

MATISSE : version 1.2 et développements futurs

Pierre Simoneau, Roland Berton, Karine Caillault,
Sandrine Fauqueux, Thierry Huet, Jean Claude Krapez,
Luc Labarre, Claire Malherbe, Christian Martin,
Christophe Miesch, Antoine Roblin

ONERA, Département d'Optique Théorique et Appliquée
Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau Cedex, France

Résumé

Cet article présente le code MATISSE-v1.2 dont la finalité est le calcul d'images en luminance spectrale ou intégrée de scènes de fonds naturels. La bande spectrale de calcul s'étend de 765 à 3300 cm^{-1} (3 à $13\text{ }\mu\text{m}$) avec une résolution de 5 cm^{-1} et les fonds sont représentés par le rayonnement du sol, de la mer, de l'atmosphère et des nuages. L'une des fonctionnalités originale du code est la possibilité de prendre en compte la variabilité spatiale des grandeurs atmosphériques (températures, rapports de mélange, etc.) le long de chaque ligne de visée formant l'image. En plus de la capacité de générer des images, MATISSE peut calculer la luminance et la transmission le long d'une seule ligne de visée avec les mêmes caractéristiques spectrales que dans le mode imagerie ; dans ce cas, les effets de la réfraction atmosphérique sont pris en compte et il est possible d'intégrer une couche uniforme de nuages haute ou basse altitude. Enfin un mode haute résolution spectrale est également intégré afin de permettre le calcul de la propagation du rayonnement provenant d'une cible à haute température dans le même état atmosphérique que celui utilisé pour la génération des images. Par ailleurs, le code est développé avec une architecture modulaire afin d'être facilement couplé avec des codes extérieurs (à ce jour 8 industriels et organismes étatiques français détiennent Matisse-v1.2 ou s'approprient à le recevoir).

L'objet de ce papier est donc de présenter l'ensemble des fonctionnalités du code MATISSE-v1.2 ainsi que des résultats de calcul. Les évolutions prévues sont également abordées : les versions 1.3 à 1.5, et la version 2.0 dont la finalité est la prise en compte de la variabilité spatiale à une échelle métrique sur fond de mer.

1 Introduction

MATISSE (Modélisation Avancée de la Terre pour l'Imagerie et la Simulation des Scènes et de leur Environnement) est un générateur de scènes de fonds naturels dans l'infrarouge. Il a été développé afin de répondre aux besoins en génération d'images de fonds et en calcul de grandeurs radiatives spécifiques (sphère d'éclairement, transmission spectrale, ...) des services techniques de la DGA et des industriels du secteur Défense.

A l'inverse de la plupart des simulateurs d'images, dont l'un des atouts est la vitesse d'exécution au détriment de la représentativité physique, MATISSE a été développé avec l'objectif de générer des images de référence, par la recherche de méthodes offrant un bon compromis précision/temps de calcul. Une première version (MATISSE-v1.1 [1], [2]) a été développée, ce qui a permis de valider le choix de l'architecture adoptée pour la génération d'images de fond. MATISSE-v1.2 reprend l'ensemble des fonctionnalités de la version précédente, auxquelles des améliorations ont été apportées suite aux retours d'utilisation ; de nouvelles fonctionnalités ont également été ajoutées. En particulier, un mode ligne de visée permet de calculer la luminance et la transmission spectrale le long d'une ligne de visée avec prise en compte de la réfraction atmosphérique. Cependant, l'architecture du code est conçue pour la génération d'images et souffre donc de cette approche pour le calcul en mode ligne de visée ; une modification de l'architecture est envisagée afin d'optimiser ce mode de calcul.

Par ailleurs, parallèlement au développement de la version 1.2, de nouveaux besoins ont été exprimés conduisant à la mise au point de nouvelles versions. Celles-ci, en cours de développement, sont présentées à la fin de cet article.

1.1 Description de MATISSE-v1.2

La mission première de cette version est de fournir des images en luminance et en transmission spectrales, ainsi que la possibilité de propager le rayonnement issu d'une cible à très haute température dans le même environnement thermodynamique que celui des images ; l'architecture a donc été orientée afin d'optimiser la prise en compte de ces fonctionnalités. Cependant, au cours du développement du code, est apparu le besoin

de pouvoir réaliser des calculs radiatifs le long d'une ligne de visée avec les mêmes hypothèses de calcul et d'environnement que celles des images générées. Un mode supplémentaire appelé « mode ligne de visée » a donc été mis au point afin de répondre à ce besoin, avec cependant des fonctionnalités légèrement différentes de celles du mode imagerie ; ces fonctionnalités sont décrites au paragraphe 1.1.2.

1.1.1 Description des fonctionnalités du mode imagerie

Le mode imagerie consiste à générer des images spectrales en luminance et en transmission telles que les verrait un instrument d'observation, défini par sa position en coordonnées géocentriques, son altitude, la géométrie de visée ainsi que les paramètres caractérisant l'image en entrée de l'instrument (champ de vue angulaire, nombre de pixels). L'image ainsi formée est une image en luminance, i. e., à chaque pixel de l'image correspond une valeur unique de luminance le long d'une seule ligne de visée ; le champ de vue du capteur n'est utilisé ici que pour déterminer la zone vue par l'observateur, il n'y a pas intégration angulaire sur le champ de vue de chaque pixel.

Modèle d'absorption et bande spectrale

La bande spectrale de calcul s'étend de 765 à 3300 cm^{-1} (3 à 13 μm) avec un pas de calcul de 5 cm^{-1} et une résolution spectrale de 5 cm^{-1} . Les sorties du code sont soit des images spectrales en luminance et en transmission, soit des images en luminance et transmission intégrées après pondération par la réponse spectrale du capteur définie par l'utilisateur.

