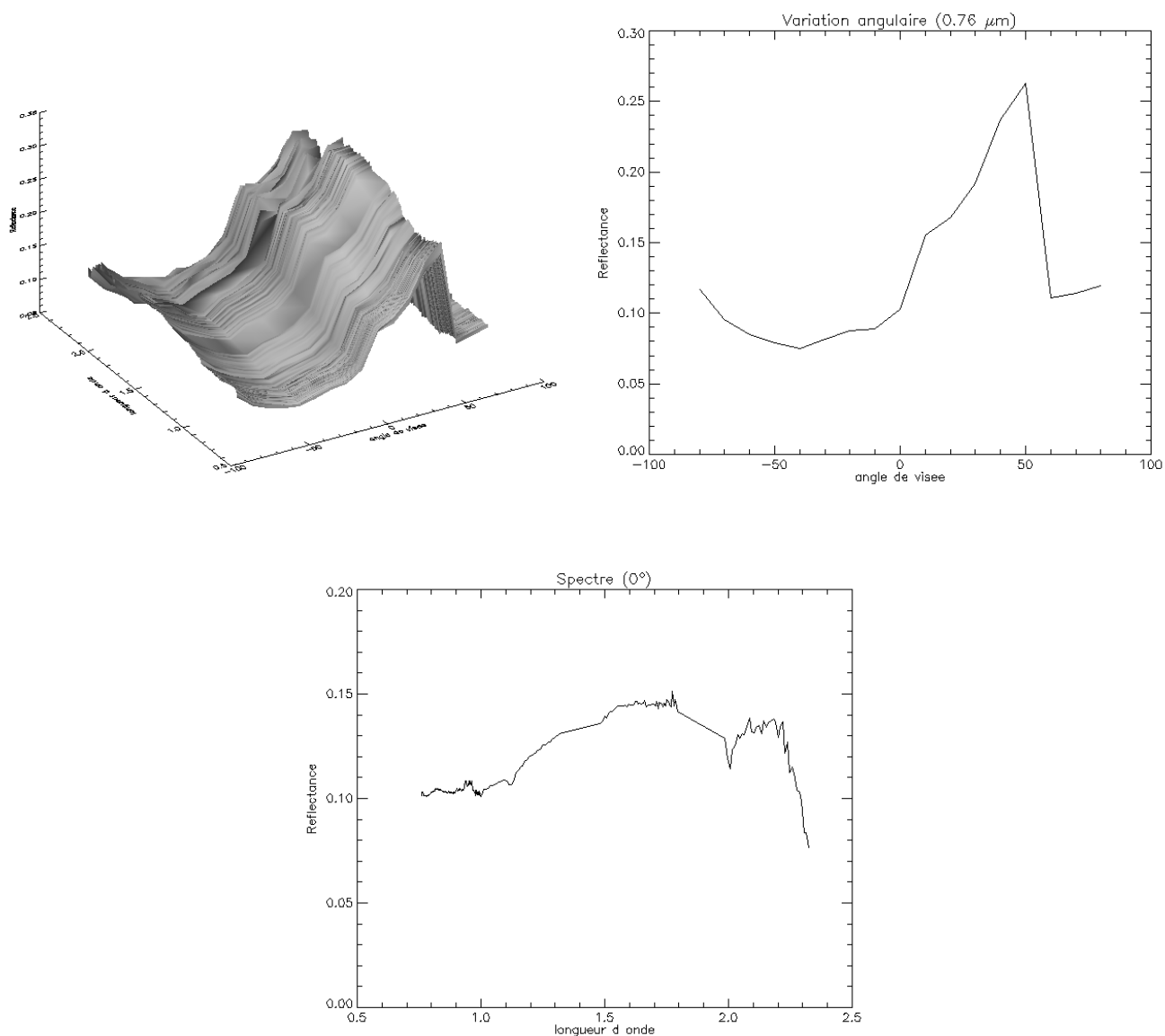


Figure 128: 2^{ème} mesure du 4/12 (péridotites, gros grains), plan principal

