Université Fédérale
Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :
Lucas Landier
le Lundi 02 Juillet 2018

Titre :

Modélisation 3D du Bilan Radiatif des Milieux Urbains par Inversion d'Images Satellites en Cartes de Réflectance et de Température des Matériaux Urbains

---

École doctorale et discipline ou spécialité :
ED SDU2E : Surfaces et interfaces continentales, Hydrologie

Unité de recherche :
CESBIO UMR 5126

Directeur/trice(s) de Thèse :
Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry
Ahmad Al Bitar

Jury :

Mme Marjorie MUSY,	Directeur de Recherche CEREMA,	Rapporteur
M. Xavier BRIOTTET,	Directeur de Recherche ONERA,	Rapporteur
Mme Christiane WEBER,	Directeur de Recherche CNRS,	Examinateur
Mme Aude LEMONSU,	Chargé de Recherche CNRS,	Examinateur
M. Abdelaziz KALLEL,	Professeur CRNS,	Examinateur
M. Philippe MAISONGRANDE,	Directeur de Recherche CNES,	Examinateur

Table des matières

Table des Figures 7
Acronymes 13
Résumé 15
Abstract 17
I. Introduction 19
1. Contexte 19
2. Le bilan d'énergie 20
2.1. Processus mis en jeu 20
2.2. Modèles de bilan d'énergie 23
3. Le transfert radiatif 29
3.1. Processus et grandeurs du transfert radiatif 29
3.2 Les modèles de télédétection 33
II. Modélisation 3D du Transfert Radiatif et Données Utilisées 41
1. Présentation 41
1. Le Modèle DART 42
1.1. Introduction 42
1.2. La Représentation du Paysage 44
1.3. Modélisation du transfert radiatif 56
2. Données de Télédétection 60
2.1. Présentation 60
2.2. Capteurs Satellitaires Utilisés 62
3. Données supplémentaires 70
3.1. Modèles numériques de terrain 70
3.2. Représentation 3D des bâtiments 72
3.3. Végétation 73
3.4. Données atmosphériques 74
III. Calcul de Q* à partir de données satellites 77
1. Introduction 77
2. Méthode itérative d'inversion des propriétés des matériaux de surface 78
2.1. Présentation générale 78
2.2. Inversion des propriétés optiques dans les courtes longueurs d'onde 81
2.3. Adaptation au domaine thermique 97
3. Calcul de Q* au passage du satellite 101
3.1. Calcul du bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde 101
3.2. Calcul du bilan radiatif dans le domaine thermique 105
4. Création de séries temporelles 106
4.1. Séries temporelles dans les courtes longueurs d'onde 106

4.2. Adaptation au domaine thermique 110
IV. Résultats, validation, et études de sensibilité 113
1. Introduction 113
2. Les sites d'application de l'étude 113
2.1. Bâle 114
2.2. Londres 117
2.3. Héraklion 119
3. La simulation d'images satellites 121
4. Cartes de $Q*$ au passage du satellite 127
5. Séries temporelles 132
6. Etudes de sensibilité 138
6.1. Impact des itérations 138
6.2. Impact des murs 142
6.3. Impact des mises à jour de propriétés optiques 144
6.4. Impact de la représentation 3D 146
7. Utilisation des résultats obtenus par des études extérieures 147
7.1. Utilisation des résultats dans le projet URBANFLUXES 147
7.2. Utilisation des résultats dans le modèle DART-EB 164
V. Conclusion et Perspectives 169
1. Conclusion 169
2. Perspectives 173
Bibliographie 175
Annexes 185
Annexe A – Convert a raster DEM to OBJ format 186
Annexe B – Script convertDEMtoOBJ.py 194
Annexe C – Références de l'article 'Urban Energy Exchanges Monitoring from Space' 198

Table des Figures

FIGURE 1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES FLUX DU BILAN D'ENERGIE D'UN ELEMENT DE VOLUME URBAIN. LE BILAN D'ENERGIE PAR UNITE DE SURFACE DU HAUT DU VOLUME EST $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$ (W/M^2), AVEC Q* LE BILAN RADIATIF NET, Q_F LE FLUX DE CHALEUR ANTHROPOGENIQUE, Q_H LE FLUX TURBULENT DE CHALEUR SENSIBLE, Q_E LE FLUX TURBULENT DE CHALEUR LATENTE, ΔQ_S LE FLUX NET DE STOCKAGE DE LA CHALEUR DANS LE VOLUME ET ΔQ_A LE FLUX NET D'ADVECTION. LES FLECHES INDIQUENT LA DIRECTION SELON LAQUELLE LES FLUX SONT SUPPOSES POSITIFS. ADAPTE DE CHRYSOULAKIS ET AL. (2018). 21

FIGURE 2 : LES 7 TYPES D'UTILISATION DU SOL CONSIDERES PAR LE MODELE SUEWS. PAVED - PAVE (IMPERMEABLE) ; BUILDINGS - BATIMENTS ; EVERGREEN TREES - ARBRES TOUJOURS VERTS ; DECIDUOUS TREES – ARBRES QUI PERDENT LEURS FEUILLES ; GRASS – HERBE ; BARE SOIL – SOL NU ; WATER – EAU. E, IE, P SONT LIES AU FLUX HYDRIQUE. SOURCE (WARD ET AL., 2016A) 25

FIGURE 3 : SIMULATIONS DART DE PAYSAGES URBAIN (HAUT) ET NATUREL (BAS) SCHEMATIQUES. LE PAYSAGE NATUREL EST UN CHAMP DE MAÏS (LAI=1.2). MAQUETTES DE PAYSAGE (A, D). IMAGES EN REFLECTANCE AU NADIR (B, D). REFLECTANCE DIRECTIONNELLE (C, F). L'ALBEDO DE TOUT MATERIAU EST 0.40 : $\rho_{FEUILLE} = \tau_{FEUILLE} = 0.2$ ET $\rho_{SOL} = \rho_{MUR} = 0.4$. L'ATMOSPHERE EST DEFINIE PAR LE MODELE DE GAZ "USSTD" ET LE MODELE D'AEROSOLS "RURAL 23KM", POUR UNE LONGUEUR D'ONDE DE 0.56µM. L'ANGLE ZENITHAL SOLAIRE EST 60°. LA REFLECTANCE VARIE ENTRE 0.10 ET 0.43 POUR LE PAYSAGE URBAIN ET ENTRE 0.15 ET 0.26 POUR LE CHAMP DE MAÏS. 26

FIGURE 4 : VUE SCHEMATIQUE DE LA CONFIGURATION A COUCHE UNIQUE DU MODELE TEB. LES LIGNES EN POINTILLE REPRESENTENT L'INTERACTION DES SURFACES AVEC LE MODELE ATMOSPHERIQUE (SOURCE : MASSON, 2006). 27

FIGURE 5 : ILLUSTRATION DE L'ECLAIREMENT (GAUCHE) ET DE L'EXITANCE (DROITE) D'UNE SURFACE. 30

FIGURE 6 : DIFFERENTS TYPES DE REFLECTANCE (DIRECTE D, CONIQUE C, HEMISPHERIQUE H) 31

FIGURE 7 : A) MAQUETTE DE PAYSAGE (3 ARBRES, 1 MAISON, 1 LAC) ET SIMULATIONS DART: B) COMPOSITION COLOREE ROUGE / VERT / BLEU. C) REFLECTANCE 1D DANS LE VERT SELON L'ANGLE ZENITHAL DE VISEE DANS LE PLAN SOLAIRE. L'ANGLE ZENITHAL EST NEGATIF POUR LES DIRECTIONS SOLAIRES ARRIERE. D) REFLECTANCE DIRECTIONNELLE DANS LE VERT. LES DEUX MAXIMA DE LA REFLECTANCE CORRESPONDENT AUX CONFIGURATIONS "SPECULAIRE" ET "HOT SPOT". LE DISQUE NOIR INDIQUE LA DIRECTION SOLAIRE. LA DISTANCE AU CENTRE INDIQUE L'ANGLE ZENITHAL DE LA DIRECTION DE DIFFUSION. L'ORIGINE DE L'ANGLE AZIMUTAL EST L'AXE OX. ANGLE ZENITHAL SOLAIRE DE 30° ET AZIMUTAL DE 90°. 31

FIGURE 8 : REPRESENTATION DES DIRECTIONS UTILISEE PAR LE MODELE SAIL. UNE DIRECTION SOLAIRE, UNE D'OBSERVATION, ET DEUX VERTICALES POUR LES FLUX ASCENDANTS ET DESCENDANTS (SOURCE : VERHOEF ET AL., 2007) 37

FIGURE 9 : REPRESENTATION D'UN JEU DE DIRECTIONS UTILISE PAR LE MODELE DART. LA SCENE OBSERVEE EST AU CENTRE DE LA SPHERE DE DIRECTIONS, PARTITIONNEE PAR LES ANGLES SOLIDES DE CHAQUE DIRECTION. 5 DIRECTIONS SONT AJOUTEES A CETTE PARTITION, REPRESENTEES PAR LES 5 « CARRES » PLUS PETITS. (SOURCE : GASTELLU-ETCHEGORRY, 2018) 38

*FIGURE 2.1 : SCHEMA DU SYSTEME TERRE-ATMOSPHERE SIMULE DANS DART. **IL** COMPREN**D** LA MAQUETTE TERRESTRE ET L'ATMOSPHERE.* 44

*FIGURE 2.2 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTS MODES DE **SUIVI DE RAYONS** AUX LIMITES DE LA SCENE : MODE MAQUETTE REPETITIVE (HAUT), PENTE INFINIE (MILIEU), SCENE ISOLEE (BAS). LES FLECHES REPRESENTENT LES RAYONS DESCENDANTS LORS DE L'ILLUMINATION (A) OU MONTANT LORS DE LA CREATION D'IMAGE (B)* 46

*FIGURE 2.3 : IMAGES SIMULEES DART CORRESPONDANT AUX **TROIS** MODES DE CONDITIONS AUX LIMITES, POUR UNE SCENE COMPOSEE DE 4 ARBRES SUR UN SOL EN PENTE REGULIERE DE 25°. SCENE REPETITIVE (GAUCHE), PENTE INFINIE (MILIEU), SCENE ISOLEE (DROITE). LA MAQUETTE EST DUPLIQUEE 4 FOIS DANS CHAQUE CAS. SIMULATION REALISEE POUR UNE DIRECTION SOLAIRE (θ, ϕ) = (20°,180°) ET UNE DIRECTION DE VISEE DU CAPTEUR (30°,200°), ET UNE RESOLUTION SPATIALE DE 2.5M* 47

FIGURE 2.4 : ARBRE AVEC COURONNE ELLIPSOÏDALE ET DENSITE VOLUMIQUE CONSTANTE (GAUCHE) ET SA DISCRETISATION EN CELLULES TURBIDES (DROITE). LA CLARTE DU VERT DEPEND DE LA DENSITE VOLUMIQUE FOLIAIRE, AJUSTEE SELON LA PROPORTION DE LA CELLULE OCCUPEE PAR DE LA VEGETATION. 48

FIGURE 2.5 : FORMES DE COURONNES D'ARBRES CREES PAR DART. AFFICHAGE PAR L'OUTIL ''VUE 3D'' DE DART. LA RESOLUTION SPATIALE DES CELLULES EST DE 25CM. LES COURONNES SONT REMPLIES DE MATIERE TURBIDE. 49

FIGURE 2.6 : BATIMENTS CREES PAR DART. A) GEOMETRIE D'UN BATIMENT GENERIQUE. B) AFFICHAGE 3D D'UNE MAISON CLASSIQUE : LES 4 MURS ONT LA MEME HAUTEUR ET LE TOIT EST DEFINI PAR 2 POINTS. 49

Figure 2.7 : Exemples d'objets naturels et artificiels importes par DART, modelises par des triangles : (a) Pousse de ble, (b) Plant de maïs, (c) canopee de riz, (d) Plant de tournesol, (e) Arbre cerisier, (f) Avion 51
Figure 2.8 : Illustration de la transformation du feuillage en matiere turbide (troncs en triangles) pour un champ d'orangers simule avec une resolution spatiale de 5cm. (A) Scene 3D simulee sans conversion, (B) Image DART resultante en composition coloree, (C) Scene 3D apres conversion du feuillage en matiere turbide, (D) Image DART resultante en composition coloree 51
Figure 2.9 : Diagrammes 2D des reflectances pour differents modeles de reflectance [-] en fonction de la direction de visee ΩV [°]. La direction d'illumination ΩS [°] est fixee et representee par le point noir. (A) Lambertien, $\rho = 0.5$ [-]. (B) Lambertien + speculaire, $\rho = 0.5,\ \alpha = 0.8,\ n = 1.4,\ A = 900$ [-]. (C) Hapke, $\rho = 0.5,\ \alpha = 0.2,\ n = 1.4,\ A = 1000$ [-], parametres Hapke egaux a 1 [-]. (D) RPV, $\rho 0 = 0.5,\ \rho c = 0.7,\ \kappa = 1,\ \Theta = 0.065$ [-]. 53
Figure 2.10 : Exemple d'impact de l'atmosphere sur la mesure de reflectance. Spectres de reflectance de champ de maïs simules pour un capteur au bas de l'atmosphere (bleu) et a 3500m d'altitude (vert). 56
Figure 2.11 : Illustration de la definition d'une direction dans DART 57
Figure 2.12 : Illustration des 5 etapes de calcul du transfert de bilan radiatif d'un paysage par DART 58
Figure 2.13 : Composition coloree RGB utilisant les bandes 2, 3, et 4 du capteur S2A MSI, corrigees des effets atmospheriques, pour la ville d'Heraklion (Crete), le 29 Janvier 2016. 63
Figure 2.14 : Comparaisons des bandes spectrales des capteurs spatiaux Sentinel-2 MSI, Landsat-7 ETM+, et Landsat-8 OLI/TIRS (Source : NASA) 64
Figure 2.15 : A) Image de temperature de brillance du canal S7 de SRSTR au nadir, a 1km de resolution, le 20 Janvier 2017; B) Zoom sur la ville de Bale en Suisse ; C) Carte de temperature de surface calculee par une methode de spatial-spectral unmixing, a 100m de resolution, avec un masque de nuages. 66
Figure 2.16 : Composition coloree RGB utilisant les bandes 2, 3, et 4 du capteur LS8 OLI, corrigees des effets atmospheriques, pour la ville de Londres (Angleterre), le 9 Avril 2015 68
Figure 2.17 : Extrait du MNT de Londres sous forme d'image raster, en metres au-dessus du niveau de la mer [masl], avec une resolution spatiale de 0.7m 70
*Figure 2.18 : Illustration de la vectorisation d'un MNT raster au format *.obj, pour une partie de la ville de Londres. A) Visualisation de l'objet avec le logiciel Blender. B) Zoom sur l'encadre rouge, avec affichage des facettes generees automatiquement. C) Objet complet apres simplification des facettes* 71
Figure 2.19 : Visualisation 3D Blender du MNT de la ville de Bale. A) Visualisation globale. B) Visualisation des facettes du groupe 'sol'. C) Visualisation des facettes du groupe 'riviere' 72
Figure 2.20 : Image nadir de luminance thermique simulee par DART sur une partie de la ville de Bale, pour la bande spectrale [10.60 11.19 μm] a 2,50m de resolution. Tous les toits ont la meme propriete ($\epsilon = 0.99, T = 300K$)? Tous les autres elements ont une emissivite nulle. 73
Figure 2.21 : Visualisation 3D de l'association MNT+Batiments avec le logiciel Blender, pour la ville de Bale. Les differents groupes sont representes par des couleurs differentes. Vue au nadir (A) et oblique (B). 73
Figure 2.22 : Image raster de modele numerique de surface pour les canopees vegetales dans une partie de la ville de Londres. Les unites sont en metres au-dessus du niveau du sol (meters above ground level) [magl] 74
Figure 2.23 : Visualisation dans l'outil vue 3D de DART des paysages complets (relief + batiments + vegetation) pour les villes de Londres (A) et Bale (B) 74
Figure 2.24 : Spectre d'eclairement simule au-dessus de Bale pour le 24 Juin 2016, a 11h05, en utilisant 410 bandes spectrales de 5nm de largeur de bande 75

Figure 3.1 : Methode de cartographie des reflectances et temperatures des materiaux urbains par comparaison iterative d'images DART et satellite. DART calcule $Qsw*$ a partir de ces proprietes et de l'eclairement local. Une methode similaire permet de calculer la distribution spatiale des temperatures, et ainsi obtenir $Qlw*$. 78
Figure 3.2 : Vues nadir (gauche) et oblique (droite) de la base de donnees geometrique de la ville de Bale dans l'outil "Vue 3D" de DART. Chaque groupe d'element urbain est distingue par une couleur differente. 79
Figure 3.3 : Image "reflectance nadir" DART simulee avec des reflectances de materiau spatialement constantes. Bande NIR (865nm) de Sentinel-2. 24/06/2016. Resolution spatiale de 5m. 79

Figure 3.4 : Images "reflectance nadir" DART (gauche) et Sentinel-2 corrigee des effets atmospheriques (droite) acquise le 24 Juin 2016. Bande NIR (865nm). Resolution spatiale de 20m. 80
Figure 3.5 : Exemples d'images DART de "reflectance nadir" par materiau a 865nm et 5m de resolution. Ville de Bale. Conditions d'acquisition de l'image Sentinel-2 du 24.06.2016. A : groupe 'sol' ; B : groupe 'riviere' ; C : groupe 'toits' ; D : groupe 'vegetation'. 80
Figure 3.6 : Carte d'epaisseur optique des aerosols (a 550nm) obtenue lors de la correction atmospherique par le DLR de l'image Landsat-8 de la ville de Bale acquise le 21.08.2015. Resolution : 100m. Source : DLR. 81
Figure 3.7 : Eclairement dans les grandes et courtes longueurs d'onde mesure par une tour de flux a 38m au-dessus de la surface au centre de Bale (Knlingelbergstrasse). Haut : bilan radiatif ainsi qu' eclairement et exitance dans les courtes et grandes longueurs d'onde [W/m²]. Bas : eclairements solaires directs et diffus dans les courtes longueurs d'onde, a differentes altitudes [W/m²]. Les donnees sont agregees a des intervalles de temps de 30 minutes, pour la semaine du 5 Avril au 11 Avril 2018. (Source : Universite de Bale - https://mcr.unibas.ch/dolueg2/) 82
Figure 3.8 : Exemple de jeu de points de controle utilises pour geo-referencer une image DART de la ville de Bale. Les points sont selectionnes sur une image DART a 2.5m de resolution, simulee sans vegetation. 85
Figure 3.9 : Image DART (Δr=2.5m) superposee a une image Landsat-8 (Δr=30m) de la ville de Bale. 85
Figure 3.10 : Pixel schematique contenant les types d'elements urbains "sol" (beige), "toit" (gris) et "arbre" (vert) de luminances respectives $L\Delta\lambda, sol$, $L\Delta\lambda, toit$ et $L\Delta\lambda, arbre$. Pour tout pixel, DART simule la luminance totale $LDART, \Delta\lambda$ et les luminances par type d'element (i.e. $LDART, \Delta\lambda, sol$, $LDART, \Delta\lambda, toit$, $LDART, \Delta\lambda, arbre$) 87
Figure 3.11 : Images DART de paysage schematique. a) Scene 3D DART, a la resolution spatiale 10mx10mx5m, comprenant 3 arbres et 1 batiment, simules avec des surfaces triangulaires. b) Composition coloree DART au nadir. c) Composition coloree DART pour un angle zenithal de visee de 60°. 88
Figure 3.12 : Maille d'analyse u (4 pixels) de l'algorithme d'inversion. Le systeme a autant d'equations que d'inconnues: le sol (beige), la vegetation (vert), les toits (gris), et la surface d'eau (bleu). 89
Figure 3.13 : Representation de schematique de systeme insoluble pour l'algorithme d'inversion. Comme dans la Figure 3.12, quatre elements sont presents : sol (beige), vegetation (vert), toit (gris), et riviere (bleu). 90
Figure 3.14 : Schema illustrant deux mailles d'analyse La maille encadree en jaune est la maille de la Figure 3.13. La maille encadree en rouge est la maille "jaune" decalee d'un pixel selon l'axe horizontal. 90
Figure 3.15 : Schema presentant deux grilles d'analyse de mailles de 2x2 pixels et une grille de de maille de 3x3 pixels. Les elements presents sont le sol (beige), la vegetation (vert), le toit (gris), et l'eau (bleu). Le premier groupe de pixel considere est encadre en pointilles jaune, le deuxieme en pointilles rouge, et le troisieme en pointilles violets. 91
Figure 3.16 : Carte de facteurs optiques du sol derivee de la comparaison d'images de luminance DART et Sentinel-2 du 24 Juin 2016, dans le proche infrarouge (865nm), a 20m de resolution..... 91
Figure 3.17 : Carte de facteurs multiplicatifs (PIR: 865nm) du sol a 5m de resolution, derivee d'image Sentinel-2 (24/06/2016). 92
Figure 3.18 : Illustration de la methode de Newton pour le cas d'une fonction de luminance donnee (ligne bleue continue) en fonction de la reflectance. La solution retenue $\rho 2$ correspond a l'intersection de la luminance satellite Ls (pointilles rouges) et de la tangente (pointilles verts) calculee a partir des iterations precedentes representees ici par les indices 0 et 1. 94
Figure 3.19 : Reflectance DART d'un pixel pur de vegetation en fonction de l'albedo foliaire. 96
Figure 3.20 : Exemple de consideration explicite des termes d'ordre superieur pour l'inversion de l'albedo foliaire ω, a l'aide des resultats obtenus dans les iterations precedentes. 97
Figure 3.21 : Cartes de σn de 3 elements (A : 'sol' ; B : 'toits' ; C : 'eau') de la ville d'Heraklion, pour la direction verticale, a 30m de resolution. Les valeurs des pixels vont de 0 (element n non visible) a 1 (n est le seul element visible) 99
Figure 3.22 : Carte de temperatures de materiaux derivees d'une image de luminance Landsat-8 (bande 10), pour la ville de Bale le 30 Aout 2015, au nadir. Gauche : carte de temperature du sol. Droite : carte de temperature de la riviere. 101
Figure 3.23 : Albedo spectral d'un pixel DART pour 6 bandes de Sentinel-2 (2,3,4, 8a, 11, 12). 102
Figure 3.24 : Carte d'albedo spectral a 665nm et 20m de resolution, simulee par DART a partir de l'image B4 de Sentinel-2 du 24.06.2016 a 10:37. La Figure 3.23 affiche l'albedo spectral du pixel "rouge". 102

Figure 3.25 : Spectre d'eclairement BOA simule par DART pour la configuration atmospherique du 24.06.2016 a 10:37 a Bale (Suisse). Simulation realisee avec 410 bandes spectrales de 5nm de largeur, entre 0.350μm et 2.4 μm 103
Figure 3.26 : Carte d'albedo de Bale, a 100m de resolution (grille URBANFLUXES), derivee de l'image Sentinel-2 du 24 Juin 2016 a 10h37. 104
Figure 3.27 : Carte de $QSW * W.m-2$ pour la ville de Bale le 24.06.2016 a 10h37, a 100m de resolution. Le point rouge represente l'emplacement de la tour de flux BKLI. 104
Figure 3.28 : Carte $Qlw * W.m-2$ de la ville de Bale le 30.08.2015 a 10h16, a 100m de resolution. 105
Figure 3.29 : Carte de $Q * W.m-2$ pour la ville de Bale le 30.08.2015 a 10h16, a 100m de resolution. 106
Figure 3.30 : Discretisation des directions solaires possibles pour la ville de Bale. La courbe bleue indique l'evolution de l'angle solaire durant le solstice d'hiver, et la courbe rouge durant le solstice d'ete. Les points rouges representent l'echantillonnage choisi pour discretiser les angles possibles. 108
Figure 3.31 : Eclairement spectral pour un angle zenithal solaire de 25°. Bleu : eclairement total. Rouge : eclairement direct. Jaune : eclairement diffus. 108
Figure 3.32 : Eclairement spectral pour un angle zenithal solaire de 80°. Bleu : eclairement total. Rouge : eclairement direct. Jaune : eclairement diffus. 108
Figure 3.33 : Cartes d'emissivite de surface (gauche) et de temperature de surface (droite), a 100m de resolution, le 24.06.2016 (a 11h05 pour la temperature) pour la ville de Bale (Source : FORTH) 110

Figure 4.1 : Les 3 sites urbains etudies. A : Bale (Suisse) ; B : Londres (Royaume-Uni) ; C : Heraklion (Grece) 114
Figure 4.2 : Grille (vert) correspondant aux cartes de bilan radiatif de la ville de Bale, a 100m de resolution. L'image en fond est une composition coloree Sentinel-2 du 24.06.2016, a 20m de resolution. 115
Figure 4.3 : Maquette DART de la ville de Bale, en vue oblique dans l'outil de visualisation 3D de DART. En vert la vegetation, en gris fonce les toits, en gris clair les murs, en bleu l'eau, et en beige le relief. 115
Figure 4.4 : Vue aerienne (a) de la maquette 3D de la ville de Bale, visualisee avec l'outil 'vue 3D' de DART. Le cercle bleu indique une zone batie ou les batiments sont absents dans la maquette. Le points rouge et jaune indiquent respectivement l'emplacement des tours de flux BKLI et BAES. A droite : zoom de la representation sur des elements de structures de toit. 116
Figure 4.5 : Carte de temperature de surface au 30.08.2015 a 11 :16 (UTC+1) avec indication des zones qui contribuent aux mesures des tours BKLI et BAES. Le pixel central (gris fonce) contribue a 20% de la mesure et les pixels adjacents (gris clair) a 10%. Les temperatures varient de 295K (bleu) a 320K (jaune). 117
Figure 4.6 : Grille (vert) des cartes de bilan radiatif de Londres, a 100m de resolution. L'image en fond est une composition coloree Sentinel-2 du 06.06.2016, a 20m de resolution. Les points rouges et jaunes indiquent respectivement les points de mesures KSSW et IMU 118
Figure 4.7 : Maquette 3D DART de Londres, en vue oblique affichee avec l'outil de visualisation 3D de DART. En vert la vegetation, en gris fonce les toits, en gris clair les murs, en bleu l'eau, et en beige le relief. 118
Figure 4.8 : Grille des cartes de bilan radiatif de la ville d'Heraklion, a 100m de resolution. L'image en fond est une composition coloree Sentinel-2 du 17.06.2016, a 20m de resolution. Le point rouge indique la tour de flux (UF-HER-13) utilisee pour les mesures d'eclairement. 119
Figure 4.9 : Maquette DART de la ville d'Heraklion, en vue oblique, affichee par l'outil de visualisation 3D de DART. En vert la vegetation, en gris fonce les batiments, en bleu l'eau, et en beige le relief. En haut : vue globale. En bas : zoom sur le centre-ville. 120
Figure 4.10 : Images de reflectance DART (gauche) et Landsat-8 (droite) du 30.08.2015, a 30m de resolution. Bande B5 : 864.6nm. L'image Landsat-8 est corrigee des effets atmospheriques. 121
Figure 4.11 : Images de reflectance DART (gauche) et Sentinel-2 (droite) du 24.06.2016, a 20m de resolution. Bande 8a (865nm) de Sentinel 2. L'image Sentinel-2 est corrigee des effets atmospheriques. 122
Figure 4.12 : Carte d'erreur relative entre une image de reference Sentinel-2 du 24.06.2016 et une image simulee par DART pour la bande B8a su capteur Sentinel-2 (655nm) 122
Figure 4.13 : Haut : Image Landsat-8 de Londres au 02.10.2015, a 30m de resolution, avec masque de nuages. Bande 5 (864.6nm) Bas : image DART correspondante apres inversion des reflectances de materiau. 123

Figure 4.14 : Haut : image Landsat-8 de la ville d'Heraklion au 13.07.2016 a 30m de resolution, avec masque de nuages. Bande 5 (864.6nm) Bas : image DART obtenue apres inversion des reflectances de materiau. 124
Figure 4.15 : Bas : image Landsat-8 de la ville d'Heraklion au 29.07.2016, corrigee des effets atmospheriques. Bande 10 (10895nm). 30m de resolution. Haut : image DART obtenue par inversion des temperatures. 125
Figure 4.16 : Carte d'erreur relative entre une image de reference Landsat-8 du 29.07.2016 et une image DART pour la bande B10 du capteur Landsat-8 (10895nm) 126
Figure 4.17 : Droite : image Landsat-8 de Bale au 30.08.2015. Bande 10 (10895nm) a 30m de resolution, corrigee des effets atmospheriques. Gauche : image DART correspondante apres inversion de la temperature. 126
Figure 4.18 : Droite : image Landsat-8 de Londres du 02.10.2015, corrigee des effets atmospheriques a 30m de resolution. Bande 10 (10895nm). Gauche : image DART apres inversion des temperatures. Les nuages sont masques dans les deux images. 126
Figure 4.19 : Cartes d'erreurs relatives des images DART obtenues par inversion de l'image Landsat-8 dans la bande 10. Gauche : Bale au 30.08.2015. Droite : Londres au 02.10.2015. 127
Figure 4.20 : Cartes simulees d'albedo (en haut), d'exitance thermique (au milieu), et de bilan radiatif (en bas) pour la ville d'Heraklion, a partir d'une image Landsat-8 du 29.07.2016 a 8h53, a 100m de resolution, corrigee des effets atmospheriques. 128
Figure 4.21 : Cartes d'albedo (haut), d'exitance thermique (milieu), et de bilan radiatif (bas) de Londres, derivees d'une image Landsat-8 du 08.07.2016 a 11h00, a 100m de resolution. Masques de nuages en rouge. 129
Figure 4.22 : Cartes simulees d'albedo (haut), d'exitance thermique (milieu), et de bilan radiatif (bas) de Bale, a partir d'une image Landsat-7 du 28.03.2014 a 10h13 et d'une image ASTER du 28.03.2014 a 10h40, a 100m de resolution, corrigee des effets atmospheriques. 130
Figure 4.23 : Cartes d'albedo des 3 villes, a 100m de resolution, derivees d'images Sentinel-2 du 05.05.2016 a 10h30 pour Bale, du 29.01.2016 a 09h04 pour Londres, et du 04.05.2016 a 10h59 pour Heraklion, avec un masque couvrant les nuages. 131
Figure 4.24 : Evolution temporelle du bilan radiatif en un point donne par site urbain, durant l'annee 2016. 134
Figure 4.25 : Correlogrammes de comparaison des valeurs de $Q*$ simulees et mesurees par la tour BKLI de la ville de Bale, pour la serie MODIS-A (a gauche) et MODIS-T (a droite). 135
Figure 4.26 : Correlogrammes de comparaison entre les valeurs simulees et mesurees de $Q*$ au niveau de la tour de flux KSSW, dans la ville de Londres, pour la serie MODIS-A (a gauche) et MODIS-T (a droite). 135
Figure 4.27 : Correlogrammes de comparaison entre les valeurs de $QSW*$ simulees et mesurees au niveau de la tour de flux BKLI de la ville de Bale, pour la serie MODIS-A (a gauche) et MODIS-T (a droite). 136
Figure 4.28 : Correlogrammes de comparaison entre les valeurs de $QSW*$ simulees et mesurees au niveau de la tour de flux KSSW de Londres, pour la serie MODIS-A (a gauche) et MODIS-T (a droite). 136
Figure 4.29 : Correlogrammes de comparaison entre les valeurs de $QLW*$ simulees et mesurees par la tour de flux BKLI de la ville de Bale, pour la serie MODIS-A (a gauche) et MODIS-T (a droite) 137
Figure 4.30 : Correlogrammes de comparaison entre les valeurs de $Qlw*$ simulees et mesurees au niveau de la tour KSSW de la ville de Londres, pour la serie MODIS-A (a gauche) et MODIS-T (a droite) 137
Figure 4.31 : Correlogrammes de comparaison entre les valeurs de $Q*$ simulees et mesurees au niveau des tours de flux BKLI a Bale (droite) et KSSW a Londres (gauche), pour la serie d'acquisition de Sentinel-3 138
Figure 4.32 : Calibration iterative de DART. (a) Image Sentinel-2 du 24.06.2016 (B8a-865nm) a 20m de resolution. (b) Image de reflectance simulee DART sans calibration a 20m de resolution. (c) Image DART apres 1 iteration (d) 2 iterations (e) 3 iterations. 139
Figure 4.33 : Comparaison des pixels de reflectance DART et Sentinel-2 (B8a, 865nm ; 24.06.2016) a differentes etapes de l'inversion. En haut a gauche : sans calibration, en haut a droite : fin de la premiere etape de comparaison, en bas a gauche, fin de l'iteration 2, en bas a droite : fin de l'iteration 3. 140
Figure 4.34 : Evolution de la reflectance DART (croix) et Sentinel-2 (ronds) de pixels correspondant a 3 types de couvert urbain. En haut a gauche : vegetation pure. En haut a droite : sol pur. En bas : centre-ville. 141
Figure 4.35 : Evolution de $Qsw*$ simule par DART (ronds bleus) compare a la valeur mesuree (trait rouge) au cours des iterations successives de la methode, au niveau de la tour BKLI. 142
Figure 4.36 : Representation 3D de la zone observee par la tour de flux BKLI de Bale, visualisee dans l'outil 'vue 3D' de DART. Le point rouge represente la position de la tour de flux. 143

Figure 4.37 : Evolution de $QSW*$ au niveau de la tour BKLI simule par DART (ronds bleus) compare a la valeur mesuree (trait rouge) au cours des iterations successives de la methode. Une iteration supplementaire a ete effectuee (Iter 3b) dans laquelle la reflectance des murs a ete multipliee par 2. 143
Figure 4.38 : Photo 'fish-eye' prise du haut de la tour de flux BKLI a Bale. Elle illustre le champ de vue du capteur de rayonnement. Les cercles blancs representent les facteurs de vue, c'est-a-dire le pourcentage de contribution des surfaces observees (Source University of Basel) a la mesure de ce capteur. 144
Figure 4.39 : En haut a gauche : carte $Qsw*$ simulee le 21.08.2015 a partir de proprietes optiques derivees de l'image Landsat de ce meme jour. En haut a droite : carte $Qsw*$ simulee le 21.08.2015 a partir de proprietes derivees de l'image satellite du 05.08.2015. En bas : carte d'erreur relative. 145
Figure 4.40 : Comparaison de $Qsw*$ mesure et simule a des dates proches de la date to (vert) de l'image satellite utilisee pour creer la base de donnees de cartes d'albedo utilisee, et simule a des dates t (gris) avec cette meme base de donnees mise a jour avec la methode "multiplicative" appliquee a l'image satellite acquise a la date la plus proche de t, plus ou moins eloignees de to. 146
Figure 4.41 : Evolution horaire de l'exitance Msw [W/m²] au niveau de la tour , simulee par DART (bleu), calculee avec l'hypothese "Lambertien" (jaune) et mesuree (rouge). 147

Acronymes

AMCR – Adaptative Multiple Contribution Retrieval

AOT – Aerosol Optical Thickness

BRF – Bidirectionnal Reflectance Factor

ESA – European Space Agency

IHM – Interface Homme Machine

UHI – Urban Heat Island

LAI – Leaf Area Index

LW - Longwave

MNT – Modèle Numérique de Terrain

NIR – Near Infrared

RT – Radiative Transfer

S2 – Sentinel-2

S3 – Sentinel-3

SVF – Sky View Factor

SW – Shortwave

SWIR – Shortwave Infrared

TIR – Thermal Infrared

UoB – University of Basel

UoR – University of Reading

VNIR – Visible Near Infrared

Résumé

Du fait de son impact sur le climat urbain, le suivi temporel du bilan radiatif urbain Q^*, avec prise en compte de sa variabilité spatiale, est un axe de recherche en développement. Q^* est la différence entre l'éclairement (*i.e.*, rayonnement incident) et l'exitance (rayonnement sortant) sur le domaine spectral qui englobe l'essentiel du rayonnement solaire (*i.e.*, courtes longueurs d'ondes) et de l'émission thermique terrestre (*i.e.*, grandes longueurs d'ondes). Les images satellites optiques fournissent une information unique et indispensable mais très partielle, car uniquement pour la configuration d'observation (direction de visée et bandes spectrales du capteur satellite), alors que Q^* est une quantité intégrée sur toutes les directions de l'espace et sur l'ensemble des courtes (Q^*_{sw}) et grandes (Q^*_{lw}) longueurs d'onde. Ces intégrations appliquées aux images satellites sont très compliquées du fait de la complexité de l'architecture tridimensionnelle (3D) urbaine, et de l'hétérogénéité spatiale des propriétés optiques et températures des matériaux urbains. Durant cette thèse, une approche originale a été conçue pour effectuer ces intégrations et ainsi obtenir des séries temporelles de cartes de Q^* à la résolution spatiale des images satellites utilisées (*i.e.*, Sentinel-2, Landsat-8, etc.). Elle s'appuie uniquement sur un modèle de transfert radiatif 3D, des images satellites et une base de données géométriques urbaine incluant le relief, le bâti (*i.e.*, immeubles, maisons, routes, etc.) et la végétation (*i.e.*, arbres, pelouses, etc.).