Concernant l'absorption moléculaire, le code utilise un modèle CK [3]. En plus des propriétés de ce type de modèle pour le calcul de la propagation atmosphérique (compromis précision/temps de calcul, couplage absorption/diffusion) le choix de cette méthode répond pleinement à l'un des besoins fonctionnels de MATISSE : pouvoir générer une série d'images sans calculs systématiques de l'ensemble des paramètres radiatifs de la scène. Pour cela, l'ensemble des paramètres radiatifs (fonctions sources atmosphériques, coefficients d'extinction, luminances surfaciques des fonds) est calculé pour l'ensemble des zones « vues » par l'observateur pour chaque valeur du modèle CK puis stocké dans des fichiers. La génération de l'image consiste alors à relire ces fichiers puis à propager, pour chaque pixel de l'image, les termes sources corrigés de l'absorption moléculaire. L'expression (1) illustre ce point. Le terme de gauche représente la luminance moyenne au niveau de l'observateur dans l'intervalle spectral $\Delta\sigma$ et dans la direction θ, φ ; le premier terme de droite représente la luminance du fond (sol, mer ou nuage) propagée à travers l'atmosphère, le second la contribution des fonctions sources atmosphériques. Ce sont donc les termes $L_s^i(\theta, \varphi)$ et $J^i(s, \theta, \varphi)$ qui, une fois calculés puis stockés, sont relus puis propagés avec le CK le long du trajet optique jusqu'à l'observateur.

$$\bar{I}_{obs}^{\Delta\sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N w_i L_S^i(\theta, \varphi) e^{-\int_{s_0}^{obs} k_i^{ext}(s') ds'} + \sum_{i=1}^N w_i \int_{S_0}^{obs} e^{-\int_s^{obs} k_i^{ext}(s') ds'} J^i(s, \theta, \varphi) k_i^{ext}(s) ds \quad (1)$$

où

- N est le nombre de points de la quadrature
- w_i le $i^{\text{ème}}$ poids de la quadrature
- $L_S^i(\theta, \varphi)$ est la luminance du fond dans la direction θ, φ quand l'équation de transfert radiatif est résolue pour le coefficient d'extinction k_i^{ext}
- $J^i(s, \theta, \varphi)$ est la fonction source de rayonnement dans la direction θ, φ , au point s le long du trajet, calculée pour la valeur $k_i^{ext}(s)$ du coefficient d'extinction
- $k_i^{ext}(s)$ l'une des N valeurs du coefficient d'extinction au point s

Cette architecture n'est rendue possible que grâce à l'utilisation de la loi de Beer ; parmi les différents modèles décrivant l'absorption moléculaire dans l'infrarouge à moyenne résolution spectrale (typiquement quelques cm^{-1}), seule l'approche CK obéit à la loi de Beer.

Le modèle comprend 17 points de quadrature sur chaque intervalle de 5 cm^{-1} . Afin de limiter les temps de calcul lors de l'exécution du code, l'ensemble des profils thermodynamiques contenus dans les banques de données de MATISSE sont convertis en « profils CK », i. e., chaque vecteur contenant toutes les données thermodynamiques à une altitude donnée est remplacé par les 17 valeurs de « k ». Pour cela, les coefficients d'absorption sont d'abord calculés pour chaque élément spectral, à l'aide d'un modèle raie par raie, puis ils sont réordonnés par valeur croissante de « k » ; les coefficients CK sont alors évalués aux points de quadrature. Afin de conserver la corrélation spectrale d'une couche à l'autre, les poids du CK sont identiques sur toute la colonne atmosphérique entre 0 et 100 km d'altitude. Les profils sont ensuite stockés sous forme d'une banque de données « CK ».

Fonds modélisés

Les fonds modélisés dans MATISSE sont le fond de sol (terre, mer), les nuages et le fond atmosphérique.

Fond atmosphérique

Le rayonnement provenant de l'atmosphère constitue le fond atmosphérique. Dans MATISSE, il est composé du rayonnement provenant de l'émission propre, de l'éclairement solaire direct et du rayonnement solaire diffusé par les aérosols et les molécules.

L'émission propre est calculée avec l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local (ETL) du sol au sommet de l'atmosphère, approximation justifiée pour la majeure partie des géométries d'observation utilisées en imagerie (ce qui ne serait pas le cas pour des visées au limbe à haute altitude dans certaines bandes spectrales [4]). Concernant la prise en compte de la diffusion, MATISSE intègre le code aux ordonnées discrètes RTRN21 [5] pour le calcul des termes de diffusion multiple, fournissant également la sphère d'éclairement locale en tout point de discrétisation de l'atmosphère.

Dans la majorité des codes de transfert radiatif atmosphérique ou des générateurs de scènes, les grandeurs thermodynamiques atmosphériques (pression, température, densité des constituants) dépendent de l'altitude mais sont homogènes horizontalement, ce qui suppose que sur une ligne de visée de plusieurs centaines de kilomètres en visée horizontale, le profil thermodynamique reste le même. L'une des fonctionnalités de MATISSE est son aptitude à prendre en compte cette variabilité spatiale le long de chaque ligne de visée formant l'image. Cette fonctionnalité est rendue possible par l'architecture du code, qui modélise l'atmosphère par une grille aux nœuds de laquelle sont associés des paramètres thermodynamiques (pression, température, densités des constituants, ...) ainsi que tous les paramètres radiatifs calculés (fonctions sources atmosphériques, sphère d'éclairement, coefficients d'extinction, ...). Les données d'entrées peuvent être, soit des sorties de codes de prévision météorologiques délivrant une collection de profils atmosphériques sur une zone et un échantillonnage horizontal donné (Europe échantillonnée à $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ pour les scènes d'analyses EUROCC25 de MétéoFrance), soit des profils mono-dimensionnels que l'utilisateur assemble afin de construire une scène 3D. Concernant les aérosols, MATISSE dispose d'une banque de données sous la forme d'une climatologie échantillonnée à $5^\circ \times 5^\circ$ (climatologie GADS [11]) avec une couverture globale. Les calculs du rayonnement diffusé sont alors effectués en utilisant le code RTRN21, appliqué à chaque échantillon de la climatologie aérosols et fournissant un calcul pseudo-3D de la diffusion atmosphérique. Une fois les grandeurs radiatives calculées et stockées aux nœuds de la grille atmosphérique, le rayonnement est propagé en utilisant la loi de Beer.