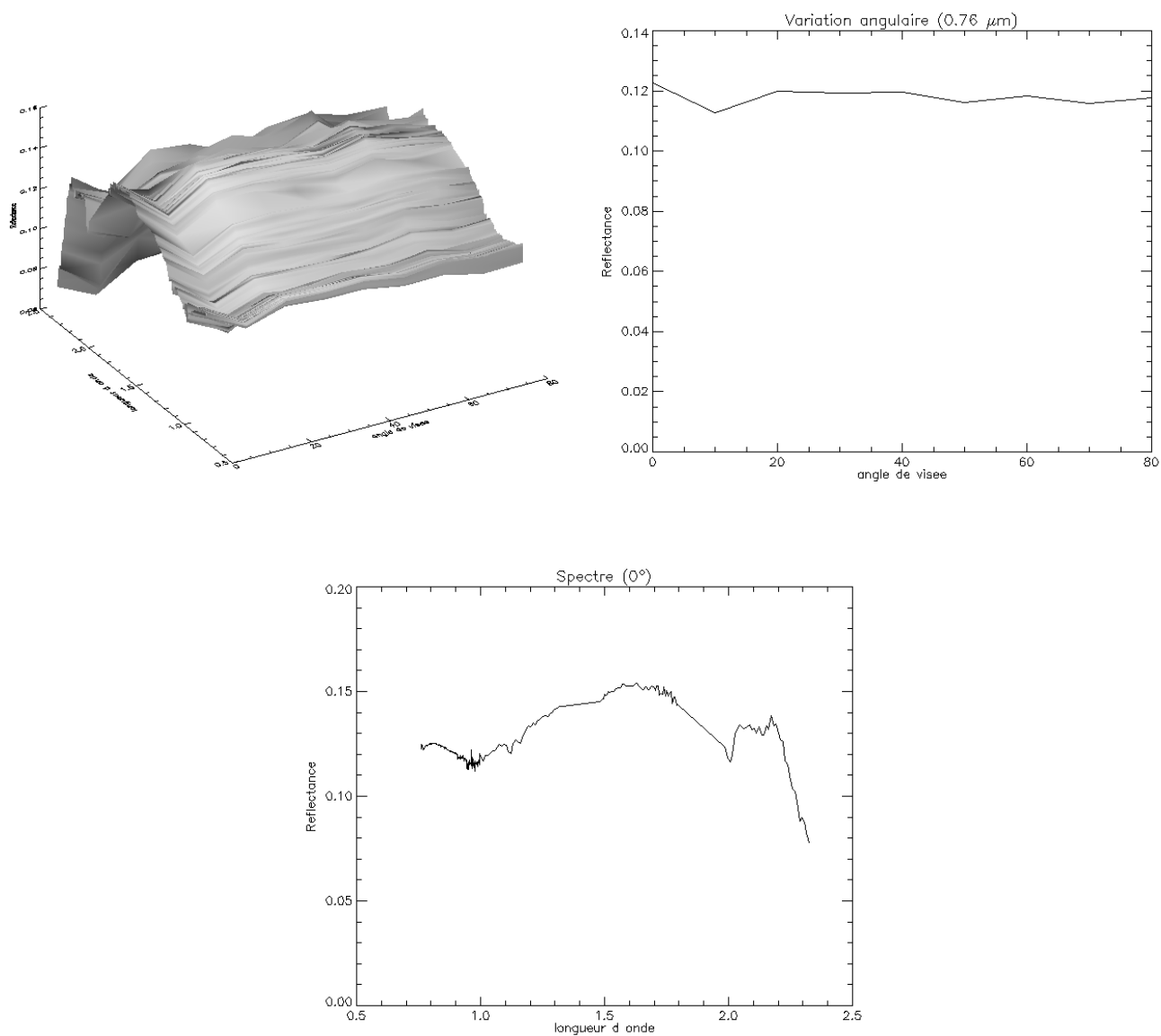


Figure 129: 2^{ème} mesure du 4/12 (péridotites, gros grains), plan perpendiculaire