De manière schématique, le modèle de transfert radiatif DART (www.cesbio.ups-tlse.fr/dart), développé au CESBIO, est utilisé en mode inverse pour transformer des images satellites en cartes de propriétés optiques et de température de matériaux urbains, puis en mode direct pour calculer des cartes de bilan radiatif par bande spectrale satellite $Q^*_{\Delta\lambda}$. L'intégration spectrale des cartes $Q^*_{\Delta\lambda}$ donne alors les cartes Q^* recherchées.

Toute série temporelle de carte Q^*_{sw} est alors générée efficacement à partir de cartes d'albédo direct (*i.e.*, black sky albedo) et diffus (*i.e.*, white sky albedo) pré-calculées par DART avec la base de données géométrique urbaine et des cartes de propriétés des matériaux dérivées de l'image satellite la plus proche. Ces cartes sont complétées par des données externes thermiques pour la construction des séries temporelles. Cette approche a été conçue et mise au point avec 3 villes de géométries et propriétés optiques très diverses : Londres (Royaume-Uni), Bâle (Suisse), et Héraklion (Grèce). Le projet H2020 URBANFLUXES de la Communauté Européenne a utilisé les cartes de Q^* simulées pour estimer les flux urbains de chaleur anthropogénique via le calcul du bilan énergétique urbain à partir d'images satellites.

La précision de l'approche développée a été évaluée via l'écart relatif ϵ_L des luminances des images DART et satellites (ϵ_L < 2% pour toute bande spectrale) et via l'écart relatif ϵ_{Q^*} des bilans Q^* simulés et mesurés par les tours de flux. En 2016, $|\epsilon_{Q^*}|$<4.5% pour la série temporelle de 321 cartes de Q^* de Bâle, et $|\epsilon_{Q^*}|$< 4.4% pour les 278 cartes de Q^* de Londres. Cette possibilité de dériver d'images satellites des cartes précises de Q^* est très prometteuse au vu de la disponibilité croissante des bases de données urbaines et des séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale, et de l'amélioration des modèles de transfert radiatif 3D.

Abstract

Optical remote-sensing imagery provide a unique and very needed information, but still a partial one, because only in the observation configuration of the satellite sensor (i.e. viewing direction and spectral bands), whereas Q^* is an integrated quantity over all the directions and over the whole shortwave (Q^*_{sw}) and longwave (Q^*_{lw}) spectral domain. These integrations applied to satellite images are very complicated because of the complexity of the urban tri-dimensional (3D) architecture, and because of the urban materials temperature and optical properties spatial heterogeneity. Over the course of this PhD, an innovative approach has been conceived in order to achieve those integrations and thus obtain temporal series of Q^* maps at the spatial resolution of the used satellite sensors (i.e. Sentinel-2, Landsat-8, etc.). This approach is using solely a 3D radiative transfer model, satellite images, and a geometrical urban database including the topology, the urban constructions (i.e. buildings, roads, etc.) and the vegetation (i.e. trees, gardens, etc.).

Schematically speaking, the radiative transfer model DART (www.cesbio.ups-tlse/dart), developed at CESBIO, is used in inverse mode in order to transform satellite images into urban materials optical properties and temperature maps, and then in direct mode in order to compute radiative budget $Q^*_{\Delta\lambda}$ maps for each spectral band of the used satellite sensor. Then, the spectral integral of those $Q^*_{\Delta\lambda}$ maps leads to the desired Q^* maps.

Each temporal series of Q^*_{sw} maps is then generated efficiently from direct albedo maps (i.e. black sky albedo) and diffuse (i.e. white sky albedo) pre-computed using DART from the geometrical urban database of the considered city and optical properties derived from the closest satellite image. These maps are complemented by external thermal data for the computation of the temporal series. This method has been conceived and refined using 3 cities with very varying geometries and optical properties: London (United-Kingdom), Basel (Switzerland), and Heraklion (Greece). The H2020 project URBANFLUXES of the European Community used the simulated Q^* maps in order to estimate the urban anthropogenic heat fluxes using the derivation of urban energy budget computed from satellite imagery.

The precision of the developed method has been estimated using the relative error ϵ_R between the radiance images simulated by DART and measured by satellite sensors ($\epsilon_R < 2\%$ for any spectral band) and the relative error ϵ_{Q^*} between Q^* simulated and measured by flux towers. For the year 2016, $|\epsilon_{Q^*}|$<4.5% for 321 Q^* maps over Basel, and $|\epsilon_{Q^*}|$<4.4% for 278 London Q^* maps. This capacity of deriving from satellite imagery precis Q^* maps is really promising in light of the always increasing availability of urban geometrical databases, of high resolution temporal series of satellite images, and of the improvement of 3D radiative transfer modeling.

I. Introduction

1. Contexte

Encore plus que les régions naturelles, les villes sont très impactées par le changement climatique actuel de notre planète. Cet impact tend à croître avec l'augmentation du changement climatique et l'urbanisation, c'est-à-dire le processus de développement des villes et de concentration des populations et des constructions. L'urbanisation est un processus spatio-temporel qui se réalise différemment selon les pays et les villes. Ainsi, elle peut survenir autour de villes existantes, de zones commerciales ou de centres industriels. Ce processus s'est accéléré durant ces dernières décennies. Ainsi, le taux d'urbanisation mondial est passé de 3.4% en 1800 à 69% en 2015 (15% en 1900, 30% en 1950, 50% en 2007). L'accumulation d'activités humaines qui dégagent de la chaleur et de constructions qui peuvent plus accumuler la chaleur que les environnements naturels affectent beaucoup le climat urbain et par suite la vie et santé des populations urbaines. De manière schématique, les surfaces urbaines absorbent la chaleur durant le jour, et la restituent durant la nuit, ce qui, par rapport aux zones rurales voisines, induit des températures plus élevées durant le jour, et un refroidissement nocturne plus faible. Ainsi, durant la vague de chaleur de l'été 2003, la région parisienne a été particulièrement affectée avec une mortalité qui a atteint certains jours plus de quatre fois la normale en cette période de l'année. D'autre part, la distribution spatiale des températures urbaines n'est pas spatialement homogène. Ainsi, elle tend à être plus importante au centre des villes, ce qui correspond au phénomène d'îlot de chaleur urbain (Urban Heat Island, UHI). Cet écart de température tend à augmenter avec l'évolution du climat et l'agrandissement des villes. A Paris, il est de l'ordre de 2°C le jour à 8°C la nuit (Lemonsu et Masson, 2002). La distribution spatio-temporelle des températures urbaines dépend de divers facteurs comme la distribution tridimensionnelle (3D) des constructions, le chauffage, la climatisation et le trafic.

La compréhension des relations entre l'architecture urbaine, la consommation d'énergie et les émissions de carbone est donc un défi important pour notre société. Cependant, cette compréhension est encore très limitée alors qu'elle est essentielle pour la modélisation du climat urbain et la planification des villes. Les nombreuses recherches réalisées pour améliorer cette compréhension s'appuient sur différents types de mesures terrain (flux de chaleur, propriétés optiques et calorifiques des matériaux urbains, etc.), de meilleures descriptions du milieu urbain (architecture des bâtiments, cartes d'espaces verts, types de matériaux de construction, etc.) et des modèles de simulation des flux de chaleur urbains de plus en plus perfectionnés. Une difficulté majeure est due au fait que l'équilibre énergétique urbain (UEB – Urban Energy Budget) est un phénomène tridimensionnel en raison de la nature 3D des villes, qui met en jeu les flux de chaleur entrant ou sortant ainsi que le stockage de la chaleur dans le volume urbain.

D'une manière générale, la modélisation du climat urbain et la planification urbaine requièrent des données spatiales spatialement désagrégées à l'échelle locale (voisinage, ou 100 m x 100 m). Une difficulté majeure est que cette information ne peut être dérivée de mesures de flux in situ, car celles-ci sont principalement locales. Elles sont en général réalisées avec des instruments fixes (e.g., radiomètre, caméra thermique ou anémomètre sur tour de mesure de flux) ou mobiles (e.g., instrument embarqué sur véhicule terrestre ou avion) au sein ou au-dessus de la canopée urbaine. Par suite, la télédétection satellite, de par sa capacité à fournir des observations régulières de la totalité d'agglomérations urbaines est un outil potentiellement indispensable. Des méthodes innovantes sont continuellement développées pour mieux interpréter les mesures des satellites d'observation de la Terre, et ainsi obtenir des informations continuelles, fiables et précises. Cependant, l'estimation satellitaire des flux d'énergie urbaine à l'échelle du quartier reste un défi. Ceci explique les efforts déployés par les scientifiques pour développer des modèles capables de relier les observations satellitaires aux flux de chaleur urbains. Une difficulté majeure est qu'une mesure satellite n'apporte qu'une information partielle, car elle correspond à des échantillonnages nécessairement limités dans le temps, dans le domaine spectral et pour ce qui est des directions de propagation du rayonnement. Par suite, les modèles doivent extrapoler les mesures satellites à tout le spectre et à toutes les directions de l'espace. Les modèles actuels de simulation des flux de chaleur urbains sont variés et de complexités très diverses, tant dans les hypothèses plus ou moins

simplificatrices que dans leurs données d'entrée. Ainsi, l'architecture urbaine est plus ou moins bien prise en compte. Durant ces quinze dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés dans la compréhension des processus urbains, associés à une capacité de calcul plus élevée, une meilleure résolution des capteurs satellitaires et une capacité accrue à coupler les schémas de paramétrisation des surfaces urbaines avec les modèles atmosphériques (Arnfield, 2003 ; Voogt et Oke, 2003 ; Offerle et al., 2005 ; Weng, 2009 ; Grimmond et al., 2010 ; Gastellu-Etchegorry et al., 2015 ; Ward et al., 2016b ; Ando et Ueyama, 2017 ; Oke et al., 2017). La télédétection est fréquemment utilisée pour étudier le phénomène des îlots de chaleur urbains, mais beaucoup moins pour quantifier les flux de chaleur (Chrysoulakis, 2003 ; Kato et Yamaguchi, 2007, 2005 ; Xu et al., 2008 ; Weng et al., 2014 ; Chen et Hu, 2017). Des études récentes ont étudié son potentiel pour dériver des flux de chaleur turbulents et identifier et analyser les incertitudes associées (Feigenwinter et al., 2017 ; Crawford et al., 2017).

Un objectif majeur des modèles de bilan d'énergie urbaine est d'apporter des réponses ou des éléments de réponses aux différentes questions scientifiques que se posent les chercheurs sur le fonctionnement des milieux urbains. Quel peut être l'impact d'une hausse des températures sur une ville ? Quelles sont les principales sources du bilan énergétique des villes et quelle est la part due à l'activité humaine ? Comment limiter les déficits de chaleur dans les échanges ville-atmosphère ? Comment modéliser et calculer efficacement les différents flux du bilan d'énergie urbain ?

e travail de thèse contribue à l'estimation du bilan d'énergie des villes via la détermination de la composante radiative par modélisation physique à partir de mesures de télédétection satellite. Avant de présenter le travail réalisé, cette section introduit les phénomènes intervenant dans ce bilan, ainsi que les modèles existants, avec leurs particularités, forces et faiblesses.

2. Le bilan d'énergie

2.1. Processus mis en jeu

e bilan d'énergie d'un paysage urbain exprime le lien entre les différentes sources et pertes d'énergie, indiquées par la Figure 1. Il est souvent représenté par l'équation :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A + S \qquad (1)$$

- Le bilan radiatif Q^*

Le bilan radiatif, Q* est un des termes majeurs du bilan d'énergie. Pour un volume (e.g., paysage urbain), il est égal à la différence entre la densité d'énergie radiative reçue (i.e., éclairement) et perdue (i.e., exitance) au sommet du volume. L'énergie radiative correspond au rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Dans le cadre de l'étude du bilan radiatif des surfaces terrestres, le spectre électromagnétique est en général considéré comme composé de deux domaines spectraux : les courtes (shortwave – SW) et grandes (longwave – LW) d'ondes. Le domaine des courtes longueurs d'onde s'étend de 0.35 μm à 3.5 μm, c'est-à-dire de l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge moyen (shortwave infrared), en incluant les régions spectrales du visible (VIS) et du proche infrarouge (near infrared – NIR). Dans ce domaine, le soleil est la principale source de rayonnement, ce qui explique l'emploi fréquent du terme "domaine du rayonnement solaire réfléchi" en télédétection. Ici, l'éclairement et l'exitance sont respectivement notés $K_{\downarrow}$ et $K_{\uparrow}$. Le domaine des grandes longueurs d'onde correspond aux longueurs d'onde supérieures à 3.5μm. Dans ce domaine, l'éclairement solaire diminue avec l'augmentation de la longueur d'onde, alors l'atmosphère et les surfaces terrestres deviennent les deux principales sources de rayonnement via leur émission thermique. En effet, aux températures terrestres usuelles (i.e. 280-310 K), l'émission thermique survient surtout au-delà de 3.5μm avec un maximum autour de 10-12 μm dans la région spectrale de l'infrarouge, ce qui explique que le domaine des

grandes longueurs d'onde est souvent qualifié de domaine de l'infrarouge thermique. Il convient de noter que les termes "domaine des grandes longueurs d'onde" et "domaine spectral de l'émission thermique" ne sont pas équivalents. Ainsi, une surface urbaine très chaude émet un rayonnement thermique non négligeable en deçà de 3.5μm. De même, au-delà 3.5μm, la réflexion du rayonnement solaire sur une surface qui présente un comportement spéculaire (e.g., surface vitrée), peut induire selon certaines directions un rayonnement réfléchi supérieur au rayonnement dû à l'émission thermique. Ici, l'éclairement et l'exitance dans les grandes longueurs d'onde sont respectivement notés $L_{\downarrow}$ et $L_{\uparrow}$. Par suite, le bilan radiatif peut s'écrire de la manière suivante :

$$Q^* = (K_{\downarrow} - K_{\uparrow}) + (L_{\downarrow} - L_{\uparrow}) \quad (1)$$

Les termes $K_{\downarrow}$, $K_{\uparrow}$, $L_{\downarrow}$ et $L_{\uparrow}$ dépendent de nombreux facteurs comme l'énergie émise par le soleil, la température et les propriétés optiques de l'atmosphère et des surfaces terrestres. Ils résultent des multiples interactions radiatives qui surviennent au sein du système "Soleil – Atmosphère – Terre". La théorie du transfert radiatif permet de modéliser ces interactions et la propagation du rayonnement dans l'atmosphère et les surfaces terrestres. Ces interactions sont très complexes, en particulier dans les milieux urbains du fait de la diversité de leurs matériaux et de leur architecture 3D. Notamment, cette architecture induit une anisotropie du comportement radiatif urbain, tant dans les courtes que les grandes longueurs d'onde du spectre électromagnétique (Krayenhoff et Voogt, 2016; Voogt et Oke 1998; Lagouarde et al. 2010). En plus d'être variable à la fois dans l'espace et selon les directions d'observation, le comportement radiatif urbain varie aussi dans le temps, tant au niveau journalier selon la position du soleil et la composition de l'atmosphère, qu'au niveau saisonnier avec l'évolution par exemple de la végétation. Le bilan radiatif et les phénomènes qu'il implique, sujets principaux de ce travail de thèse, sont plus amplement décrits dans la suite.

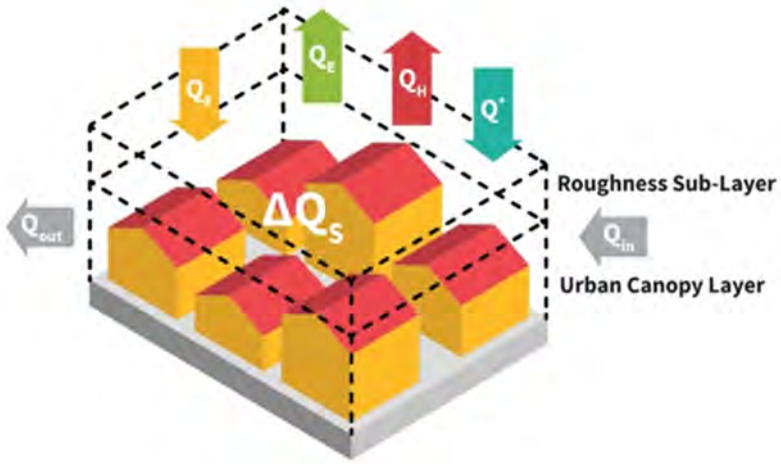


Figure 1 : Représentation schématique des flux du bilan d'énergie d'un élément de volume urbain. Le bilan d'énergie par unité de surface du haut du volume est $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$ (W/m²), avec Q^* le bilan radiatif net, Q_F le flux de chaleur anthropogénique, Q_H le flux turbulent de chaleur sensible, Q_E le flux turbulent de chaleur latente, ΔQ_S le flux net de stockage de la chaleur dans le volume et ΔQ_A le flux net d'advection. Les flèches indiquent la direction selon laquelle les flux sont supposés positifs. Adapté de Chrysoulakis et al. (2018).

- Le flux anthropogénique Q_F

Le flux de chaleur anthropogénique Q_F revêt une importance particulière, car il constitue un indicateur de l'impact de l'activité humaine sur le bilan d'énergie. En effet, contrairement aux autres termes du bilan d'énergie qui interviennent dans tout paysage, avec différentes intensités, Q_F n'intervient de manière significative que dans les environnements urbains. Il représente l'énergie libérée par les différentes activités des humains présents dans la ville. Il peut être supérieur à Q^* sous certaines conditions (Allen et al., 2011). Trois sources sont principalement considérées lorsque l'on décrit le flux de chaleur anthropogénique d'une ville (Grimmond, 1992). La source la plus importante correspond à l'énergie libérée par les bâtiments ($Q_{F,B}$), notamment via le chauffage,

la climatisation, ou l'utilisation industrielle de ces derniers. En deuxième position arrive la part du flux dû au transport sous toutes ses formes ($Q_{F,T}$), notamment le trafic routier dans la ville. Enfin une petite part (typiquement 2 à 3%) de Q_F provient des flux de chaleur métabolique ($Q_{F,M}$), c'est-à-dire l'énergie dégagée par les corps des humains au sein du paysage urbain (Allen et al., 2011).

$$Q_F = Q_{F,B} + Q_{F,T} + Q_{F,M} \quad (2)$$

Le flux de chaleur anthropogénique dépend beaucoup de la structure de la ville, de son fonctionnement et de sa population (Iamarino et al., 2011). Il varie fortement dans le temps et l'espace, ce qui rend difficile sa mesure (Offerle et al. 2003a, Pigeon et al. 2007). Par exemple, les flux libérés par les bâtiments dépendent de leur étendue verticale, et de leurs infrastructures (climatisations mécaniques, ventilations utilisant les fenêtres, etc.). Pour les transports, cela dépend entre autres des types de véhicule, de l'existence ou non de restrictions sur le nombre ou les créneaux horaires durant lesquels certains véhicules peuvent circuler, comme cela peut s'appliquer à certaines villes pour les camions au-delà d'un certain tonnage. Q_F est l'objet de nombreux travaux scientifiques tant au niveau de sa modélisation que de son observation depuis l'espace, comme dans le projet H2020 URBANFLUXES (Chrysoulakis et al., 2015) de la commission européenne, auquel mon travail de thèse a contribué.

- Les flux turbulents Q_E et Q_H

Le flux de chaleur latente Q_E et le flux de chaleur sensible Q_H, sont des flux convectifs turbulents d'air entre la surface terrestre et l'atmosphère. Q_H dépend surtout de la différence de température entre la surface et l'atmosphère, alors que Q_E dépend surtout du gradient d'humidité au niveau de la surface terrestre. Contrairement aux régions rurales tempérées, dans les villes Q_H est plus élevé que Q_E, car les couverts végétaux et taux d'humidité sont faibles sensible Q_H est prédominant en ville devant le flux de chaleur latente Q_E (Oke, 1979 ; Moriwaki et Kanda, 2004). Du fait de leur dépendance aux déplacements d'air, Q_E et Q_H dépendent aussi de la vitesse locale du vent. Les flux turbulents de chaleur sont donc très impactés par des caractéristiques urbaines telles que l'architecture 3D, la rugosité, les surfaces imperméables, la distribution spatiale des sources et puits de chaleur, et les injections de chaleur et d'eau dans l'atmosphère urbaine dues aux activités humaines (e.g., trafic, chauffage, traitement des déchets, etc.). La variabilité spatiale de tous ces paramètres dans les environnements urbains complique considérablement l'estimation de ces flux, et peut mener à de grandes variations en intensité de ces flux de chaleur sur de courtes distances (Offerle et al., 2006).

- Le flux de chaleur de stockage ΔQ_S

Le flux de chaleur de stockage ΔQ_S est le flux de chaleur net emmagasiné dans le volume urbain. Il dépend des mécanismes de stockage d'énergie dans l'air, la végétation, les bâtiments, le sol, etc. La chaleur nette stockée durant la journée dans un environnement urbain représente une proportion relativement importante du flux de transfert radiatif total Q^* (Nunez and Oke, 1977 ; Grimmond and Oke, 1999a). Elle peut être 2 à 6 fois supérieure à la chaleur stockée dans les paysages non-urbains (Oke, 1987). Cette quantité de chaleur emmagasinée dans la journée est libérée durant la nuit. Parmi tous les effets causés par la transformation d'un environnement naturel en environnement urbain, l'augmentation de la quantité de chaleur stockée dans la canopée est le plus prononcé. ΔQ_S est important pour de nombreuses applications pratiques, notamment pour la mesure du climat dans les bâtiments et pour l'estimation des flux de chaleur latente et sensible. Il est influencé par de nombreux paramètres de la canopée urbaine, dont la conductivité thermique des matériaux de surface, les profils de températures verticaux dans le sol, les murs et les toits. La difficulté d'obtention de ces paramètres sur des surfaces étendues rend l'estimation directe de ΔQ_S ardue, voire parfois impossible (Meyn and Oke 2009). C'est pourquoi les stratégies les plus répandues passent par des méthodes indirectes, sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

- L'advection ΔQ_A

ΔQ_A représente la quantité d'énergie ou de chaleur latente et sensible transportée horizontalement dans le volume urbain (Figure 1) :

$$\Delta Q_A = Q_{in} - Q_{out} \quad (3)$$

L'advection se produit à différentes échelles. A petite échelle (micro-échelle), des flux advectifs horizontaux se produisent par exemple en termes de chaleur sensible entre des pans de sols éclairés et à l'ombre, ou en termes de chaleur latente entre des surfaces humides et des surfaces sèches. A moyenne échelle (échelle locale, du quartier), des flux d'advection peuvent exister à proximité d'étendues d'eau ou de parcs, et entre des zones urbaines de densités différentes. A grande échelle (méso-échelle, échelle de la ville), l'advection s'effectue entre la ville et la campagne environnante, ou pour les villes côtières entre la ville et la mer. Des études ont été menées sur les flux advectifs de chaleur latente et de chaleur sensible et ont montré que ces deux composantes de l'advection étaient en règle générale d'intensité semblables mais de signes opposés (Pigeon et al., 2003). Cela explique que ΔQ_A est majoritairement considéré comme un phénomène existant mais non majeur dans le bilan d'énergie d'un environnement urbain, et négligé dans de nombreuses études.

- Les sources et puits additionnels S

Dans le bilan d'énergie urbain tel que décrit dans l'équation (1), S représente les sources et puits d'énergie mineurs qui ne sont pas pris en compte dans les autres termes. C'est par exemple le cas du flux de chaleur libéré dans les eaux usées, ou de l'eau de pluie absorbant de la chaleur à la surface (Offerle et al. 2005). Ces processus ont des impacts limités relativement aux autres termes, et sont souvent négligés dans les études dont ils ne sont pas le sujet principal.

Ainsi, toutes ces composantes du bilan d'énergie dépendent de nombreux paramètres et phénomènes dans les villes, et ce à différentes échelles. Cela complique leur mesure et leur estimation dans les environnements complexes que sont les milieux urbains, et se traduit par un grand nombre de méthodes et d'approches développées pour y parvenir. Ces méthodes utilisent des mesures de différents types, pour réaliser des modélisations plus ou moins simplifiées de la canopée urbaine et des phénomènes qui s'y produisent, dont une partie est détaillée ci-dessous.

2.2. Modèles de bilan d'énergie

Les modèles sont les outils privilégiés des scientifiques quand il est nécessaire de représenter un phénomène difficile ou impossible à mesurer, ou pour prédire comment un phénomène peut évoluer avec le changement de différents paramètres. Dans le cas des villes, le bilan d'énergie possède incontestablement un fonctionnement très complexe, car il est la somme de composantes elles-mêmes difficiles à représenter dans un milieu aussi complexe que la canopée urbaine. Ainsi, la description exacte d'une ville et des processus énergétiques qui y opèrent est impossible du fait de la diversité des surfaces, imperméables ou végétalisées, des multiples constructions différentes, séparées ou non par des routes, de l'activité humaine sous toutes ses formes, et bien plus encore. Cependant, de nombreux modèles et méthodes existent. Ils diffèrent selon leur précision, leur complexité, et le type et format de leurs d'entrée. De plus, ils permettent d'estimer soit une ou plusieurs composantes du bilan d'énergie globale, soit la totalité de ce dernier, en combinant différentes modélisations de chaque phénomène.

De manière générale, aucun modèle n'est incontestablement meilleur que tous les autres sur tous les points (Grimmond et al., 2011). Par exemple, le flux de chaleur latente est souvent sous-estimé, certains flux sont ignorés, des phénomènes tels que le lien énergétique avec le cycle hydrique des villes sont souvent négligés, etc. Pour décrire ces modèles, nous allons les classifier en trois grandes catégories : les modèles empiriques, les

modèles de végétation adaptés aux canopées urbaines, et les modèles de canopées urbaines. Les deux derniers groupes peuvent eux-mêmes être séparés selon la présence ou non de couches multiples prenant en compte les effets de traînée dans les modèles atmosphériques associés (Masson, 2006).

2.2.1. Les modèles empiriques

Ces modèles sont basés sur des observations du bilan d'énergie des villes. Ils sont créés pour être statistiquement étalonnés avec des mesures de ce bilan de surface urbain. De manière générale, ces modèles utilisent relativement peu de données de forçage et demandent peu de puissance de calcul. Ces données sont principalement des données classiques de météorologie, ainsi que des données sur le type de surface et l'occupation des sols. Ils font l'hypothèse que le comportement physique des surfaces est directement aux flux énergétiques observés. Par suite, plus les mesures sont nombreuses, c'est-à-dire plus le jeu de données considéré est important, et plus les relations ainsi obtenues sont pertinentes. L'un des meilleurs modèles pour représenter cette catégorie aujourd'hui est sans doute le modèle SUEWS (Surface Urban Energy and Water Balance Scheme Järvi et al. 2011, Ward et al. 2016a, Järvi et al. 2014) dans son estimation du bilan d'énergie de surface urbaine. Ce modèle considère 7 types de surfaces différentes (Figure 2). Il combine plusieurs sous-modèles et méthodes pour estimer les différents termes à considérer :

- Q^* : le modèle NARP (Net All-wave Parameterization, Offerle et al. 2003b, Loridan et al. 2011) calcule l'exitance dans les courtes longueurs d'onde, ainsi que l'éclairement et l'exitance dans les grandes longueurs d'onde, en fonction du flux radiatif incident dans les courtes longueurs d'onde, de la température, de l'humidité relative et de l'émissivité des surfaces. Si ces entrées ne sont pas disponibles, SUEWS peut utiliser des mesures directes de Q^*.
- Q_F : deux modèles simples sont combinés, l'un utilisant la densité de population et le nombre de degrés-jours de chauffage et de refroidissement (Järvi et al. 2011), et l'autre basé sur une relation linéaire par morceaux avec la température de l'air (Loridan et al., 2011). SUEWS peut aussi utiliser des valeurs pré-calculées par des modèles externes, comme LUCY (Allen et al. 2011, Lindberg et al. 2013) ou GreaterQF (Iamarino et al. 2011).
- ΔQ_S : il est en général calculé par le modèle OHM (Objective Hysteresis Model, Grimmond et al. 1991, Grimmond & Oke 1999a, 2002) avec $\Delta Q_S = f(Q^*, a_1, a_2, a_3)$ fonction de Q^* et de coefficients calibrés empiriquement. Les modèles AnOHM (Analytical Objective Hysteresis Model, Sun et al. 2017) et ESTM (Element Surface Temperature Method, Offerle et al. 2005) sont en cours d'intégration dans SUEWS. Leurs approches sont plus analytiques.
- Q_E et Q_H : une équation de Penman-Monteith modifiée permet de calculer le flux de chaleur latente. Le flux de chaleur sensible est estimé comme le résidu de l'énergie disponible. $Q_E = f(Q^* - Q_S, b_1, b_2)$ fonction des flux déjà estimés et de deux paramètres empiriques.
- Equilibre hydrique des surfaces : il est estimé avec des données de précipitation, d'irrigation et de drainage, à partir d'approches du modèle "Urban water balance model" (Grimmond et al., 1986) et du schéma d'évaporation et d'interception urbaines de Grimmond et Oke (1991).

Ce type de modèle empirique est très efficace en termes de simplicité et de vitesse de calcul. Un désavantage, cependant, est la limitation à un intervalle de conditions définies par des études empiriques initiales. Ils utilisent en effet des jeux de données finis liés aux conditions de types de surface, climatiques, de saison, etc., dans lesquelles ils ont été mesurés.