Les données atmosphériques sont composées de profils thermodynamiques et de données aérosols. Les profils thermodynamiques sont classés en trois catégories suivant leur extension spatiale :

- les profils 1D sont utilisés uniformément (horizontalement) sur l'ensemble de la scène considérée ; 1761 profils atmosphériques provenant de radiosondages effectués sur l'ensemble du globe sont disponibles (base de données TIGR [7]) ainsi que 4 des profils standard de l'AFRL [6] (US Standard, Midlatitude été/hiver, Tropical)
- les profils 2D proviennent d'une climatologie [9] fournissant le profil thermodynamique moyen sur chaque bande de latitude avec un échantillonnage de 10° et pour 8 saisons de 45 jours
- les scènes 3D qui contiennent une collection de profils échantillonnés tous les $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (scènes d'analyses EUROCC25 de Météo-France) ; actuellement, une scène d'extension limitée à une partie de la France est disponible.

Les profils 1D issus de mesures et les profils 3D provenant de codes de prévision météorologiques ne sont en général disponibles que pour une altitude maximale de 10 km. Un travail d'extrapolation de ces profils jusqu'au sommet de l'atmosphère a donc été effectué préalablement afin de générer des données directement utilisables dans le code (utilisation du modèle PRFL [8]), stockées ensuite sous la forme de banques de données.

De la même façon, les données aérosols sont classées en deux types :

- des données aérosols uniformes (horizontalement) sur l'ensemble de la scène ; on retrouve alors une partie des aérosols de l'AFRL [10] (rural, urbain, maritime et troposphérique)
- des données 3D provenant d'une climatologie (GADS [11]) fournissent l'ensemble des paramètres optiques sur une grille de couverture globale échantillonnée tous les $5^\circ \times 5^\circ$ pour deux saisons.

Fond de sol

Le fond de sol est modélisé géométriquement par un ensemble de facettes triangulaires utilisant pour support un modèle numérique de terrain (MNT) référencé par rapport à l'altitude moyenne de la surface de la mer. Deux résolutions spatiales sont actuellement disponibles dans les banques de données de MATISSE, l'une

de 30'' d'arc à l'équateur (900m) permet une couverture sur l'ensemble du globe [12], l'autre de 3'' d'arc à l'équateur est limitée à une partie de l'Europe et de l'Afrique du nord ; cette dernière banque de données est à accès restreint et nécessite une autorisation du service de cartographie des Armées.

Concernant les propriétés thermo-optiques des sols, une banque de données a été créée ; à chaque élément du MNT de résolution 30'' d'arc est associé un type parmi les 17 classes IGBP (forêts, savane, zone agricole, ...) et à chaque type sont associés une réflectivité spectrale et une émissivité (actuellement la réflectivité spectrale stockée dans la base est lambertienne mais l'architecture du code a été conçue afin de tenir compte d'éventuels effets directionnels).

Un modèle thermique est également intégré afin de calculer la température de chaque facette du terrain. Ce modèle suppose qu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre facettes et que l'évolution temporelle du dépôt d'énergie radiative au sol est périodique ; dans ces conditions, il est possible d'obtenir la variation temporelle de la température à la surface en utilisant un modèle à Transformée de Fourier [13]. Le flux radiatif déposé est apporté par les contributions de l'énergie radiative directe et diffuse dans l'atmosphère. La contribution diffuse est calculée par un modèle 2 flux en utilisant le profil atmosphérique local, permettant également la prise en compte d'une couverture totale de nuages types strato-cumulus ou cirrus.

La mer est géométriquement modélisée par un ensemble de facettes planes de résolution 30'' d'arc (identique à celle du MNT à couverture globale) avec pour support l'ellipsoïde de référence WGS84. Le rayonnement issu de chaque facette prend en compte l'émission thermique ainsi que la réflexion de la sphère d'éclairement locale. Il n'y a actuellement aucun effet de réflexion spéculaire et la température de la mer provient de la climatologie ASST (Averaged Sea Surface Temperature [14] dont la résolution spatiale est 0,5°x0,5°) dérivée de mesures satellites ATSR.

Enfin, un modèle de textures en luminance a été intégré au code afin d'introduire artificiellement une variabilité spatiale dans le rayonnement issu de chaque facette de sol. Ce modèle est basé sur des Densités Spectrales de Puissance (DSP) déduites d'images spécifiques acquises lors de campagnes de mesure.

Fond nuageux

Deux approches différentes sont intégrées dans le code : la première conduit à des images contenant une couverture partielle de stratocumulus présentant une variabilité spatiale de la luminance sur le nuage (échantillonné à 500 m), la seconde conduit à une couverture totale de strato-cumulus ou de cirrus, homogènes horizontalement sur toute l'étendue de l'image. Cette dernière a été développée principalement pour le mode ligne de visée car elle n'apporte aucune variabilité spatiale de la luminance dans l'image, mais permet la prise en compte éventuelle d'un voile homogène de cirrus dans l'image.

