

HYEMALIS : un simulateur d'images de paysages tridimensionnels complexes

Jérôme HELBERT^a, Béatrice BERTHELOT^a, Cyril SOLER^b

^aNOVELTIS, Parc Technologique du Canal, 2 avenue de l'Europe, 31520 Ramonville Saint-Agne

Tél : +33 (0) 562 88 11 11 / Fax : +33 (0) 562 88 11 12 / Email : [jerome.helbert | beatrice.berthelot]@noveltis.fr

^bINRIA Rhône-Alpes, 655 avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot

Tél. : +33 (0) 476 61 54 29 / Fax : +33 (0) 476 61 54 40 / Email : cyril.soler@imag.fr

Résumé : Cet article présente HYEMALIS, un atelier logiciel développé par NOVELTIS en collaboration avec l'INRIA permettant de simuler des paysages tridimensionnels complexes et des images de télédétection dans le domaine spectral solaire. HYEMALIS est composé de plusieurs modules : calcul du transfert radiatif par un algorithme de radiativité, couplage avec un modèle d'interaction atmosphérique, simulation du capteur aéroporté ou orbital. Cet outil permet de conduire de nombreuses applications en relation avec l'observation des milieux urbains : aide à la définition de missions, test d'algorithmes de traitement d'images, simulation de bases de données de réflectances directionnelles.

Mots-clés : simulation 3D, transfert radiatif, radiativité, FTM.

Abstract : This paper deals with HYEMALIS, a software developed by NOVELTIS in collaboration with INRIA to simulate complex three-dimensional landscapes and remote sensing images in the solar spectrum. HYEMALIS is composed of several modules : radiative transfer computation with a radiosity algorithm, atmospheric interaction model coupling, airborne or space borne sensor simulation. This software can be used to lead various applications relating to urban landscape observation like helping in mission design, testing image processing algorithms, simulating directional reflectance databases.

Key words : 3D simulation, radiative transfer, radiosity, MTF.

1. Introduction

HYEMALIS est un simulateur d'images de paysages tridimensionnels complexes développé par NOVELTIS en collaboration avec le projet ARTIS du laboratoire GRAVIR (INRIA Rhône-Alpes).

HYEMALIS est un atelier logiciel complet permettant de générer des images multi-résolutions et multidirectionnelles de paysages (zones urbaines, agricoles, forestières...) dans le domaine spectral solaire (400-2500 nm) à partir de conditions d'illumination et d'observation définies par l'utilisateur. HYEMALIS est un outil particulièrement adapté à la simulation d'images de télédétection, notamment dans le cadre d'études des milieux urbains où il présente de nombreux attraits pour des applications multiples et variées.

HYEMALIS s'inscrit parmi les modèles tridimensionnels de calcul du transfert radiatif tels que DART [Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996] mais utilise la méthode de radiativité au lieu d'une technique de lancer de rayons

Cet article s'articule en deux parties : une première partie décrit l'organisation et le fonctionnement général du simulateur ; une seconde partie présente plusieurs exemples d'applications en milieu urbain.

2. Présentation de HYEMALIS

HYEMALIS se compose de plusieurs modules indépendants, présentés sur la figure 1 et détaillés dans les paragraphes suivants.

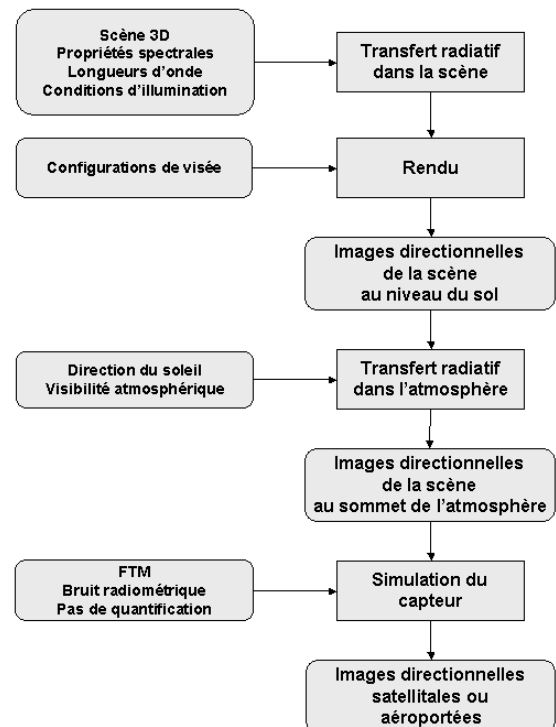


Figure 1. Fonctionnement général du simulateur HYEMALIS. Les données d'entrée sont représentées sur la gauche du schéma.

2.1. Définition des scènes

2.1.1. Description géométrique

Le premier module de HYEMALIS demande en entrée des scènes tridimensionnelles. Celles-ci sont construites à l'aide d'objets 3D de types urbains et/ou végétaux disponibles dans des bases de données ou bien générés par des simulateurs d'objets, tels que AMAP ORCHESTRA pour les éléments végétaux [Bionatics, 2003] (figure 2).



Figure 2. Exemples de pins maritimes âgés de 2 ans, 12 ans et 35 ans générés par le logiciel ORCHESTRA.