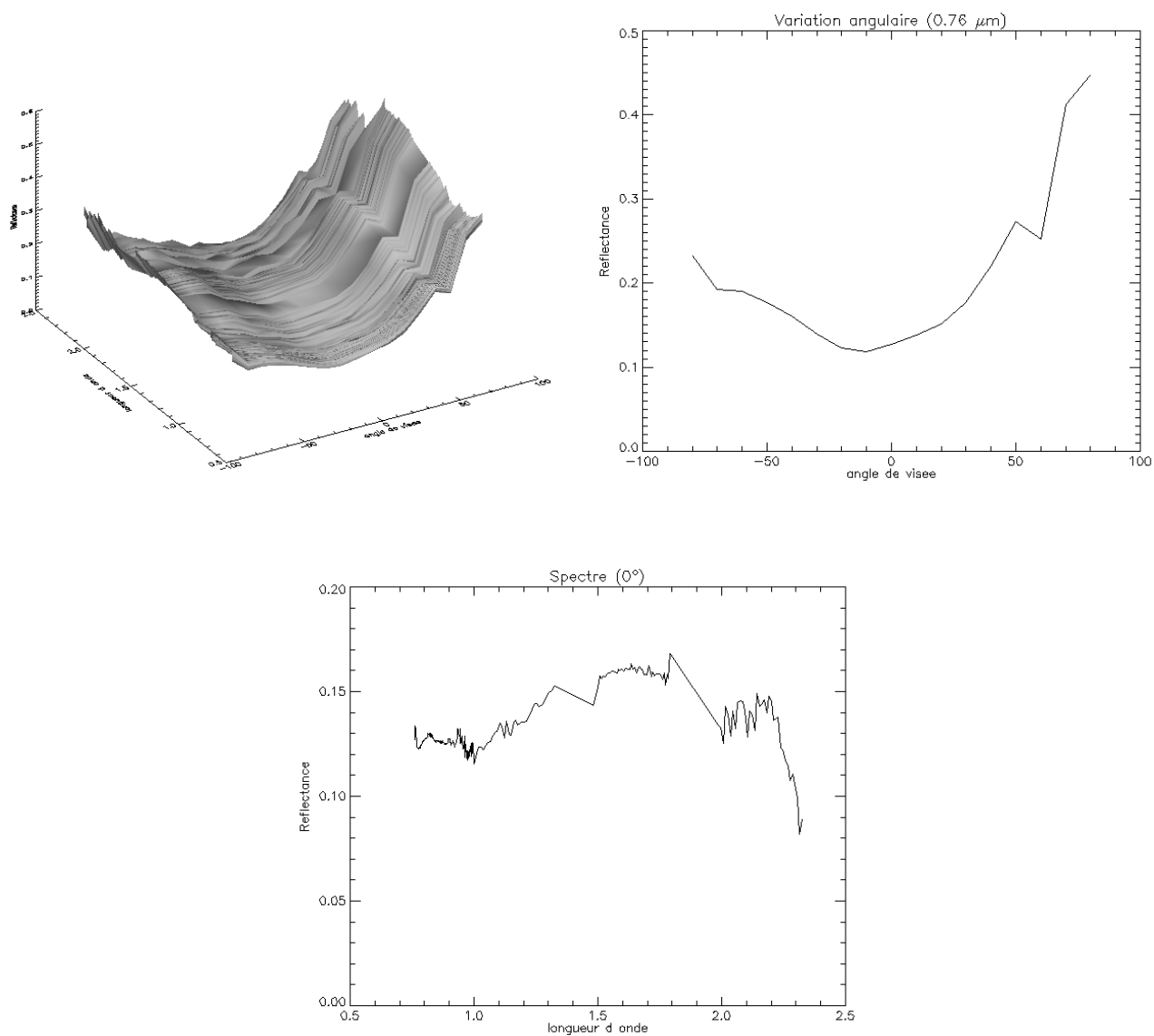


Figure 130: 1^{ère} mesure du 6/12 (péridotites, grains fins), plan principal

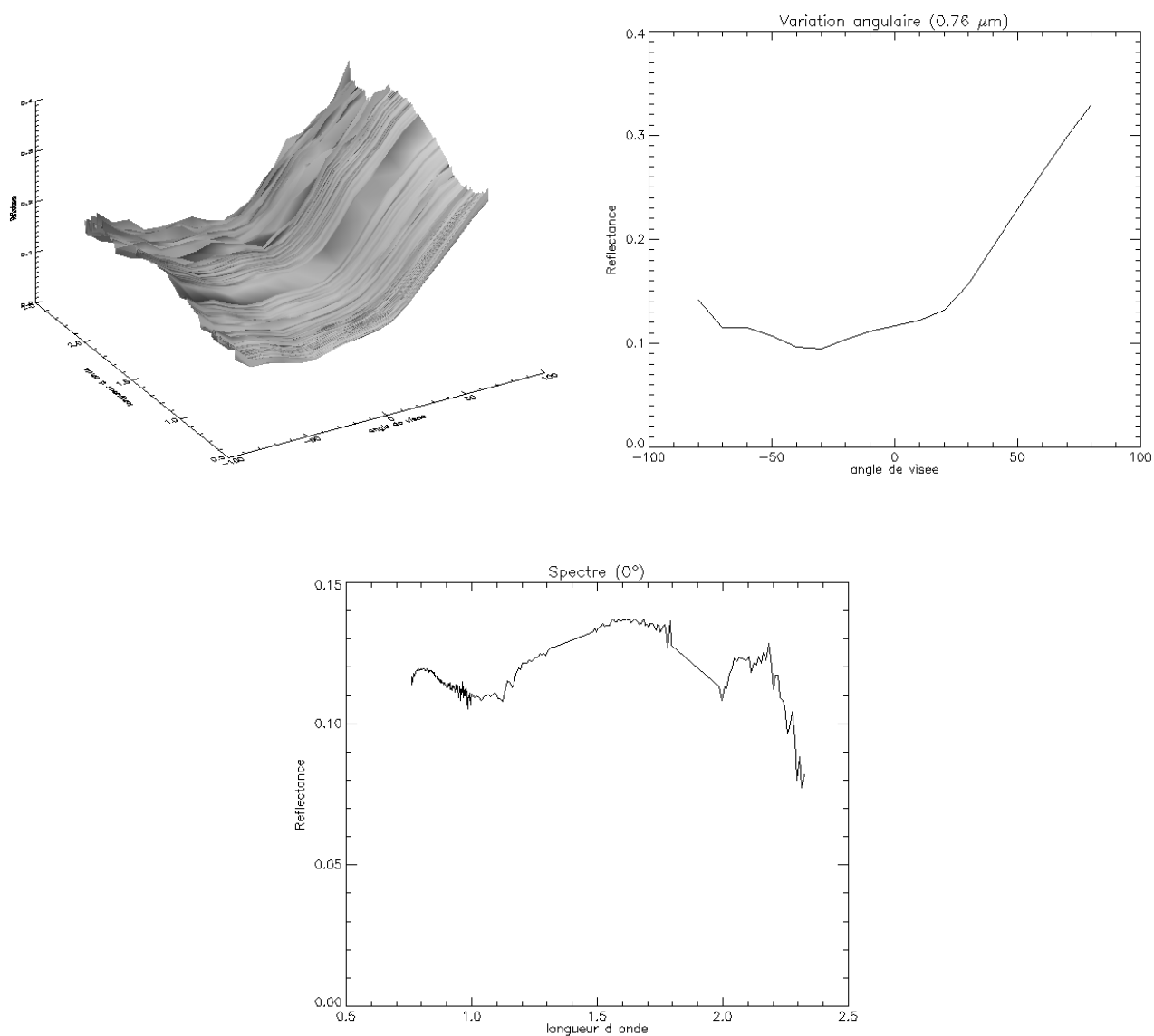


Figure 131: 1^{ère} mesure du 