Dans le premier cas, les nuages sont modélisés par des objets discrétisés en facettes sur lesquelles sont appliquées des propriétés surfaciques : BRDF, BTDF et émissivité. Ces trois grandeurs ont été pré-calculées avec le code RTRN21 puis intégrées à MATISSE sous forme d'une banque de données. A partir des conditions de calcul fixés par l'utilisateur (taux de couverture, altitude minimale de la base du nuage, épaisseur maximale, échantillonnage spatial), un générateur de couverture nuageuse calcule la répartition des stratocumulus au sein de l'image, la surface du nuage est alors générée sous la forme de facettes auxquelles sont associées les propriétés surfaciques mentionnées précédemment. Le rayonnement est ensuite calculé à partir de l'environnement radiatif au voisinage du nuage et de la température locale. Cette méthode repose sur l'hypothèse que le rayonnement provenant de chaque facette du nuage est indépendant du rayonnement des autres facettes (Independent Pixel Approximation [15]), ce qui est justifié si la taille des facettes est suffisamment grande et pour des angles solaires et d'observation éloignés de l'horizontale.

De façon identique aux fonds de sol, un modèle de textures permet d'accroître la variabilité spatiale de la luminance sur chacune des facettes.

Dans cette approche, les ombres portées par les nuages au niveau du sol peuvent être prises en compte. L'éclairement solaire direct des facettes occultées est nul, cependant la sphère d'éclairement locale ne tient pas compte du nuage ce qui limite la validité de l'approche.

Dans le second type de modélisation, la couverture nuageuse est systématiquement totale ; les paramètres nuageux sont supposés homogènes horizontalement, en revanche ils dépendent de l'altitude. Le calcul radiatif est effectué lors de l'exécution du code, en ajoutant aux grandeurs atmosphériques une couche contenant les paramètres optiques du nuage (fonction de phase, coefficients d'extinction et diffusion, ...) ; le calcul est alors réalisé de façon identique à celui effectué pour les aérosols. Les nuages modélisés ici sont des stratocumulus ou des cirrus.

Architecture du code

L'utilisation de MATISSE nécessite l'exécution de deux phases successives : une phase d'initialisation et une phase de rendu.

Dans la première, toutes les grandeurs radiatives (fonctions sources atmosphériques, coefficients d'extinction, luminances sols et nuages) sont calculées dans toutes les directions et pour l'ensemble de la bande spectrale requise par l'utilisateur, puis stockées dans des fichiers binaires.

Ces fichiers sont ensuite relus dans la phase de rendu, ce qui conduit à n'effectuer que des calculs de propagation des luminances de fond et des fonctions sources atmosphériques, permettant la détermination du rayonnement au niveau de l'observateur pour différentes géométries possibles. Cette phase s'appuie sur la librairie graphique 3D OpenGL version 1.2, qui permet de former l'image au niveau du capteur à partir des facettes de la scène en éliminant les parties cachées.

1.1.2 Mode ligne de visée

Ce mode permet le calcul de la luminance et de la transmission le long d'une ligne de visée unique. Une partie des fonctionnalités du mode imagerie a été reprise avec cependant quelques adaptations que nous décrivons ci-après.

Les caractéristiques spectrales et le modèle d'absorption sont identiques à ceux du mode imagerie : bande spectrale 3 – 13 μm , pas de calcul et résolution spectrale 5 cm^{-1} , modèle CK. Les sorties sont aussi bien la luminance et la transmission, spectrales ou intégrées après pondération par la réponse spectrale du capteur définie par l'utilisateur. L'observateur est défini par sa position en coordonnées géocentriques et son altitude par rapport à l'ellipsoïde de référence. La propagation est effectuée soit en considérant le trajet fond-cible rectiligne, soit en tenant compte des effets de réfraction atmosphérique. Dans ce dernier cas, la position de l'observateur est fixée ainsi que les angles de visée, le code calcule alors le trajet à partir de l'observateur et s'arrête si le trajet sort de l'atmosphère, ou bien atteint le sol ou une distance définie par l'utilisateur.

Le sol n'est plus modélisé par un MNT mais est supposé uniforme et représenté géométriquement par l'ellipsoïde de référence (WGS84) avec une température et un albédo spécifiés par l'utilisateur.

Le rayonnement provenant des nuages est calculé avec l'hypothèse d'une couche infinie uniforme horizontalement. Les nuages considérés sont les strato-cumulus (2 microphysiques disponibles) et les cirrus.

En ce qui concerne l'atmosphère (profils thermodynamiques, aérosols, modèles), les caractéristiques sont identiques à celle du mode imagerie.

1.1.3 Calcul haute résolution spectrale

Ce mode permet le calcul de la luminance thermique (pas de phénomènes de diffusion) et de la transmission en utilisant un modèle raie par raie [16]. Cette fonctionnalité permet ainsi un calcul de propagation à haute résolution spectrale le long d'une ligne de visée unique avec les mêmes caractéristiques atmosphériques que celles du mode imagerie, ce qui permet d'estimer au sein d'une image le rayonnement provenant d'une cible à haute température.

La luminance et la transmission sont calculées sur la bande spectrale de 765 à 3300 cm^{-1} avec un pas de 0.1 à 0.005 cm^{-1} (calcul automatique suivant les conditions thermodynamiques) le long de la ligne de visée avec ou sans prise en compte de la réfraction.

Il n'y a pas de fond de sol dans ce mode, ni présence d'aérosols. En revanche l'ensemble des profils thermodynamiques du mode imagerie sont utilisables ainsi que les scènes atmosphériques 3D.

2 Validation

La plupart des fonctionnalités du code ont été validées dans la version précédente de MATISSE (version 1.1), le travail a donc consisté à valider les nouvelles fonctionnalités et effectuer les tests de non-régression par rapport à MATISSE-v1.1.