Chaque objet est constitué d'un ensemble de facettes polygonales définies par les coordonnées de leurs sommets, aucune limitation géométrique n'étant imposée sur ces éléments. Pour la simulation de scènes réelles, le positionnement des objets s'effectue à partir de données externes issues de systèmes d'information géographique (cadastre, relevés de terrain...) permettant ainsi de placer exactement chaque objet dans la scène (figure 3).



Figure 3. Maquette tridimensionnelle du quartier des Demoiselles, Toulouse.

2.1.2. Définition des propriétés optiques des objets

Les propriétés optiques des éléments peuvent être simulées (modèle PROSPECT pour les végétaux [Jacquemoud et Baret, 1990], modèle de Price pour les sols [Price, 1990]...) ou bien provenir de mesures *in situ* ou de laboratoire. HYEMALIS traite par défaut des éléments lambertiens, des réflectances bidirectionnelles (BRDF) pouvant également être introduites (cf. §2.2.2). L'algorithme de simulation du transfert radiatif utilisé permet par ailleurs de représenter la réflectance lambertienne de certaines surfaces (murs, fenêtres, toits, routes, sols...) par des textures afin de rendre les objets visuellement plus réalistes [Gershbein et al. 1994].

Grâce aux performances des moyens informatiques actuels, il est possible de traiter sur un ordinateur personnel des scènes urbaines couvrant des surfaces de l'ordre du kilomètre carré.

2.2. Transfert radiatif

2.2.1. Illumination des scènes

Le rayonnement descendant est simulé à partir de la position connue du soleil (ou de la date à laquelle est simulée la scène) et des propriétés de l'atmosphère (visibilité atmosphérique). La distribution de luminance sur la voûte céleste est calculée à l'aide de la formule de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) pour les longueurs d'onde visibles [Perez et al., 1993] et simulée numériquement avec le logiciel 6S pour le domaine du proche infrarouge [Vermeote et al., 1997]. La figure 4 présente les valeurs de luminance pour un angle solaire de $33,75^\circ$, une visibilité de 23 km et une longueur d'onde de 550 nm.

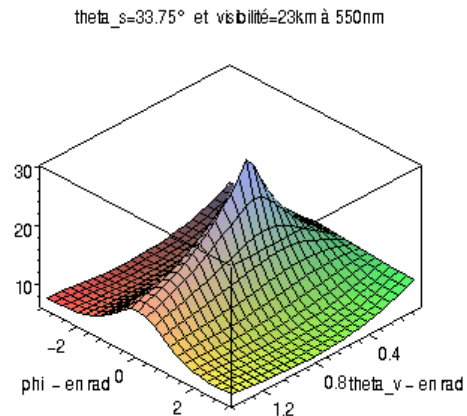


Figure 4. Distribution du rayonnement descendant sur la voûte céleste (luminances en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).

Pour des études spécifiques (par exemple les simulations de réflectances directionnelles), il est possible de remplacer les éclairages solaire et atmosphérique par un éclairage direct unique correspondant à une source ponctuelle située à l'infini et rayonnant un flux d'intensité arbitraire.

2.2.2. Calcul du transfert radiatif

Le transfert radiatif dans la scène est ensuite simulé dans trois bandes spectrales simultanément par un algorithme de radiosité hiérarchique avec *clustering* et instanciation [Soler et al., 2003], technique basée sur une approche physique des transferts d'énergie par une méthode d'éléments finis.

Une représentation hiérarchique de la géométrie — obtenue par subdivision ou par regroupement des surfaces (*clustering*) — associée à une approche hiérarchique du calcul des transferts d'énergie, permet des simulations sur des scènes pouvant contenir plusieurs millions d'éléments.

Le principe est tout d'abord le calcul des visibilité entre tous les polygones constituant les objets (calculs des facteurs de forme) puis, connaissant les propriétés optiques de ces objets, le calcul de la répartition de l'énergie lumineuse sur tous les polygones de la scène. Notons que contrairement aux techniques de radiosité classiques l'algorithme développé permet la prise en compte de réflectances directionnelles en associant à chaque élément un champ de distribution d'éclairage, ce champ se limitant simplement à une valeur de radiosité pour les éléments lambertiens.

La résolution du problème s'effectuant itérativement, un critère d'erreur maximale sur la solution calculée est introduit par l'utilisateur pour limiter les temps de calcul. Par ailleurs, une subdivision automatique des polygones (*i.e.* raffinement) est effectuée pendant le calcul pour réduire les gradients de luminosité trop forts entre polygones adjacents. Le raffinement des polygones est d'autre part contraint par une valeur d'aire minimale entrée par l'utilisateur. L'effet produit est visible sur la figure 5 où l'on voit que le sol, constitué à l'origine d'un seul grand carré, est d'abord subdivisé en petits carrés d'aires égales, puis subdivisé à nouveau aux endroits de transitions rapides entre ombre et lumière. L'introduction de ces critères de précision et de raffinement est un des principaux attraits de la méthode de radiosit e puisqu'elle permet à l'utilisateur de choisir librement un compromis entre vitesse de calcul et précision des résultats.