6/12 (péridotites, grains fins), plan décalé de 30° du plan principal

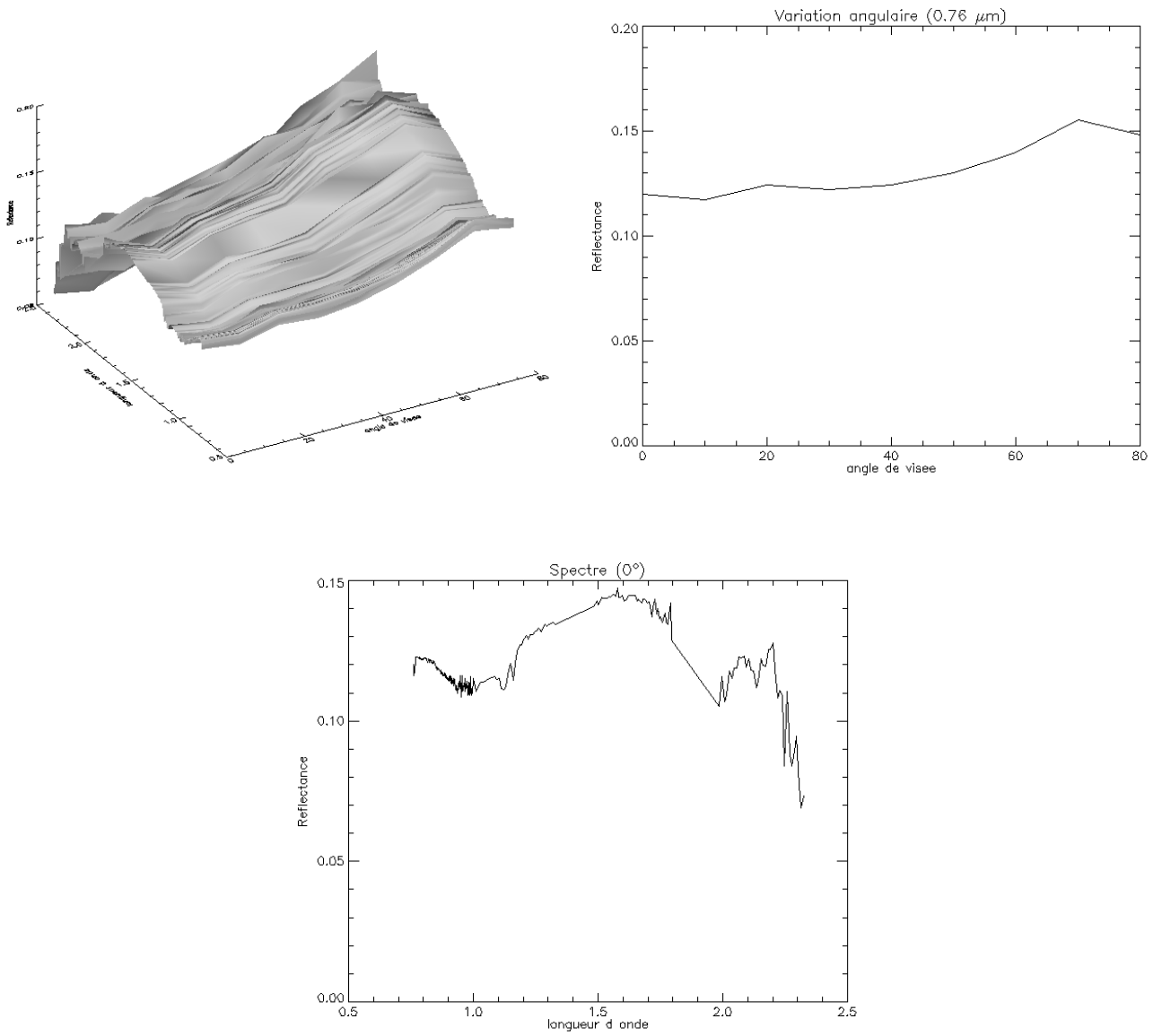


Figure 132: 1^{ère} mesure du 6/12 (péridotites, grains fins), plan perpendiculaire