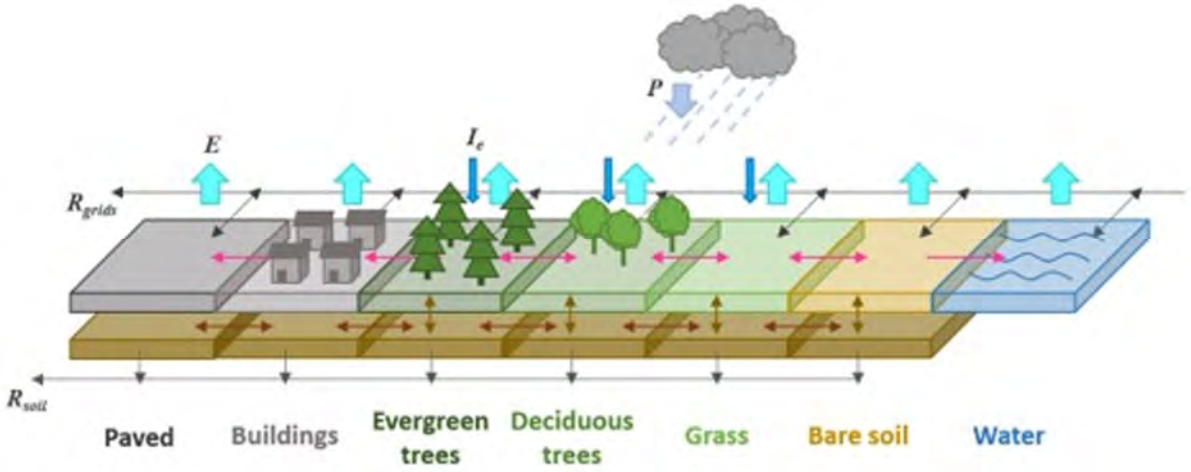


Figure 2 : Les 7 types d'utilisation du sol considérés par le modèle SUEWS. Paved - Pavé (imperméable) ; Buildings - Bâtiments ; Evergreen trees - Arbres toujours verts ; Deciduous trees – Arbres qui perdent leurs feuilles ; Grass – Herbe ; Bare soil – Sol nu ; Water – Eau. E, I_E, P sont liés au flux hydrique. Source (Ward et al., 2016a)

2.2.2. Les modèles de végétation adaptés

Une approche classique pour modéliser le fonctionnement du bilan d'énergie des surfaces urbaines est d'adapter un modèle de végétation existant (Soil Vegetation Transfer Scheme – SVAT) (Masson, 2006). L'intérêt est de bénéficier des très nombreux acquis scientifiques dans ce domaine. Cependant, les zones urbaines ayant un comportement énergétique très différent des zones rurales, des modifications importantes sont nécessaires pour bien modéliser le bilan d'énergie urbain :

- Flux radiatifs : l'architecture spécifique des villes implique un comportement radiatif très différent de celui des zones rurales. La Figure 3 illustre cette différence à partir d'images simulées avec le modèle DART avec des maquettes schématiques de paysages urbain et agricole où l'albédo de tout matériau est 0.4. Ainsi, le paysage urbain a un albédo de 0.16, et une réflectance directionnelle entre 0.1 et 0.43, alors que le paysage agricole a un albédo de 0.19 et une réflectance directionnelle entre 0.15 et 0.26. Ce résultat ne peut être extrapolé à tout le domaine spectral, car les matériaux des paysages naturels et urbains ont des propriétés spectrales très différentes, et bien évidemment différentes de 0.4. De plus, les paysages urbains ont des albédos qui dépendent de leur architecture. Beaucoup d'études ont montré que les villes ont un albédo plus faible que les zones rurales environnantes (Arnfield, 1982; Oke, 1982, 1987). Par suite, une méthode classique d'adaptation des SVATs est de spécifier un albédo de surface relativement faible, par exemple de l'ordre de 0.15 (Taha, 1999). D'autre part, la présence de pollution et d'aérosols peut aussi affecter l'albédo urbain (Arnfield, 2003).
- Flux de chaleur anthropogénique : étant surtout dû aux émanations d'énergie des bâtiments, ce flux peut varier énormément selon les saisons et les jours ouvrés ou non, par exemple du fait de la différence d'utilisation du chauffage et de la climatisation. Une méthode classique pour estimer son intensité est d'inventorier les différentes consommations d'énergie. Il a été ainsi déterminé que dans le centre de Tokyo, les flux anthropogéniques peuvent atteindre 200W/m² en été et 400W/m² en hiver (Ichinose et al., 1999).
- Flux de stockage : il est beaucoup plus important que pour les zones rurales. Une méthode classique d'adaptation est de remplacer les surfaces végétalisées des SVATs par des surfaces imperméables (Atkinson, 2003). Cela n'étant pas toujours suffisant, une approche plus précise consiste à utiliser le modèle OHM (Arnfield et Grimmond, 1998 ; Taha, 1999).
- Flux de chaleur turbulents : ils diffèrent beaucoup des zones rurales, car les bâtiments perturbent les flux d'air. Une adaptation classique est d'augmenter la longueur de rugosité par rapport aux zones rurales

(Grimmond et al., 1998 ; Grimmond et Oke, 1999b). Elle peut être améliorée en prenant en compte la distribution spatiale des bâtiments (Bottema, 1997).

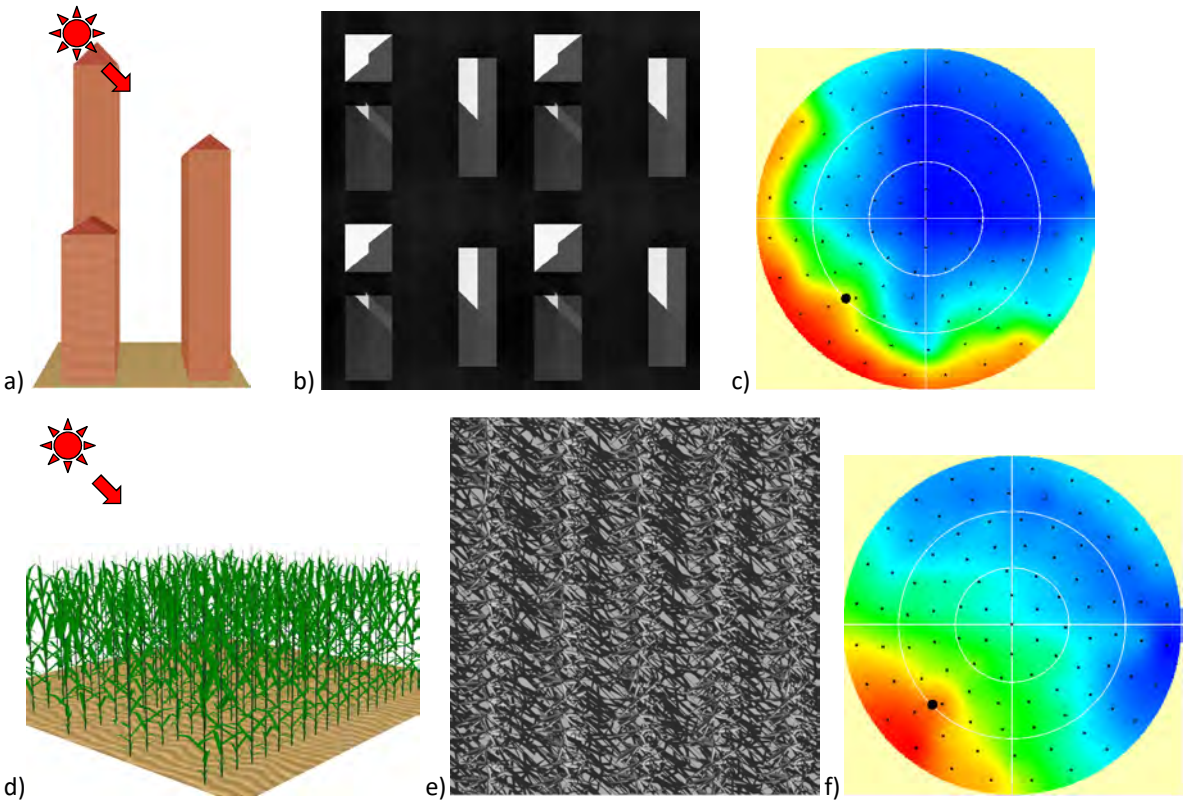


Figure 3 : Simulations DART de paysages urbain (haut) et naturel (bas) schématiques. Le paysage naturel est un champ de maïs (LAI=1.2). Maquettes de paysage (a, d). Images en réflectance au nadir (b, d). Réflectance directionnelle (c, f). L'albédo de tout matériau est 0.40 : $\rho_{feuille}$= $\tau_{feuille}$=0.2 et ρ_{sol}=ρ_{mur}=0.4. L'atmosphère est définie par le modèle de gaz "USSTD" et le modèle d'aérosols "Rural 23km", pour une longueur d'onde de 0.56µm. L'angle zénithal solaire est 60°. La réflectance varie entre 0.10 et 0.43 pour le paysage urbain et entre 0.15 et 0.26 pour le champ de maïs.

2.2.3. Les modèles de canopée urbaine

Ce type de modèle est plus récent que les modèles et méthodes décrits précédemment. Ils sont conçus pour simuler plus précisément le bilan d'énergie des villes, en utilisant une modélisation plus réaliste de la canopée tridimensionnelle des villes. Ils se basent sur une géométrie voulue la plus proche possible de la réalité des paysages urbains, avec une représentation effective des surfaces verticales et horizontales. Au minimum, les toits, les murs et la route sont différenciés, ce qui permet de leur attribuer des propriétés énergétiques indépendantes, plutôt que moyennées sur l'ensemble de la canopée urbaine résultante (comme c'est le cas dans les modèles de végétation adaptés). Les effets radiatifs sont modélisés en prenant en compte l'exposition des différents éléments de surface, ce qui permet de résoudre explicitement les positions des ombres et les réflexions d'ordre 1. Le stockage peut lui aussi être plus précisément estimé, en utilisant les équations de conduction de la chaleur directement sur les différentes surfaces. La précision de ce terme peut être notamment augmentée en considérant plusieurs couches superposées pour former les différentes surfaces, avec chacune des propriétés thermiques différentes. Encore une fois dans ce genre de modélisation, la précision et la complexité change d'un modèle à un autre, selon les choix et les simplifications effectuées. Par exemple, la plupart de ces modèles n'incluent pas encore complètement la végétation dans le paysage urbain, tous n'utilisent pas le même nombre de couches atmosphériques interagissant avec la canopée urbaine, le transfert radiatif ne prends pas toujours en compte les réflexions multiples, etc. Quelques exemples des modèles sont introduit ci-dessous, représentant différentes approches de la modélisation du bilan d'énergie.

- Le modèle TEB

TEB (Town Energy Balance, Masson 2000) est un modèle de référence pour le calcul du bilan d'énergie des villes. Sa représentation géométrique est simple : l'élément urbain de base est un canyon (Figure **4**) tel que défini par (Nunez and Oke, 1977) à partir d'une rue infinie entre deux murs surmontés d'un toit chacun. La ville est ainsi représentée par un réseau de canyons de longueur infinie, sans intersections, moyenné selon toutes les directions. TEB est un modèle à couche unique, ce qui signifie que la canopée urbaine est directement liée au modèle d'atmosphère au niveau des toits. L'air dans le canyon, lui, est défini par une vitesse de vent suivant un profil 1D logarithmique, une température et une humidité constante.

Les différents bilans (radiatif, turbulents et de stockage) sont simulés pour chaque surface générique (toit, mur, route), chacune étant composée de plusieurs couches. Des sources additionnelles de chaleur anthropogénique sont introduites s'ils sont connus, ainsi que la température interne des bâtiments. TEB a été validé dans plusieurs zones densément urbaines (Masson et al., 2002 ; Lemonsu et al., 2004).

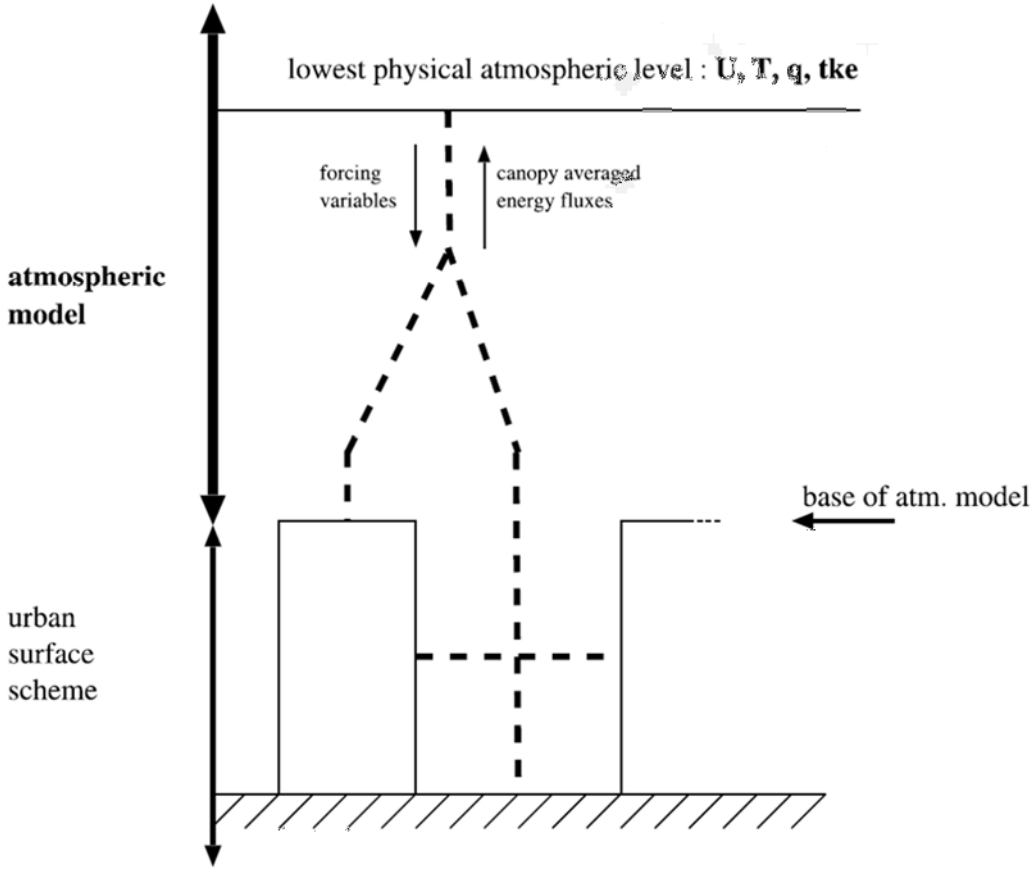


Figure 4 : Vue schématique de la configuration à couche unique du modèle TEB. Les lignes en pointillé représentent l'interaction des surfaces avec le modèle atmosphérique (Source : Masson, 2006).

Une voie de complexification consiste à considérer plusieurs couches entre la canopée urbaine et l'atmosphère avec une approche dite de traînée. Cela permet de modéliser plus précisément le profil paramétrique de l'air dans le canyon urbain (vitesse du vent et température). C'est le cas par exemple du modèle de Martilli et al. (2002). Il est également possible de considérer de la végétation dans la canopée urbaine et les équations de bilan d'énergie associées. Par exemple, le modèle TEB-Veg est une adaptation récente du modèle TEB prenant en compte de la végétation basse dans le canyon urbain (TEB-Veg, Lemonsu et al., 2012).

- Modèle SOLENE

Le modèle SOLENE (Péneau, 1989) du laboratoire CERMA (CEntre de Recherche Méthodologiques d'Architecture) a initialement été conçu pour estimer l'ensoleillement extérieur ou intérieur de projets architecturaux, notamment en simulant les tracés d'ombre et les durées d'éclairage naturel au cours de la journée. Il a été étendu à la simulation de températures et de flux de chaleur de surface urbaine par des modules de calcul de transfert d'énergie, allant jusqu'à l'échelle du quartier (Groleau, 2003 ; Hénon, 2008). Il définit une représentation 3D de la scène à l'aide de maillages triangulaires dans lesquels chaque facette est caractérisée par un ou deux matériaux et leurs propriétés optiques et thermiques. Un algorithme estime par l'utilisation des facteurs de formes entre les différentes facettes les réflexions multiples par itérations successives et en déduit les flux nets radiatifs pour chaque facette sur l'ensemble du spectre électromagnétique. L'éclairement est calculé à partir d'un maillage du ciel au-dessus de la scène couplé à un modèle de luminance de ciel. Les surfaces sont composées de deux couches de matériau, caractérisées par leur épaisseur, leur capacité calorifique et leur conductivité, pour la modélisation thermique des parois pour le calcul des flux d'énergie et des températures.

- Modèle DART-EB

Le modèle DART-EB est un module de bilan d'énergie associé au modèle de transfert radiatif DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer – Energy Budget, Gastellu-Etchegorry et al., 2015 ; Al Bitar, Landier, et al., 2017). Les différents flux de chaleur sont calculés similairement au modèle TEB, mais le bilan radiatif est estimé de manière beaucoup plus précise grâce au modèle de transfert radiatif 3D DART. Ce modèle est introduit par la suite. Il simule le transfert radiatif à partir de maquettes de paysage où les différents éléments sont simulés par des facettes et du matériel turbide au sein d'une matrice 3D de voxels rectangulaires. Ainsi, il permet de simuler avec précision les différentes interactions du rayonnement (e.g., diffusions multiples et émission thermique des différentes surfaces urbaines). Le modèle DART-EB est couplé à DART et y ajoute une modélisation du bilan d'énergie calculant les températures de chacune des surfaces de la scène 3D en utilisant le bilan radiatif simulé par DART, et en simulant les principaux mécanismes énergétiques (conduction, moment turbulent, flux de chaleurs, humidité du sol, etc.). Ces mécanismes sont simulés similairement aux approches du modèle TEB, mais un profil de vent vertical est considéré, ainsi qu'une variation verticale de la résistance thermodynamique des murs. Chaque surface (toits, murs, sols) est discrétisée en plusieurs couches pour la simulation des flux de chaleur de conduction.

2.2.4. L'apport de la télédétection

L'étude du bilan d'énergie des villes passe par l'approche dite de paramétrisation des nombreux paramètres et propriétés des éléments de la canopée urbaine. A l'échelle d'une ville, ces paramètres sont très variables spatialement et temporellement. Cela complique considérablement l'estimation et la mesure des propriétés utiles au calcul des différents termes du bilan d'énergie. Cependant, avec l'augmentation du nombre de capteurs satellites et leur amélioration, en particulier en termes de de précision radiométrique et de résolution spatiale, les scientifiques ont accès à de plus en plus d'informations utiles. Un intérêt majeur des satellites d'observation de la Terre est de fournir une observation synoptique qui couvre des villes entières, avec un rythme de revisite régulier. Ceci explique que de plus en plus d'études scientifiques les utilisent pour estimer des cartes de propriétés urbaines utiles pour modéliser les différents termes du bilan d'énergie urbain.

Les mesures de télédétection sont aussi classiquement utilisées pour réaliser des classifications des surfaces selon leur type de fonctionnement, qui peuvent elles-mêmes être incorporés à des modèles comme SUEWS (décrit précédemment) dont cette distinction dans les comportements de surface fait partie des données d'entrée. De telles classifications peuvent par exemple être obtenues grâce à des méthodes de spectral unmixing (Mitraka et al. 2012, 2013). Les données satellite obtenues par des capteurs thermiques permettent également

d’obtenir des cartes de température de surface. Ces cartes de température sont directement utiles à des modèles comme ESTM pour estimer le flux de chaleur de stockage. La longueur de rugosité, utile notamment dans le calcul des flux turbulents pour les modèles SVAT adaptés aux paysages urbains, peut également être déterminée à l’aide de mesures de télédétection (Kato et Yamaguchi, 2005 ; Xu et al., 2008 ; Kanda et al., 2007). D'autre part, les images satellites nocturnes peuvent être utilisées pour estimer la densité de population et l’activité des villes, ce qui peut être intégré dans les estimation des flux anthropogéniques.

La détermination des propriétés physiques (propriétés optiques et thermiques) à partir d'observations satellites est très difficile compte tenu de la variabilité spatiale de ces matériaux, de grande hétérogénéité 3D de l'architecture urbaine. Ainsi, les méthodes d'inversion utilisées pour dériver la surface foliaire des arbres à partir d'observations satellites ne sont en général pas applicables, du moins avec une bonne précision, car en tout point du milieu urbain, l'environnement radiatif, et donc la réflectance des surfaces végétales, dépend de l'architecture urbaine locale. En effet, les bâtiments avoisinants affectent beaucoup l'éclairement solaire direct et l'éclairement atmosphérique. Ces difficultés expliquent l'intérêt de l'approche originale conçue et implémentée durant ce travail de thèse. Cette approche permet de dériver d'images satellites la distribution spatiale des propriétés optiques et thermiques des différents matériaux urbain, qui assurent une quasi égalité entre les images satellites et les images simulées par le modèle DART, par pixel, satellite. Elle permet donc d'estimer le bilan radiatif urbain uniquement à partir d'images satellites. Par contre, l’estimation du bilan d’énergie urbain uniquement à partir de données de télédétection total n’est pas encore possible, même si des projets ambitieux comme le projet URBANFLUXES (urbanfluxes.eu) sont réalisés dans ce sens.

Avant de présenter l'approche développée durant cette thèse, la section suivante présente un certain nombre de théories et grandeurs physiques utilisées dans cette approche.

3. Le transfert radiatif

3.1. Processus et grandeurs du transfert radiatif

Le transfert radiatif (ou transfert par rayonnement) est le domaine de la physique mathématique décrivant l'interaction du rayonnement électromagnétique et de la matière (https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_radiatif). Cette discipline permet notamment d'analyser la propagation des photons ou d'autres particules à travers un milieu gazeux, solide ou liquide. Historiquement les premiers développements ont été faits dans le domaine de la physique des plasmas et de l'astrophysique. Elle est aujourd'hui présente dans des domaines aussi variés que l'étude de l'atmosphère et le rendu de génération d'image. Comme déjà indiqué, le bilan radiatif des surfaces terrestres est en général calculé en décomposant le domaine spectral en deux régions spectrales : les courtes longueurs d'onde (shortwave - SW), de l'ultraviolet (0.35µm) au à l'infrarouge moyen (3.5µm), et les grandes longueurs d'onde (longwave - LW) au-delà de 3.5µm. Le transfert radiatif permet d'évaluer précisément ce bilan via le calcul de la densité surfacique de flux radiatif issue du paysage (i.e. exitance) à partir de la densité surfacique de flux radiatif incident (i.e., éclairement) et de la connaissance de l'architecture 3D et des propriétés optiques des éléments du paysage. D'une manière générale, le rayonnement incident SW comprend deux composantes : l'éclairement solaire direct et l'éclairement dû à la diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère. Par contre, le rayonnement incident LW est essentiellement dû à l'émission thermique de l'atmosphère. Les interactions qui surviennent au sein des surfaces terrestres sont essentiellement des mécanismes de diffusion et d'absorption, combinés à des mécanismes d'émission thermique en particulier au-delà de 3.5µm. Ces mécanismes sont en général considérés comme des mécanismes de surface ou de volume. Ainsi, les interactions sur les murs des villes sont des mécanismes de surface, alors que les interactions avec l'atmosphère ambiante sont des mécanismes de surface. Il est intéressant de noter que les interactions avec les éléments foliaires constitutifs de la végétation (e.g., arbres) sont des

mécanismes de volume si la végétation est conceptualisée comme un milieu turbide ou bien des mécanismes de surface si la végétation est conceptualisée comme un ensemble de surfaces foliaires. D'une manière générale, les interactions de volume et de surface ne sont pas isotropes. En ville, les façades vitrées sont particulièrement anisotropes en raison de fortes réflexions spéculaires. Les surfaces qui induisent des diffusions isotropes sont qualifiées de surfaces lambertiennes. Les trois principales quantités utilisées pour quantifier le rayonnement incident et provenant d'une surface sont indiquées ci-dessous.

- La **luminance** $\boldsymbol{L_\Sigma(\Omega)}$ d'une surface Σ dans une bande spectrale donnée $\Delta\lambda$ est le flux énergétique radiatif issu de cette surface selon la direction Ω par unité d'angle solide et par unité de surface efficace de Σ. Son unité est $W.m^{-2}.sr^{-1}$. L'unité de la luminance spectrale associée $\boldsymbol{L_{\Sigma,\lambda}(\Omega)}$ est $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ($\boldsymbol{L_\Sigma(\Omega) = \int_{\Delta\lambda} L_{\Sigma,\lambda}(\Omega)\,.\,d\lambda}$).

- L'**exitance** $\boldsymbol{M_\Sigma}$ d'une surface Σ dans une bande spectrale donnée $\Delta\lambda$ est la densité surfacique de flux énergétique issu de cette surface par unité de surface de Σ. Elle est égale à l'intégrale de la luminance issue de Σ sur l'ensemble des directions ascendantes Ω du demi hémisphère au-dessus de Σ. Son unité est $W.m^{-2}$, et l'unité de l'exitance spectrale associée $M_{\Sigma,\lambda}$ est $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$.

$$\mathrm{M}_\Sigma = \int L_\Sigma(\Omega).|\cos(\theta)|\,.\,d\Omega \ \ (\mathrm{W.m^{-2}}) \qquad \mathrm{M}_{\Sigma,\lambda} = \int L_{\Sigma,\lambda}(\Omega).|\cos(\theta)|\,.\,d\Omega \ \ (\mathrm{W.m^{-2}}.\mu\ \mathrm{m^{-1}}) \tag{4}$$

- L'**éclairement** $\boldsymbol{E_\Sigma}$ d'une surface Σ dans une bande spectrale donnée $\Delta\lambda$ est la densité surfacique de flux énergétique sur cette surface Σ, par unité de surface de Σ. Elle est égale à l'intégrale de la luminance incidente sur Σ sur l'ensemble des directions descendantes Ω du demi hémisphère au-dessus de Σ. Son unité est $W.m^{-2}$, et l'unité de l'éclairement spectral associé $E_{\Sigma,\lambda}$ est $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$.

$$E_\Sigma = \int L_\Sigma(\Omega).|\cos(\theta)|.\,d\Omega \ \ (\mathrm{W.m^{-2}}) \qquad \mathrm{E}_{\Sigma,\lambda} = \int L_{\Sigma,\lambda}(\Omega).|\cos(\theta)|\,.\,d\Omega \ \ (\mathrm{W.m^{-2}.\mu m^{-1}}) \tag{5}$$

La Figure 5 illustre la distinction entre l'exitance et l'éclairement d'une surface.

La capacité d'une surface Σ à réfléchir le rayonnement est souvent représentée par son **facteur de réflectance** $\boldsymbol{\rho}$. Ce dernier est égal au rapport de la luminance due à Σ par la luminance qui surviendrait si Σ était remplacé par une surface blanche lambertienne, dans les mêmes conditions d'éclairement que Σ. Par suite, pour un éclairement E direct ou diffus, le facteur de réflectance pour la direction de diffusion Ω est :

$$\rho(\Omega) = \frac{\pi.\,\mathrm{L}(\Omega)}{E} \tag{6}$$

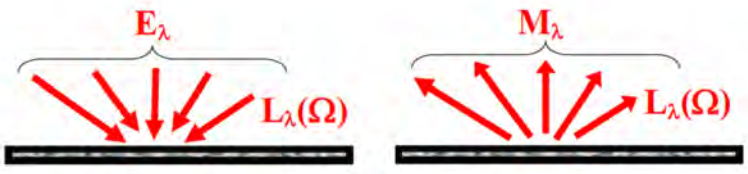


Figure 5 : Illustration de l'ECLAIREMENT (gauche) et DE L'EXITANCE (droite) d'une surface.

De manière schématique, le rayonnement est souvent considéré comme se propageant selon une direction mono-directionnelle (indice "d"), dans un angle solide conique (indice "c") ou selon tout un hémisphère (indice "h"). En fait, un rayonnement ne peut être parfaitement monodirectionnel. D'autre part, un capteur mesure en général dans un angle solide conique. De plus, des études comme le bilan radiatif des surfaces terrestres, s'appuient sur un rayonnement incident et / ou réfléchi selon tout un hémisphère. La Figure 6 illustre les configurations expérimentales les plus classiques. Certaines configurations sont cependant très

schématiques. Ainsi, un rayonnement "hémisphérique" comme l'éclairement du ciel n'est pas forcément isotrope.

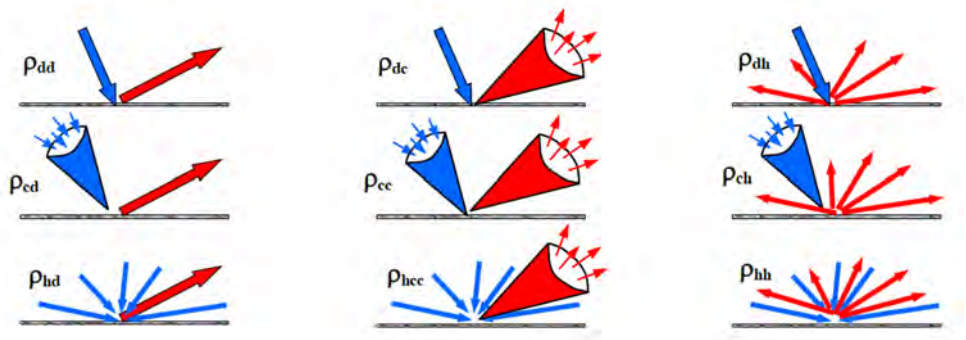


Figure 6 : Différents types de réflectance (directe d, conique c, hémisphérique h)

Une surface lambertienne a un facteur $\rho_{dd}(\Omega_V)$ constant pour toutes les directions de diffusion. Ce facteur est égal à 1 pour une surface blanche lambertienne. Pour une surface naturelle, $\rho_{dd}(\Omega_{V_V})$ est anisotrope avec par exemple un maximum selon la direction spéculaire, et localement maximal dans la direction solaire d'illumination (hotspot). ρ_{dd} dépend de la longueur d'onde considérée. Il correspond à une valeur intégrée sur une région spectrale plus ou moins large, à la limite infiniment étroite. La Figure 7 illustre deux modes classiques de représentation de la distribution angulaire de ρ_{dd} dans le cas d'un paysage schématique qui comprend une maison, un lac et 3 arbres. Les pics associés aux configurations du hot spot et de la réflectance spéculaire apparaissent clairement.

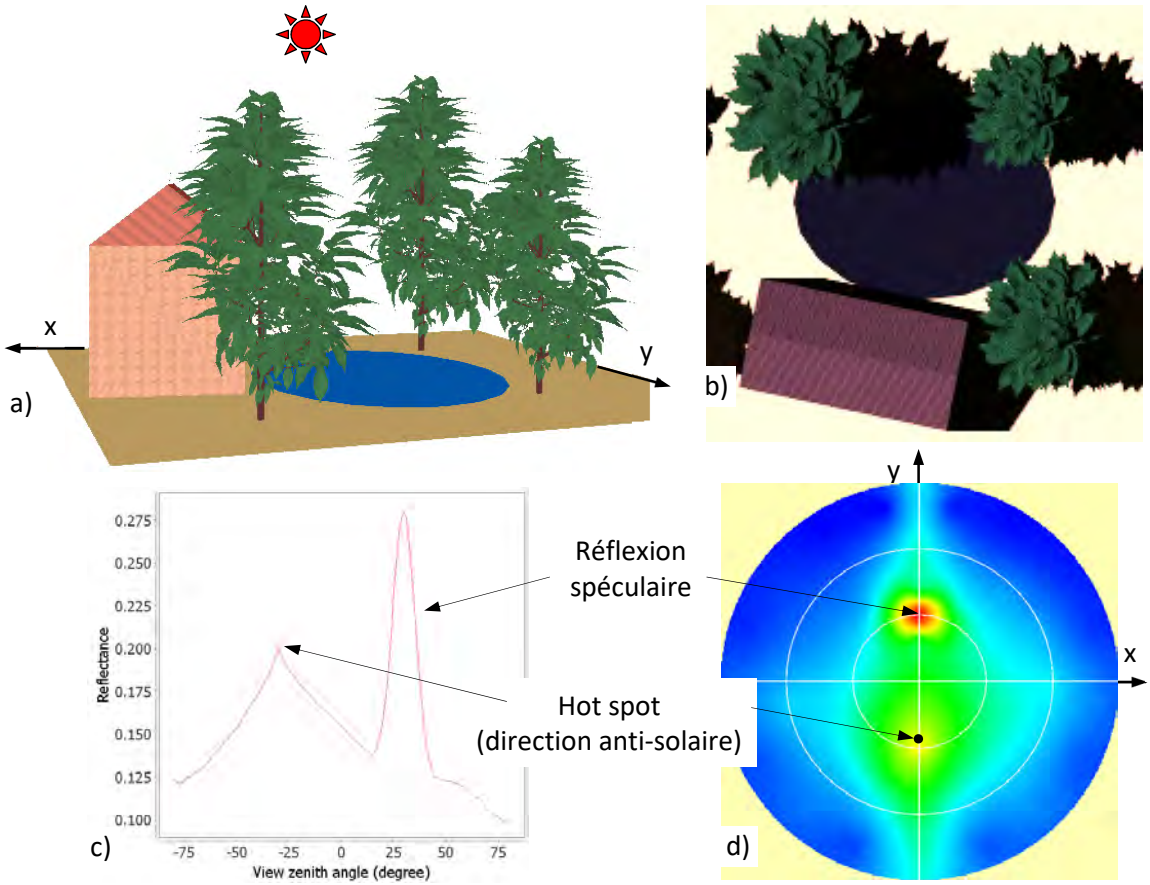


Figure 7 : a) Maquette de paysage (3 arbres, 1 maison, 1 lac) et simulations DART: b) Composition colorée rouge / vert / bleu. c) Réflectance 1D dans le vert selon l'angle zénithal de visée dans le plan solaire. L'angle zénithal est négatif pour les directions solaires arrière. d) Réflectance directionnelle dans le vert. Les deux maxima de la réflectance correspondent aux

configurations "spéculaire" et "hot spot". Le disque noir indique la direction solaire. La distance au centre indique l'angle zénithal de la direction de diffusion. L'origine de l'angle azimutal est l'axe Ox. Angle zénithal solaire de 30° et azimutal de 90°.

- L'**albédo** $\boldsymbol{A}$ est le rapport entre l'exitance et l'éclairement d'une surface. L'albédo peut être défini de différentes manières. Ainsi, $\mathrm{A_{dh}}$ désigne un albédo "hémisphérique - hémisphérique" et $\mathrm{A_{dh}}$ désigne un albédo "direct – hémisphèrique". $\mathrm{A_{dh}}(\Omega_\mathrm{i},\Delta\lambda)$ est une résulte d'une intégrale double : intégrale sur les directions Ω_r de l'hémisphère supérieur (i.e., directions montantes) du facteur de réflectance spectral $\rho_{\mathrm{dd}}(\Omega_\mathrm{i},\Omega_\mathrm{r}\lambda)$ pondéré par l'éclairement spectral $\mathrm{E}_\lambda(\Omega_\mathrm{i})$ selon la direction Ω_i intégré sur la région spectrale $\Delta\lambda$ considérée (e.g., [3µm 50µm]).

$$\mathrm{A_{dh}}(\Omega_\mathrm{i},\Delta\lambda)=\frac{1}{\pi}.\frac{\int_{\Delta\lambda}\int_{2\pi}\rho_{\mathrm{dd}}(\Omega_\mathrm{i},\Omega_\mathrm{r}\lambda).\mu_\mathrm{r}.\mathrm{E}_\lambda(\Omega_\mathrm{i}).\mu_\mathrm{i}.\mathrm{d}\Omega_\mathrm{r}.\mathrm{d}\lambda}{\int_{\Delta\lambda}\mathrm{E}_\lambda(\Omega_\mathrm{i}).\mu_\mathrm{i}.\mathrm{d}\lambda}$$

- Le facteur de **transmittance** $\boldsymbol{T}$ d'une surface est le rapport entre l'éclairement de cette surface et son exitance "avant" (i.e., selon les directions "avant" par rapport à l'orientation du rayonnement incident). Comme le facteur de réflectance, il dépend des directions considérées et peut être bidirectionnel, bi-hémisphérique, etc. Il dépend aussi de la longueur d'onde considérée, et peut être défini pour un intervalle spectral plus ou moins large.