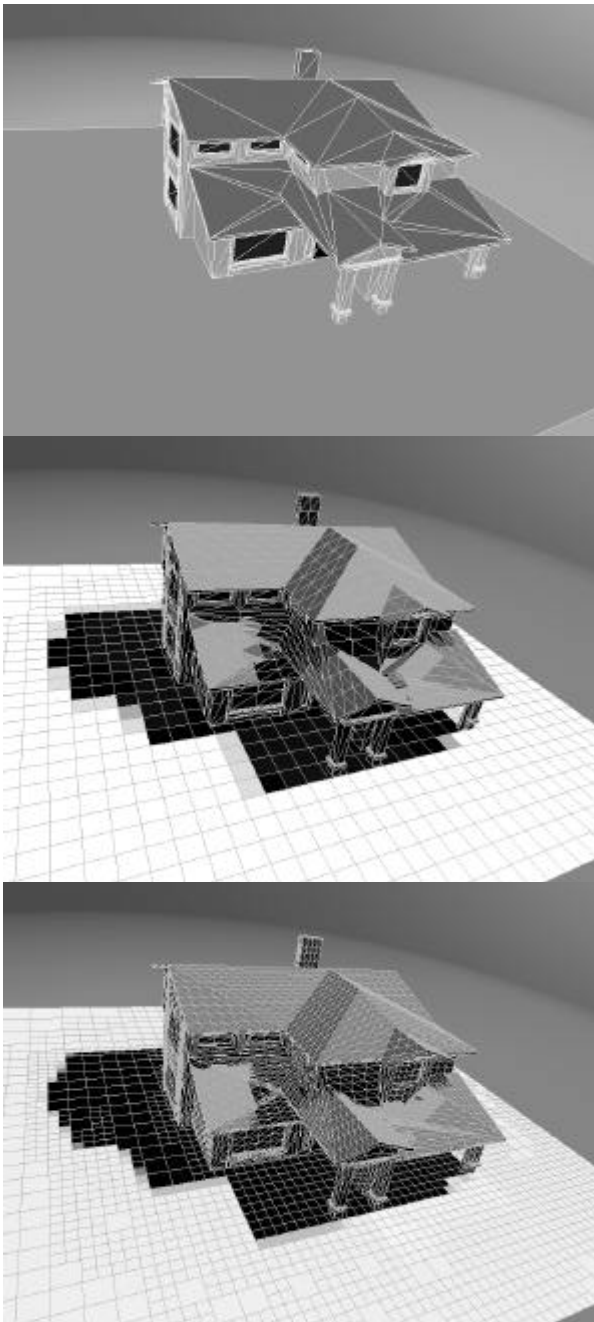


Figure 5. Exemple de scène mettant en évidence le raffinement automatique des objets par la méthode de radiosit e. La première image montre le maillage original, les images suivantes le résultat du calcul de radiosit e pour deux aires minimales de raffinement (1 m^2 et $50 \times 50 \text{ cm}^2$).

Pour plus de performances, la méthode utilise également un algorithme d'instanciation hiérarchique [Soler *et al.*, 2003]. Cet algorithme consiste tout d'abord à décomposer les objets complexes présents plusieurs fois dans une même scène en éléments plus simples. Ceci peut être r ealis e à des niveaux croissants de complexité, comme illustr e sur la figure 6 où un arbre est d ecompos e d'abord en branches principales, puis en branches secondaires et enfin en feuilles. Une fois la décomposition effectu e, l'algorithme calcule la BRDF de l'élément de plus bas niveau, celle-ci pouvant être ensuite utilis e à la place de cet élément (*i.e.* instanci e) pour d'une part remplacer un objet présent plusieurs fois par une structure beaucoup moins coûteuse en mémoire mais également pour déterminer la BRDF de l'élément hiérarchiquement plus  lev e. Cette méthode permet donc un gain de performance substantiel à la fois sur la consommation mémoire car la description géométrique des objets r ep et es n'est introduite qu'une seule fois — et uniquement lorsque le calcul concerne leurs propres sous-éléments —, et sur la rapidité de calcul car les interactions énergétiques entre les sous-parties d'un objet instanci e et le reste de la scène n'est r ealis e que lors de la détermination de la BRDF.

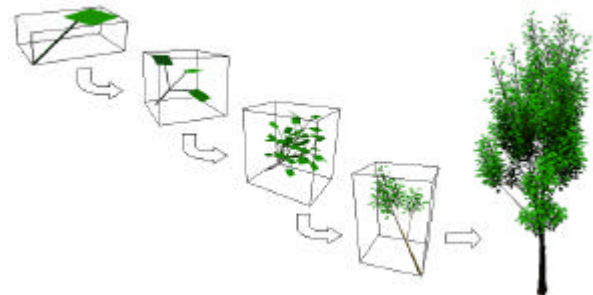


Figure 6. Principe d'instanciation des éléments d'un objet complexe : les éléments simples sont successivement instanci es pour créer l'objet final à l'aide des instances de plus haut niveau.