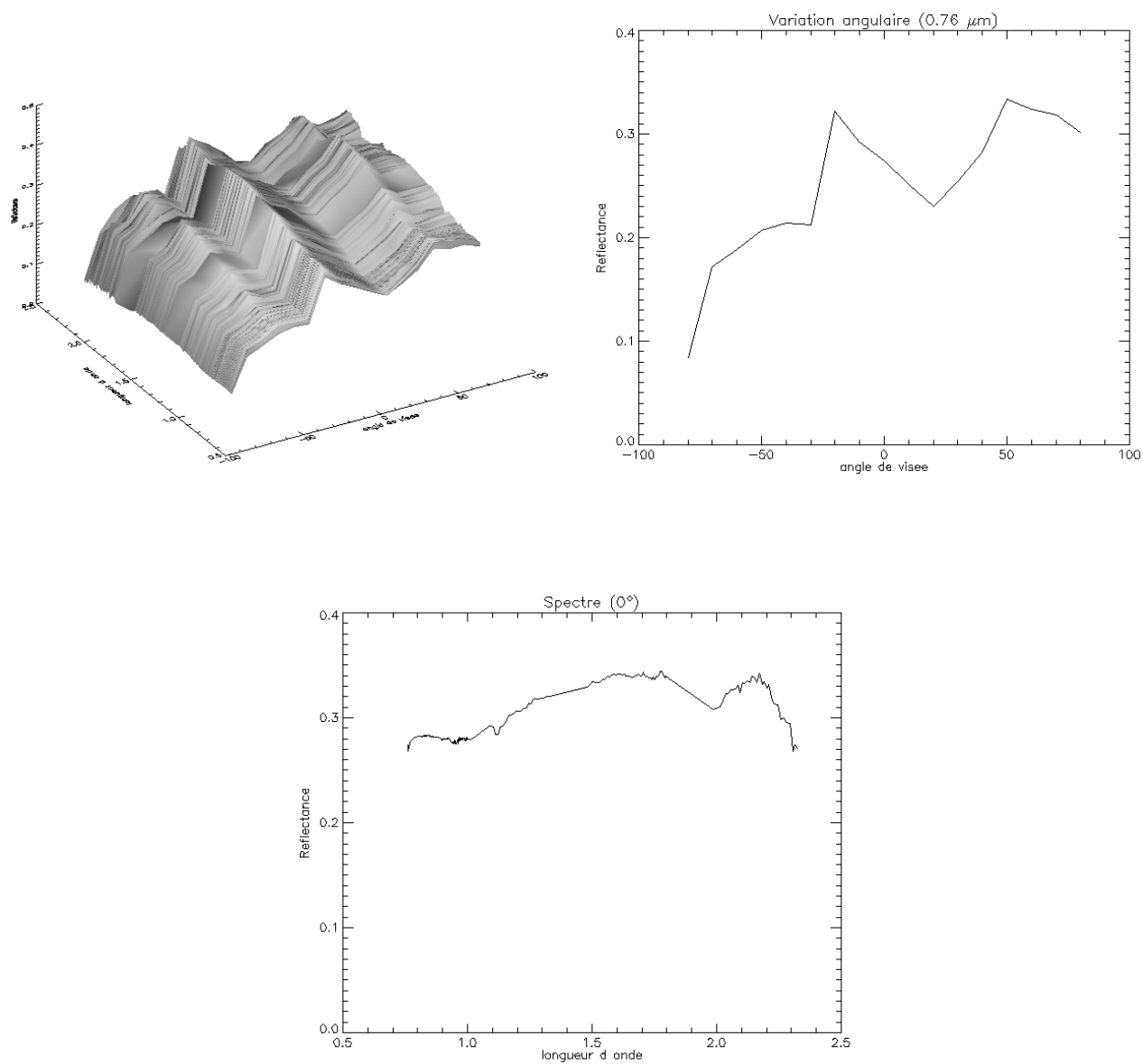


Figure 133: 2^{ème} mesure du 6/12 (péridotites, poussière), plan principal

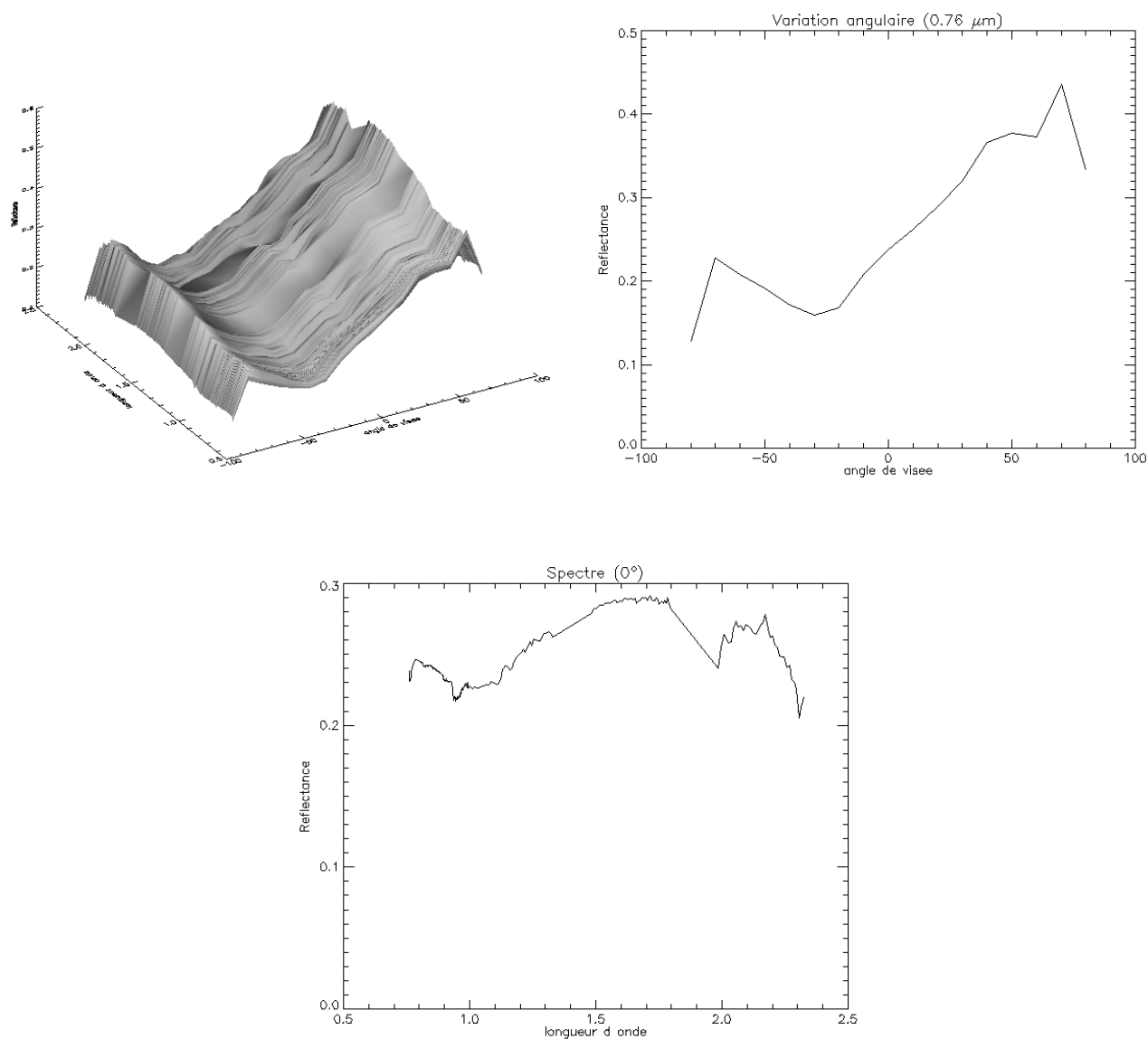


Figure 134: 3^{ème} mesure du 6/12 (péridotites, poussière), plan principal

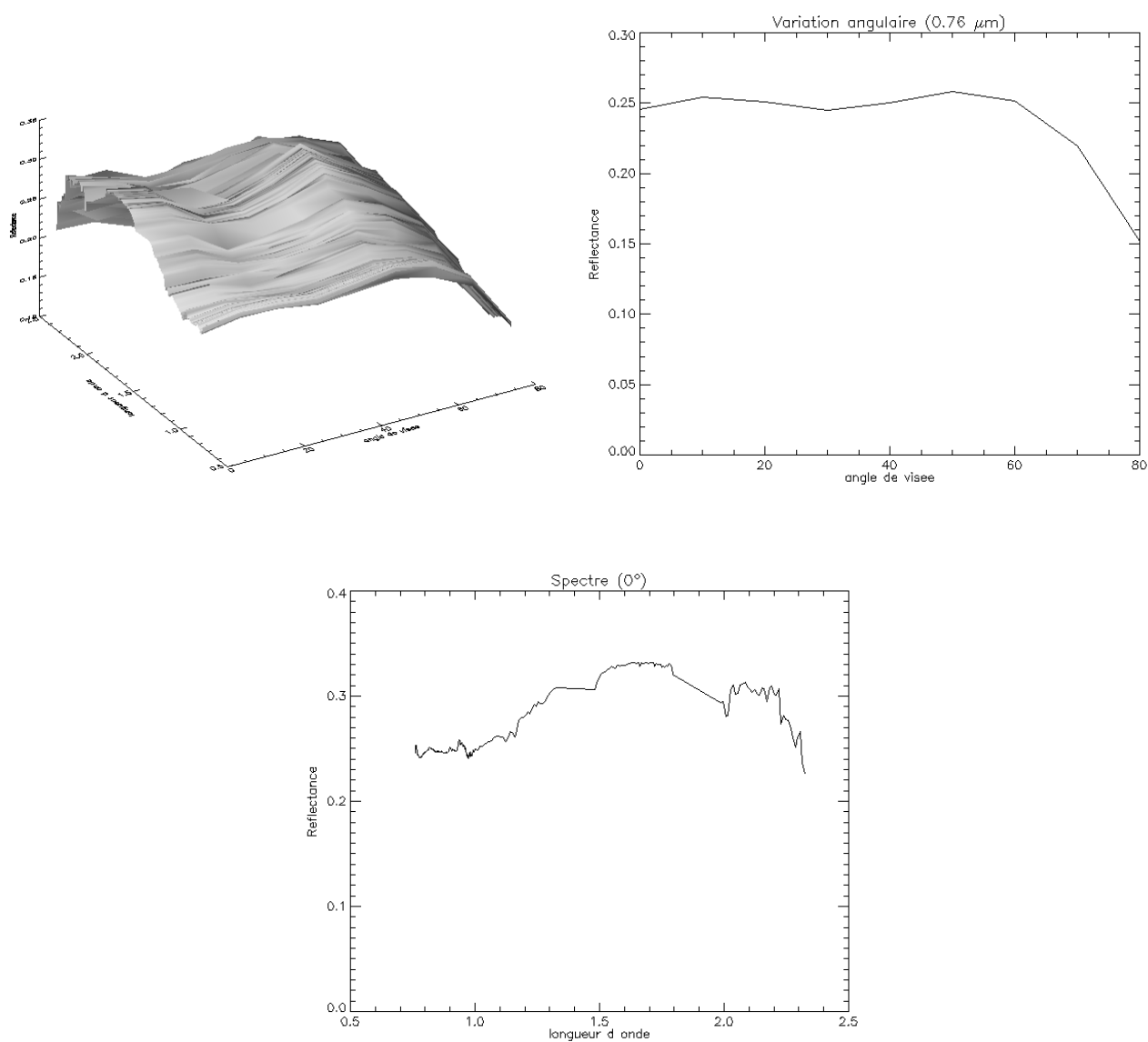


Figure 135: 3^{ème} mesure du 6/12 (péridotites, poussière), plan perpendiculaire

RESUME

L'imagerie hyperspectrale est une technique en plein essor, qui permet d'acquérir des images étalonnées en luminance, sur un grand nombre de bandes spectrales étroites et contiguës. La luminance mesurée est le résultat d'une interaction entre l'éclairement solaire, l'atmosphère, et la surface du sol. Pour appliquer une méthode de détection ou de classification du sol, il est nécessaire d'isoler au préalable les propriétés optiques de la surface, en s'affranchissant des phénomènes d'absorption et de diffusion du rayonnement. Sur une zone