Les validations se sont limitées à comparer les résultats de MATISSE-v1.2 avec ceux d'autres codes : LBLRTM [17] pour le mode haute résolution spectrale et MODTRAN4 [18] pour le mode ligne de visée. Dans tous les cas, les résultats sont en accord à fonctionnalité équivalente (pas d'atmosphère 3D) et pour des paramètres atmosphériques identiques. Afin de satisfaire ce dernier point, certaines données de MODTRAN ont été insérées dans MATISSE pour la durée des essais afin d'évaluer la partie purement algorithmique. En utilisant cette démarche, les comparaisons conduisent à des accords satisfaisants entre les modèles.

Un point particulier à mentionner est la différence apparaissant dans les bandes de vapeur d'eau lors des comparaisons entre les calculs à haute résolution spectrale. Ces différences sont attribuables à des modélisations différentes des continua de la vapeur d'eau entre LBLRTM (utilisation du modèle CKD [19]) et le code raie par raie de MATISSE qui utilise les modèles de continua développés par le Laboratoire de PhotoPhysique Moléculaire (UPR 3361 du CNRS) [20] adaptés au code raie par raie. Un travail de validation expérimentale doit être envisagé afin d'évaluer les performances respectives de ces modèles.

Pour le mode imagerie, les calculs de propagation ont été auto-validés par comparaison de la luminance obtenue sur le pixel central avec la luminance calculée en mode ligne de visée.

3 Résultats

Nous présentons ici deux résultats obtenus avec MATISSE-v1.2 : le premier en mode imagerie et le second en mode ligne de visée.

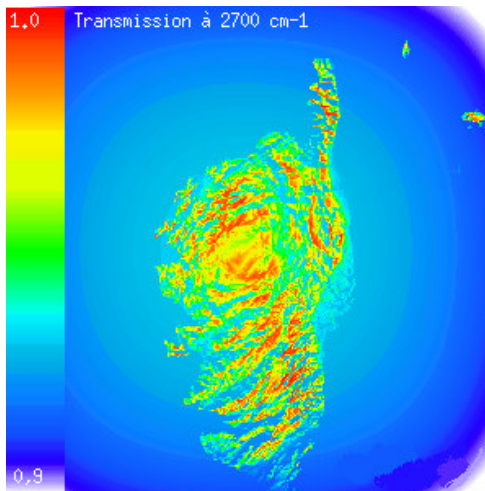


Figure 1 : image en transmission

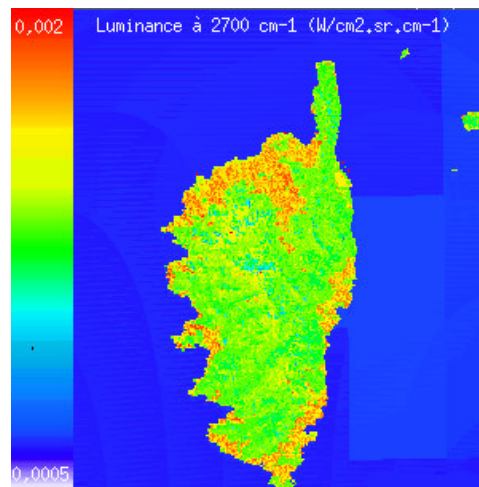


Figure 2 : image en luminance

La figure 1 présente une image en transmission ; l'observateur est situé au dessus de la Corse (9° E / 42.3° N) à une altitude de 90 km au voisinage de 12h locale. Le nombre de pixels est de 200×200 , le champ total 80° et le nombre d'ondes est égal à 2700 cm^{-1} ($3.7 \mu\text{m}$). Ce nombre d'onde correspond à une fenêtre de transmission de l'atmosphère, ce qui est confirmé par les valeurs apparaissant sur l'échelle de couleur à gauche de la figure (entre 0.9 et 1). On remarque au centre de l'image que les valeurs les plus élevées de la transmission correspondent aux massifs montagneux de la corse (distance à l'observateur la plus courte) et que la valeur la plus basse de la transmission est située sur les coins de l'image correspondant à l'effet de champ du capteur.

La figure 2 représente la luminance ($\text{W}/\text{cm}^2.\text{sr}.\text{cm}^{-1}$) obtenue avec le même scénario que celui de l'image précédente. On remarque la variabilité spatiale du rayonnement sur le fond de sol, provenant des variations de température et du rayonnement réfléchi induites dans les deux cas par les différents types de terrains, les orientations locales du terrain ainsi que les différentes altitudes. On remarque sur le fond de mer l'apparition de « pavés » dus à la résolution spatiale moindre de la banque de données ASST (qui n'est que de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$).

Les résultats suivant proviennent d'une étude réalisée dans le cadre d'un projet financé par la DGA (projet MIRADOR [21]), dans laquelle il est important de pouvoir évaluer les fluctuations de luminance induites par la variabilité atmosphérique le long du trajet optique en visée proche de l'horizontale. MATISSE a donc été utilisé pour évaluer l'impact des variations de profils thermodynamiques le long de la ligne de visée sur les variations de luminance. Une scène 3D a été générée à partir de 3 profils atmosphériques choisis dans la banque de données de MATISSE (profils n° 58, 105 et 267).

La figure 3 montre les luminances calculées le long d'une ligne de visée pour quatre configurations atmosphériques différentes. L'observateur est positionné à 16° de latitude nord et 6° de longitude est, à une altitude de 13 km, la longueur du trajet est de l'ordre de 1000 km et l'élévation est égale à 5° (angle zénithal 85°). La différence entre l'azimut solaire et l'azimut d'observation est de 34° et l'observation a lieu à midi le 21 juin.