2.2.3. Rendu au niveau de la surface

Une fois le calcul des échanges d'énergie achev e, le rendu d'image peut être effectu e pour n'importe quelle direction de visée et n'importe quelle résolution spatiale. La méthode de radiosit e présente en effet l'avantage que la solution ne dépend (outre les caractéristiques géométriques et spectrales des polygones) que de la direction d'éclairage, une seule simulation permettant de générer tout un ensemble d'images.

2.3. Couplage atmosphérique

Si besoin (simulations de prises de vue aéroportées ou satellitales), il est possible d'effectuer un couplage avec un modèle atmosphérique prenant en compte les effets de diffusion et d'absorption atmosphériques ainsi que les effets d'environnement (pollution d'un pixel vis e par les pixels voisins). Le modèle atmosphérique d evelopp e

est basé sur la formulation 6S [Vermote *et al.*, 1997]. La figure 7 montre les différents phénomènes de couplage pris en compte : contribution directe de l'atmosphère (a), trajet direct source-pixel-capteur (b), diffusion atmosphérique simple (c), contribution d'un pixel voisin pour des ordres de diffusion simples et multiples (d, e et f).

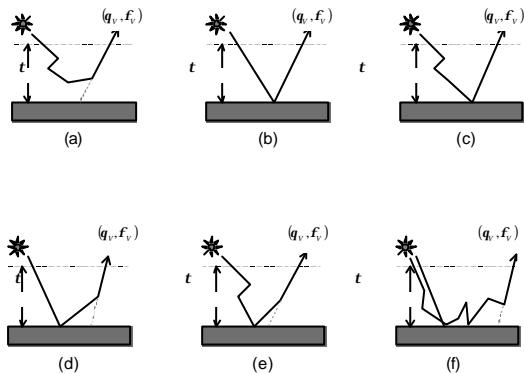


Figure 7. Phénomènes de couplage atmosphérique, d'après Vermote *et al.* [1997].

Les effets d'environnement sont calculés à partir de la réflectance moyenne des pixels situés à une distance r autour du pixel visé, pondérée par une fonction de contribution tenant compte de la diffusion Rayleigh et de la diffusion par les aérosols (cette fonction dépend également de r). La fonction de contribution de l'environnement pouvant être significative jusqu'à une distance de plusieurs kilomètres, c'est à dire à une distance plus grande que la taille des scènes simulées, il est intéressant d'affecter à la région extérieure à la scène simulée une réflectance égale à la réflectance moyenne de la scène traitée par HYEMALIS. Ceci revient ainsi à simuler une zone urbaine entourée d'un tissu urbain de même nature. La figure 8 montre un exemple d'image simulée avec prise en compte des effets atmosphériques et d'environnement jusqu'à 2 km ; on voit nettement la perte de contraste et l'augmentation de la luminance dans le canal bleu.

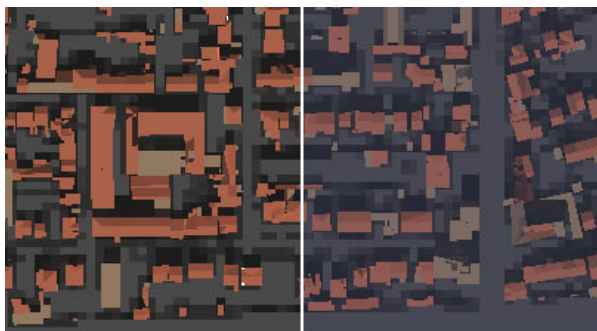


Figure 8. Exemple d'image simulée sans atmosphère (gauche) et avec prise en compte des effets atmosphériques et d'environnement (droite).

2.4. Simulation des images satellitales ou aéroportées

Le dernier module de HYEMALIS permet de simuler la présence d'un capteur en tenant compte des caractéristiques géométriques de l'instrument, des bruits induits par l'électronique du détecteur et de

l'échantillonnage dû au convertisseur analogique/numérique.

2.4.1. Caractéristiques géométriques du capteur

Les caractéristiques géométriques interviennent dans le calcul de la fonction de transfert de modulation du capteur (FTM). Celle-ci dépend du dimensionnement de l'optique, de la taille du détecteur, du temps d'exposition à l'origine de l'effet de filé. La figure 9 présente dans l'espace fréquentiel une FTM caractéristique pouvant être appliquée à une image simulée.

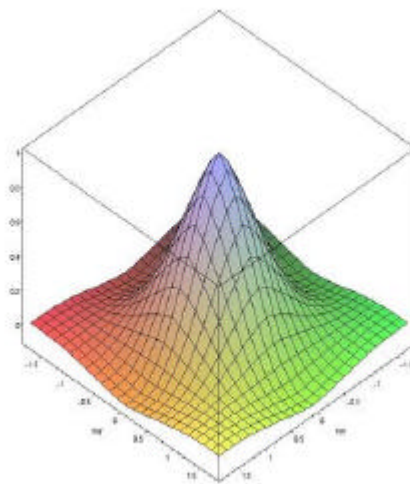


Figure 9. Exemple de FTM d'un capteur.