- Le facteur d'**absorbance** $\boldsymbol{a}$ d'un milieu est le rapport entre la puissance interceptée et la puissance absorbée. De manière similaire au comportement du facteur de réflectance, il dépend de la direction incidente. Il dépend également de la longueur d'onde considérée, et peut être considéré en bande large, c'est-à-dire intégré sur un intervalle spectral.

- L'**émissivité** $\boldsymbol{\epsilon}$ d'un corps naturel est le rapport entre la radiation thermique émise et la luminance d'un corps noir de même température. Elle est comprise entre 0 et 1, car à toute température le corps noir émet la plus grande luminance possible. L'émissivité peut être définie sur un intervalle spectral plus ou moins large, et pour un angle solide plus ou moins grand. Pour une direction d'émission Ω_v, elle vérifie l'équation :

$$\mathrm{L}(\lambda,T,\Omega_\mathrm{v})=\epsilon(\lambda,T,\Omega_\mathrm{v}).L_B(\lambda,T) \quad (7)$$

avec $L_B(\lambda,T)$ la luminance du corps noir de température T et de longueur d'onde λ. Cette luminance est donnée par la loi de Planck :

$$\mathrm{L_B}(\lambda,T)=\frac{(2hc^2)}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1)} \quad (8)$$

où h est la constante de Planck ($h=6.62606896.10^{-34}\,J.s$), c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c=299792458\,m.s^{-1}$), et k est la constante de Boltzmann ($k=1.3806504.10^{-23}\,J.K^{-1}$). L'exitance thermique correspond à l'intégrale spectrale. Elle est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\mathrm{M(T)}=\epsilon(\mathrm{T}).\sigma.\mathrm{T}^4 \quad (9)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5.6704.10^{-8}\,W.m^{-2}.K^{-4}$)

L'émissivité et l'absorptance sont liés par la loi de Kirchoff :

$$\epsilon=\mathrm{a} \quad (10)$$

Par suite, la loi de conservation de l'énergie à l'équilibre thermodynamique permet d'écrire :

$$\rho + T + a = 1 \quad (11)$$

L'**albédo** et l'éclairement solaire sont les termes les plus classiquement utilisés pour l'étude du bilan radiatif des surfaces opaques (transmittance nulle) dans les courtes longueurs d'onde. Dans le domaine thermique, le bilan radiatif est principalement dérivé de l'**émissivité** et de la **température** des matériaux.

La connaissance de ces grandeurs "radiométriques", et donc la connaissance de la manière dont le rayonnement évolue entre le Soleil et un capteur satellite ou autre, après être passée par l'atmosphère et avoir interagi avec les différents éléments de surface, est primordiale. En effet, cette connaissance permet une compréhension des quantités observées et par suite une utilisation plus efficace des mesures. Elle est aussi très utile pour l'étalonnage des capteurs satellites, et pour transformer leurs mesures en grandeurs biophysiques, via diverses méthodes d'inversion, telles que la biomasse foliaire, le taux de couverture arborée, ou l'humidité des sols. De nombreux modèles de transfert radiatif apportent une information plus ou moins précise sur le bilan radiatif des surfaces terrestres. Les principaux types de modèles sont indiqués ci-dessous.

3.2 Les modèles de télédétection

3.2.1. Présentation

Ci-dessous, l'expression "Modèle de Télédétection" est utilisé pour désigner un modèle qui simule des mesures de télédétection. Il existe de nombreux types de modèles de télédétection. Les modèles semi empiriques et les modèles physiques, avec en particulier les modèles géométriques et les modèles de transfert radiatif, figurent parmi les modèles les plus fréquents dans le domaine de la télédétection. Ils sont brièvement présentés dans les paragraphes suivants.

Deux modes d'emploi des modèles de télédétection sont en général distingués : mode direct où l'objectif est de simuler la mesure d'un capteur, et mode inverse où les simulations du modèle sont utilisées pour interpréter des mesures radiométriques par exemple en termes de grandeurs biophysiques.

Sous réserve qu'il soit suffisamment performant (*i.e.*, précis, adapté à tout paysage urbain et naturel, adapté à toute configuration d'observation, temps de calcul "raisonnables"), un modèle de télédétection utilisé en mode direct est très utile, voire indispensable, durant la phase de préparation d'une mission spatiale à la fois pour la conception du capteur embarqué (*e.g.*, nombre et position des bandes spectrales, résolution spatiale) et pour la définition des configurations d'observation (*e.g.*, orbite du satellite, direction de visée), compte tenu de l'information recherchée (*e.g.*, cartographie urbaine). Utilisé en mode inverse, un modèle de télédétection "performant" est indispensable pour exploiter au mieux les mesures de télédétection, c'est à dire pour les traduire en information utile. En résumé, dans le domaine de l'observation de la Terre et de l'étude du bilan radiatif, un modèle de télédétection performant permet de juger de la faisabilité d'un projet et d'améliorer sa réalisation.

3.2.2. Les modèles semi-empiriques

Les modèles empiriques, similairement a ce qui a été vu pour les modèles de bilan d'énergies, sont généralement les modèles les moins complexes. Ils ne passent pas par une description des processus radiatifs qui opèrent à la surface, mais par la construction de relations statistiques (souvent polynomiale simple) basées sur des jeux de données d'observations pour simuler la réflectance. Ces relations vont être ajustées au cas de réflectance

simulée (selon la condition d'éclairement et d'observation) selon des données déjà connues de réflectance. Cette approche possède deux avantages majeurs :

- Aucune hypothèse n'est nécessaire quant au type de paysage considéré
- La complexité de la fonction statistique choisie peut être ajustée selon la précision voulue

En pratique, les fonctions utilisées sont suffisamment simples pour pouvoir inverser analytiquement les données observées. De plus, des fonctions plus complexes peuvent prendre en compte plus de types d'observations de références, mais peuvent aussi résulter en une sur-calibration amenant des erreurs par rapport à l'utilisation d'une fonction polynomiale de moindre degré. Ces modèles peuvent également s'appuyer sur des principes physiques simplifiés de la théorie du transfert radiatif et de modèles de géométrie optique. Par exemple, les modèles à noyaux linéaires (Linear Kernel – LiK) calculent les facteurs de réflectance bidirectionnels (BRF) comme la somme de termes **isotropes** (i.e. non dépendant de la direction considérée) et de fonctions **anisotropes** (les noyaux) qui caractérisent les diffusions de surfaces et de volumes (Liu et al., 2010 ; Roujean et al., 1992 ; Wanner et al., 1995). Ce genre d'approche est utilisé pour générer les données d'albédo/BRF dans les produits MODIS, POLDER, MSG/SEVIRI, AVHRR ou encore VEGETATION, afin d'inverser les paramètres de réflectance multi-angulaire et bidirectionnelle en absence de couverture nuageuse (You et al., 2014). Un autre exemple de modèle empirique très largement utilisé dans ce domaine est le modèle Rahman-Pinty-Verstraete (RPV, Rahman et al., 1993), ainsi que ses versions plus récentes optimisées pour l'inversion, comme le modèle RPV modifié (MRPV, Martonchik, 1997) et le modèle EMRPV (Engelsen et al., 1996), qui utilisent des relations analytiques et un nombre réduit de paramètres d'entrée.

De la simplicité des modèles empirique découle un désavantage majeur, qui est l'absence de relation explicite entre les données biophysiques de surfaces et les valeurs de réflectances résultantes, ces dernières étant issues de comportements radiatifs observés des surfaces terrestres (et non simulés). Cet aspect rend les modèles empiriques peu utiles dans l'inversion de paramètres biophysiques du paysage, et plus utilisés dans une modélisation de sens directe, notamment pour de la correction ou normalisation d'effets directionnels dans des mesures de réflectance multi-angulaire. Ils trouvent ainsi plus d'intérêt dans l'étude de données satellites à basse résolution, pour lesquels les comportements globaux des surfaces sont pris en compte, et moins dans les mesures à haute résolution, pour lesquelles les phénomènes biophysiques individuels prennent plus d'importance.

3.2.3. Les modèles physiques

Les modèles physiques sont nés de la demande grandissante de précision dans la connaissance théorique et modélisation du transfert radiatif, dans des conditions expérimentales et instrumentales variées (précision radiométrique, résolutions spatiale, spectrale, temporelle, etc.), pour accompagner de développement de capteurs de plus en plus précis. Ces modèles calculent le bilan radiatif en considérant les principes physiques fondamentaux des interactions du rayonnement dans l'atmosphère et les éléments du paysage considéré. Si les phénomènes de propagation de la lumière sont précisément décrits, le paysage est lui-même représenté de manière plus ou moins simplifiée selon les modèles. Ces simplifications sont naturellement nécessaires, car il est aujourd'hui impossible de représenter un paysage de manière parfaitement fidèle à la réalité, encore moins s'il comprend des structures 3D complexes (par exemple une ville ou une forêt). De plus, en addition des éléments composants le paysage, l'atmosphère et la topologie du sol sont à considérer. Enfin, la complexité des modèles (ou association de modèles) peut varier selon les phénomènes négligés ou non (comme par exemple la fluorescence due au fonctionnement interne des feuilles dans un couvert végétal).

3.2.3.a. La Représentation des paysages

Avant de présenter des exemples de modèles, il est important de préciser les différentes manières dont un modèle peut choisir de représenter le paysage qu'il souhaite étudier, car les choix fait à ce niveau jouent beaucoup sur la précision et la complexité de la modélisation. Les modèles physiques modélisent les paysages en utilisant des représentations homogènes ou hétérogènes. Un milieu **homogène** correspond classiquement à une couche de matériau turbide, principalement de la végétation. Le paysage est ainsi représenté comme une superposition horizontale de couches turbides. Un milieu turbide est défini par un volume dans lequel les éléments absorbants et diffusants (e.g. les feuilles d'une canopée végétale) du paysage sont représentés par une distribution statistique de la densité des éléments supposés plans et infiniment petits (Ross, 1981 ; Smolander et al., 2006). L'utilisation de milieux turbides est une approche classique de simplification de la modélisation de la diffusion, et donc de la réflectance (caractérisée par la manière donc les éléments diffusent le rayonnement), pour décrire la végétation ou les volumes gazeux/liquides. Ce genre de modèle homogène peut notamment être utilisé dans la caractérisation de tendances générales telles que l'évolution de réflectance bidirectionnelle de cultures en fonction de l'évolution de couverture foliaire (LAI). Cette représentation présente deux défauts principaux. D'une part le fait que la distribution homogène des éléments diffuseurs néglige les phénomènes anisotropes qui ont un impact considérable sur la mesure, comme les effets d'ombres apparaissant dans un milieu naturellement hétérogène. D'autre part, la taille des éléments diffuseurs n'est pas considérée, alors que cela, associé à la disposition angulaire de ces éléments, joue sur les effets dits de « hot-spot », se traduisant par une réflectance plus forte quand on observe la scène autour de la direction d'illumination (visible dans la Figure 7). Cependant, un avantage considérable des modèles utilisant une représentation homogène est leur simplicité d'utilisation, en termes de données nécessaires et de puissance de calcul, ainsi que leur rapidité.

Pour offrir une description du paysage plus fidèle à la réalité, d'autres modèles physiques utilisent des représentations **hétérogènes**. Pour parvenir à cette fin, une possibilité est de procéder à une voxelisation turbide du paysage, c'est-à-dire de discrétiser la scène en une grille 3D de volumes (par exemple cubiques) contenant chacun de la matière turbide (Kimes and Kirchner, 1982 ; Myneni et al., 1991). Cela permet d'obtenir plus de précision dans la distribution spatiale horizontale et verticale des paramètres du paysage considéré, par rapport à une représentation en une couche turbide unique. Cependant, la question de la taille des voxels utilisée se pose pour une description statistique qui soit représentative. Il est ainsi difficile de définir une densité foliaire dans un volume contenant seulement un petit nombre de feuilles. Une autre possibilité est de représenter la scène étudiée en utilisant un **maillage 3D**. Dans ce genre de représentation, les éléments du paysage sont décrits comme des assemblages de surfaces planes élémentaire, classiquement des triangles ou des parallélogrammes, caractérisés par les coordonnées cartésiennes des sommets de chaque surface. Cette méthode permet une représentation très réaliste du paysage et des structures de la scène. La précision de la représentation dépend notamment du nombre de surfaces élémentaires utilisées, et de la connaissance précise des positions des différents éléments ou structures qu'ils composent. En utilisant une décomposition fine des éléments composant le paysage, on peut en obtenir une représentation très réaliste, au prix d'une demande augmentée en capacités de calcul. Cette approche est utilisée par la majorité des modèles qui veulent simuler le bilan radiatif sur un paysage réduit avec une grande précision. D'autres modèles peuvent combiner les différentes approches, homogènes et hétérogènes, afin d'avoir le meilleur compromis de précision et d'efficacité dans toutes les situations.

3.2.3.b. Les modèles de réflectance par géométrie optique

Les modèles physiques de géométrie optique (GO) calculent les réflectances bidirectionnelles de surfaces terrestres en fonction de leur structure et de leurs dimensions physiques, en utilisant les lois de l'optique géométrique. Une forêt pourra ainsi être modélisée par un ensemble de couronnes d'arbres représentées par leur forme géométrique approchée (e.g. sphérique) associées à leurs ombres et à un sol forestier, tous caractérisés par des propriétés optiques de surface prédéfinies et intégrant implicitement les diffusions volumiques de lumière (Peddle et al., 2003). Le bilan radiatif est alors simulé selon une partition du paysage en fractions de la canopée et du sol éclairées ou ombragées. Cette approche est particulièrement adaptée à la simulation du transfert radiatif en paysages ouverts, c'est-à-dire pour lesquels le sol n'est pas complètement recouvert par le reste des éléments. L'un des premiers modèles de ce type à avoir été développé le fût par Li et Strahler (Li et Strahler, 1992), avant que de nombreux autres lui succèdent. Par exemple, le modèle 4-Scale (Chen et Leblanc, 1997), définit 4 niveaux d'architecture dans la canopée : les groupes d'arbres, les couronnes, les branches, et les feuilles (ou épines pour les conifères). Les canopées sont définies par des assemblages de cônes et de cylindres pour les conifères, ou par des sphères pour les arbres feuillus. Les branches sont définies par un unique angle d'inclinaison et sont fournies de feuilles ou d'épines définies par leur distribution angulaire. Pour calculer la réflectance bidirectionnelle de la scène ainsi constituée, 4-Scale utilise alors une méthode de diffusions multiples combinées à des « sky view factors » (SVF), définis par la proportion de l'hémisphère de ciel visible depuis chaque élément (Chen et Leblanc, 2001). Le modèle 5-Scale (Leblanc et Chen, 2000) est une extension de ce modèle qui inclus en addition le modèle LIBERTY (Dawson et al., 1998) de propriétés optiques d'éléments foliaires (feuilles et épines).

3.2.3.c. Les modèles de transfert radiatif

Contrairement aux modèles précédents qui simulent seulement quelques composantes du transfert radiatif dans des portions limitées du spectre électromagnétique, comme les facteurs de réflectance bidirectionnelles dans les courtes longueurs d'ondes, les modèles de transfert radiatif simulent l'ensemble de ce dernier, sur l'ensemble du spectre. Ils simulent la propagation de la radiation et sa diffusion au travers des paysages modélisés et les mesures des capteurs radiométriques, selon les équations du transfert radiatif. Ces dernières décrivent les évolutions du rayonnement au cours de son cheminement dans la scène, en fonction de l'absorption, la diffusion, et l'émission thermique des différents éléments qu'il rencontre. Ces modèles sont particulièrement robustes et précis grâce aux représentations réalistes des paysages avec lesquels ils travaillent. Différentes classes d'éléments peuvent typiquement être modélisées dans la simulation du transfert radiatif d'un paysage, pour lesquelles certains modèles sont spécialisés :

- Le sol (e.g. le modèle Hapke (Hapke, 1981))
- Les feuilles (e.g. le modèle PROSPECT (Feret et al., 2008))
- Les canopées végétales (e.g. le modèle SAIL (Verhoef, 1984))
- L'atmosphère (e.g. le modèle MODTRAN (Berk et al., 1987))
- Les bâtiments et autres structures urbaines (e.g. le modèle SOLENE (Miguet et Groleau, 2002))

D'autres modèles sont capables de rassembler différentes techniques de modélisation plus ou moins simplifiées pour modéliser le transfert radiatif dans des paysages réalistes complexes possédant des combinaisons de ces différents types d'éléments. La principale source d'erreur pour ces modèles de transfert radiatif devient alors généralement la gestion des diffusions multiples des rayonnements (i.e. le suivi du rayonnement après de multiples interactions avec les éléments du paysages) et donc la conservation de l'énergie. En effet, ces effets n'ont pas de solution analytique simple, contrairement aux diffusions de premier ordre (après une unique interaction avec un élément du paysage). Les méthodes les plus répandues pour gérer ces phénomènes sont les suivantes :

- Les Ordres Successifs de Diffusions (Successive Orders of Scattering – SOS) : C'est l'une des méthodes les anciennes et dont le concept est parmi les plus simples dans la prise en compte des diffusions

multiples. Elle se base sur un calcul itératif des ordres successifs de diffusion, dans lequel le vecteur de flux de luminance total est la somme des contributions de chaque photon après interaction avec un nombre fixé fini d'élément (i.e. diffusé dans la scène un certain nombre de fois). Un exemple de modèle utilisant cette méthode est le modèle SOSVRT (Duan et al., 2010), qui simule le transfert radiatif polarisé dans des paysages verticalement inhomogènes (plans homogènes horizontaux parallèles).

- N-Flux : Dans cette méthode, N directions discrètes sont définies le long desquelles le rayonnement est considéré et propagé dans la scène, ce qui correspond à la résolution de N équations de transfert radiatif. Par exemple, le modèle SAIL (Verhoef, 1984), utilise 4 directions correspondant à 4 équations différentielles et à 4 flux radiatifs directionnels se propageant dans un milieu horizontalement homogène. Une direction est dédiée au flux solaire, deux pour les flux supposés isotropes (descendants et montants), et une dernière pour les flux dans la direction de visée du capteur modélisé. Ces directions sont visualisées dans la Figure 8. Cependant, une description plus détaillée de l'anisotropie observée dans un paysage complexe peut nécessiter la considération de bien plus de directions, allant par exemple jusqu'à plus de 100 directions (Yin et al, 2013). Le modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2015) peut travailler avec un tel nombre de directions. Elles peuvent alors être réparties de manière homogène sur la sphère 4π, ou définie plus précisément à l'aide d'un angle solide, comme illustré sur la Figure 9.

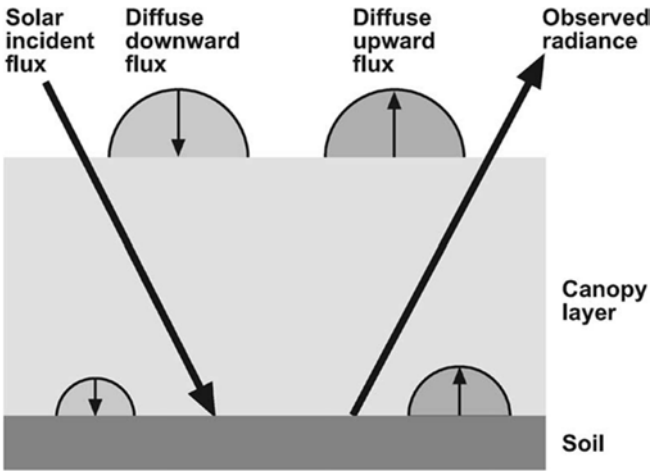


Figure 8 : Représentation des directions utilisée par le modèle SAIL. Une direction solaire, une d'observation, et deux verticales pour les flux ascendants et descendants (Source : Verhoef et al., 2007)

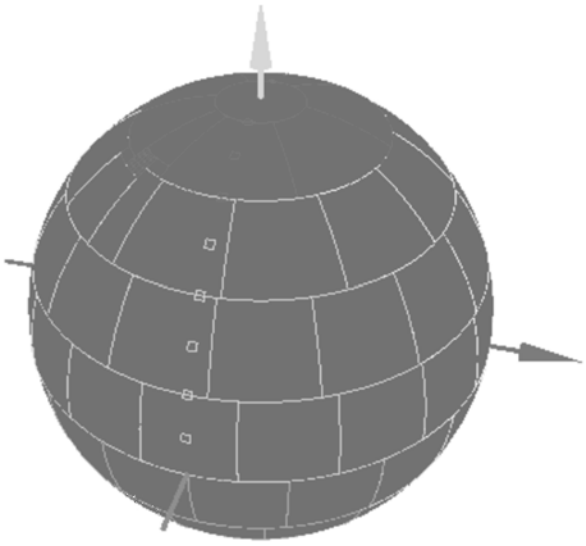


Figure 9 : Représentation d'un jeu de directions utilisé par le modèle DART. La scène observée est au centre de la sphère de directions, partitionnée par les angles solides de chaque direction. 5 directions sont ajoutées à cette partition, représentées par les 5 « carrés » plus petits. (Source : Gastellu-Etchegorry, 2018)

- La Radiosité : Cette méthode est basée sur la résolution des équations d'équilibre radiatif pour un nombre fini M d'éléments diffuseurs discrets, en calculant notamment les view-factors entre chaque élément (Borel et al., 1991). Elle est donc basée sur l'inversion de matrices de taille $M \times M$ qui peut devenir très consommateur en puissance de calculs en présence d'un nombre important d'éléments diffuseurs, ce qui peut être les cas avec des arbres par exemple (chaque feuille étant alors un élément diffuseur).

- Monte-Carlo : Cette méthode consiste à suivre un photon depuis sa source lumineuse (e.g. le Soleil) jusqu'au capteur ou jusqu'à l'absorption du photon, en simulant la succession de phénomènes de diffusions affectant ce photon au fur et à mesure de ses interactions avec les différents éléments de la scène. Un avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite que le calcul explicite de diffusions d'ordre 1 (Disney et al., 2000). Cependant, pour être représentative du comportement radiatif de la scène considérée, un grand nombre de trajectoires de photons doivent être simulées. De plus, la scène et chacun de ses composants (e.g. arbres, bâtiments, etc.) doivent être représentés précisément en trois dimensions avec les propriétés radiométriques associées (réflectance, émissivité, etc.). Ceci implique de fortes demandes calculatoires et une intégration numérique (i.e. l'intégration Monte Carlo). Drat (Lewis, 1999), FLIGHT (North, 1996), et Raytran (Govaerts et Verstraete, 1998), sont des exemples de modèles utilisant la méthode de Monte-Carlo.

Ici encore, chacune de ces différentes méthodes à des avantages et des inconvénients, majoritairement sur des aspects de précision, de puissance de calcul, et de besoin en données d'entrée, sur lesquels un compromis doit être fait selon l'étude à réaliser. La versatilité des modèles devient alors un véritable avantage pour réaliser le meilleur compromis possible, tant dans la représentation des paysages que dans les méthodes et modélisations utilisées pour simuler le bilan radiatif des scènes étudiées. Par exemple, le modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2015), permet l'utilisation d'une combinaison de milieux turbides et de facettes pour représenter les paysages. Il peut ainsi importer des objets ou ensembles d'objets sous forme de maillage 3D précis pour les éléments de paysages qui le nécessitent, et simuler dans le même paysage de la végétation sous forme turbide pour limiter la puissance de calcul. De la même manière, il peut faire fonctionner en parallèles des modèles radiatifs entre autres d'atmosphère de feuilles ou de sols (e.g. Hapke et PROSPECT), pour simuler le transfert radiatif terrestre et sont couplage avec l'atmosphère. Enfin, il peut utiliser la méthode de Monte-Carlo grâce à sa représentation précise du paysage, ou plus classiquement une méthode de suivi de rayon à N-flux avec N

supérieur à 100 directions (généralement 105 en plus de la direction solaire) afin de représenter au mieux la réalité anisotrope des paysages urbains ou végétaux étudiés.

Les modèles de transfert radiatif sont aussi très utiles pour déterminer le bilan radiatif des surfaces terrestres selon leur état (*e.g.*, stade de développement d'une culture), leur architecture 3D (*e.g.*, ville), les conditions atmosphériques, etc. La modélisation du transfert radiatif et de ses composants est une discipline qui a été considérablement étudiée par le passé, et qui continue de progresser aujourd'hui. Elle est primordiale pour ce qui est de la compréhension des phénomènes radiatifs, de la calibration et définition des capteurs, à la fois de plus en plus nombreux et sophistiqués, et finalement du développement de l'observation de la Terre par satellite.

Les nombreux modèles de transfert radiatifs existants se distinguent par l'approche "physico-mathématique" avec laquelle ils simulent le transfert radiatif et par la manière dont le paysage étudié est simulé. En général, les modèles les plus précis sont les plus complexes et ceux dont les temps de calcul sont les plus élevés. Par suite, le choix d'un modèle de transfert radiatif dépend de nombreuses considérations : complexité et étendue du paysage étudié, résolution spatiale des résultats, temps de calcul, etc. Ainsi, un modèle qui simule de manière très schématique les paysages et les mécanismes radiatifs est souvent plus adapté pour simuler de grandes surfaces avec des moyens informatiques réduits, qu'un modèle qui simule avec précision les paysages et les mécanismes radiatifs, et par suite les mesures radiométriques et le bilan radiatif. En effet, la prise en compte de la complexité des paysages terrestres et des multiples mécanismes radiatifs (e.g., diffusions de volume et de surface, éclairement atmosphérique anisotrope, topographie, etc.) requiert des moyens informatiques supérieurs. De plus, la paramétrisation des modèles "complexes" est plus compliquée à mettre en œuvre que la paramétrisation des modèles simples qui ne nécessitent qu'un nombre restreint de paramètres d'entrée. L'amélioration des puissances de calcul, combinée à l'optimisation informatique des modèles complexes et aux besoins sans cesse croissants de précision concernant à la fois le bilan radiatif et l'information dérivée des mesures de télédétection, incite à utiliser de plus en plus des modèles complexes en raison de leur plus grande précision.

3.2.4. L'apport de la télédétection

De la même manière que pour les modèles de bilan d'énergie, le développement de capteurs satellites et de l'observation de la Terre est très bénéfique pour la modélisation du bilan radiatif des surfaces terrestres de tout type. De manière générale, la télédétection facilite l'étude et l'observation des surfaces terrestres et des propriétés des différents éléments (e.g. la végétation, les sols, les bâtiments, etc.) qui la composent, grâce à la vision à grande échelle (comparé à un capteur avion ou local) et à fréquence temporelle de plus en plus élevée qu'elle offre. Les images satellites sont acquises pour des configurations instrumentales (résolution et domaine spectral, angle de visée, résolution spatiale, etc.) et expérimentales (types et conditions de surface, états atmosphériques, position du soleil, etc.) données, qui doivent être traduites en informations qualitatives et quantitatives sur les différents paramètres de la surface terrestre. Les avancées technologiques sur la précision des différents capteurs sur l'ensemble du spectre nécessitent une avancée toute aussi grande de la modélisation des mesures de télédétection pour profiter pleinement des informations qu'elles apportent.

Ces mesures sont très liées au transfert radiatif. En effet, la plupart des capteurs spatiaux mesurent des composantes radiatives de la surface terrestre, majoritairement des valeurs de luminance ou réflectance spectrale. Il est donc important de pouvoir modéliser efficacement les phénomènes radiatifs au cœur des paysages étudiés, et également de pouvoir simuler des mesures de capteurs satellites. Pour ce faire, l'amélioration de la résolution spatiale des capteurs (e.g. jusqu'à 10m pour Sentinel-2) nécessite une représentation toujours plus précise des paysages étudiés, particulièrement lors de l'étude de scènes possédant

une architecture tridimensionnelle complexe telles que des villes. En effet, les canopées urbaines sont par nature anisotropes pour tous les phénomènes radiatifs, ce qui ne peut pas être représenté par une représentation homogène du paysage. Il est donc nécessaire de pouvoir représenter précisément des paysages suffisamment étendus. Pour étudier le fonctionnement radiatif d'un paysage tel qu'une ville, modéliser une scène à l'échelle d'un ou plusieurs quartiers, voire de la ville, permettra de rendre compte véritablement des variations spatiales du bilan radiatif, et de profiter pleinement de l'apport des capteurs satellites. Ainsi, le modèle utilisé se doit d'être capable de représenter précisément des scènes de plusieurs kilomètres carrés (i.e. pour contenir plusieurs quartiers), et de fournir des simulations de bilans radiatifs sur des résolutions spatiales supérieures à 100m² (i.e. pour que chaque quartier modélisé contienne un nombre suffisant de pixels).

Additionnellement, pour utiliser pleinement les données fournies par les images satellites, et pour pouvoir calculer le bilan radiatif complet, un modèle se doit de pouvoir travailler sur l'ensemble du domaine spectral, du visible à l'infrarouge thermique, en utilisant n'importe quelle résolution spectrale donnée. Il doit aussi pouvoir simuler le transfert radiatif dans tous les matériaux susceptibles d'être observés par le satellite (e.g. pour une ville : les bâtiments, le sol, la végétation des parcs/forêts, etc.), et dans l'atmosphère, qui influe directement sur la mesure et l'illumination de la scène. Enfin, il est important de noter que la mesure satellite n'a pas que des avantages. Par exemple, une mesure de réflectance d'un satellite ne pourra être réalisée que par temps dégagé, c'est-à-dire sans nuages. Il est donc intéressant de pouvoir développer des méthodes afin de modéliser le transfert radiatif même quand une image satellite n'est pas utilisable, pour cause de nuages, ou simplement si l'on souhaite simuler des valeurs à une fréquence temporelle plus importante que celle du satellite. De plus, la mesure satellite est dans la plupart des cas réalisée pour une unique direction de visée, et pour un nombre limité de bande spectrales. Or, comme vu précédemment, le bilan radiatif surfacique total dépend des flux observés sur l'ensemble des directions disponibles, et sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Il est donc nécessaire de pouvoir utiliser la mesure unidirectionnelle du satellite afin de la transformer en une simulation multidirectionnelle, qui tienne compte de l'anisotropie du paysage, et interpolée/extrapolée sur l'ensemble du domaine spectral. Le modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2015), est l'un des modèles physiques de transfert radiatif les plus complets à ce jour, simulant les interactions radiatives Terre-atmosphère du visible à l'infrarouge thermique, et offrant une représentation du paysage variée, précise et efficace, et capable notamment de simuler des images de télédétection de paysages complexes, ainsi que le bilan radiatif associé. Il peut répondre aux besoins cités plus haut et est introduit plus en détails dans la suite du texte. Il sera utilisé, parallèlement au développement de méthodes innovantes, pour apporter des réponses ou éléments de réponses aux questions scientifiques suivantes :

Comment inverser efficacement les informations apportées par une image satellite ?

Comment utiliser ces informations pour calculer le bilan radiatif d'un paysage urbain ?

Quel est l'apport de la considération explicite de l'architecture 3D urbaine dans la précision du calcul du bilan radiatif ?

Comment prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle des propriétés des différents éléments du paysage urbain ?

Comment développer une méthode qui soit applicable à des villes possédant des fonctionnements radiatifs très différents ?

Comment extrapoler ces informations à des dates n'ayant pas de données disponibles ?

II. Modélisation 3D du Transfert Radiatif et Données Utilisées

1. Présentation

Le bilan radiatif urbain Q^*, introduit dans le chapitre I, est l'un des composants majeurs du bilan d'énergie urbain. Sa connaissance est cruciale pour comprendre des processus fondamentaux liés au bilan d'énergie total comme la contribution des activités anthropogéniques (Q_F) au réchauffement climatique mondial et l'impact de ce réchauffement sur l'environnement urbain et des phénomènes comme l'UHI (Grimmond et Oke, 1999a). Ainsi, il constitue une composante majeure dans le cadre du projet de recherche URBANFLUXES (Chrysoulakis, 2015) dédié à la quantification de Q_F et des autres flux énergétiques urbains avec une approche basée sur la modélisation physique et les images des satellites d'observation de la Terre. Ces flux énergétiques urbains étant extrêmement variables dans le temps, l'étude du bilan d'énergie urbain requiert des séries temporelles de ces flux, et donc de Q^*. Classiquement, ce dernier est considéré être la somme de deux termes : le bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde (shortwave – SW) jusqu'à 3.5μm, où le soleil est la source principale de rayonnement, et le bilan radiatif dans les grandes longueurs d'onde (longwave – LW) au-delà de 3.5μm, où l'atmosphère et les surfaces terrestres sont les principales sources de rayonnement. Le calcul de Q^* urbain présente plusieurs difficultés (Meganem et al., 2014). En effet, il varie spatialement et temporellement, en particulier du fait des changements de la canopée urbaine (e.g. phénologie de la végétation, nouveaux bâtiments, etc.), des configurations d'illumination (e.g. direction solaire, conditions d'atmosphère, etc.), de la température des matériaux urbains (e.g. murs, routes, toits, etc.), et de l'architecture des quartiers (e.g. hauteur et densité des bâtiments, présence de parcs, etc.). Ces deux types de variabilité conditionnent le choix des approches (e.g. modèles et données) utiles pour déterminer Q^* de manière efficace.

Les satellites d'observation de la Terre sont bien adaptés pour la détection des variations spatiales et temporelles des canopées urbaines, car ils fournissent des observations (i.e. images) fréquentes de canopées urbaines entières dans les courtes et grandes longueurs d'onde. Cependant, le calcul de Q^* à partir de ces observations se heurte à une difficulté majeure : les images satellites sont réalisées pour une direction de visée unique et pour un temps donné, et de plus ne couvrent qu'une partie du spectre électromagnétique utile (i.e. [0.3μm 50μm]). Par exemple, dans les courtes longueurs d'onde, des images d'observation de la Terre corrigées des effets atmosphériques, c'est-à-dire correspondant à des mesures qui seraient prises en bas de l'atmosphère (Bottom of Atmosphere – BOA), mesurent des informations 2D de luminances $L_{x,y}(\Omega_S, \Omega_V, \Delta\lambda_i)$ (ou sous forme de réflectances) par pixel $M(x,y)$, pour une direction solaire Ω_S unique (i.e. un temps unique), une direction de visée unique Ω_V du capteur, et pour un nombre limité de bandes spectrales $\Delta\lambda_i$. Ainsi, cette information 2D et spectrale ne correspond pas aux produits voulus (i.e., albédo de surface, exitance, Q^*), qui sont des intégrales doubles sur tout le domaine spectral et toutes les directions "montantes" de l'hémisphère supérieur $2\pi^+$. Par exemple, l'exitance spectrale d'une surface urbaine est l'intégrale de la luminance $L(\Omega_V)$ de cette surface selon toutes les directions de l'hémisphère montant (pondérée par une fonction cosinus), et l'exitance SW est l'intégrale de l'exitance spectrale SW, pondérée par l'éclairement du Soleil. Il en est de même pour l'albédo (rapport de l'exitance par l'éclairement), l'exitance LW et le bilan radiatif Q^*.