Sur la figure, la courbe bleue représente la luminance calculée en faisant l'hypothèse que le profil n°58 est le même sur l'ensemble de la ligne de visée, la courbe verte fait la même hypothèse avec le profil n°267 ainsi que pour la courbe rouge avec le profil n°105 (les températures associées à ces profils sont présentées sur la figure 5). La courbe orange représente la luminance en faisant l'hypothèse que le trajet rencontre les trois profils consécutivement, le premier profil étant le profil n° 58, le dernier le n° 105. On remarque une variabilité de la luminance entre les différentes configurations. La figure 4 représente la différence entre la luminance obtenue dans le cas 3D et celle obtenue par l'utilisation du profil 58 (le plus près de l'observateur) sur toute la ligne de visée. On remarque des différences pouvant atteindre près de 30% entre les luminances, information qui peut s'avérer être essentielle pour la mise au point de systèmes optroniques.

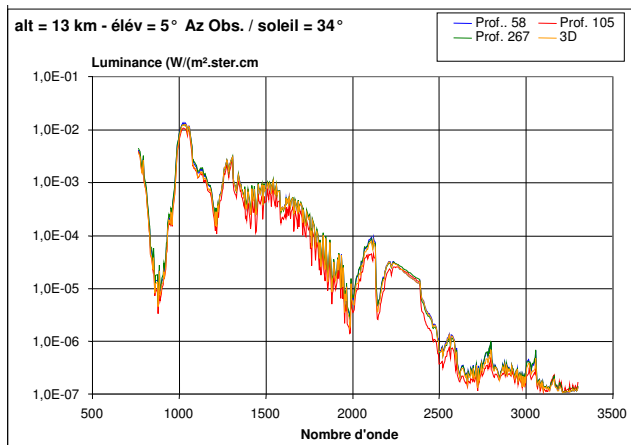


Figure 3 : luminance pour 4 conditions atmosphériques différentes

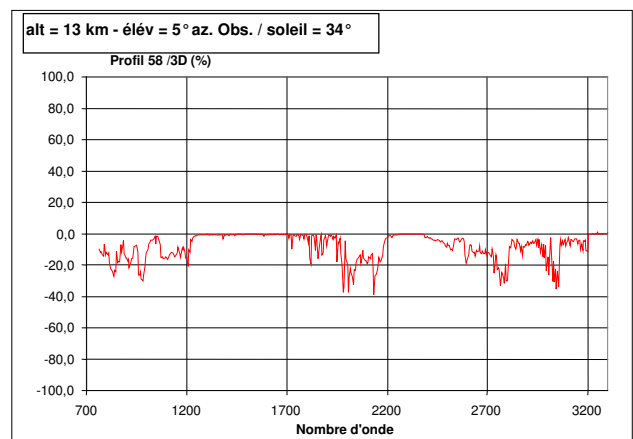


Figure 4 : différence entre la luminance 3D et 1D prenant en compte le premier profil rencontré sur la ligne de visée

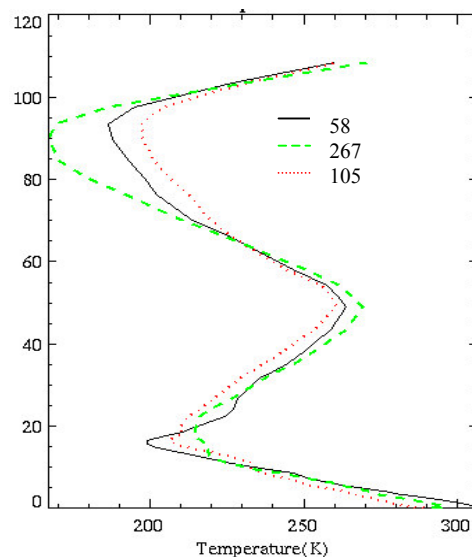


Figure 5 : température pour les 3 profils sélectionnés

4 Distribution du code

Actuellement le code est distribué aux industriels français du secteur Défense qui en ont fait la demande auprès de la DGA et aux établissements sous tutelle du ministère de la Défense (Celar, SHOM). Le RDDC (Recherche et Développement pour la Défense Canada) de Valcartier (Québec) est également détenteur du code dans le cadre d'un arrangement spécifique entre la France et le Canada (AS20).

Le code est prévu pour fonctionner sur une station de travail de type SUN sous Solaris 2.8 ou IBM sous AIX4.3, stations pour lesquelles une maintenance en condition opérationnelle est assurée. Afin de bénéficier de l'intégralité des banques de données fournies avec MATISSE, un espace disque de 20 Go environ est requis ; cependant MATISSE peut fonctionner avec un nombre restreint de données mais avec dans ce cas, des fonctionnalités limitées.

Une réflexion est également en cours afin de proposer une version de MATISSE à distribution non limitée et beaucoup moins volumineuse afin de pouvoir être exécutée sur tout type de machine et « téléchargée » sur internet.

Une page internet dédiée à MATISSE (<http://matisse.onera.fr>) est en cours de construction. Cette page contient une présentation du code et de ses fonctionnalités, un accès à une documentation descriptive (manuel utilisateur et dossier de tests notamment) ainsi que la possibilité de s'inscrire afin d'accéder à l'espace utilisateur. L'inscription permettra l'accès à un forum et une FAQ ainsi qu'aux dernières versions du code source directement téléchargeable.