2.4.2. Bruits électroniques

Les bruits électroniques sont principalement le courant d'obscurité et le bruit de transfert. Ils sont introduits à partir de valeurs réelles déterminées par l'étude des performances des capteurs ou bien estimées sur la base d'un cahier des charges.

2.4.3. Conversion analogique/numérique

La conversion de l'énergie lumineuse reçue en comptes numériques produit une perte d'information (bruit de quantification) directement liée au pas d'échantillonnage et donc à la dynamique du codage et au nombre de bits utilisé pour coder les valeurs.

3. Applications

La précision radiométrique des scènes simulées par HYEMALIS ainsi que la prise en compte des effets géométriques à toutes les échelles permettent de mener des études sur la définition de futures missions, des tests de performance de logiciels et d'algorithmes, ou bien encore des études de signatures spectrales. Ces diverses applications, rencontrées de façon très générale dans les études d'observation de la Terre, trouvent naturellement leur place dans le cadre d'études des milieux urbains avec toutefois des différences liées aux caractéristiques propres à ces milieux (finesse des détails et forte discontinuité du paysage principalement). Des exemples d'études sont proposés dans les paragraphes suivants.

3.1. Aide à la définition de futures missions

La possibilité d'intégrer des caractéristiques de capteurs orbitaux ou aéroportés permet de générer

aisément des images à des résolutions multiples et sous des angles de visée très variés. Ceci permet d'envisager des études où la discrimination d'objets à l'intérieur d'une image (ou d'une série d'images) est partie intégrante d'un projet de mission et ainsi de définir les meilleurs paramètres de prise de vue.

3.1.1. Choix de la résolution

La résolution au sol est un paramètre important qui doit être déterminé en fonction des objectifs définis de la mission. HYEMALIS permettant de simuler des capteurs de n'importe quelle résolution, il est aisé de comparer plusieurs images d'une même scène et de choisir ainsi la résolution la mieux adaptée (figure 10). Pour des études précises de la géométrie de l'habitat, on s'orientera ainsi vers des résolutions d'au moins 2,5 m tandis qu'une résolution de l'ordre de 5 m est suffisante pour caractériser le milieu urbain à l'échelle d'un quartier. Des résolutions supérieures à 10 m ne donnent accès qu'aux plus grandes structures urbaines et sont adaptées à quelques applications spécifiques : calcul des surfaces urbanisées, différenciation de pixels (urbain/végétation) à l'aide de la radiométrie des pixels.



Figure 10. Simulation d'une scène urbaine vue par trois capteurs de résolutions au sol de 2,5 m (haut), 5 m (centre) et 10 m (bas).

3.1.2. Effets des angles de visée

En milieu urbain, l'occurrence d'objets et de faces cachés augmente très rapidement avec l'angle de visée à cause de la forte discontinuité verticale des scènes et de la présence de façades. Cependant, la performance de restitution tridimensionnelle est facilitée par l'obliquité des visées. La recherche d'un compromis est donc importante dans le cadre de la définition d'une mission dont l'un des objectifs est la création de MNE (Modèles Numériques d'Élévation) ou de MNT (Modèles Numériques de Terrain). Grâce à la souplesse d'utilisation de HYEMALIS, des études peuvent ainsi être conduites sur divers types d'urbanisation — habitat bas (zones résidentielles) ou haut (immeubles, quartiers d'affaires, zones industrielles), densités variables... — afin de déterminer en fonction de la nature des scènes qui seront visées par le capteur embarqué les meilleurs paramètres de prise de vue.

Cette problématique se retrouve également dans le cadre d'extraction de façades où il s'agit de définir préalablement un compromis entre bonne visibilité des murs et faible occurrence des faces cachées.

Par ailleurs, la création de mosaïques, technique courante pour générer des images ou des cartes couvrant des zones étendues, pose des problèmes d'appariement d'images car les zones de recouvrement servant à la coregistration des images sont vues sous des angles de visée opposés (figure 11). Entre deux images successives, les détails devant servir à l'appariement sont donc déformés différemment — et ceci d'autant plus que les constructions et les résolutions sont élevées — ce qui rend la superposition des images difficile. La figure 12 montre un exemple sur une même zone de sol où on voit nettement que les détails élevés, notamment les toits, se projettent sur des pixels totalement différents. Des images d'une même région peuvent ainsi être simulées avec HYEMALIS en tenant compte du déplacement de la plateforme entre deux instants d'acquisition. Ceci permet d'évaluer la déformation des détails sur les zones de recouvrement et d'établir soit un compromis entre fréquence d'acquisition, vitesse de déplacement (pour les missions aéroportées) et configuration de prise de vue (notamment le champ de vue...), soit une stratégie sur le traitement des pixels contenus dans la zone de recouvrement (correction des déformations...).

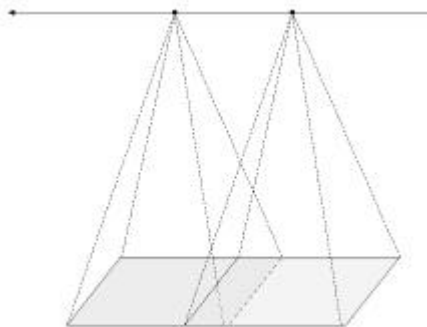


Figure 11. Zone de recouvrement de deux images successives servant à la réalisation d'une mosaïque par appariement.