Pour dériver l'exitance de mesures unidirectionnelles satellitaires, une approximation classique est de considérer que la luminance urbaine est isotrope, c'est-à-dire que la luminance dans toute direction montante est égale à la luminance mesurée par le satellite. Cette approche, notamment adoptée par les modèles de bilans radiatifs qui négligent l'architecture 3D des paysages urbains, est rarement acceptable, car les canopées urbaines ont un comportement radiatif SW et LW très anisotrope (Krayenhoff and Voogt 2016; Voogt and Oke 1998; Lagouarde et al. 2010). Son emploi conduit à des estimations très imprécises de Q^* et de ses composantes, et donc du bilan d'énergie urbain total. Une approche originale a été conçue durant cette thèse pour remédier à cette situation : elle s'appuie sur un modèle de transfert radiatif (TR) qui simule précisément à la fois les mesures directionnelles satellitaires, à partir d'une représentation 3D du paysage urbain. La mise en œuvre de cette approche pour dériver Q^* de données satellites requiert quatre conditions majeures :

1) Des images satellites corrigées des effets atmosphériques avec :
   - des bandes spectrales qui échantillonnent le domaine spectral utile,
   - une résolution spatiale adaptée aux variations spatiales urbaines (e.g. taille de pixel inférieure à 100m)
   - des dates adaptées à l'évolution temporelle urbaine.
2) L'architecture 3D de la ville étudiée, ainsi qu'un modèle digital d'élévation du sol, et si possible une description de la végétation (position et taille des arbres). Ces informations sont de plus en plus facilement disponibles avec la multiplication des études menées et des moyens déployés.
3) La distribution spatiale des propriétés optiques et de la température des différents matériaux urbains (e.g. sol, murs, toits, végétation, etc.). Du fait de sa variabilité spatiale et temporelle, cette information ne peut être obtenue uniquement par des mesures in-situ. Par suite, une méthode originale d'obtention de cette information directement à partir d'images satellites et d'un modèle TR a été conçue et mise en œuvre durant cette thèse.
4) Un modèle de transfert radiatif qui :
   - simule à la fois des images de luminance et de bilan radiatif intégré,
   - prend en compte l'architecture 3D urbaine
   - prend en compte la distribution spatiale des propriétés optiques des matériaux urbains,
   - simule de grandes surfaces urbaines, et si possible des villes entières.
   - simule toute condition atmosphérique au-dessus de la canopée urbaine et si possible dans la canopée (par exemple pour prendre en compte la pollution), ce qui implique de calculer le transfert radiatif dans l'atmosphère à la fois au-dessus et à l'intérieur de la canopée.

Ce chapitre présente le modèle TR retenu, compte tenu des critères indiqués ci-dessus, ainsi que les adaptations et améliorations qui lui ont été apportées durant cette thèse. Il présente aussi l'apport des capteurs satellitaires pour l'étude des milieux urbains, et en particulier les images satellitaires utilisées durant cette thèse. Finalement, les données spécifiques aux trois sites d'étude (Londres, Angleterre ; Bâle, Suisse ; Héraklion, Crète) sont introduites. Ces trois sites sont ceux du projet URBANFLUXES. Ils ont été utilisés pour tester et valider les approches conçues durant cette thèse. Ils ont été choisis, car ils représentent trois types distincts de paysages urbains et de climats. Ainsi Londres présente une canopée très dense et étendue dans un climat tempéré, Bâle une ville moins étendue dans un climat continental, et Héraklion une ville côtière dans un climat méditerranéen. Ces sites d'étude, les scènes associées, et leurs spécificités seront plus amplement décrits dans le chapitre IV.

1. Le Modèle DART

1.1. Introduction

Le modèle *Discrete Anisotropic Radiative Transfer* (DART, Gastellu-Etchegorry et al., 2015) est un modèle physique 3D de transfert radiatif qui simule l'émission et la propagation du rayonnement lumineux dans les paysages terrestres de tous types, sur l'ensemble du spectre électromagnétique du visible à l'infrarouge thermique. Il est développé depuis 1992 au CESBIO, et a été breveté en 2003. Il utilise la physique du rayonnement et prend en compte l'éclairement solaire incident et l'émission thermique des paysages, pour calculer la propagation du rayonnement en fonction des propriétés optiques et thermiques des éléments. Il fournit le bilan radiatif et les mesures de télédétection passive (spectroradiomètres imageurs) et active (LIDAR) satellitaire, aéroporté et terrestre. DART modélise les paysages de manière explicite, ce qui implique que l'étendue spatiale et la précision des simulations ne sont limitées que par les données d'entrée et la puissance de calcul disponible.

De manière générale, une image satellite est conditionnée par :

1) Le paysage observé, c'est-à-dire les éléments qui le composent et leurs propriétés optiques et thermiques.
2) Les conditions d'illumination (e.g. la position du soleil) et la distribution 3D des températures
3) L'état et la composition de l'atmosphère (jouant notamment sur l'illumination)
4) Le capteur utilisé, c'est-à-dire sa direction de visée, ses caractéristiques optiques, les domaines spectraux utilisés (bandes spectrales définies par leur longueur d'onde centrale λ et largeur de bande $\Delta\lambda$, ainsi que leurs fonctions de sensibilité), et sa résolution spatiale.

DART permet de simuler et gérer la majeure partie de ces paramètres, dans une très large gamme d'applications. Il est constitué de quatre modules majeurs paramétrables :

a. Le module **direction** : pré calcul des directions de propagation du rayonnement dans l'espace 4π.
b. Le module **phase** : pré calcul des propriétés optiques de surface et de volume (e.g. fonctions de phase de la végétation, si celle-ci est simulée de manière turbide) des surfaces terrestres présentes et de l'atmosphère, pour minimiser les temps de calcul de la simulation du transfert radiatif.
c. Le module **maket** : simulation de l'architecture 3D et des propriétés optiques et thermiques du paysage.
d. Le module **dart** : simulation du transfert radiatif.

En plus de ces quatre modules, DART comprend un séquenceur de simulations, et de nombreux modules qui par exemple permettent de simuler des images satellitaires à bande-large, de générer des modèles numériques de terrain (MNT) schématiques, des modèles intégrés de réflectance bidirectionnelle de surface de Hapke (Hapke, 1981) et RPV (Rahman et al., 1993), des modèles optiques foliaires Fluspect et PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990), etc. Le format des données d'entrée dépend de la nature de ces données : bases de données SQL pour les propriétés optiques des matériaux, l'éclairement solaire et les propriétés physiques de l'atmosphère, fichiers au format obj pour les objets 3D (e.g. base de données géométrique urbaine, arbres, etc.), simples fichiers texte pour l'éclairement solaire mesuré sur le terrain, etc. D'autre part, les modules de DART sont pilotés via une interface graphique (IHM) ou directement via des scripts écrits en langage Python. L'Université Paul Sabatier délivre les licences de DART. Début 2018, plus de 300 Universités et Centres Spatiaux (NASA, ISRO, London King College, etc.) ont acquis des licences. Ces licences sont gratuites pour la Recherche et l'Enseignement.

Le modèle DART a été validé par comparaison à des mesures (Gastellu-Etchegorry et al., 1999) et à d'autres modèles de réflectance 3D (e.g., FLIGHT (North, 1996), SPRINT (Thompson et Goel, 1998)**,** Raytran (Govaerts et Verstraete, 1998)) dans le contexte de l'étude RAMI (RAdiation transfer Model Intercomparison – (Pinty et al, 2001 ; Pinty et al., 2004 ; Widlowski et al., 2007 ; Widlowski et al., 2008 ; Widlowski et al., 2013). Il est et a été utilisé avec succès dans de nombreuses applications scientifiques, dont le développement de méthodes d'inversion d'images de réflectance satellite ou avion (Gascon et al., 2014 ; Banskota et al., 2013)), la conception de capteurs satellites (e.g., DESDynl de la NASA, Pleiades du CNES, mission LIDAR du CNES (Durrieu et al., 2013)), l'estimation de l'impact de la structure des canopées sur la texture des images satellitaires (Bruniquel-Pinel et Gastellu-Etchegorry, 1998 ; Gastellu-Etchegorry et al., 1999), la modélisation de la distribution 3D de la photosynthèse de canopées végétales (Malenovský et al., 2008), le design d'un nouvel index d'estimation de chlorophylle d'une forêt de conifères (Malenovský et al., 2013), dans des études de forêt tropicales (Barbier et al., 2010 ; Barbier et al., 2012 ; Proisy et al., 2014), etc.

La section qui suit présente le modèle de manière générale, ses entrées et ses sorties, et les fonctionnalités qui ont été utilisées durant l'étude, ainsi que les améliorations apportées dans le cadre de cette dernière.

1.2. La Représentation du Paysage

1.2.1. La Maquette

1.2.1.a. Généralités

DART simule et gère les scènes 3D indépendamment de la modélisation du transfert radiatif. La maquette, illustrée en Figure 2.1,aussi appelée scène, est le paysage dans lequel le transfert radiatif est simulé. Elle contient une représentation des différents éléments du paysage qui interagissent avec le rayonnement. Le paysage modélisé est compris dans un parallélépipède rectangle divisé en cellules (voxels). Les cellules sont des parallélépipèdes rectangles à base carrée (mêmes dimensions X et Y). A l'intérieur du paysage, les cellules ont toutes la même dimension, définie par l'utilisateur selon les besoins en précision et les contraintes en termes de temps de calcul et de volume mémoire. Ces dimensions sont en général plus petites que les dimensions des cellules utilisées pour modéliser l'atmosphère surplombant la scène, décrite de manière plus détaillée par la suite. Les coordonnées (X, Y, Z) au sein de la scène s'expriment en mètres dans un repère orthonormé et sont comptées positivement à partir d'un coin origine au bas de la maquette.

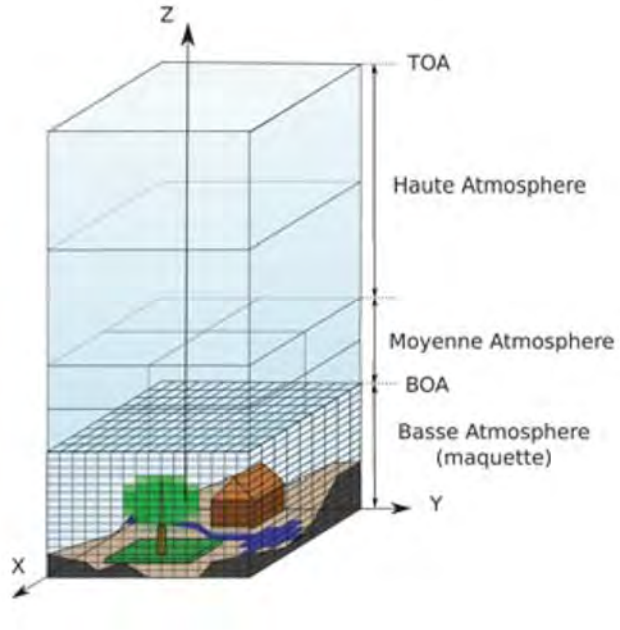


Figure 2.1 : Schéma du système Terre-Atmosphère simulé dans DART. Il comprend la maquette terrestre et l'atmosphère.

Il est intéressant de noter que cette représentation 3D des paysages permet de se ramener à de simples modélisations 2D ou 1D en paramétrant différemment la taille des cellules utilisées. Ainsi, le paysage peut être modélisé comme un simple empilement de couches infinies, et obtenir une représentation du paysage semblable à celle des modèles homogènes ou 1D (e.g. modèle SAIL). Toute scène simulée peut contenir deux classes d'éléments, possiblement combinés au sein d'une même cellule :

1) **Volumes** : ensemble de cellules de la maquette remplies par des fluides (e.g., air, eau, fumée) ou de la matière dite turbide. Cette dernière est souvent utilisée pour simuler la végétation ; elle correspond à une distribution spatialement homogène d'éléments surfaciques infiniment petits caractérisés par leur densité volumique de surface et par une fonction qui indique la distribution angulaire de leurs normales. Les volumes donnent lieu à des diffusions d'ordre 1 et multiples dites de volume.

2) **Surfaces planes** : triangles ou parallélogrammes utilisés pour simuler les interactions surfaciques de rayonnement. Elles peuvent représenter n'importe quel élément du paysage considéré (végétation, bâtiments, etc.). Toute surface est caractérisée par un modèle de facteur de réflectance bidirectionnelle (FRB), un facteur de transmittance directe, et un facteur de transmittance diffuse lambertienne.

Ces deux classes d'éléments permettent de simuler tout type d'objet et de paysage terrestre, à toute résolution spatiale. Ainsi, DART peut directement créer des paysages schématiques, de précision souvent suffisante pour de nombreux travaux. DART peut aussi importer des objets et paysages 3D créés par des modèles externes, et les assembler pour simuler les paysages étudiés. Cette souplesse de création de paysage est un des points forts du modèle DART. Ainsi, toute scène DART contient des cellules vides (i.e. sans interaction avec le rayonnement), des cellules mixtes contenant des matériaux turbides et/ou des éléments surfaciques, et des cellules contenant uniquement de l'air (i.e. fluide). La discrétisation du paysage en cellules permet d'obtenir des informations sous forme de matrice 3D (e.g. distribution du feuillage, des triangles, des composantes du bilan radiatif). De plus, elle permet d'utiliser des technologies optimisées de suivi de rayons et de calcul d'intersection des rayons par les éléments surfaciques.

1.2.1.b. Les conditions aux limites

Le paysage terrestre étant un parallélépipède fini, il existe trois types de conditions limites pour tout rayon incident en un point (A) d'une face du parallélépipède :

1) Rayon incident sur la face du bas : il est totalement intercepté.
2) Rayon incident sur la face du haut : il est stocké par direction et par pixel, de manière à créer les images et composantes du bilan radiatif. Ces rayons permettent aussi de simuler le couplage radiatif entre le paysage terrestre et l'atmosphère.
3) Rayon incident sur une face latérale : il est stoppé / perdu dans le cas d'un paysage dit isolé (i.e. mode "scène isolée"). Autrement, il sort et entre à nouveau dans la maquette en un point (B) de la face symétrique. Dans ce cas, le paysage est infini exactement répétitif (i.e., mode "scène infinie répétitive") si (B) est le point symétrique du point (A). Le paysage est infini avec continuité du relief (i.e., mode "pente infinie) si (B) est symétrique de (A) avec un décalage vertical qui correspond à la différence d'altitude moyenne des faces de sortie et d'entrée du parallélépipède. Ces trois modes requièrent chacun un éclairement, un suivi de rayon et une construction d'image spécifiques. Ils sont illustrés dans la Figure 2.2 et les images simulées résultantes dans la Figure 2.3.

Dans le cas d'une **scène répétitive**, le mode par défaut du modèle, un rayon sortant par une face latérale est réintroduit à la même hauteur et avec la même direction par la face opposée. Cette représentation est utile pour un paysage horizontal. En présence de relief, pour éviter qu'un rayon puisse être réintroduit sous le sol, la maquette est construite de manière à ce que le sol ait les mêmes altitudes sur les côtés opposés de la scène. Ainsi, le relief est répétitif et continu, mais possiblement avec une forte variation à la limite de la scène pour ajuster les altitudes sur la bordure. La simulation d'une pente simple, par exemple, se traduira par une scène répétée à l'infini et redescendue à chaque fois à l'altitude de base (en 'toit d'usine'). Cela induit des effets d'ombres indésirables telles que des bandes sombres dans les images simulées (Figure 2.3). La scène répétitive infinie est la plus simple à gérer : l'illumination de la scène est simulée en émettant des rayons depuis le haut de la maquette uniquement ; la répétitivité de la scène implique un éclairement infini. De même, les images sont créées uniquement par les rayons sortant par le haut de la maquette. L'image associée à une direction d'observation Ω_v Ces images peuvent être horizontales (i.e., même dimension que la section horizontale de la maquette) soit projetées dans le plan perpendiculaire à la direction Ω_v.

Le mode **pente infinie** permet de simuler une scène répétitive en conservant la continuité de la pente de la scène. A cette fin, les altitudes des bords de la scène répétée sont décalées d'une valeur constante et spécifique à chaque bord. De manière schématique, les scènes adjacentes à la scène de base sont relevées ou rabaissées pour correspondre à l'élévation de la pente du sol. Ce mode s'appuie sur des traitements automatiques particuliers par rapport au cas d'une scène répétitive infinie classique, notamment pour l'éclairement de la scène et la construction des images simulées. Lors de la phase d'illumination, l'éclairement de la scène est simulé à partir d'une zone du haut de la maquette plus étendue que la maquette elle-même (cf Figure 2.2). En effet, cela permet d'éclairer intégralement la scène, alors que la zone répétée classiquement est éclairée totalement par les rayons sortant par les faces latérales. Cette zone d'éclairement dans le mode pente infinie dépend des différences de hauteur entre les différents côtés de la scène et de la direction de l'éclairement. Un rayon montant qui sort de la scène est suivi pour être soit réintroduit dans le paysage, soit stocké pour former l'image finale, soit perdu (pour les directions dans lesquelles la scène n'est pas vue par le capteur).

Dans le mode "**maquette isolée**", tout rayon qui sort pas un côté de la scène n'est pas réintroduit dans la maquette, ce qui correspond au fait que la scène n'interagit pas avec le paysage non simulé qui l'entoure. Les rayons montants sont stockés à leur point d'intersection avec le plan contenant la face supérieure de la maquette. Ainsi, les images simulées dans le plan horizontal ont des dimensions qui varient avec la direction de visée du capteur. Aussi, comme dans le cas de la pente infinie, la zone d'éclairement varie avec la direction solaire et le relief de la scène.

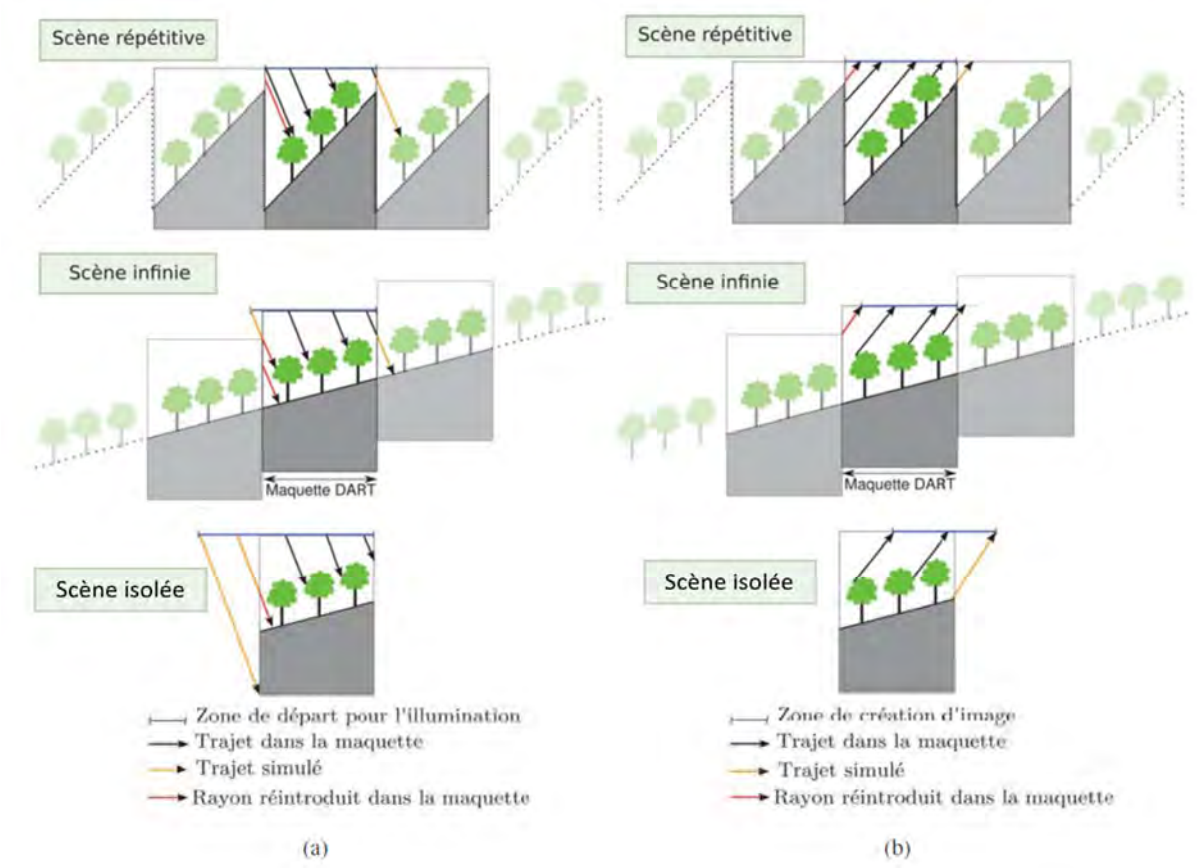


Figure 2.2 : Illustration des différents modes de **SUIVI DE RAYONS** *aux limites de la scène : mode maquette répétitive (haut), pente infinie (milieu), scène isolée (bas). Les flèches représentent les rayons descendants lors de l'illumination (a) ou montant lors de la création d'image (b)*

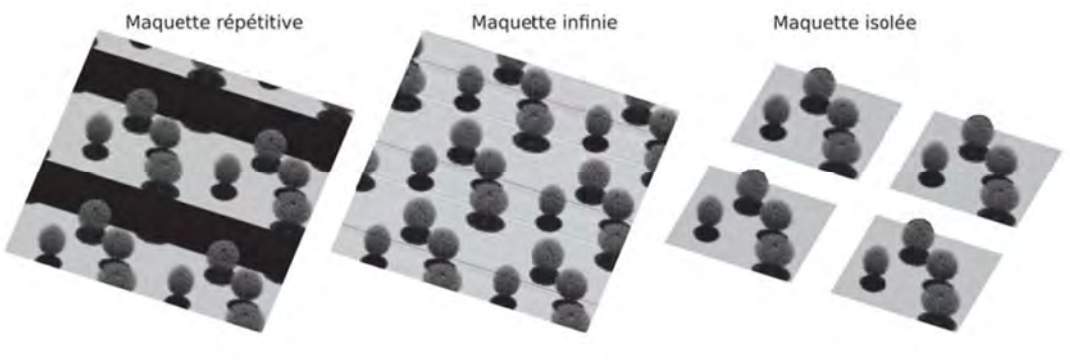


Figure 2.3 : Images simulées DART correspondant aux **TROIS** *modes de conditions aux limites, pour une scène composée de 4 arbres sur un sol en pente régulière de 25°. Scène répétitive (gauche), pente infinie (milieu), scène isolée (droite). La maquette est dupliquée 4 fois dans chaque cas. Simulation réalisée pour une direction solaire (θ, ϕ) = (20°,180°) et une direction de visée du capteur (30°,200°), et une résolution spatiale de 2.5m*

1.2.1.c. Les objets 3D générés

Les objets directement générés par DART ont des formes géométriques relativement simples. Les principaux objets sont présentés ci-dessous.

Les **parcelles**, ou ‘‘plots’’, sont des quadrilatères composés de fluide ou de matière turbide représentant de la végétation, et/ou d’un sol sous-jacent. Une parcelle est définie par la position (x, y, z) de ses quatre coins et dans le cas de la végétation, par l’altitude du bas de la couche et son épaisseur (moyenne et écart type). Toute parcelle est définie par sa densité volumique foliaire ou son LAI (Leaf Area Index) défini par le rapport de la surface de feuille sur la surface de sol occupé. Dans le cas d’une parcelle de végétation de hauteur h, le LAI et la densité volumique u_f sont liés par la relation : $LAI = u_f . h$. Une parcelle "turbide" est également définie par son espèce, c’est-à-dire les propriétés optiques foliaires et la distribution angulaire des normales foliaires. Chaque parcelle est homogène en termes de densité et de propriétés optiques, mais plusieurs parcelles peuvent occuper le même espace de la scène, ce qui signifie que plusieurs espèces peuvent occuper la même cellule. La cellule étant l’élément de base pour représenter le turbide, les parcelles de végétations sont discrétisées à la dimension définie des cellules. Si la parcelle est définie de telle sorte que des cellules ne soient que partiellement comprises dans cette dernière (les coordonnées des coins de la parcelle ne correspondent pas forcément à des points de la grille de cellule), la cellule sera quand même remplie de matière turbide, mais avec une densité volumique réduite au prorata du volume occupé par la végétation. En fait, si la végétation est supposée occuper moins de 10% de la cellule, la cellule turbide n'est pas créée. Il en résulte que l'augmentation de la dimension des cellules peut faire disparaître tout ou partie de la végétation simulée de manière turbide. De manière à rendre la simulation des parcelles indépendante de la dimension des cellules, une procédure automatique permet de remplacer la matière turbide par une densité volumique de triangles dont les dimensions et orientations résultent des caractéristiques associées de la matière turbide de la parcelle. Un intérêt des parcelles est que DART peut importer une carte d'occupation du sol en la transformant en une juxtaposition de parcelles sensées représenter par exemple des champs de blé, de maïs, etc.

DART peut créer des **arbres** schématiques. Chaque arbre est caractérisé par sa position (x, y) dans la maquette et son espèce. Les arbres sont construits à l’altitude locale du sol de la scène. Si une partie d'un arbre "sort" de la maquette par une face latérale, cette partie est reportée sur le bord opposé de la maquette (sauf en mode maquette isolée). L’espèce d’un arbre est définie par plusieurs caractéristiques (Figure 2.4 et Figure 2.5) :

1) La hauteur du tronc sous et dans la couronne
2) Le diamètre du tronc sous la couronne

3) La forme de la couronne (trapézoïde, cône tronqué, cône composé, ellipsoïde, ellipsoïde composée), et les paramètres associés (e.g. diamètre, hauteur).
4) La rotation azimutale autour de l'axe Oz de l'arbre
5) La présence ou non de branches
6) Les niveaux de couronne, et pour chaque niveau défini, les distributions horizontales et verticales de LAI, le diamètre du tronc, les propriétés optiques des feuilles, du tronc et des branches. Les niveaux sont contraints par la dimension verticale des cellules, la matière turbide étant homogène par cellule.

Une fois les espèces voulues définies, les positions et dimensions (facteurs de taille appliqués aux dimensions de l'espèce) des arbres peuvent être définies de trois façons :

- Positions et dimensions exactes des arbres : un fichier texte stocke l'espèce, la position et les dimensions de chaque arbre.
- Positions exactes et dimensions semi-aléatoires des arbres : un fichier texte stocke uniquement l'espèce et la position de chaque arbre, et les dimensions sont définies aléatoirement suivant une moyenne et un écart type spécifiés par espèce.
- Positions et dimensions semi-aléatoires des arbres : les arbres sont placés de manière aléatoire dans des disques de rayons définis centrés sur les nœuds d'une grille régulière avec un maillage défini par l'utilisateur, et une probabilité de présence définie par nœud. Les dimensions sont définies aléatoirement suivant une moyenne et un écart type spécifiés par espèce.

Les troncs des arbres ainsi générés sont alors représentés par des triangles, tandis que la couronne peut être représentée par une juxtaposition de cellules turbides (de dimensions égales à la résolution spatiale de la maquette), ou par un nuage de triangles dont la densité et la distribution angulaire sont définis par l'utilisateur.

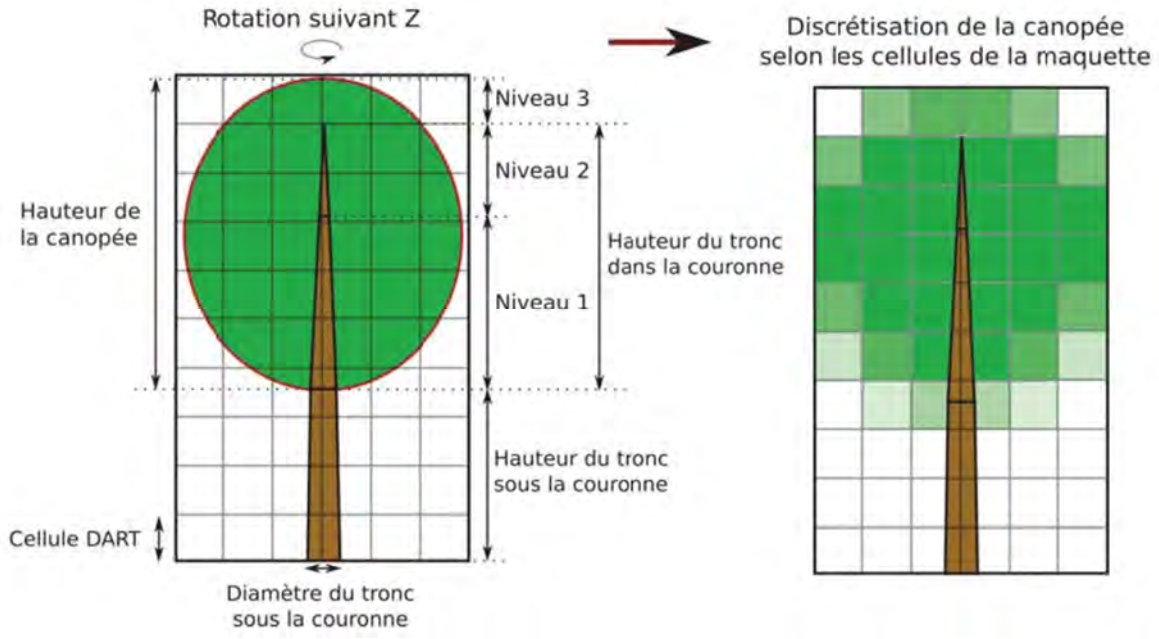


Figure 2.4 : Arbre avec couronne ellipsoïdale et densité volumique constante (gauche) et sa discrétisation en cellules turbides (droite). La clarté du vert dépend de la densité volumique foliaire, ajustée selon la proportion de la cellule occupée par de la végétation.

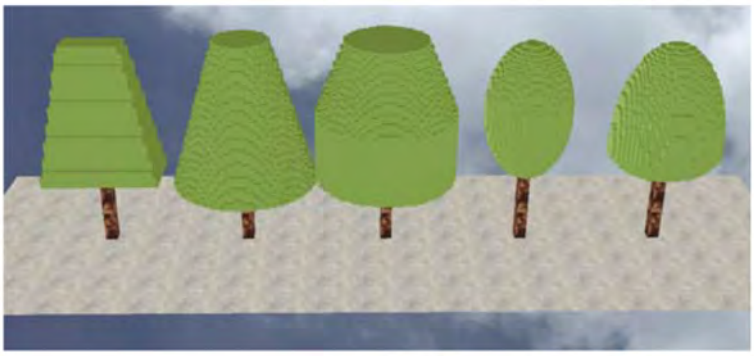


Figure 2.5 : Formes de couronnes d'arbres crees par DART. Affichage par l'outil ''vue 3D'' de DART. La résolution spatiale des cellules est de 25cm. Les couronnes sont remplies de matiere turbide.

DART génère des **bâtiments** schématiques. Tout bâtiment comprend 4 murs verticaux définis par les coordonnées de leurs coins supérieurs et un toit défini par ses 4 coins supérieurs (Figure 2.6). Cette forme générique permet de modéliser simplement la plupart des bâtiments urbains, sachant que des constructions plus complexes peuvent être modélisées à l'aide de combinaisons de ces bâtiments. Les murs et les pans de toit sont modélisés par des assemblages de triangles et peuvent avoir des propriétés optiques différentes les uns des autres. Les toits peuvent avoir des styles classiques prédéfinis dans DART pour simplifier la création, pour lesquelles moins de coordonnées sont à renseigner.

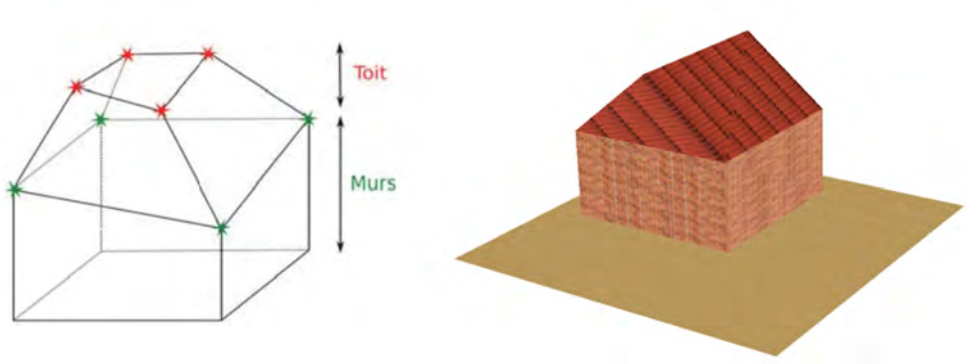


Figure 2.6 : Bâtiments créés par DART. a) Geometrie d'un batiment generique. b) Affichage 3D d'une maison classique : les 4 murs ont la meme hauteur et le toit est defini par 2 points.

DART peut créer des **routes** et des surfaces **aquatiques** (e.g. rivières, lacs). Les routes et les rivières sont modélisées par des suites de segments de largeur constante, sans épaisseur. Les lacs ont des formes elliptiques définies par leur centre et leurs deux axes. Ces trois types de surfaces sont caractérisés par des propriétés optiques qui viennent simplement remplacer celles du sol pour les cellules qu'ils recouvrent. La précision de leur modélisation, notamment aux frontières entre le sol et ces éléments, dépend donc de la résolution horizontale choisie pour les cellules de la maquette.