montagneuse, une correction supplémentaire est nécessaire pour prendre en compte les variations du rayonnement montant inhérentes au relief. Cette thèse propose une nouvelle méthode de correction atmosphérique et topographique des images hyperspectrales dans le domaine réflectif (0,4 μm à 2,5 μm). Cette méthode permet de remonter en quatre étapes successives, à une carte de réflectances indépendantes des conditions de mesures de l'image de luminances. De nouveaux modèles ont notamment été développés pour modéliser l'éclairement incident sur la scène, et la luminance diffuse montante. Une première validation effectuée par inversion d'images synthétiques, montre une bonne adéquation entre la réflectance restituée et la réflectance initiale. L'étude de sensibilité aux données d'entrée a montré que la source principale d'erreurs sur l'inversion est le Modèle Numérique de Terrain. Des imprécisions en altitude, ou sur l'orthorectification de l'image, engendrent des erreurs sur la réflectance supérieures à celles obtenues en supposant le sol plat.

La campagne de mesures réalisée au cours de cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet HYPERGEMME, dont l'un des objectifs est d'évaluer l'apport de l'imagerie hyperspectrale en géologie. Aussi, le massif montagneux de Maqsad (Oman), dont la cartographie géologique est parfaitement maîtrisée, est survolé par l'imageur hyperspectral HYMAP. Les mesures acquises au sol par l'ONERA ont pour but de valider le code SIERRA. Comparée à la réflectance de surface mesurée sur le site, la réflectance restituée par inversion des images HYMAP est estimée avec une précision de 5%. Malgré de nombreuses imprécisions sur le MNT, cette campagne a également permis de mettre en évidence l'apport de la correction topographique réalisée dans SIERRA par rapport aux codes supposant le sol plat.