Figure 12. Exemple d'une zone de recouvrement prise sous des angles de $\pm 20^\circ$.

3.1.3. Aide à la définition des paramètres fréquentiels et temporels

HYEMALIS peut également être utilisé pour la définition des paramètres temporels d'acquisition d'images. La figure 13 montre des images simulées au-dessus de bâtiments, telles qu'on pourrait les acquérir avec un capteur de 1 m de résolution se déplaçant à $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ par rapport au sol (typiquement un avion). Les trois images sont générées pour trois temps de pose différents : la première image est prise instantanément — l'effet de filé n'est pas pris en compte dans la FTM —, les images suivantes étant simulées pour des temps de pose de $1/100^{\text{ème}}$ et $1/50^{\text{ème}}$ de seconde. Deux types d'effet peuvent être observés : la perte de résolution, liée à l'empâtement des pixels adjacents, et l'affaiblissement du contraste. Ces deux effets sont dus à l'intégration temporelle du signal dans une fenêtre dont la largeur dépend à la fois du temps d'acquisition et de la vitesse de déplacement du capteur et qui a pour conséquence la perte des hautes fréquences de l'image. En fonction d'une résolution souhaitée et d'une vitesse de défilement donnée, il est donc possible de définir les temps de pose maximaux. Inversement, pour un capteur dont les temps de pose sont fixés, il est possible de simuler des images qui seraient obtenues pour différentes vitesses de défilement et ainsi déterminer la vitesse maximale de déplacement du capteur par rapport au sol.



Figure 13. Simulation de l'effet de filé pour différents temps de pose et une vitesse de déplacement du capteur de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: image instantanée (haut), $1/100^{\text{ème}}$ s (centre), $1/50^{\text{ème}}$ s (bas).

3.1.4. Définition des autres paramètres instrumentaux

HYEMALIS peut également être utilisé pour définir d'autres paramètres instrumentaux comme par exemple la position des bandes spectrales d'un capteur à partir de l'étude de la dynamique radiométrique d'images simulées, ou bien le choix de bandes spectrales servant à la création de compositions colorées. De même, la simulation d'instruments de niveaux de bruit différents peut permettre d'établir des critères de précision (rapport signal sur bruit) en fonction de la qualité d'image souhaitée.

3.2. Études de performance d'outils logiciels

3.2.1. Restitution d'information 3D

La restitution d'information tridimensionnelle est un aspect très souvent abordé dans l'étude des milieux urbains. La création à l'aide de HYEMALIS de couples stéréographiques pour différents angles de visée peut s'avérer intéressante pour tester des algorithmes de restitution d'information d'altitude (figure 14) : connaissant très précisément les coordonnées des objets composant les scènes, il est aisé de les comparer aux coordonnées estimées par différents moteurs de restitution et ainsi établir des critères de qualité entre ceux-ci. Cette démarche est également applicable à la qualité de reconstruction 3D à partir de couples simulés en introduisant des perturbations *a priori* inconnues comme des vibrations de la plateforme d'acquisition (variations d'attitude) [Duplaquet *et al.*, 2001], ou bien encore à la discrimination entre éléments du sol et éléments du sur-sol (séparation MNT/MNE [Jordan *et al.*, 2002]).

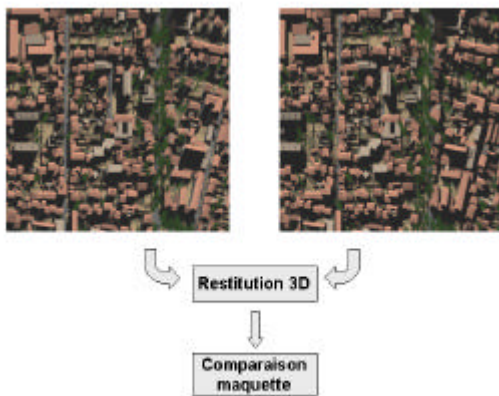


Figure 14. Simulations de couples stéréographiques pour l'étude de performance de logiciels de restitution 3D.

Il est aussi possible de simuler des scènes de complexités variables pour tester des algorithmes de restitution de relief à partir de l'analyse radiométrique des pixels d'une seule image (*shape from shading*) [Hashemi *et al.*, 2002]. Cette technique consiste à calculer le gradient du signal radiométrique autour des objets afin d'estimer leurs hauteurs. Compte tenu de la précision radiométrique de HYEMALIS, des images simulées peuvent donc être utilisées pour tester différentes méthodes. La hauteur d'un bâtiment peut également être estimée en étudiant la longueur de son ombre portée [Hinz *et al.*, 2001]. Cette technique, dite d'extraction monoscopique, consiste à déterminer la hauteur H de l'objet connaissant l'élévation a du soleil

au-dessus de l'horizon et la longueur L de l'ombre de l'objet au sol. La formulation la plus simple se produit dans les conditions d'un sol horizontal et d'un toit parfaitement plat et pour lesquelles on a $L = \frac{H}{\tan a}$

(figure 15). Le problème réside donc — en plus de la performance de l'algorithme de détection des toits utilisé si la méthode est entièrement automatique — dans le choix de la résolution au sol de sorte à pouvoir estimer la longueur des ombres de façon suffisamment précise en fonction de la hauteur moyenne des bâtiments à étudier.