Enfin, DART peut générer du **relief** pour les différents paysages modélisés. Ce relief peut être dérivé d'un modèle numérique de terrain (MNT) importé sous forme d'image raster, créé par interpolation à partir d'un fichier texte de points (x, y, z), ou encore être directement généré à partir de formes classiques (e.g. colline gaussienne, vallée, sinusoïde, etc.). L'importation d'une image raster s'accompagne automatiquement d'un rééchantillonnage afin d'obtenir des nombres de lignes et de colonnes égaux à ceux de la maquette. L'altitude de chaque pixel du raster est alors attribuée au coin supérieur gauche d'une cellule de la maquette (projetée sur la plan horizontal). Cela permet de construire un triangle (ou parallélogramme) qui va d'un bord à l'autre d'une colonne verticale de cellules). Pour une scène de N lignes et M colonnes, on à NxM cellules et autant de valeurs

d'altitude. Toutes les altitudes étant attribuées au coin supérieur gauche d'une cellule, on doit attribuer aux bords de la scène le plus bas et le plus à droite une altitude non présente dans le raster. Cette dernière est choisie en fonction du mode de répétitivité de la scène :

1) Mode *scène répétitive* : l'altitude du dernier bord est prise égale à celle du premier bord. Cela peut induire une forte variation locale si l'altitude du dernier bord est très différente de celle du premier.
2) Mode *pente infinie* : l'altitude h' de tout point du bord le plus bas (le plus à droite) est h'=h+<h'>-<h>, avec <h'> l'altitude moyenne des points obtenus par extrapolation des altitudes des points des trois dernières lignes (colonnes), h l'altitude du point opposé sur la face symétrique de la maquette et <h> la valeur moyenne des altitudes h. Ainsi, le décalage vertical entre deux points correspondants situés sur les bords opposés de la maquette est constant, ce qui permet d'assurer un relief infini continu. De plus, de manière à améliorer la continuité du relief sur le bas et la droite de la maquette, les N dernières lignes (colonnes) sont lissées, avec N choisi en fonction de la similitude du relief sur les côtés opposés de la maquette.
3) Mode *scène isolée* : Les rayons n'étant pas réintroduits dans ce mode, l'altitude du dernier bord n'a pas de réel impact. Elle est donc simplement calculée par extrapolation des 3 dernières altitudes.

Dans le cas de la génération automatique d'un MNT à partir d'une image raster importée, DART crée 2 triangles par pixel de cette image raster. Cela peut s'avérer inefficace dans le cas de scène dont la section horizontale est simulée avec beaucoup de cellules. En effet, ce mode de génération de MNT tend à créer des triangles inutiles dans les parties planes du relief. En effet, toute partie plane peut être simulée avec seulement deux triangles, ce qui réduit les contraintes informatiques en termes de volume mémoire et temps de calcul. Ce point est abordé dans des exemples concrets dans la suite du manuscrit.

1.2.1.d. Les objets 3D importés

DART peut importer des objets 3D générés à partir de logiciels spécialisés (e.g. Blender, Maya, etc.). Ces objets sont simulés en tant qu'ensemble de facettes (triangles ou parallélogrammes) et peuvent avoir différents formats (wrl, x3d, obj), le format *.obj étant le plus simple. Ils peuvent représenter tout type d'élément de surface terrestre, végétal ou non. Les triangles de ces objets 3D sont classés par groupe, selon le matériau qui leur correspond. Ainsi, un bâtiment 3D peut être constitué de deux groupes : un groupe de triangles composant les murs et un groupe pour le toit. De même, un arbre 3D peut comprendre un groupe "tronc", un groupe "branches", et un groupe "feuilles". DART peut définir des propriétés optiques spécifiques à chaque group. Il est donc nécessaire qu'un objet 3D comporte N groupes si l'objet doit être caractérisé par N propriétés optiques. Les objets 3D peuvent être situés en tout point de la maquette avec application de rotation autour des trois axes de la maquette, (ou suivant les angles d'Euler) et d'homothétie selon les trois axes pour modifier la taille d'un ou de plusieurs groupes au sein de l'objet (e.g. possibilité d'agrandir les feuilles d'un arbre sans impacter le tronc et les branches). La Figure 2.7 montre des exemples d'objets que DART importe (et présents dans les bibliothèques du modèle). Comme pour les arbres et les parcelles, les objets 3D peuvent être clonés pour constituer des champs d'objet 3D via l'emploi d'un fichier texte qui renseigne le type d'objet importé (ID), sa position (x, y, z), les transformations géométriques, et ses propriétés optiques. On peut ainsi par exemple créer une forêt à partir d'arbres 3D modélisés de manière réaliste par un logiciel spécialisé. Les triangles de ces objets qui dépassent de la maquette peuvent être dupliqués sur le bord opposé (en mode *scène répétitive*), ce qui permet d'éviter qu'un rayon entre dans le volume fermé d'un objet 3D lors de son passage par le bord de la scène.



Figure 2.7 : Exemples d'objets naturels et artificiels importés par DART, modélisés par des triangles : (a) Pousse de blé, (b) Plant de maïs, (c) canopée de riz, (d) Plant de tournesol, (e) Arbre cerisier, (f) Avion

Tout objet 3D importé peut être traité comme un ensemble de triangles ou être intégralement ou en partie transformé en matière turbide. Cela est utilisé principalement pour la végétation. Ainsi, la végétation peut être simulée sous forme ''exacte'' avec les triangles originels du modèle 3D, ou en tant que matière turbide caractérisée par les propriétés (densité, orientation, propriétés optiques, etc.) des triangles de l'objet 3D. Ainsi, le tronc et les branches peuvent être modélisées en triangles et les feuilles en matière turbide équivalente. La transformation des triangles "feuille" en matière turbide peut beaucoup réduire le temps de calcul et le volume mémoire, comme dans le cas de forêts où chaque arbre est simulé avec plusieurs millions de triangles. Par exemple, chaque oranger de la Figure 2.8 est composé de plus de 60 000 triangles. Cette transformation "Triangle $\rightarrow$ Turbide" peut cependant induire une perte de précision en contrepartie du gain en performances. Lors de la transformation, les propriétés de la matière turbide sont soit calculées par DART en fonction des orientations et de la couverture du sol des triangles, soit définies par l'utilisateur, par exemple pour faire évoluer le LAI d'une canopée selon le stade de croissance du couvert végétal. La Figure 2.8 présente un exemple de transformation en turbide, ainsi que les images DART de réflectance simulées résultantes, en composition colorée.

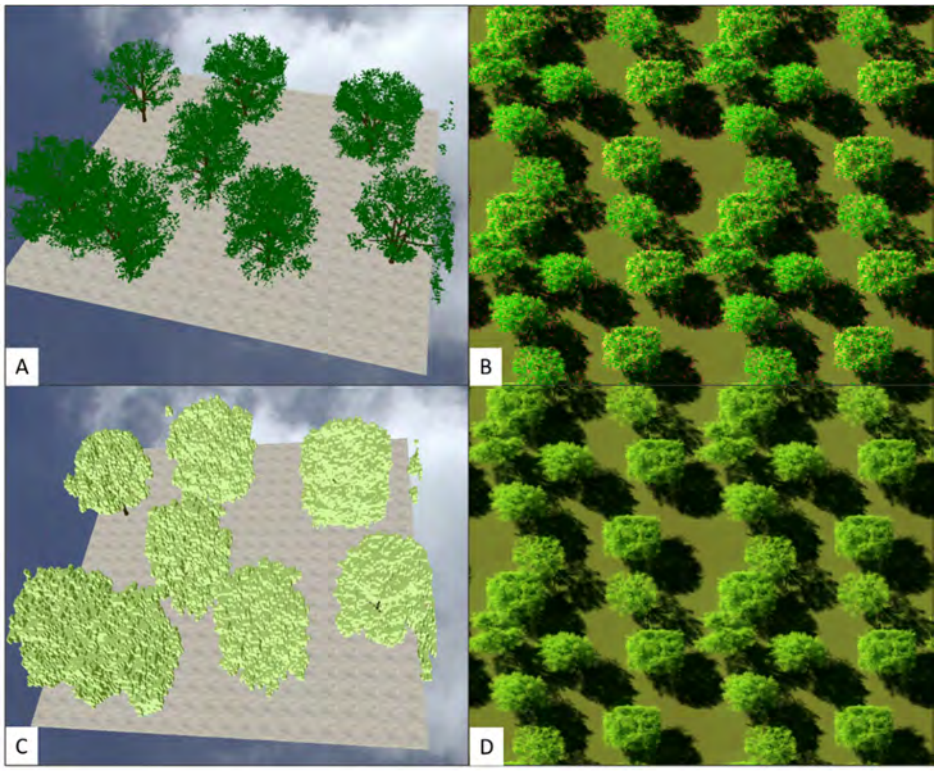


Figure 2.8 : Illustration de la transformation du feuillage en matière turbide (troncs en triangles) pour un champ d'orangers SIMULE avec une résolution spatiale de 5cm. (A) SCENE 3D simulée sans conversion, (B) Image DART résultante en composition colorée, (C) SCENE 3D après conversion du feuillage en matière turbide, (D) Image DART résultante en composition colorée

1.2.2. Les Propriétés Optiques des Eléments

Les propriétés optiques définissent comment les surfaces et les volumes des éléments de la scène simulée interceptent, absorbent et diffusent le rayonnement. Elles dépendent de la composition chimique et structure de ces éléments. Le module *phase* les précalcule pour réduire le temps de calcul de la simulation du TR.

1.2.2.a. Les propriétés des surfaces

Les fonctions de transfert des surfaces, ou ''fonctions de phase 2D'', sont caractérisées par une réflectance $\rho(\Omega_s, \Omega_V)$ dépendant de la direction d'éclairement et de visée du capteur, une transmittance directe T_{dir} et une transmittance diffuse isotrope T_{diff}. Elles dépendent de la bande spectrale $\Delta\lambda$ considérée. Ces propriétés spectrales sont soit lues dans les bibliothèques internes de DART, soit entrées par l'utilisateur, soit générées par des modèles intégrés à DART comme le modèle PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990). Ces trois propriétés permettent également de définir l'absorptance a et l'émissivité directionnelle $\epsilon(\Omega)$ des surfaces, grâce à la loi de conservation de l'énergie et la loi de Kirchoff (équations (11) et (12)). La température des éléments de surface peut être définie de différentes manières : importation d'une distribution 3D ou 1D de température $T(x, y, z)$ ou bien affectation d'une propriété de température $\{T, \Delta T\}$ par élément, sachant que les éléments sont automatiquement affectés d'une température en fonction de leur éclairement. Cette approche pragmatique est une approximation de la réalité, car elle ne tient pas compte des propriétés thermiques de la matière. Elle est cependant souvent acceptable si la gamme de températures des éléments est connue soit via des mesures ou via un modèle 1D de bilan d'énergie comme le modèle SCOPE (référence) pour la végétation et le modèle TEB (référence) pour la ville.

DART gère 4 types de réflectances de surfaces, issues de différents modèles de réflectance :

1) La réflectance **lambertienne** est définie par une réflectance isotrope, c'est-à-dire égale quelles que soient les directions considérées :

$$\rho(\Omega_S, \Omega_V) = \rho_{lamb} = Cte$$

2) La réflectance **lambertienne + spéculaire** combine une composante isotrope lambertienne et une composante spéculaire :

$$\rho(\Omega_S, \Omega_V) = \rho_{lamb} + \rho_{spec}(\Omega_S, \Omega_V)$$

La composante spéculaire ρ_{spec} est dérivée des équations de Fresnel et dépend de la largeur angulaire α du cône de diffusion spéculaire, de l'indice de réfraction spectral n, et d'un facteur d'amplitude A.

3) La réflectance **Hapke+spéculaire** est définie par l'association d'une réflectance spéculaire ρ_{spec} et de la réflectance ρ_{Hapke} qui correspond à une extension du modèle Hapke (Hapke et al., 1993). Ce modèle assimile le sol à un milieu plan composé de particules disposées aléatoirement, grandes devant la longueur d'onde considérée. Il est associé à une fonction de phase dérivée du polynôme de Legendre, qui simule la rétrodiffusion et la diffusion vers l'avant (Jacquemoud et al., 1992).

$$\rho(\Omega_S, \Omega_V) = \rho_{Hapke}(\Omega_S, \Omega_V) + \rho_{spec}(\Omega_S, \Omega_V)$$

Ce mode simule le phénomène de *hotspot* des sols. Il peut aussi permettre les temps de calculs. DART peut par exemple calculer les paramètres Hapke d'un sous-bois à partir d'une BRDF donnée, puis simuler une forêt en représentant le sous-bois par un sol plat de réflectance ρ_{Hapke}.

4) La réflectance **RPV** est basée sur le modèle Rahman-Pinty-Verstraete (Rahman et al., 1993). Ce modèle, plus simple d'utilisation que celui de Hapke, reproduit bien les BRDF standard des surfaces terrestres, même asymétriques, et l'effet *hotspot*. Il est défini par l'amplitude ρ_0 de la réflectance, la convexité de l'anisotropie κ, l'effet de *hotspot* ρ_c, et le degré de diffusion Θ :

$$\rho(\Omega_S, \Omega_V) = \rho_0 . M_I(\kappa) . F_{HG}(\Theta) . H(\rho_c)$$

M_I est la fonction de Minnaert, F_{HG} est basée sur les fonctions de Henyey-Greenstein, et H est la fonction simulant le *hotspot*. Toutes dépendent des directions d'illumination et de visée.

La Figure 2.9 illustre le comportement de ces réflectances pour des paramètres standard.

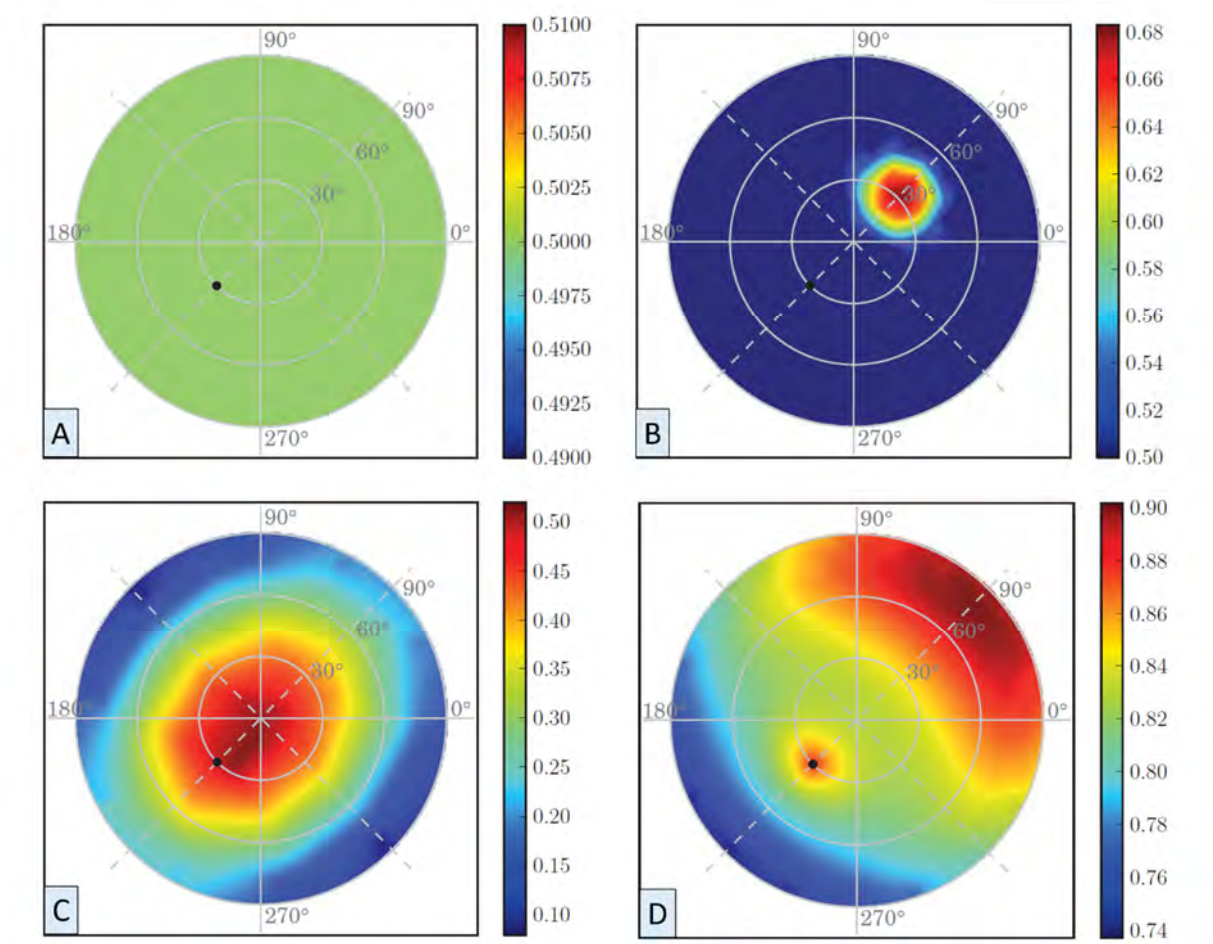


Figure 2.9 : Diagrammes 2D des REFLECTANCES pour différents modeLes de réflectance [-] en fonction de la direction de visée Ω_V [°]. La direction d'illumination Ω_S [°] est fixée et représentée par le point noir. (A) Lambertien, $\rho = 0.5$ [-]. (B) Lambertien + spéculaire, $\rho = 0.5,\ \alpha = 0.8,\ n = 1.4,\ A = 900$ [-]. (C) Hapke, $\rho = 0.5,\ \alpha = 0.2,\ n = 1.4,\ A = 1000$ [-], paramètres Hapke égaux à 1 [-]. (D) RPV, $\rho_0 = 0.5,\ \rho_c = 0.7,\ \kappa = 1,\ \Theta = 0.065$ [-].

Il est important de noter que le mode de réflectance choisi et son intérêt dépend bien évidemment des études. Ainsi, lors de l'étude d'un paysage comportant de nombreux éléments différents, l'utilisation d'une réflectance lambertienne pour chaque élément individuel se traduira par une réflectance non lambertienne pour l'ensemble de la scène. Il est donc tout à fait possible d'étudier l'anisotropie d'un environnement urbain en considérant les facettes individuelles comme étant lambertienne. Les autres modes de réflectances peuvent être cependant plus adaptés lors de l'étude de couverts plus homogènes, tels que les forêts ou les plans d'eau, afin d'observer plus particulièrement les effets de *hotspot* et de spécularité.

1.2.2.b. Les propriétés des éléments turbides pour la végétation

Les propriétés optiques de la végétation simulée par de la matière turbide volumique sont caractérisées par des fonctions de phase 3D. Une cellule comprenant différents éléments représentés par de la matière turbide pourra être associée à plusieurs de ces fonctions de phase. Ces fonctions de phase foliaires sont définies par :

1) Les propriétés optiques spectrales des feuilles : transmittance et réflectance supérieure et inférieure foliaires, et paramètres descriptifs du comportement spéculaire foliaire (rugosité, indice de réfraction). Ces propriétés sont stockées dans des bases de données SQL qui peuvent importer toute propriété mesurée ou simulée par ailleurs.
2) La dimension des feuilles, utilisée pour modéliser les effets de *hotspot*.
3) La distribution angulaire des feuilles (Leaf Angle Distribution – LAD). Il est possible d'utiliser des LADs spécifiques en plus des LADS pré-définis (i.e., planophile, érectophile, ellipsoïdal, etc.).
4) Les paramètres de *clumping*, c'est-à-dire le fait que les feuilles ne soient pas réparties uniformément dans la canopée (présence d'agglomérations de feuilles en certains points).
5) Une propriété de température $\{T, \Delta T\}$ pour le calcul de l'émission thermique.

Les modèles PROSPECT-5 (Feret et al., 2008) et PROSPECT-D (référence) sont implantés dans DART de manière opérationnelle. Ces modèles calculent les propriétés spectrales foliaires du visible au moyen infrarouge (0.4 à 2.5μm) à partir de données biochimiques foliaires :

1) La concentration en chlorophylle C_{ab}
2) Le contenu en eau C_w
3) La concentration en matière sèche C_m
4) Le contenu en caroténoïdes C_{ar}
5) Le nombre de couches de la feuille considérées dans la structure foliaire N
6) La concentration en anthocyanine (uniquement pour PROSPECT D)

DART modélise l'émission de fluorescence chlorophyllienne depuis 2016 à partir du modèle FLUSPECT (Van der Tol et al., 2009) de fluorescence foliaire. Ce modèle fournit des matrices de conversion de l'énergie reçue dans N bandes spectrales vers une émission de fluorescence foliaire dans N bandes spectrales. Des tests de validation ont été réalisés sur des cas théoriques simples, et d'autres sont en cours avec des mesures de la NASA (Gastellu-Etchegorry et al., 2017). De plus, il est prévu de réaliser d'autres tests de validation avec les mesures de fluorescence du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD).

1.2.2.c. Variabilité spatiale des propriétés optiques

Durant ma thèse, une nouvelle méthode de modélisation 3D des propriétés optiques et de température a été introduite dans DART. Initialement, un nombre N de propriétés optiques étaient définies et ces propriétés optiques étaient chacune associées à un groupe d'élément de la scène, quelle que soit la position d'un élément du groupe. Par exemple, un groupe comprenant tous les toits des bâtiments de la scène pouvait être caractérisé par une unique propriété optique. Pour pouvoir considérer la variabilité spatiale des propriétés optiques, il fallait alors définir autant de groupes que de propriétés différentes, et autant de fonctions de phase 2D. Cette approche peut être acceptable si aucune information n'est disponible sur la variabilité spatiale des propriétés optiques urbaines. En fait, les images de télédétection renseignent sur cette variabilité spatiale. Durant cette thèse, la variabilité des propriétés optiques est obtenue par inversion des images de télédétection (Chapitre III). Avec cette approche, le nombre de propriétés optiques inversées est de l'ordre de grandeur du nombre de pixels de l'image satellite utilisée. Il est ainsi possible de représenter précisément la variabilité spatiale des différents éléments et ainsi le fonctionnement radiatif d'une canopée urbaine. Cependant, en pratique, créer autant de groupes d'éléments à partir des modèles 3D utilisés et calculer toutes les fonctions de phases correspondantes

est lourd à mettre en œuvre et s'avère donc peu efficace. C'est pourquoi une fonctionnalité permettant de gérer des propriétés optiques de tout groupe d'objet avec toute variabilité spatiale a été développée.

Cette amélioration est aujourd'hui fonctionnelle sur tout le domaine spectral, du visible à l'infrarouge thermique, et à tous les types de propriétés optiques de surface qui sont gérées par le modèle DART : les réflectances lambertienne, Hapke, RPV, les propriétés optiques 3D de fluide, ainsi que les transmittance et réflectance de la végétation turbide. Cette nouvelle fonction permet, pour tout voxel (x, y, z) de la scène simulée, d'appliquer un facteur multiplicatif aux propriétés optiques ou thermiques impactant tout mécanisme de diffusion ou d'émission thermique de tout élément présent dans le voxel. Une fonction de phase associée à un groupe d'éléments sera ainsi pondérée par un coefficient spécifique à l'emplacement de l'élément du groupe dans la scène, ce qui traduit directement la variabilité spatiale voulue. Ces coefficients, spécifiques à chaque bande spectrale, sont stockés dans des matrices 3D de taille égale à la matrice 3D de la scène. Il est aussi possible de spécifier uniquement un plan xy de coefficients, qui sera alors dupliqué sur toutes les couches horizontales de la scène. De la même manière, il est possible d'utiliser des matrices de température (en plus des émissivités) pour définir la variabilité de la totalité des propriétés thermiques des matériaux de la scène.

1.2.3. L'atmosphère

L'atmosphère est un élément majeur à la fois pour le fonctionnement des surfaces terrestres et pour les mesures de télédétection, via l'absorption, l'émission, et la diffusion du rayonnement dans les courtes et les grandes longueurs d'onde. Elle impacte directement l'éclairement des paysages et le signal reçu par le capteur satellite, comme on peut l'observer dans la Figure 2.10, qui illustre la différence entre un spectre de réflectance de paysage mesuré en bas de l'atmosphère et à 3500m d'altitude. Le rôle de l'atmosphère dépend de son état (e.g. pression, température), de la distribution spatiale de ses constituants (e.g. profil vertical des gaz et aérosols), des angles solaires et de visée du capteur, ainsi que de la longueur d'onde considérée. DART simule cette influence sur le bilan radiatif des surfaces terrestres, et sur les mesures des capteurs satellitaires via une voxellisation de l'atmosphère, en utilisant des voxels de taille inversement proportionnelle à la densité des particules composant l'atmosphère. Dans DART, l'atmosphère peut être ignorée, ou traitée comme une interface au-dessus du paysage terrestre simulé ou comme un milieu diffusant, absorbant et émissif au-dessus et au cœur de la scène étudiée. Elle est alors délimitée à son sommet par un plan dite *Top of* Atmosphere (TOA – haut de l'atmosphère) et à sa base par un plan dit *Bottom of Atmosphere* (BOA – bas de l'atmosphère) qui est l'interface avec la maquette du paysage terrestre (Figure 2.1). L'altitude du niveau TOA correspond à l'altitude maximale (85km) des profils des modèles de gaz et d'aérosols standards du modèle Modtran (Berk et al, 1987) utilisés comme référence dans DART.
Entre ces deux limites TOA et BOA se situent deux couches principales :

1) La Haute Atmosphère (HA) : superposition de couches d'épaisseur variable (2km par défaut).
2) La Moyenne Atmosphère (MA) : matrice de voxels d'épaisseur de 500m par défaut, du niveau BOA à 4km d'altitude par défaut. L'emploi de voxels au lieu de couches a pour but de pouvoir simuler les effets d'environnement associés à la variabilité spatiale des luminances issues des surfaces terrestres.

Les cellules qui composent l'atmosphère sont caractérisées par leur contenu en gaz et aérosols, et leur propriétés spectrales (i.e. fonctions de phases, profils verticaux, coefficients d'extinction, albédo sphérique, etc.). DART prend en compte la courbure de la Terre, ce qui est très important pour la simulation de configurations où la direction d'observation et/ou solaire est très oblique, comme dans le cas d'observations en début de matinée ou fin de journée par des capteurs embarqués sur satellite géostationnaire. Les profils de gaz et d'aérosols par défaut sont les profils du modèle Modtran (Berk, 2014) avec des transmittances spectrales de $0.3\mu m$ à $50\mu m$. Ils sont stockés dans une base de données SQL, comme les modèles d'éclairement fournis avec DART. L'utilisateur peut modifier ces profils ce qui est très utile pour ce qui est de la vapeur d'eau et des aérosols. Il peut aussi les renseigner directement à partir de mesures ou d'autres modèles. Il est aussi possible d'importer des bases de

données issues par exemple de l'AErosol RObotic NETwork (AERONET) ou du European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Un point important pour limiter les temps de calcul, est que DART peut pré calculer l'éclairement des surfaces terrestres ainsi que la rétrodiffusion atmosphérique sur les surfaces terrestres. Un tel pré calcul est par exemple très utile lors d'étude de sensibilité où seuls les seuls paramètres variables sont ceux des paysages terrestres (i.e., direction solaire et atmosphère constantes).

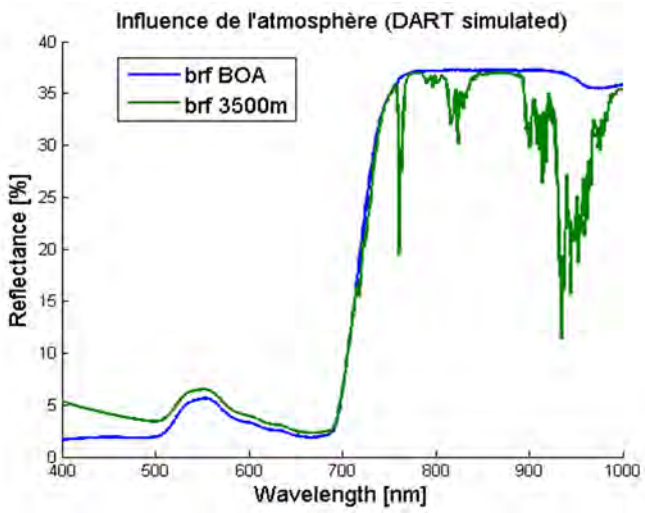


Figure 2.10 : Exemple d'impact de l'atmosphère sur la mesure de réflectance. Spectres de réflectance de champ de maïs simulés pour un capteur au bas de l'atmosphère (bleu) et à 3500m d'altitude (vert).

1.3. Modélisation du transfert radiatif

Le modèle DART simule le transfert radiatif avec soit le mode **Monte Carlo** soit le mode **Flux Tracking** (suivi de flux). Le mode Monte Carlo gère une suite de diffusions d'ordre 1 par un suivi de photons, sans tenir compte de l'émission thermique. Il est plus coûteux en temps de calcul, mais permet d'une part de valider le mode Flux Tracking non-thermique. Il sert aussi de base au mode LiDAR de DART. Dans cette thèse, seul le mode Flux Tracking est utilisé. Dans ce mode, présenté ci-dessous, la diffusion de tout flux intercepté peut induire jusqu'à N flux. Cette approche correspond à une discrétisation de l'espace des directions (Kimes et Kirchner, 1982).

1.3.1. Les directions dans DART

DART subdivise l'espace 4π des directions en un nombre quelconque N_{dir} directions discrètes et contigües Ω_n. La méthode de suivi de flux suit tout rayon selon ces directions. Toute direction (Figure 2.11) est caractérisée par un angle solide $\Delta\Omega_n$, et une direction centrale (angle zénithal θ_n, angle azimutal ϕ_n) avec $\sum\Delta\Omega_n = 4\pi$. DART peut donc simuler toute mesure et image de capteur selon toute direction discrète montante. N_{dir} peut être adapté au cas d'étude, notamment pour sur-échantillonner des régions angulaires présentant un comportement anisotrope prononcé comme la configuration *hotspot* (Nilson et Kuusk, 1989). De plus, des directions supplémentaires $(\Omega_V, \Delta\Omega_V)$ dites *fictives* peuvent être définies, par exemple pour créer des images dans des directions spécifiques. Les flux radiatifs le long de ces directions ne contribuent pas aux flux des directions de base. La direction solaire Ω_S est aussi une direction supplémentaire. Elle est unique et d'angle solide nul, sauf si l'effet dit de pénombre est simulé. Elle est définie par ses angles zénithal θ_S et azimutal ϕ_S, ou par la date considérée (année, mois, jour, heure, minute, seconde, zone UTC, heure d'été/hiver) et la position géographique de la scène (latitude, longitude, altitude).

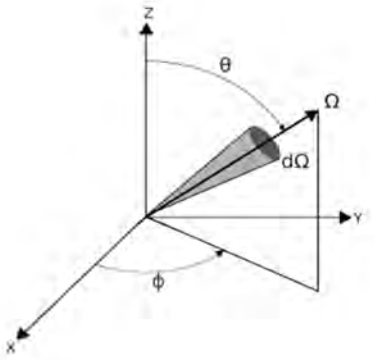


Figure 2.11 : Illustration de la définition d'une direction dans DART

1.3.2. L'approche N-Flux Tracking

La méthode de suivi de rayon à N flux utilisée par DART résout l'équation du transfert radiatif selon toutes les directions discrètes préalablement définies. L'équation générale décrivant la propagation d'une onde électromagnétique monochromatique stationnaire de longueur d'onde λ (la lumière naturelle étant une somme d'ondes monochromatiques), à la position r, selon la direction Ω, et de luminance $L(r,\Omega)$ $[W/m^2/sr]$ dans un milieu de température T est décrite par (la dépendance spectrale n'est pas précisée pour alléger les notations):

$$\left[\xi\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dx}}+\eta\frac{d}{dy}+\mu\frac{d}{dz}\right]L(r,\Omega)=-\alpha_e(r,\Omega)\mathrm{L}(\mathrm{r},\Omega)+\alpha_\mathrm{a}(r,\Omega)L_B(T)+\int_{4\pi}\alpha_d(r,\Omega)\frac{P(r,\Omega'\rightarrow\Omega)}{4\pi}L(r,\Omega')d\Omega'$$

avec

- ξ, η et μ les cosinus directeurs de la direction de propagation selon les axes x, y et z
- $\alpha_a(r,\Omega)$ le coefficient d'absorption du milieu $[m^{-1}]$
- $\alpha_d(r,\Omega)$ le coefficient de diffusion du milieu $[m^{-1}]$
- $\alpha_e(r,\Omega)$ le coefficient d'extinction du milieu (diffusion + absorption) $[m^{-1}]$
- $P(r,\Omega'\rightarrow\Omega)$ la fonction de phase normalisée $[sr^{-1}]$
- $L_B(\lambda,T)$ la luminance de Planck

Dans le cas de directions discrètes, cette équation s'écrit :

$$\left[\xi\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dx}}+\eta\frac{d}{dy}+\mu\frac{d}{dz}\right]L(r,\Omega_\mathrm{n})=-\alpha_e(r,\Omega_\mathrm{n})\mathrm{I}(\mathrm{r},\Omega_\mathrm{n})+\alpha_\mathrm{a}(r,\Omega_\mathrm{n})L_B(T)+\sum_{m=0}^{N_{dir}}\alpha_d(r,\Omega_n)\frac{P(r,\Omega_m\rightarrow\Omega_n)}{4\pi}L(r,\Omega_m)\Delta\Omega_m$$

où $L(r,\Omega_n)$ est la luminance au point r selon la direction Ω_n. Pour assurer une bonne discrétisation de l'équation, les valeurs des angles solides $\Delta\Omega_n$ doivent être suffisamment faibles, selon le degré d'anisotropie de la fonction de phase et de l'hétérogénéité du milieu considéré. Le mode *Flux Tracking* consiste à suivre des rayons qui transportent des flux d'énergie spectrale selon un nombre fini de directions. Dans les paysages 3D hétérogènes (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) et l'atmosphère (Grau et Gastellu-Etchegorry, 2013), il est basé sur des méthodes exactes de noyau et d'ordonnées discrètes utilisant une approche itérative et convergente. Tout ou partie du rayonnement intercepté par les éléments de la scène à l'itération i est diffusé durant l'itération $i+1$ suivante. Le processus itératif s'arrête quand la différence relative de l'exitance de la scène entre deux itérations consécutives est inférieure à un seuil spécifié préalablement. De plus, un rayon est arrêté si son énergie angulaire $[W/sr]$ est inférieure à l'énergie angulaire moyenne de la scène diffusée à la première itération, multipliée par un coefficient choisi par l'utilisateur.