5 Versions futures

5.1 MATISSE-v1.3

Cette nouvelle version, qui sera opérationnelle à l'été 2005, a pour objet d'ajouter une nouvelle fonctionnalité au calcul de la réfraction dans le mode ligne de visée. Dans la version 1.2, lorsque l'utilisateur veut effectuer un calcul de rayonnement ou de transmission le long d'une ligne de visée, la position de l'observateur ainsi que les angles d'observation sont fixés. Le programme calcule alors automatiquement la géométrie du trajet réfracté à partir de l'observateur, la propagation s'arrête dès que le trajet sort de l'atmosphère, ou bien atteint le sol ou une distance définie par l'utilisateur. La nouvelle fonctionnalité en cours de développement, est d'autoriser l'utilisateur à fixer les positions de l'observateur et de la cible dans un même calcul, les angles de visée au niveau de l'observateur ainsi que la distance observateur / cible sont alors déterminés par la recherche du plus court chemin optique entre les deux extrémités du trajet. L'évaluation de l'erreur de localisation au niveau du sol, représentée par la différence entre le trajet réfracté et le trajet en ligne droite est proposée à l'utilisateur.

5.2 MATISSE-v1.4

MATISSE-v1.4 sera une version développée en collaboration avec le RDDC (Recherche et Développement pour la Défense Canada) de Valcartier. L'objectif est de pouvoir calculer le rayonnement se propageant le long d'une ligne de visée dans la couche limite maritime. Afin d'atteindre cet objectif, les travaux portent sur deux thèmes : le premier est la connaissance des données d'entrées, le second le développement d'un module géométrique très précis permettant la détermination de trajets multiples (possibilité de plusieurs trajets réfractés).

Les données d'entrées sont constituées des profils thermodynamiques et des données d'aérosols. Les premiers sont obtenus par l'utilisation d'un modèle Bulk de 0 à 10 m d'altitude, prolongé par le radiosondage local, puis enfin extrapolé jusqu'au sommet de l'atmosphère par le programme PRFL [8] (cf. 1.1.1). Les seconds proviennent du modèle AP (Aerosols Profiles) développé par le RDDC fournissant les données aérosols jusqu'à une altitude de 30 m ; au-delà les données sont issues du modèle NOVAM [22] (jusqu'à 3 km) et enfin les modèles de l'AFRL [10] sont utilisés pour étendre le profil jusqu'au sommet de l'atmosphère. Le module géométrique quant à lui provient d'une routine du code IRBLEM [23] adaptée pour être intégrée à MATISSE.

La recette est prévue pour la fin de l'année 2005.

5.3 MATISSE-v1.5

Le développement de cette dernière version de la série des MATISSE-v1.x a pour origine les retours d'utilisation du code. Parmi les modifications proposées, l'une d'elles permettra d'améliorer le processus de calcul des images par la suppression de la librairie Open GL et son remplacement par une méthode purement logicielle utilisant un Zbuffer [24]. L'utilisation de la librairie Open GL pour la gestion des parties cachées au sein de l'image a permis un développement rapide de MATISSE-v1.1, mais impose un contexte graphique 3D de rendu et une intervention de l'utilisateur, ce qui interdit le calcul en « batch » d'images en série si la géométrie d'observation est modifiée entre deux images. L'utilisation d'une solution purement logicielle permettra alors de lever cette limitation. Cette nouvelle version sera disponible début 2006.

6 MATISSE-v2.0

La dernière version présentée ici nécessite une modification majeure de l'architecture, justifiant la nouvelle numérotation. Elle est motivée par l'incapacité des versions précédentes à modéliser, pour les fonds de sol, la variabilité spatiale du rayonnement à une échelle inférieure à celle de la résolution du modèle numérique de terrain (30'' d'arc à l'équateur, ce qui représente à peu près 700m à nos latitudes). Un modèle de textures en luminance a été implémenté dans les versions précédentes, mais ce type de modélisation impose trop de contraintes et est limité concernant la représentativité physique.

L'amélioration principale apportée par MATISSE-v2.0 est la prise en compte de la variabilité spatiale du rayonnement à échelle métrique sur les fonds. Bien que le besoin soit étendu à tous les types de fonds (sols, mer, nuage, atmosphère) cette version de MATISSE n'inclura que la mer ; cependant des études concernant la variabilité spatiale sur les fonds de sols sont actuellement en cours à l'Onera, et l'architecture du code sera adaptée afin de recevoir dans la version suivante, les modèles développés au cours de ces études.

Au niveau des fonctionnalités, MATISSE-v2.0 sera capable de générer des images en éclaircissement de la mer, prenant en compte les effets de réflexion spéculaire solaire, avec un échantillonnage au plus fin de 1 mètre ; la variabilité sub-pixelique sera incluse. Le besoin étant de disposer d'images quelle que soit la géométrie d'observation, un modèle multi-échelle sera développé afin de pouvoir générer des images en visées rasantes (multirésolution dans le champ) et d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'effectuer des « zooms » sur les images.

Evidemment, toutes les fonctionnalités des versions précédentes devront être présentes afin d'assurer la non régression. MATISSE-v2.0 devrait être disponible à partir de l'automne 2008.

7 Conclusion

L'ensemble des fonctionnalités de MATISSE-v1.2 a été présenté dans cet article : images en luminance et transmission spectrales ou intégrées, prise en compte du rayonnement des sols avec calcul de la température locale du sol, rayonnement de la mer, rayonnement d'une couche partielle de strato-cumulus ou propagation du rayonnement provenant d'une cible à haute température. Il est également possible d'utiliser le code pour réaliser des calculs le long d'une ligne de visée avec prise en compte de la réfraction atmosphérique.

De nouvelles versions sont en cours de réalisation : version 1.3 pour le calcul de la réfraction entre une cible et l'observateur, version 1.4 pour le calcul dans la couche limite maritime, version 1.5 pour le calcul d'images en mode bouclé. Enfin la version 2.0 aura la capacité de générer des images de fonds de mer contenant une variabilité spatiale du rayonnement jusqu'à une échelle métrique et prenant en compte la réflexion spéculaire solaire.