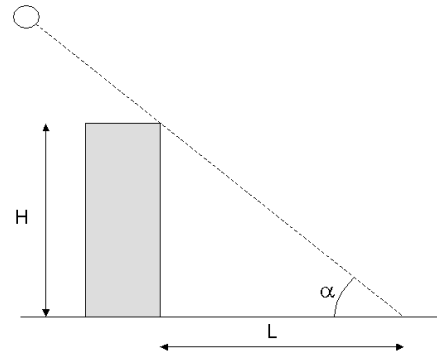


Figure 15. Estimation de la hauteur d'un bâtiment à partir de son ombre portée.

3.2.2. Détection et extraction de contours

De la même manière, des algorithmes de détection de contours, d'extraction et de calcul de surfaces, d'identification d'objets, etc., peuvent être testés sur des images d'une même scène simulées à différentes résolutions dans le but de définir pour chaque algorithme la résolution d'image minimale nécessaire à son fonctionnement nominal.

3.2.3. Modification de l'occupation des sols

Par ailleurs, il est également envisageable de générer un ensemble de scènes identiques à quelques objets près et de tester des algorithmes de détection de changements dans l'occupation des sols : présence d'immeubles, destruction puis reconstruction, tracé de nouvelles routes...

3.2.4. Test d'algorithmes de recalage d'images aéroportées

Les techniques aéroportées permettent d'obtenir des images pour des coûts assez faibles. Cependant, la registration automatique des images est rendue difficile par l'imprécision des données de vol enregistrées (position, cap, roulis et tangage de l'avion) indispensables à la détermination de la configuration de visée du capteur. Grâce à HYEMALIS, il est possible de simuler des images aéroportées prises successivement afin de tester des algorithmes de recalage, notamment leur résistance à l'imprécision des données de vol. Ceci permet d'établir des critères de précision sur ces données, critères d'autant plus importants que le recalage d'images urbaines, généralement de très haute résolution, nécessite une bonne connaissance des conditions de prise de vue.

3.2.5. Classification spectrale

Enfin, l'information radiométrique contenue dans les pixels des images simulées peut également être utilisée pour tester les performances de différents algorithmes de classification. Il est possible par exemple de tester ces méthodes sur des pixels mixtes (contributions de matériaux de différentes natures dans un même pixel) pouvant être obtenus à loisir en modifiant les objets présents dans les scènes simulées et la résolution des images.

3.3. Étude des signatures spectrales

3.3.1. Génération de bases de données de BRDF

Grâce à son module de transfert radiatif performant, HYEMALIS fournit une information radiométrique précise. La réflectance de scènes « types » peut être calculée pour des angles d'illumination et de visée multiples de sorte à générer des fonctions de réflectance bidirectionnelle. Ceci peut être effectué à la fois pour des objets simples (maisons, immeubles...) mais aussi pour des scènes plus complexes (quartier, ville, agglomération) et être réutilisé par exemple dans des simulations de scènes plus grandes qu'il est impossible de traiter avec les machines actuelles.

3.3.2. Inversion de données de réflectance directionnelle

Des données de réflectance bidirectionnelle simulées par HYEMALIS puis regroupées dans des bases de données peuvent être utilisées afin d'inverser des mesures de télédétection et de retrouver des paramètres de structure urbaine : densité d'habitat, type d'habitat (immeubles, maisons...), rapports d'occupation végétation/habitat... La figure 16 présente un exemple de réflectances directionnelles calculées dans le plan solaire au-dessus d'un quartier constitué de bâtiments « types » représentés sur la figure 17. La scène simulée comporte seize blocs d'immeubles de hauteurs égales avec chacun une cour intérieure. Les trois courbes ont été obtenues pour des hauteurs d'immeuble de 10, 20 et 40 m. Ce graphique met en évidence la dépendance de la réflectance directionnelle avec la hauteur des constructions, plus précisément avec le pourcentage des surfaces à l'ombre ou éclairées dues à l'alternance rapide d'éléments hauts (toits) et d'éléments bas (rues) séparés par des éléments verticaux (façades). On peut noter en particulier que la réflectance est d'autant plus faible que les bâtiments sont élevés car la présence d'ombres portées augmente avec la hauteur des constructions. Il est également possible d'observer que la baisse des réflectances à partir du point de *hot spot* (direction de rétrodiffusion, située pour cet exemple à -45°) est régulière pour les bâtiments de 10 m (transition entre ombre et lumière plus lente) alors qu'elle devient plus brutale pour les hauteurs supérieures. Enfin, on peut noter que le point de rétrodiffusion est plus marqué lorsque les immeubles sont bas. Ainsi, des simulations peuvent être menées sur des scènes urbaines de différents types afin de déterminer dans les fonctions de réflectance directionnelle des éléments caractéristiques qui permettent de les identifier.