La méthode de suivi de rayon possède trois modes de simulation : réflectance (R), température (T), et la combinaison des deux (R+T). Le mode R permet de simuler le comportement radiatif dans les courtes longueurs d'onde en utilisant le Soleil comme source principale d'éclairement et l'atmosphère en tant que source

secondaire. Dans ce mode, les émissions thermiques du paysage et de l'atmosphère sont négligées. Le mode T considère uniquement les émissions thermiques et néglige la radiation solaire. Le mode (R+T) considère toutes les sources de radiation thermiques ou non. Il est donc particulièrement utile pour le domaine spectral $3 \rightarrow 4\mu m$. L'émission thermique spectrale est modélisée par la loi de Planck, tandis que la loi de Boltzmann peut être utilisée pour simuler le bilan radiatif sur l'ensemble du spectre électromagnétique.

Le schéma général de la modélisation des mesures de capteurs de télédétection comprend 5 grandes étapes :

1. **Calcul de l'éclairement de la scène :** la transmission et la diffusion du rayonnement solaire et de l'émission thermique de l'atmosphère donnent un éclairement direct et diffus de la scène considérée (au niveaux BOA, TOA et autre niveau de capteur spécifié dans l'atmosphère).
2. **Calcul du transfert radiatif dans la maquette :** la maquette et ses éléments diffusent de manière itérative le rayonnement qu'ils interceptent et le rayonnement thermique qu'ils émettent. Le bilan radiatif et les images peuvent être stockées à la fin de chaque itération
3. **Calcul de l'éclairement de couplage :** l'exitance du paysage terrestre au niveau BOA donne lieu à de l'énergie rétrodiffusée par l'atmosphère.
4. **Calcul du couplage Terre-Atmosphère :** l'énergie rétrodiffusée par l'atmosphère est à nouveau diffusée par la scène terrestre. Cette diffusion est calculée avec une seule itération, mais une extrapolation basée sur l'étape 2 permet de prendre en compte les diffusions multiples. Le couplage Terre-Atmosphère a été soumis avec succès à des comparaisons croisées (Gascon et al., 2001 ; Grau et Gastellu-Etchegorry, 2013) avec des simulations du modèle de transfert radiatif atmosphérique MODTRAN (Berk, 2014).
5. **Calcul du rayonnement aux niveaux TOA et Capteur :** transfert du rayonnement montant BOA aux niveaux TOA et du capteur dans l'atmosphère.

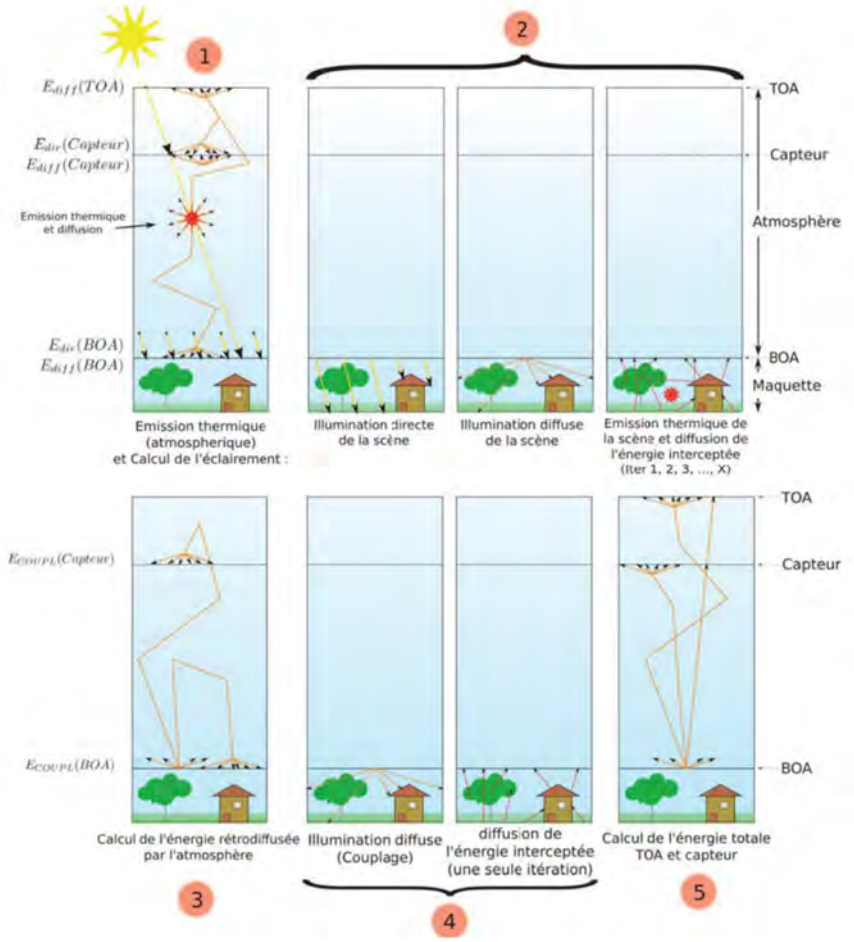


Figure 2.12 : Illustration des 5 étapes de calcul du transfert de bilan radiatif d'un paysage par DART

Il est également possible de ne pas simuler le transfert radiatif dans l'atmosphère, auquel cas seules les étapes 1 et 2 sont effectuées. Les cinq étapes du calcul de bilan radiatif d'un paysage sont illustrées dans la Figure 2.12.

1.3.3. Les sorties du modèle

Une fois le processus de calcul du transfert radiatif dans l'ensemble de la scène achevé, DART propose deux types majeurs de produits : bilan radiatif 3D et produits de télédétection associés aux rayonnements ascendants sortant du paysage modélisé. Ces deux types de produits sont utilisés dans ce travail de thèse.

1.3.3.a. Simulation d'images de capteurs

DART permet de simuler les observations de tout capteur radiatif passif (i.e., spectro-radiomètre imageur) ou actif (e.g. LIDAR). Les images sont simulées pour toute direction discrète montante, c'est-à-dire des directions utilisées par le modèle pour le suivi de flux, et toute direction ajoutée par l'utilisateur. Par défaut, ces images sont projetées dans le plan du capteur. Elles peuvent être orthorectifiées. Elles sont au format du logiciel libre ILWIS (fichier raster binaire *.mp# accompagné d'un fichier texte d'en-tête *.mpr). Elles peuvent être fournies à trois altitudes différentes :

1) **BOA :** images qu'obtiendrait un capteur positionné juste au-dessus du paysage considéré, sans atténuation par l'atmosphère (hors atmosphère interne à la scène). Elles correspondent également à des images satellites mesurées au-dessus de l'atmosphère, mais corrigées des effets atmosphériques.
2) **TOA :** images mesurées par un capteur satellite en orbite au-dessus de l'atmosphère. Elles sont affectées pleinement par l'atmosphère.
3) **Capteur :** images acquises par un capteur à une altitude entre BOA et TOA, choisie par l'utilisateur.

Il convient de noter que ces trois types d'images correspondent à une acquisition avec une projection parallèle. DART peut aussi simuler des images simulées avec une projection perspective. Ces images correspondent au cas des capteurs avec un champ de vue non nul, ce qui est en particulier le cas des capteurs aéroportés.

Le type de produit simulé peut différer selon le mode de simulation de transfert radiatif retenu. Ainsi, plus des images en luminance $[W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}]$, DART peut fournir des images en réflectance en mode R [BRF] et des images en température de brillance $[K]$ en mode T et R+T. D'autre part, les images peuvent correspondre à des bandes spectrales étroites ou des bandes larges obtenues par intégration de bandes spectrales étroites pondérées par le gabarit spectral de la bande spectrale du capteur considéré. De plus, les images sont mono-bandes ou multi-bandes selon que la simulation est mono-bande ou multi-bande.

La résolution spatiale (i.e., dimension des voxels) doit en général correspondre à la dimension des plus petits éléments du paysage qui affectent le signal simulé. DART peut réaliser un sous échantillonnage spatial pour se ramener à la résolution spatiale finale voulue, comme par exemple la résolution spatiale d'un capteur satellite.

1.3.3.b. Simulation du bilan radiatif 3D

DART donne le rayonnement intercepté, absorbé, diffusé, et émis thermiquement par voxel (i.e., distribution 3D) et/ou sous forme de profils 1D et d'images (i.e., distribution 2D) ou cartes d'albédo $[-]$ et d'exitance spectrale $[W.m^{-2}.\mu m^{-1}]$ ou non $[W.m^{-2}]$, par bande spectrale et sur la bande qui recouvre toutes les bandes spectrales de la simulation. Ces produits correspondent à l'intégrale de termes directionnels (i.e., luminance). L'albédo spectral A et l'exitance spectrale M sont par pixel (x, y) et par niveau / altitude H (BOA, TOA, ou Capteur) :

$$M_H(x, y, \lambda) = \sum_{n=1}^{N_{dir}} L_H(\Omega_n, x, y, \lambda).\cos(\theta_n).\Delta\Omega_n \quad [W.m^{-2}.\mu m^{-1}]$$

$$A_H(x,y,\lambda) = \frac{\sum_{n=1}^{N_{dir}} L_H(\Omega_n,x,y,\lambda).\cos(\theta_n).\Delta\Omega_n}{E_H(\lambda)} = \frac{M_H(x,y,\lambda)}{E_H(\lambda)} \quad [-]$$

avec L_H la luminance à l'altitude H dans la direction Ω_n, θ_n l'angle zénithal de la direction Ω_n, et E_H l'éclairement total à l'altitude H, également fourni par DART. L'éclairement ne dépend pas de la position (x,y). Il dépend de l'altitude H et correspond à une intégrale sur toutes les directions incidentes. Les valeurs 'bande large' de l'éclairement, albédo et exitance sont obtenues par intégration spectrale sur l'ensemble du spectre électromagnétique (pondérée pour l'albédo par l'éclairement spectral) :

$$M_H(x,y) = \int_\lambda M_H(x,y,\lambda)d\lambda \ \ [W.m^{-2}]$$

$$A_H(x,y) = \frac{\int_\lambda A_H(x,y,\lambda).E_H(\lambda)d\lambda}{\int_\lambda E_H(\lambda)d\lambda} = \frac{M_H(x,y)}{E_H}[-]$$

Pour tout pixel (x,y), le bilan radiatif Q^* total est la différence de l'exitance et de l'éclairement :

$$Q_H^*(x,y) = E_H - M_H(x,y)\ [W.m^{-2}]$$

1.3.3.c. Les images par type d'élément

Pour mener à bien le travail présenté dans ce manuscrit, un nouveau type d'image de sortie a été implémenté dans le modèle DART. Le modèle a été amélioré afin de simuler des images de luminance $L_{\mathrm{H},\Delta\lambda,i}(\mathrm{x},\mathrm{y},\Omega_V)$ par type d'élément i présent dans la scène. Ces images ont les mêmes caractéristiques et dépendances que les images de luminance totale $L_{\mathrm{H},\Delta\lambda}(x,y,\Omega_V)$ en termes de domaine spectral (disponibles pour toute longueur d'onde λ), direction, résolution, altitude, et autres. Les différents types d'éléments sont définis par les différents groupes spécifiés des éléments modélisés dans la scène de DART (e.g. toits, sol, végétation). Chaque pixel d'une image de luminance de l'élément i contient alors la contribution des éléments de ce type contenu dans ce pixel à la luminance totale du pixel. Il est important de noter que l'image de luminance totale est la somme des images de luminance par élément de la scène. Ainsi, pour une scène contenant N groupes d'éléments, on a alors, pour chaque pixel (x,y), dans la direction de visée Ω_V, la bande spectrale $\Delta\lambda$ et à l'altitude H:

$$L_{H,\Delta\lambda}(x,y,\Omega_V) = \sum_{i=1}^{N} L_{H,\Delta\lambda,i}(x,y,\Omega_V)$$

2. Données de Télédétection

2.1. Présentation

Les données de télédétection sont de plus en plus utilisées par les scientifiques et par les décideurs politiques pour étudier et gérer notre environnement : forêts, zones agricoles, espace urbain, etc. De façon générale, la télédétection facilite l'étude des surfaces terrestres. Les mesures de télédétection acquises pour une configuration instrumentale donnée (résolution spatiale, direction de visée, champ de vu, etc.) et une configuration expérimentale donnée (état de surface, condition atmosphérique, direction solaire, etc.) peuvent renseigner de manière qualitative et quantitative sur certaines propriétés de surface majeures qui conditionnent le comportement radiatif de ces surfaces. Le comportement radiatif d'un paysage urbain dépend surtout de son architecture 3D et des propriétés optiques et thermiques (émissivité et température) des matériaux qui le constituent. Ces deux caractéristiques expliquent le comportement radiatif anisotrope urbain et la variabilité spatiale du bilan radiatif. L'architecture 3D urbaine est de mieux en mieux appréhendée à partir de mesures in-situ et par analyse d'observations de télédétection. Par contre, la variabilité spatiale des propriétés radiatives,

pourtant essentielle pour ce qui est de la variabilité spatiale du bilan radiatif, est actuellement une information difficile à obtenir, sinon impossible. Ainsi, cette information ne peut être dérivée de mesures in-situ. Par contre, la télédétection est un outil potentiel. Dans cette étude, une approche innovante a été conçue et mise en œuvre pour obtenir cette information à partir du modèle DART et de l'architecture 3D urbaine.

Les surfaces terrestres peuvent être observées par différents moyens, chacun avec ses avantages et inconvénients. Ainsi, les observations des capteurs aéroportés ont en général d'obtenir les meilleures résolutions spatiales sont assez facilement adaptables pour obtenir des produits avec des caractéristiques spatiales ou spectrales désirées. Cependant, le coût élevé de l'appareillage et du vol d'un avion, ainsi que de la main d'œuvre associée (pilotes et techniciens) restreint leur utilisation. Les drones représentent une technologie grandissante qui résolvent ce problème de coût, mais les régulations aériennes et leur faible capacité à embarquer des instruments puissants limitent leur utilisation. Par contre, l'observation satellite de la Terre offre l'avantage de couvrir de grandes zones incluant des villes entières en une seule acquisition, et de fournir des séquences temporelles stables. De plus, les capteurs satellites ont suffisamment évolué pour fournir des images avec une résolution spatiale, bien qu'inférieure aux images avion, bien adaptée à de nombreuses études du milieu urbain. Ils permettent d'observer les propriétés des surfaces urbaines, qui présentent une grande variabilité spatiale et temporelle (phénologie de la végétation au cours des saisons, nouveaux bâtiments, etc.). Les capteurs radiométriques (ou spectroradiomètres imageurs) satellitaires mesurent des flux de luminance sous forme de vecteurs bidimensionnels (2D), dans les domaines spectraux du visible à l'infrarouge thermique, selon le capteur. Ces luminances peuvent être transformées en réflectance (BRF) de surface (rapport des flux réfléchi et incident) si elles sont acquises dans les bandes du visible et proche infrarouge, et en température de brillance de surface (BTF) si elles sont acquises dans l'infrarouge thermique. Les satellites imageurs spectroscopiques mesurent des luminances au sommet de l'atmosphère (TOA), suite aux mécanismes de diffusion et d'émission thermique des paysages terrestres et de l'atmosphère. Cependant, les images satellite peuvent être corrigées des effets atmosphériques pour obtenir des images dites BOA, c'est-à-dire des images de luminance urbaine au bas de l'atmosphère. D'autres corrections, en particulier géométriques, sont aussi appliquées aux images, ce qui est essentiel pour assurer le calage géométrique entre les images satellites et l'architecture 3D urbaine.

De manière résumée, pour le travail réalisé, les images satellites doivent avoir les caractéristiques suivantes :

1) **Résolution spectrale :** les acquisitions des capteurs doivent couvrir l'ensemble du spectre, du visible à l'infrarouge thermique, pour pouvoir représenter le transfert radiatif total. Il est possible de combiner plusieurs images de capteurs différents pour parvenir à cela.
2) **Résolution spatiale :** elle doit être adaptée aux variations spatiales des bilans radiatif et d'énergie urbains (e.g. 100m dans le projet UrbanFluxes). En général, les résolutions spatiales des capteurs sont plus fines dans les courtes longueurs d'ondes que dans les grandes longueurs d'onde.
3) **Fréquence temporelle :** elle doit être plus élevée que les variations temporelles de la canopée urbaine. En dehors des évènements pluvieux, les propriétés optiques varient relativement peu à l'échelle du jour ou de la semaine, comme noté dans le Chapitre IV. Par contre, les températures de surfaces varient rapidement sur des intervalles de temps inférieurs à l'heure, ce qui implique des fréquences d'observation élevées.
4) **Couverture spatiale :** elle doit comprendre si possible toute la ville, ou du moins plusieurs quartiers.
5) **Correction des effets atmosphériques :** les images satellites doivent être ramenées au niveau BOA, car le but est d'étudier et d'utiliser les propriétés de la canopée urbaine.

Il est aujourd'hui relativement facile de satisfaire ces différents critères, grâce aux avancées technologiques et à la disponibilité accrue des données de différents types de capteurs orbitaux toujours plus nombreux et performants. La multiplication des programmes satellites (e.g. programme Sentinel de l'ASE) permet des observations précises, de qualité et fréquentes. Les images satellites utilisées dans le travail présenté dans ce manuscrit ont toutes été traitées par le DLR (Agence aérospatiale allemande), partenaire du projet UrbanFluxes.

2.2. Capteurs Satellitaires Utilisés

Différents capteurs à bord de satellites d'observation de la Terre ont été utilisés dans cette étude à différents niveaux. Certains ont ainsi servi dans la construction de la méthode, pour réaliser divers tests sur les processus développés, et pour vérifier sa capacité à gérer tout capteur satellitaire, d'autres pour réaliser des séries temporelles étendues sur de longues périodes (à l'échelle d'une année). Les images fournies par ces capteurs vont être utilisées dans la suite pour décrire la variabilité des propriétés optiques et thermiques des éléments constituant les canopées urbaines, menant ainsi au calcul précis du bilan radiatif de ces canopées.

2.2.1. Sentinel-2

La mission Sentinel-2 (S2) de l'ESA (agence spatiale européenne) est une constellation de deux satellites imageurs multispectraux (S2A et S2B) qui ont une orbite polaire symétrique, une fauchée large, à haute résolution, dans le cadre du programme Copernicus de surveillance de surface terrestre (http://www.copernicus.eu/ ; https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2). Les satellites S2A et S2B sont en orbite depuis le 23 Juin 2015 et le 7 Mars 2017 respectivement. Ils procurent une couverture systématique de la plupart des surfaces continentales, y compris les surfaces aquatiques et les mers fermées, entre les latitudes 56° Sud et 83° Nord, avec une revisite de 5 jours sous les mêmes conditions de visée. Cette fréquence de revisite augmente si l'on considère les orbites adjacentes dont les fauchées se chevauchent, mais sous des conditions et angles de visée différents. Ces deux satellites embarquent l'instrument MSI (Multispectral Instrument – Instrument Multispectral), qui réalise des acquisitions dans 13 bandes spectrales différentes du visible à l'infrarouge moyen, de résolutions spatiales variables : 4 bandes à 10m, 6 bandes à 20m, et 3 bandes à 60m de résolution (Tableau 2.1). Les données Sentinel-2 sont complémentaires aux données d'autres missions optiques, comme notamment la mission Landsat (paragraphe 3.2.3). La Figure 2.14 indique les correspondances des bandes spectrales entre ces deux missions pour les domaines du visible et du proche infrarouge du spectre électromagnétique.

Tableau 2.1 : Résolution spatiale, longueur d'onde centrale et largeur de bande des 12 bandes spectrales du capteur S2 MSI.

BANDE N°	RESOLUTION SPATIALE $[m]$	LONGUEUR D'ONDE CENTRALE $[nm]$	LARGEUR DE BANDE $[nm]$
1	60	443	20
2	10	490	65
3	10	560	35
4	10	665	30
5	20	705	15
6	20	740	15
7	20	783	20
8	10	842	115
8A	20	865	20
9	60	945	20
10	60	1375	30
11	20	1610	90
12	20	2190	180

Toutes les données acquises par le capteur MSI sont systématiquement traitées au niveau 1-C, unique niveau fourni aux utilisateurs. Les produits de niveau 1-C correspondent à des ortho-images de 100x100km², au format JPEG2000, projetées dans le système de coordonnées UTM/WGS84, pour les 13 bandes spectrales de MSI. Les pixels donnent la réflectance TOA. Des données ancillaires sont aussi fournis : paramètres qui permettent de transformer cette réflectance en luminance par pixel, ainsi que masques de nuages, surfaces aquatiques, et surfaces terrestres. Cependant, étant trop imprécis au moment de cette étude, les masques de nuages ont été améliorés par le DLR à l'aide d'un algorithme de *Fmask* initialement utilisé sur les données Landsat, et adapté aux données Sentinel-2 (Zhu et al., 2015). Le DLR a également transformé les données de niveau 1-C en produits de niveau 2-A, qui correspondent à des images de réflectance BOA. Ces produits ne sont pas systématiquement générés par le segment sol de la mission, mais un outil dédié, appelé Sen2Cor, est fourni aux utilisateurs pour leur permettre d'obtenir les images BOA. Sen2Cor réalise des corrections atmosphérique, cirrus et de terrain à partir de données d'entrée issues des produits TOA de niveau 1-C. Il donne les images de réflectances BOA, et optionnellement des cartes d'épaisseur optique des aérosols (Aerosol Optical Thickness – AOT) et de vapeur d'eau, entre autres. La Figure 2.13 montre un exemple de composition colorée (bandes 2, 3, 4) réalisée à partir d'une image S2A MSI au-dessus de la ville de Héraklion en Crète, par ciel clair le 29 Janvier 2016.



Figure 2.13 : Composition colorée RGB utilisant les bandes 2, 3, et 4 du capteur S2A MSI, corrigées des effets atmosphériques, pour la ville d'Héraklion (Crète), le 29 Janvier 2016.

Le capteur Sentinel-2 MSI fournit des images à haute résolution du visible au proche infrarouge, avec une résolution spatiale et une revisite adaptée à l'échelle spatiale du comportement radiatif urbain dans les courtes longueurs d'onde. En fait, les bandes spectrales "2, 3, 4, 8a, 11, 12" sont suffisantes. Les autres bandes sont adaptées à d'autres types d'étude. Ainsi, les bandes 5, 6, 7, 8, dans la zone dite du 'red edge', entre le rouge et le proche infrarouge, sont très utiles pour l'étude spécifique de la végétation.

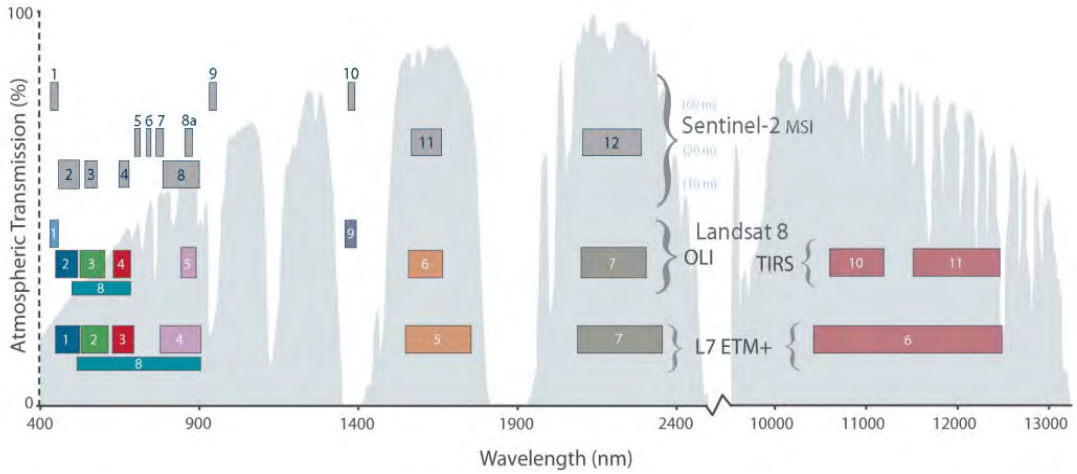


Figure 2.14 : Comparaisons des bandes spectrales des capteurs spatiaux Sentinel-2 MSI, Landsat-7 ETM+, et Landsat-8 OLI/TIRS (Source : NASA)

2.2.2. Sentinel-3

La mission Sentinel-3 (S3 - https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/) a pour objectif principal la mesure des températures et couleurs de surfaces des océans et des sols, et de la topographie des océans, avec une haute précision et une grande robustesse afin d'assister les systèmes de prévisions océanique, de surveillance des environnements et du climat. Similairement à la mission Sentinel-2, la mission Sentinel-3 est composée de deux satellites, S3A et S3B. S3A a été mis en orbite le 16 Février 2016 (prévu initialement pour fin 2014), et S3B a un lancement prévu pour 2018. Le satellite Sentinel-3 embarque quatre instruments :

1) **OLCI** (Ocean and Land Color Instrument) : radiomètre pour mesurer la couleur des sols et des océans
2) **SLSTR** (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) : radiomètre pour mesurer la température de surface
3) **SRAL** (Synthetic Aperture Radar Altimeter) : radar à synthèse d'ouverture pour l'altimétrie
4) **MWR** (Microwave Radiometer) : radiomètre dans le domaine des micro-ondes

Le spectroradiomètre SLSTR est l'instrument le plus utile pour l'étude présente, car il réalise des acquisitions sur des bandes spectrales de l'infrarouge thermique, apportant ainsi des informations manquantes au capteur MSI de Sentinel-2. SLSTR est basé sur l'AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer) d'Envisat et a pour but de calculer des températures de surfaces sur l'ensemble du globe avec une haute précision (précision supérieure à 0.3K pour les températures de surface des océans). De plus, le capteur SLSTR procure des moyens améliorés pour la correction atmosphérique des images, par rapport à l'AATSR. SLSTR réalise des acquisitions de luminance selon 9 canaux (noté S1 à S9) avec une résolution spatiale allant de 500m dans le visible et le proche infrarouge à 1km dans l'infrarouge thermique. De plus, deux canaux F1 et F2 permettent également de réaliser des acquisitions de feux. Toutes les caractéristiques de ces bandes sont résumées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Résolution spatiale, longueur d'onde centrale, et largeur de bande des différentes bandes du capteur S3 SLSTR

BANDE	RESOLUTION SPATIALE $[m]$	LONGUEUR D'ONDE CENTRALE $[\mu m]$	LARGEUR DE BANDE $[\mu m]$
S1	500	0.555	0.02
S2		0.659	0.02
S3		0.865	0.02
S4		1.375	0.015
S5		1.61	0.06
S6		2.25	0.05
S7	1000	3.74	0.38
S8		10.85	0.9
S9		12	1
F1	1000	3.74	0.38
F2		10.85	0.9

Sentinel-3 a une fréquence de revisite élevée, en moyenne une journée, pour les acquisitions au nadir (i.e. verticale), avec une résolution spatiale faible (1km) dans les bandes de l'infrarouge thermique (S7-S9). Cependant, des méthodes existent pour améliorer cette résolution, et obtenir ainsi des séries temporelles avec une haute fréquence de revisite *et* une meilleure résolution spatiale. C'est en particulier le cas des méthodes dites de spatial-*spectral unmixing* (Mitraka et al., 2013, Mitraka et al., 2015) utilisées dans le projet UrbanFluxes pour améliorer la résolution spatiale des observations thermiques de satellites et estimer des cartes d'émissivité de surface à haute résolution, avec pour objectif final le calcul de températures de surface à haute résolution spatiale et temporelle. Des informations sur le type de surface terrestre sont dérivées d'observations dans le visible et le proche infrarouge à haute résolution (e.g. 10m), et utilisées ensuite pour améliorer la résolution spatiale des mesures thermiques jusqu'à une centaine de mètres. L'émissivité est estimée en appliquant une méthode de *spectral unmixing* (Mitraka et al., 2012) à des images visible et proche infrarouge à haute résolution associées à des bibliothèques spectrales. Enfin, un algorithme de *split-window* appliqué à l'image d'émissivité et à l'image thermique rééchantillonée fournit une carte de température de surface à l'échelle locale (100m de résolution). D'autre part, les produits de niveau 1-B incluent des informations sur la couverture nuageuse et la classification des pixels de surface. La Figure 2.15 montre un exemple d'image de température de brillance pour la bande S7 de SLSTR, un zoom sur la ville de Basel en Suisse, et un exemple de carte de température de surface sur la zone couverte par ce zoom fournie par une méthode de *spatial-spectral unmixing* (utilisant notamment la bande S7 de SLSTR).

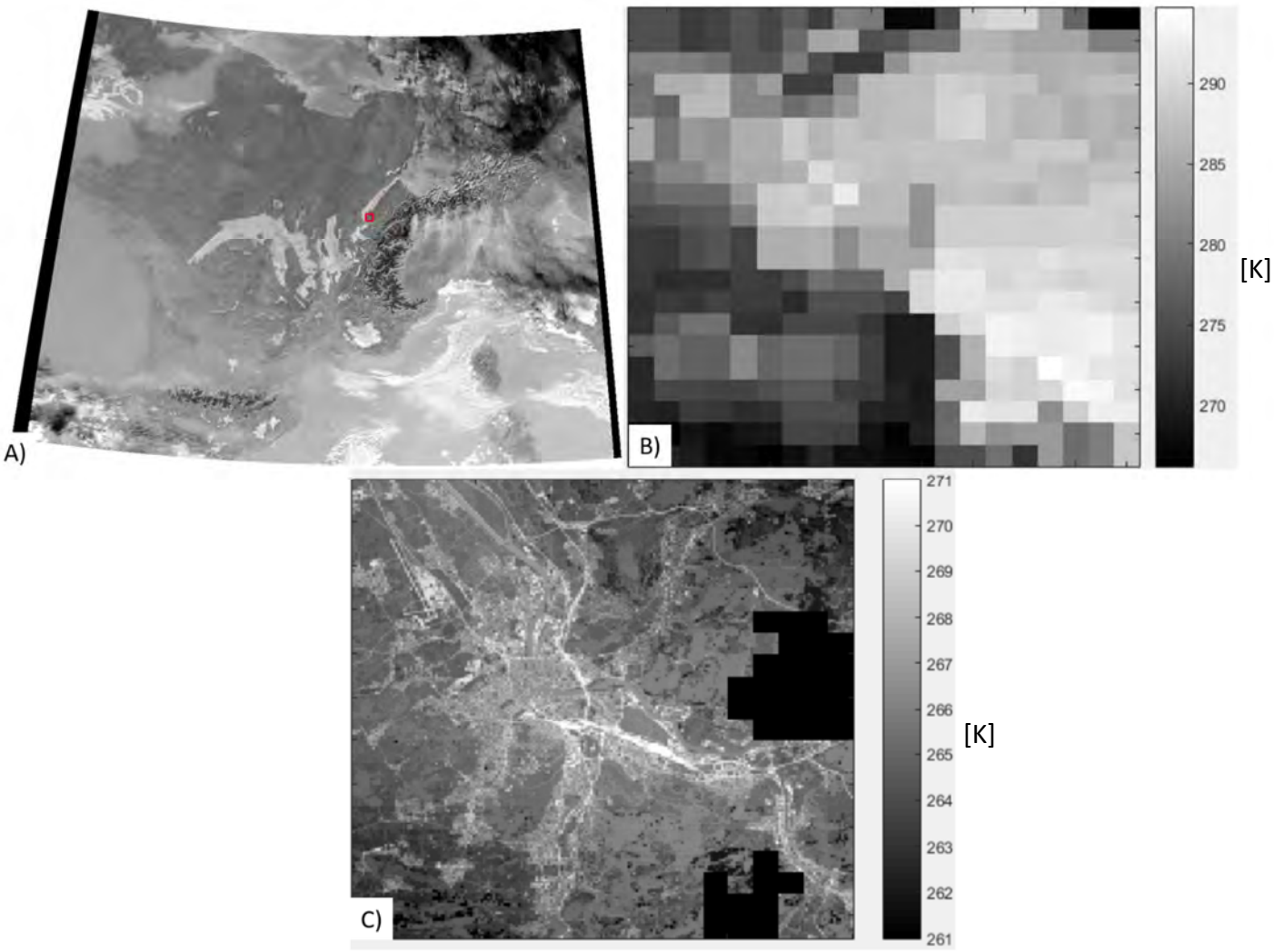


Figure 2.15 : A) Image de température de brillance du canal S7 de SRSTR au nadir, à 1km de résolution, le 20 Janvier 2017; B) Zoom sur la ville de Bâle en Suisse ; C) Carte de température de surface calculée par une méthode de spatial-spectral unmixing, à 100m de résolution, avec un masque de nuages.

Il est important de noter que les cartes de température de surfaces et d'émissivité obtenues représentent une contribution moyenne par pixel des éléments qui y sont présents ; les différents matériaux qui composent chaque pixel ne sont pas distingués. Ces cartes renseignent sur la partie thermique du bilan radiatif, non accessible via un capteur tel que S2 MSI. Dans ce travail, les données Sentinel-3 ayant été disponibles tardivement ont surtout servi d'élément de validation, et de démonstration de l'applicabilité des méthodes développées.

2.2.3. Landsat-8

Landsat-8 (https://landsat.usgs.gov/landsat-8) est un satellite américain d'observation de la Terre en orbite depuis le 11 Février 2013, dans le cadre d'une collaboration entre la NASA et l'USGS (United States Geological Survey). Il embarque deux instruments : le capteur *Operational Land Imager* (OLI) et le capteur *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Ces deux instruments couvrent l'intégralité du globe avec une fréquence de revisite de 16 jours, fournissant des images de luminance au nadir d'une taille de 170km (Nord-Sud) sur 183km (East-Ouest). Le spectroradiomètre OLI comprend 9 canaux du visible à l'infrarouge moyen, tandis que le capteur TIRS comprend 2 canaux dans l'infrarouge thermique (Barsi et al., 2014). Les caractéristiques de ces différents canaux, ainsi que leur dénomination, sont résumées dans le Tableau 2.3. La bande 1 est principalement utilisée pour les études d'aérosols et de surfaces côtières, tandis que la bande 9 est utilisée pour les détections de nuages cirrus. Toutes les bandes du capteurs OLI fournissent des images d'une résolution spatiale de 30m, à l'exception de la bande 8

panchromatique qui a une résolution de 15m. Les bandes 10 et 11 (canaux TIRS) fournissent des images de luminance thermique avec une résolution de 100m, ré-échantillonnée à 30m dans le produit final fournit.