8 Remerciements

MATISSE-v1.2 a été financé par la DGA/STTC, MATISSE-v1.3 et v1.5 sont financés par la DGA/SPAé et MATISSE-v1.4 et v2.0 sont financés par la DGA/SPN.

Remerciement à l'équipe projet MIRADOR de l'Onera pour les résultats présentés sur les figures 3 et 4.

9 Références

- [1] « MATISSE : Advanced Earth Modeling for Imaging and Scene Simulation », P. Simoneau, R. Berton, K. Caillault, G. Durand, T. Huet, L. Labarre, C. Malherbe, C. Miesch, A. Roblin, B. Rosier
ESO/SPIE Europto European Symposium on Remote Sensing, Toulouse (France), September 17 – 21, 2001
- [2] « MATISSE : Advanced Earth Modeling for Imaging and Scene Simulation : first results », P. Simoneau, R. Berton, K. Caillault, G. Durand, T. Huet, L. Labarre, C. Malherbe, C. Miesch, A. Roblin, B. Rosier
9th International Symposium on Remote Sensing, Crète (Grèce), September 22 – 27, 2002
- [3] « Développement d'un modèle en K pour MATISSE », T. Huet, Rapport Technique de Synthèse Onera n° RTS 28/4422 DOTA/Y, décembre 1998
- [4] « Carbon dioxide 4.3 μ m emission in the earth's atmosphere : a comparison between NIMBUS 7 SAMS measurements and non local thermodynamic equilibrium radiative transfer calculations », M. Lopez-Puertas, F. W. Taylor, JGR, **94**, 13045-13048, 1989
- [5] « Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane parallel scattering atmosphere », T. Nakajima and M. Tanaka, JQSRT, **35**, 13-21
- [6] « AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0-120km), G. P. Anderson, S.A. Clough, F. X. Kneizys, J. H. Chetwynd, E. P. Shettle, AFGL-TR-86-0110
- [7] « Base de données pour la restitution de variables atmosphériques à l'échelle globale. Étude de l'inversion par réseaux de neurones des données des sondeurs verticaux atmosphériques présents et à venir », J. Escobar-Munoz, Thèse de l'Université de Paris VII, 1993
- [8] Détermination des profils atmosphériques de référence pour la mesure de constituants par spectrométrie d'absorption. Programmes PRFL et RMEL, F. Karcher, Janvier 1990
- [9] « Présentation d'un modèle bi-dimensionnel photochimique de l'ozone stratosphérique », D. Cariolle, Note de travail de l'E.E.R.M., n°27, Février 1982
- [10] « Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties », E.P. Shettle and R.W. Fenn, AFGL-TR-79-0214, 20 Sept 1979, ADA085951, 1979
- [11] « Global Aerosol Data Set », Köpke P., Hess M., Schult I., Shettle E.P.
Max Planck Institut für Meteorologie - Hamburg, Rep n° 243, (september 1997)

- [12] « Development of a global land cover characteristics database and IGBP-DISCover from 1 km AVHRR data », Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Yang L., Merchant J.W. International Journal of Remote Sensing, Vol 21, No 6&7, pp. 1303-1330, May 2000
- [13] Reconnaissance Aérienne Optronique : bande spectrale IR, B. Rosier, T. Huet, Rapport Onera, RTS 32/4428 DOTA/Y, 1998
- [14] « ESA Earth Remote Sensing », ATSR products, ESA : <http://earth.esa.int/eeo2.500>
- [15] « Nonlocal Independant Pixel Approximation : Direct and Inverse Problems », A. Marshak, A. Davis, R. Cahalan and W. Wiscombe IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, N°1, January 1998
- [16] « An optimized line by line code for plume signature calculation-I : model and data”, L. Ibgui, J. M. Hartmann, JQSRT, vol 75, 3, Nov. 2002, 273-295
- [17] « Line by line Calculations of atmospheric fluxes and cooling rates : application to water vapor”, S. A. Clough, M. J. Iacono, JC Moncet, J. Geo. Res. vol 97, n° D14, p 15761-15785 Octobre 1992
- [18] A. BERK, G.P. ANDERSON, P.K. ACHARYA, J.H. CHETWYND, L.S. BERNSTEIN, E.P. SHETTLE, M.W. MATTHEW AND S. M. ADLER-GOLDEN, “Modtran4 user’s manual,” tech. rep., Hanscom AFB: Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force material Command, MA 01731-3010, 2000
- [19] « Line shape and the water vapor continuum », S. A. Clough, F. X. Kneizys and R. W. Davies, *Atm. Res.*, **23**, 229-241
- [20] « Etude et modélisation des continua d’absorption/emission moléculaire infrarouge pour des applications en télédétection », J. M. Hartmann, contrat CNRS/Snecma, Rapport Final, 09/11/1995
- [21] « Engineering and Technical Studies Relating to an Airborne InfraRed Early Warning System », A.Roblin, P. Chervet, J. Deschamps, T. Donath, T. Marchon, J. Primot, S. Herbin, F. Champagnat, 2nd AAAF international conference on missile defence "challenge in Europe", 15-17 september, 2004, Florence, Italy
- [22] « The Navy Oceanic Vertical Aerosol Model », Gathman, S.G. and Davidson, K.L., TR-1634, Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, RDT&E Division, San Diego CA (1993)
- [23] D. Dion, L. Gardenal, L. Forand, M. Duffy, P. Potvin and S. Diagle : IR Boundary Layer Effect Model, version 5.0
- [24] "A Subdivision Algorithm For Computer Display of Curved Surfaces", E. CatMull , Ph.D. Thesis, Report UTEC-Csc-74-133, Computer Science Department, University of Utah, Salt Lake City, UT, 1974