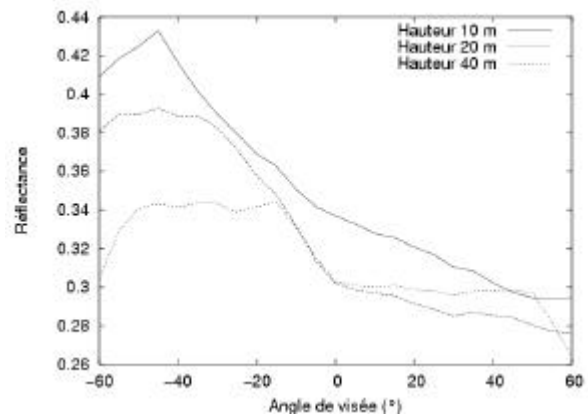


Figure 16. Réflectances directionnelles calculées tous les 5° au-dessus de trois scènes constituées de bâtiments de hauteurs données, pour un angle d'éclairage de -45° .

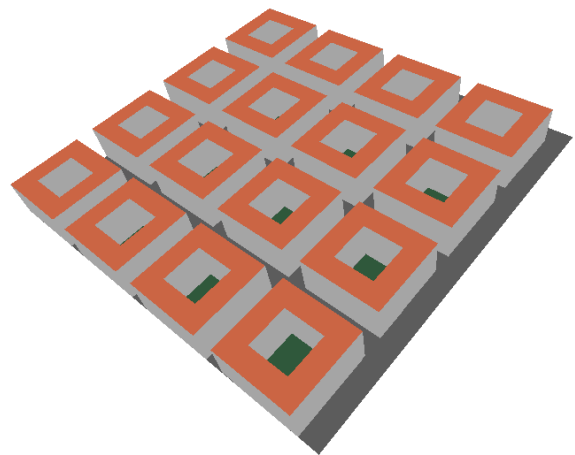


Figure 17. Scène synthétique utilisée pour l'étude de la réflectance directionnelle d'un ensemble d'immeubles.

4. Conclusion

Cet article a présenté HYEMALIS, un atelier de simulation de paysages tridimensionnels complexes permettant de générer des images multidirectionnelles, multispectrales et à n'importe quelle résolution sur l'ensemble du spectre solaire. La précision radiométrique de HYEMALIS, atteinte grâce au calcul du transfert radiatif par la méthode radiositè, permet un rendu physiquement réaliste sur l'ensemble du spectre solaire, et la prise en compte des effets atmosphériques, ainsi que des caractéristiques de capteur, permet de simuler des images acquises par des moyens de télédétection aéroportés ou orbitaux.

Grâce à sa modularité et à sa souplesse d'utilisation, HYEMALIS est un outil opérationnel performant autorisant une grande variété d'études : aide à la définition de missions aéroportées ou spatiales (dimensionnement des capteurs, conditions de prises de vues...), tests et comparaison d'algorithmes ou de chaînes de traitement d'images (restitution d'information), mais également aspects plus exploratoires (génération et analyse de réflectances bidirectionnelles...)

Par ses aspects multi-applicatifs, HYEMALIS s'inscrit donc pleinement dans la thématique de l'étude des

milieux urbains et de leur caractérisation par des moyens de télédétection.

5. Références

Bionatics. 2003. Page web [www.bionatics.com].

Duplaquet M.-L., Le Besnerais G., Foulon G. 2001. Reconstruction 3D régularisée à partir de séquences d'images aériennes. GRETSI'01 Traitement du signal et des images, 10-13 septembre 2001, Toulouse, France.

Gastellu-Etchegorry J.-Ph., Demarez V., Pinel V., Zagolski F. 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. Remote sensing of environment, 53: 131-156.

Gershbein R., Schroeder P., Hanrahan P. 1994. Textures and Radiosity: Controlling Emission and Reflection from Texture Maps. Computer Graphics Proceedings, annual conference series (ACM Siggraph'94).

Hashemi L., Azizi A., Hashemi M. H. 2002. Implementation of a single photo shape from shading method for the automatic DTM generation. Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002, September 9-13, Graz, Austria.

Hinz S., Kurz F., Baumgartner A., Wasmeier P. 2001. The role of shadow for 3D object reconstruction from monocular images. In: Optical 3-D Measurement Techniques V, Wien, October 4-10 2001. Eds.: Gruen, A.; Kahmen, H.. Institute of Geodesy and Geophysics: Vienna University of Technology. pp. 354-363.

Jacquemoud S., Baret F. 1990. Prospect: A model of leaf optical properties spectra. Remote sensing of environment, 34:75-91.

Jordan M., Cord M., Belli T. 2002. Building detection from high resolution digital elevation models in urban areas. Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002, September 9-13, Graz, Austria.

Perez R., Seals R, Michalsky J. 1993. All-weather model for sky luminance distribution — preliminary configuration and validation. Solar energy, volume 50, numéro 3, pp. 235-245.

Price J.C. 1990. On the information content of soil reflectance spectra. Remote sensing of environment, 33:113-121.

Soler C., Sillion F., Blaise F., de Reffye Ph.. 2003. An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models. ACM transactions on graphics, 2(22), 32 pages.

Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). 6S user guide version 2.