ABSTRACT

Hyperspectral imagery, that provides radiance images at hundreds of frequency bands, has been considerably developed since last ten years. The at-sensor radiance is the result of the interact between the solar irradiance, the atmosphere, and the surface. Conventional detection and classification methods may not be used without atmospheric correction, that extracts the surface optics properties from the at-sensor radiance. Over a rugged terrain, a further correction is necessary to estimate radiance variations due to the relief. This thesis proposes a new atmospheric and topographic correction for hyperspectral imagery in the reflective spectral domain. A four step model has been developed in order to infer the surface reflectances that does not depend on solar incidence and observation angles. The model focuses on the estimations of irradiance at ground level and of the diffuse upwelling radiance. A first validation work has been carried out on synthetic radiance images. SIERRA gives in all the cases an accurate estimation of the spectral reflectances, compared to the initial ones. The inversion algorithm is also analysed in relation to uncertainties on the input data. This study shows that the inversion accuracy is dramatically related to the accuracy of the DEM and of the image orthorectification.

In the frame of the HYPERGEMME project, a field measurement campaign has been realized in Oman, including HYMAP hyperspectral data and surface bidirectional reflectances measurements. Compared to the measured surface reflectance, the SIERRA retrieved reflectance is extracted from HYMAP images with a 5% accuracy. Despite of DEM and orthorectification uncertainties, SIERRA shows the improvement of the topographic correction on the inferred reflectance, as opposed to methods assuming a flat terrain.

RESUME

L'imagerie hyperspectrale est une technique en plein essor, qui permet d'acquérir des images étalonnées en luminance, sur un grand nombre de bandes spectrales étroites et contigües. La luminance mesurée est le résultat d'une interaction entre l'éclairement solaire, l'atmosphère, et la surface du sol. Pour appliquer une méthode de détection ou de classification du sol, il est nécessaire d'isoler au préalable les propriétés optiques de la surface, en s'affranchissant des phénomènes d'absorption et de diffusion du rayonnement. Sur une zone montagneuse, une correction supplémentaire est nécessaire pour prendre en compte les variations du rayonnement montant inhérentes au relief. Cette thèse propose une nouvelle méthode de correction atmosphérique et topographique des images hyperspectrales dans le domaine réflectif (0,4 μm à 2,5 μm). Cette méthode permet de remonter en quatre étapes successives, à une carte de réflectances indépendantes des conditions de mesures de l'image de luminances. De nouveaux modèles ont notamment été développés pour modéliser l'éclairement incident sur la scène, et la luminance diffuse montante. Une première validation effectuée par inversion d'images synthétiques, montre une bonne adéquation entre la réflectance restituée et la réflectance initiale. L'étude de sensibilité aux données d'entrée a montré que la source principale d'erreurs sur l'inversion est le Modèle Numérique de Terrain. Des imprécisions en altitude, ou sur l'ortho-rectification de l'image, engendrent des erreurs sur la réflectance supérieures à celles obtenues en supposant le sol plat. La campagne de mesures réalisée au cours de cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet HYPERGEMME, dont l'un des objectifs est d'évaluer l'apport de l'imagerie hyperspectrale en géologie. Aussi, le massif montagneux de Maqad (Oman), dont la cartographie géologique est parfaitement maîtrisée, est survolé par l'imagerie hyperspectral HYMAP. Les mesures acquises au sol par l'ONERA ont pour but de valider le code SIERRA. Comparée à la réflectance de surface mesurée sur le site, la réflectance restituée par inversion des images HYMAP est estimée avec une précision de 5%. Malgré de nombreuses imprécisions sur le MNT, cette campagne a également permis de mettre en évidence l'apport de la correction topographique réalisée dans SIERRA par rapport aux codes supposant le sol plat.

Mots clés : Télédétection, hyperspectral, relief, BRDF, Réflectance

ABSTRACT

Hyperspectral imagery, that provides radiance images at hundreds of frequency bands, has been considerably developed since last ten years. The at-sensor radiance is the result of the interact between the solar irradiance, the atmosphere, and the surface. Conventional detection and classification methods may not be used without atmospheric correction, that extracts the surface optics properties from the at-sensor radiance. Over a rugged terrain, a further correction is necessary to estimate radiance variations due to the relief. This thesis proposes a new atmospheric and topographic correction for hyperspectral imagery in the reflective spectral domain. A four step model has been developed in order to infer the surface reflectances that does not depend on solar incidence and observation angles. The model focuses on the estimations of irradiance at ground level and of the diffuse upwelling radiance. A first validation work has been carried out on synthetic radiance images. SIERRA gives in all the cases an accurate estimation of the spectral reflectances, compared to the initial ones. The inversion algorithm is also analysed in relation to uncertainties on the input data. This study shows that the inversion accuracy is dramatically related to the accuracy of the DEM and of the image orthorectification.

In the frame of the HYPERGEMME project, a field measurement campaign has been realized in Oman, including HYMAP hyperspectral data and surface bidirectional reflectances measurements. Compared to the measured surface reflectance, the SIERRA retrieved reflectance is extracted from HYMAP images with a 5% accuracy. Despite of DEM and ortho-rectification uncertainties, SIERRA shows the improvement of the topographic correction on the inferred reflectance, as opposed to methods assuming a flat terrain.

Keywords: Remote sensing, hyperspectral, relief, BRDF, reflectance