Tableau 2.3 : Bandes de Landsat-8 OLI/TIRS, longueurs d'onde et résolutions spatiale. (Source : USGS)

BANDES	LONGUEURS D'ONDE $[\mu m]$	RESOLUTION SPATIALE $[m]$
1 – ULTRA BLEU (COTES, AEROSOLS)	0.435 – 0.451	30
2 – BLEU	0.452 – 0.512	30
3 – VERT	0.533 – 0.590	30
4 – ROUGE	0.636 – 0.673	30
5 – PROCHE INFRAROUGE (NIR)	0.851 – 0.879	30
6 – INFRAROUGE MOYEN (SWIR) 1	1.566 – 1.651	30
7 – INFRAROUGE MOYEN (SWIR) 2	2.107 – 2.294	30
8 – PANCHROMATIQUE	0.503 – 0.676	15
9 – CIRRUS	1.363 – 1.384	30
10 – INFRAROUGE THERMIQUE (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100 (30)
11 – INFRAROUGE THERMIQUE (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100 (30)

Les images Landsat-8 OLI/TIRS représentent des luminances TOA. Pour cette étude, elles ont été corrigées des effets atmosphériques par le DLR avec le logiciel ATCOR-2 (Richter et Schläpfer, 2015). Cet outil de correction fournit également des estimations d'épaisseur optique des aérosols et de visibilité de la scène, permettant une meilleure modélisation de l'éclairement du paysage. Les images sont également corrigées des effets topographiques par l'utilisation d'un modèle numérique de terrain. On obtient après ces corrections des images de réflectance de surface et de luminance au niveau BOA, à la résolution initiale des images d'entrée. La précision de cette correction atmosphérique dépend de nombreux paramètres, tels que la précision de calibration du capteur, la qualité du co-enregistrement géométrique des différentes bandes spectrales, la précision du modèle de transfert radiatif atmosphérique (ici MODTRAN-5), la paramétrisation de ce dernier, le type de terrain (e.g. plat ou rugueux), et le type de surface (Richter et Schläpfer, 2015). Par exemple, dans le cas d'une surface plane, l'erreur relative se situe entre $\pm 2\%$ et $\pm 4\%$ (Richter et Schläpfer, 2012). Dans le cas d'une surface avec du relief, l'erreur relative dépend de la précision du modèle numérique de terrain utilisé (Richter, 1998) et tend à être plus importante pour les reliefs les plus critiques, comme les falaises.

Landsat-8 offre la possibilité de disposer de luminances à la fois dans les courtes et les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire une information utile pour la modélisation du bilan radiatif total. De plus, les images possèdent une très bonne résolution spatiale dans les courtes longueurs d'onde (bien qu'inférieure au capteur MSI de Sentinel-2), et dans l'infrarouge thermique avec une résolution effective de 100m, bien meilleure que d'autres capteurs thermiques tels que Sentinel-3 ou MODIS, avec une fréquence temporelle relativement bonne (16 jours) en l'absence de couverture nuageuse trop importante. Cela permet d'utiliser directement les données de luminance thermique dans l'études de canopées urbaines, sans passer par les températures moyennes de surfaces calculées par des méthodes de *spectral-spatial unmixing*. De plus, les données Landsat-8 ayant été disponibles dès le début de cette étude ont donc été très utiles pour mettre en place la méthodologie qui permet de déduire des cartes de bilan radiatif urbain d'images satellites. L'approche a cependant été contrainte par le fait qu'un seul des deux canaux thermiques (bande 10) fournissait des données utilisables à cause d'un problème de calibration du capteur TIRS. D'autre part, l'association de Landsat-8 avec son prédécesseur le satellite Landsat-7, utilisant des bandes spectrales similaires (voir Figure 2.14) et l'instrument ETM+, permet d'obtenir une meilleure résolution temporelle, les deux satellites ayant une orbite décalée de 8 jours. La Figure 2.16 montre une composition

colorée d'images Landsat-8 dans les bandes bleue, verte et rouge, corrigée des effets atmosphériques, pour la ville de Londres, le 9 Avril 2015.



Figure 2.16 : Composition colorée RGB utilisant les bandes 2, 3, et 4 du capteur LS8 OLI, corrigées des effets atmosphériques, pour la ville de Londres (Angleterre), le 9 Avril 2015

2.2.4. ASTER

Le capteur ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, https://asterweb.jpl.nasa.gov/) est un spectroradiomètre japonais monté à bord du satellite Terra mis en orbite par la NASA le 18 Décembre 1999. ASTER est opérationnel depuis le mois de Février 2000, avec une fréquence de revisite de 16 jours. Il procure des images à haute résolution spatiale (15m à 90m) pour 15 bandes spectrales du visible à l'infrarouge thermique à l'aide de trois sous-systèmes : visible et proche infrarouge (VNIR), moyen infrarouge (SWIR), et infrarouge thermique (TIR). Toutes les acquisitions sont réalisées au Nadir, excepté la bande 3B qui vise vers l'arrière de la trajectoire, pour réaliser des images stéréoscopiques. Les spécificités de ces bandes sont résumées dans le Tableau 2.4. Les données ASTER sont utilisées principalement pour la création de cartes précises de températures de surface, d'émissivité, de réflectance, et d'élévation.

Tableau 2.4 : Bandes spectrales du capteur ASTER. (Source : USGS)

SOUS-SYSTEME	BANDE N°	LONGUEURS D'ONDE $[\mu m]$	RESOLUTION SPATIALE $[m]$
VNIR	1	0.52 – 0.60	15
	2	0.63 – 0.69	
	3N (Nadir)	0.78 – 0.86	
	3B (Backward)	0.78 – 0.86	
SWIR	4	1.60 – 1.70	30
	5	2.145 – 2.185	
	6	2.185 – 2.225	
	7	2.235 – 2.285	
	8	2.295 – 2.365	
	9	2.360 – 2.430	
TIR	10	8.125 – 8.475	90
	11	8.475 – 8.825	
	12	8.925 – 9.275	
	13	10.25 – 10.95	
	14	10.95 – 11.65	

Les corrections atmosphériques des images ASTER ont été réalisées par le DLR. Ces images ont servi à vérifier la portabilité de la méthode de calcul du bilan radiatif développée dans cette étude à un autre capteur satellite. Cependant, seules les bandes de l'infrarouge thermique d'ASTER ont été utilisées. En effet, l'absence de bande dans les plus courtes longueurs d'ondes (inférieures à 520nm), et le disfonctionnement des canaux de l'instrument ASTER dans le domaine du moyen infrarouge en Avril 2008 (https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/aster_user_advisory_updated_january_14_2009), a rendu ces données moins utilisables pour un calcul de bilan radiatif sur l'ensemble du spectre. La qualité des acquisitions dans l'infrarouge thermique étant restée optimale, et du fait de leur haute résolution spatiale (90m), ce sont ces dernières qui ont été utilisées.

2.2.5. MODIS

MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, https://modis.gsfc.nasa.gov/), est un spectroradiomètre mis en orbite par la NASA sur le satellite Terra le 18 Décembre 1999 (tout comme ASTER). Il est aussi embarqué sur le satellite d'observation de la Terre associé Aqua, lancé le 4 Mai 2002. Du fait de sa présence sur ces deux satellites, et de son large champ de visée (2330km de fauchée), il permet d'observer toute la Terre tous les 1 à 2 jours. Il opère avec 36 bandes spectrales du visible à l'infrarouge thermique (0.405 – 14.385 μm) avec des résolutions spatiales de 250m (bandes 1 – 2), 500m (bandes 3 – 7), et 1000m (bandes 8 – 36). Cet instrument est conçu pour fournir des mesures des dynamiques terrestres globales, dont entre autres la couverture nuageuse et le bilan radiatif à grande échelle.

Bien que la résolution spatiale de MODIS ne permette pas directement d'étudier le fonctionnement de paysages à plus petite échelle comme les villes, la grande fréquence de revisite de MODIS est très utile pour créer des séries temporelles. Ainsi, après application de méthodes de *spatial-spectral unmixing*, les données de luminance

MODIS à large échelle peuvent mener à des cartes de températures de surfaces et d'émissivité à l'échelle locale. De telles cartes ont été fournies des partenaires du projet URBANFLUXES (FORTH) pour cette étude, ce qui a été très utile pour la création de séries temporelles

3. Données supplémentaires

Comme précisé dans les paragraphes précédents, obtenir la variabilité spatiale des propriétés optiques et thermiques des différents éléments présents dans le paysage est nécessaire au calcul du bilan radiatif d'une canopée urbaine, mais n'est pas suffisant. Afin de simuler complètement le bilan radiatif, d'autres données doivent être fournies au modèle de transfert radiatif utilisé. D'une part, il est nécessaire de pouvoir représenter fidèlement le paysage modélisé, c'est-à-dire la disposition 3D des différents éléments et structures composant la canopée urbaine étudiée (e.g. bâtiments, arbres, relief, etc.). D'autre part, des données atmosphériques supplémentaires sont nécessaires pour modéliser l'éclairement urbain. Ces données sont décrites de manière générale dans ce paragraphe, et de manière plus détaillée dans le chapitre IV lors de la présentation des applications des méthodes développées.

3.1. Modèles numériques de terrain

Afin de représenter le relief des différents paysages modélisés, il est nécessaire d'avoir à disposition un modèle numérique de terrain (MNT) à fournir en entrée du modèle de bilan radiatif. Ainsi, tous les autres éléments du paysage pourront avoir leur altitude respective dans la scène définie par rapport à ce relief. Afin d'être utilisable par le modèle DART, un modèle numérique de terrain doit être converti en facettes, ce qui peut être fait automatiquement par le modèle à partir d'une image raster, qui est dans la majorité des cas le format basique des MNT. L'obtention de ces images raster peut se faire par imagerie aéroportée stéréoscopique, c'est-à-dire par la combinaison de plusieurs images acquises par des capteurs aéroportés selon des directions différentes (Jung et Lacroix, 2003). Elle peut aussi se faire de manière plus précise et à très haute résolution (<1m) par des mesures de LIDAR aéroporté (Lindberg et Grimmond, 2011). Un exemple d'image raster de MNT est donné dans la Figure 2.17 pour une partie de la ville de Londres, obtenu par mesures LIDAR.

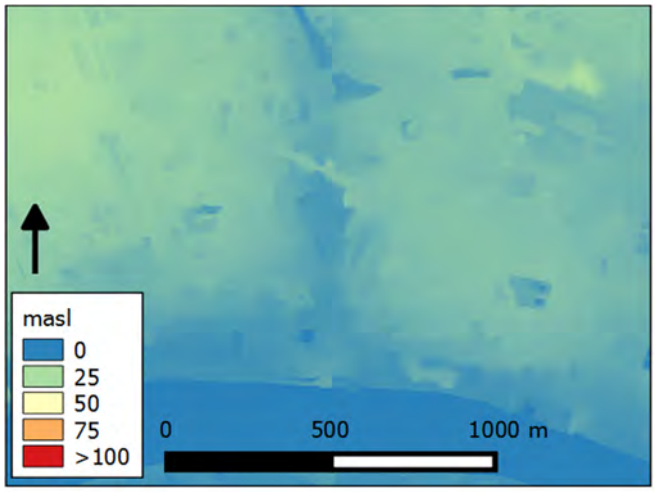


Figure 2.17 : Extrait du MNT de Londres sous forme d'image raster, en mètres au-dessus du niveau de la mer [masl], avec une résolution spatiale de 0.7m

Pour des zones étendues, travailler directement avec l'objet 3D obtenu par transformation automatique du raster MNT à raison de deux facettes par pixel du MNT n'est pas toujours optimal, car l'objet 3D peut comporter beaucoup de triangles superflus qui alourdiront les simulations. Par suite, le nombre de triangles de l'objet 3D

dérivé du raster MNT est tout d'abord réduit avec le logiciel Blender. La Figure 2.18 illustre cette approche avec un extrait du MNT de Londres. La Figure 2.18A montre un extrait du relief 3D généré avec un échantillonnage de 5m de résolution, sous formes de facettes. La zone sélectionnée est prise aux abords de la Tamise, pour contenir une partie plane du MNT. La Figure 2.18B montre un zoom de cet objet, dans lequel les différentes facettes le composant sont visibles. On observe un très grand nombre de facettes, générées automatiquement et toutes de dimensions égales. Afin d'optimiser le nombre de facettes et donc la taille finale de cet objet, toutes les facettes adjacentes et dans le même plan ont été fusionnées. Ainsi, le nombre et la dimension des facettes représentant le relief n'est plus constant, mais devient dépendant de la complexité du relief à chaque endroit. Le résultat est observable dans la Figure 2.18C. Cette opération a permis de passer d'une taille du fichier objet (pour cet extrait) de 15,3Mo à 850Ko, soit une réduction de presque 95%. Cette procédure est décrite en Annexe A, sous forme de tutoriel fourni aux partenaires du projet.

Cette transformation n'est pas nécessaire si le MNT est fourni sous forme d'objet 3D en facettes, comme dans le cas du MNT (Figure 2.19) de la ville de Bâle, fourni par l'Université de Basel (UoB). Les surfaces aquatiques ont été séparées manuellement pour former un groupe distinct, permettant ainsi de leur assigner des propriétés différentes avec le logiciel DART.

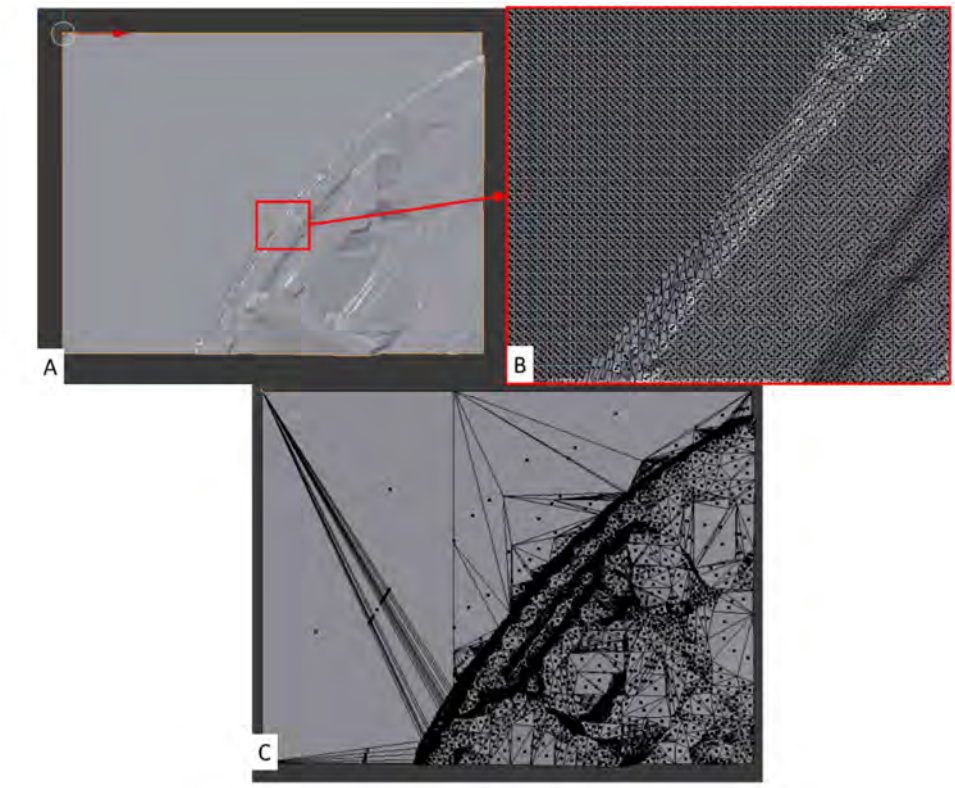


*Figure 2.18 : Illustration de la vectorisation d'un MNT raster au format *.obj, pour une partie de la ville de Londres. A) Visualisation de l'objet avec le logiciel Blender. B) Zoom sur l'encadré rouge, avec affichage des facettes générées automatiquement. C) Objet complet après simplification des facettes*

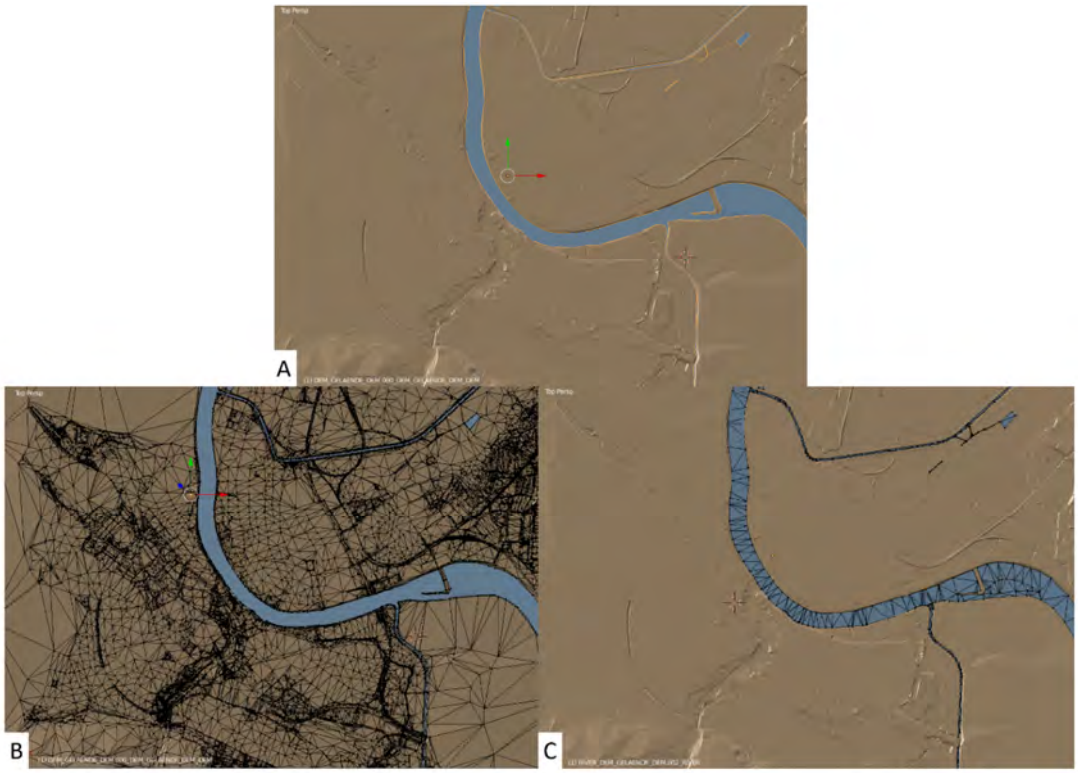


Figure 2.19 : Visualisation 3D Blender du MNT de la ville de Bâle. A) Visualisation globale. B) Visualisation des facettes du groupe 'sol'. C) Visualisation des facettes du groupe 'rivière'

3.2. Représentation 3D des bâtiments

Une fois la représentation 3D du relief finalisée, il convient d'ajouter la représentation des objets présents sur ce relief (i.e. les bâtiments et la végétation). Ceci est régulièrement réalisé par l'utilisation de modèles numériques d'élévation (MNE) ou de surface (MNS), qui comportent des informations semblables aux MNT mais à la fois sur le relief et le reste de la surface. Nous utilisons ici une approche différente de représentation, à l'aide du modèle DART et de ses capacités d'importation d'objet 3D et de génération de végétation. Tout comme le relief, les bâtiments doivent dans notre approche également être représentés par des facettes, avec au minimum une différenciation entre les murs et les toits, afin de pouvoir leur assigner des propriétés de matériaux spécifiques. La représentation 3D des bâtiments est fournie par les trois villes étudiées, soit directement au format .obj, soit dans un format (e.g. .dxf) qui est ensuite traduit au format .obj. Des opérations supplémentaires au changement de format peuvent être nécessaires, pour corriger certains défauts (e.g. dédoublement de certaines surfaces, volumes non fermés, intersections locales de faces) et s'assurer de la bonne position des bâtiments par rapport au MNT. En effet, si certaines imprécisions sont inévitables, tant dans la structure que dans la position relative des différents bâtiments, et n'ont que peu d'impact sur le résultat final, d'autres peuvent avoir un effet conséquent sur la simulation du bilan radiatif. C'est le cas notamment des facettes dédoublées. En effet, ces dernières auront notamment pour conséquence une démultiplication de l'émission thermique, résultant en une luminance anormalement élevée pour les zones concernées. La Figure 2.20 illustre ce cas avec une image de luminance thermique simulée sur un extrait de la ville de Bâle. Tous les toits ont les même propriétés thermiques ($\epsilon = 0.99$ et $T = 300K$). Le dédoublement de facettes explique que certains toits ont une exitance très supérieures aux autres toits de même configuration géométrique. Après avoir été noté, ce problème a été corrigé avec une fonctionnalité de Blender, qui permet de supprimer toutes les facettes dédoublées. Ce traitement a été par la suite appliqué systématiquement aux 3 bases de données géométriques urbaines. Une fois ces défauts corrigés et les bâtiments géo-référencés par rapport au DEM, les facettes des bâtiments et du relief sont fusionnées dans le même fichier, en conservant tous les groupes. Pour la ville de Bâle (Figure 2.21), 4 groupes

composent les bâtiments : murs, toits, structures de mur et structures de toit. Les deux derniers groupes correspondent à des structures additionnelles aux murs et toits classiques 'lisses'.

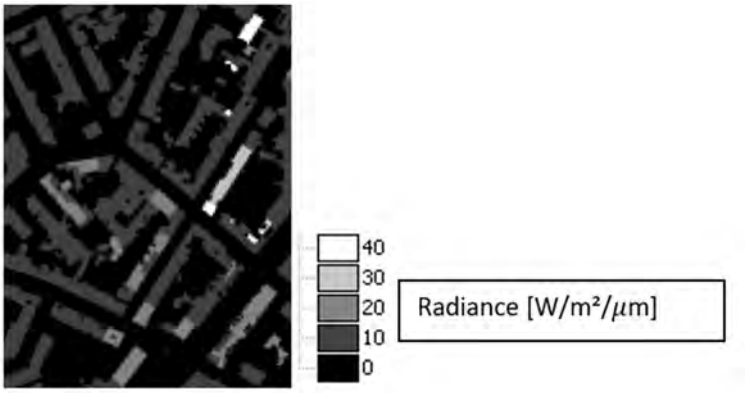


Figure 2.20 : Image nadir de luminance thermique simulée par DART sur une partie de la ville de Bâle, pour la bande spectrale [10.60 11.19 μm] à 2,50m de résolution. Tous les toits ont la même propriété ($\epsilon = 0.99, T = 300K$)? Tous les autres éléments ont une émissivité nulle.

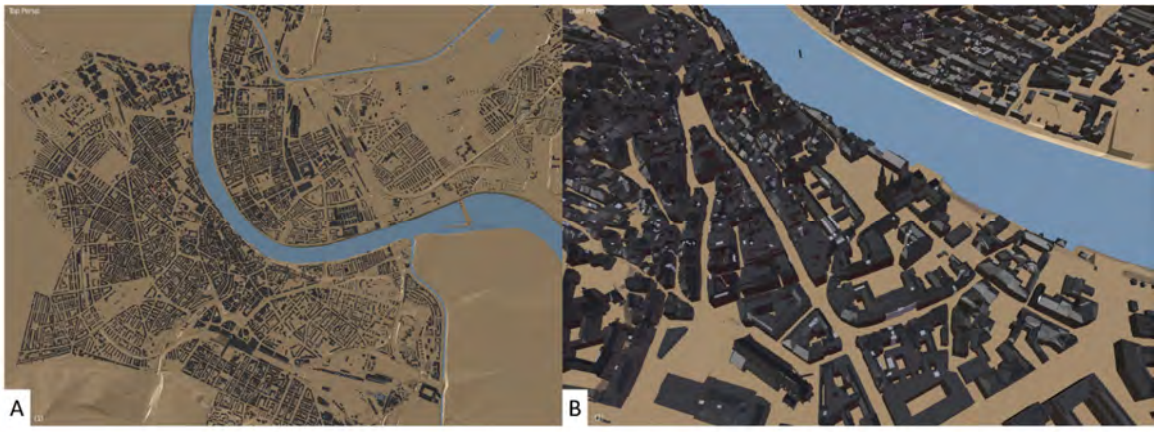


Figure 2.21 : Visualisation 3D de l'association MNT+Bâtiments avec le logiciel Blender, pour la ville de Bâle. Les différents groupes sont représentés par des couleurs différentes. Vue au nadir (A) et oblique (B).

3.3. Végétation

Une fois le relief et les bâtiments simulés, la végétation urbaine est introduite. La végétation peut être intégrée au paysage sous deux formes principales. La première option est d'avoir un fichier texte recensant les positions et tailles de tous les arbres à modéliser. DART peut ainsi générer ces arbres automatiquement à partir du fichier (voir paragraphe 2.2.1.c). De telles données sont acquises par des campagnes de mesures au sein des villes concernées, pour référencer les arbres présents dans le paysage. Une deuxième solution est d'importer dans DART une carte d'occupation du sol sous forme raster (Figure 2.22). Ainsi, la végétation est simulée sous forme de parcelles turbides. Dans ce cas, les troncs des arbres ne sont pas simulés, mais cela a un impact négligeable sur le calcul du bilan radiatif. La Figure 2.22 montre un exemple d'image raster de modèle numérique de canopée végétale, obtenu par mesures de LIDAR aéroporté pour la ville de Londres. La Figure 2.23 montre les visualisations 3D des paysages complets importés dans DART pour les villes de Londres et Bâle, dans l'outil de vue 3D de DART. La végétation pour Londres est obtenue via une image raster fournie par l'université de Reading (UoR), et pour Bâle par un fichier renseignant les positions et tailles des arbres. Ici, la végétation est simulée en tant que matière turbide.

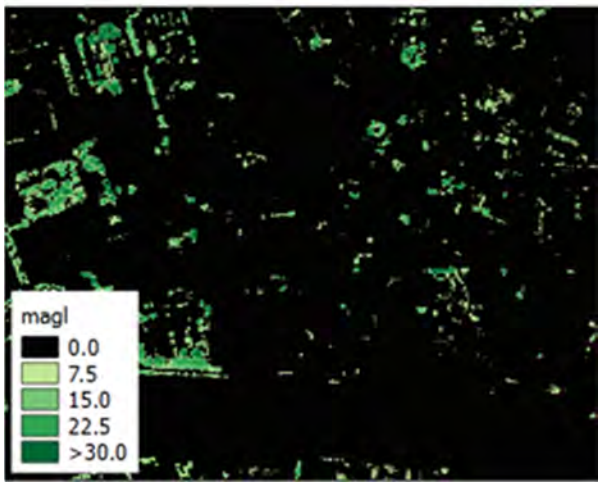


Figure 2.22 : Image raster de modèle numérique de surface pour les canopées végétales dans une partie de la ville de Londres. Les unités sont en mètres au-dessus du niveau du sol (meters above ground level) [magl]

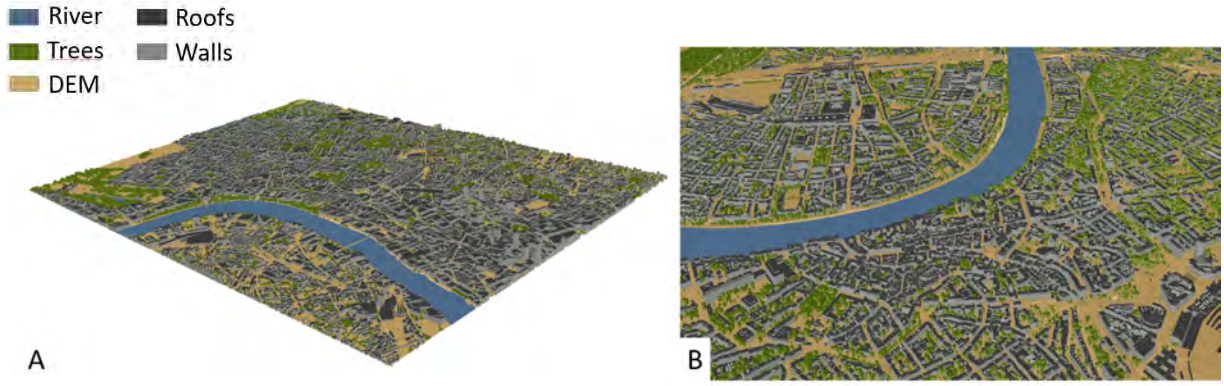


Figure 2.23 : Visualisation dans l'outil vue 3D de DART des paysages complets (relief + bâtiments + végétation) pour les villes de Londres (A) et Bâle (B)

3.4. Données atmosphériques

Afin de modéliser le bilan radiatif du paysage une fois sa représentation 3D établie, il est nécessaire de définir éclairement du paysage. DART calcule cet éclairement via la modélisation de l'atmosphère et du transfert radiatif s'y produisant. Pour cela, il faut paramétrer le modèle d'atmosphère. Cette paramétrisation change naturellement pour chaque nouvelle date ou scène modélisée, car la composition de l'atmosphère varie dans le temps, provoquant la variabilité de l'éclairement des paysages. Ce dernier est aussi modifié selon la position du Soleil, directement paramétrée par la date choisie et les coordonnées du site d'étude. Deux sources de données sont utilisées pour permettre cette paramétrisation : les données issues de la correction atmosphérique des images et les données de tours de flux présentes au-dessus des canopées urbaines. En effet, lors de la correction atmosphérique des images, l'épaisseur optique des aérosols est estimée pour la scène considérée. Cette épaisseur optique est l'un des paramètres atmosphériques majeurs qui conditionne l'éclairement et sa partition en éclairement solaire direct et diffus (i.e. dans toutes les directions). Les tours de flux sont classiquement des structures métalliques placées sur le toit d'un bâtiment, et comportant différents instruments, dont des capteurs radiométriques. Ces capteurs mesurent en particulier l'éclairement et l'exitance de la zone dans laquelle ils sont situés. Les valeurs mesurées sont des valeurs totales (i.e. intégrées spectralement), et séparées selon les courtes et les grandes longueurs d'onde. L'éclairement mesuré permet de paramétrer la modélisation atmosphérique, alors que l'exitance permet d'avoir un point de validation pour le bilan radiatif simulé (Chapitre IV).

A partir de ces informations, le but est des simuler l'éclairement de la scène. Pour la simulation thermique du bilan radiatif, les mesures d'éclairement sont appliquées directement en tant qu'éclairement atmosphérique thermique diffus. En effet, la partie thermique du bilan radiatif est simulée directement sur tout le domaine des grandes longueurs d'onde. Pour la simulation du bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde, le but est d'obtenir le spectre d'éclairement en fonction de la longueur d'onde, sur tout le domaine spectral du visible à l'infrarouge moyen. Ceci est réalisé en simulant le transfert radiatif dans l'atmosphère sur un nombre choisi de bandes spectrales couvrant le domaine voulu, en modifiant itérativement la composition en aérosols de l'atmosphère (en partant de la valeur estimée par la correction atmosphérique), de manière à faire correspondre la valeur totale simulée (i.e. après intégration du spectre obtenu) aux mesures des tours. Une fois l'atmosphère correctement paramétrée, les spectres d'éclairement résultant sont conservés pour l'intégration spectrale du bilan radiatif final. De plus, le transfert radiatif dans l'atmosphère est pré-calculé pour toutes les bandes spectrales du capteur satellitaire considéré, afin de réduire les temps de calculs lors de la simulation du bilan radiatif spectral final. Cette procédure est détaillée dans le Chapitre III. La Figure 2.24 donne un exemple de spectre d'éclairement simulé dans les courtes longueurs d'onde.

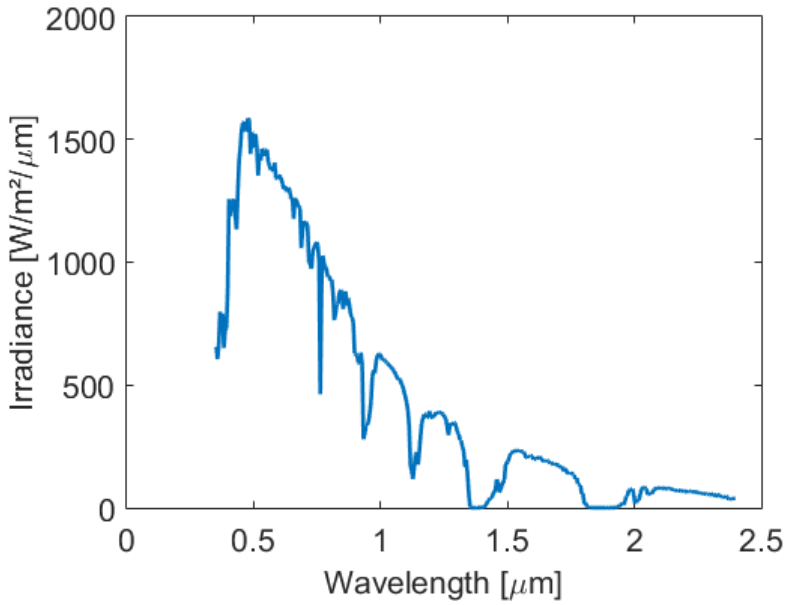


Figure 2.24 : Spectre d'éclairement simulé au-dessus de Bâle pour le 24 Juin 2016, à 11h05, en utilisant 410 bandes spectrales de 5nm de largeur de bande

Avec la paramétrisation de l'atmosphère, la représentation de la scène est complète, excepté pour les propriétés optiques et thermiques des différents matériaux de la scène. En effet, même si la représentation 3D du paysage et la modélisation de l'atmosphère sont parfaites, le bilan radiatif simulé ne sera pas réaliste si les matériaux représentés ne sont pas associés à des propriétés traduisant la réalité de la canopée urbaine. Le modèle DART est capable d'assigner des propriétés optiques différentes à chacun des groupes d'éléments définis, et pour chacun de ses éléments une variabilité spatiale de ces propriétés. Ces propriétés varient donc spectralement, spatialement, et temporellement, mais ne sont pas disponibles directement. C'est pourquoi une méthode d'inversion de ces propriétés à partir d'images d'observation de la Terre a été développée dans le cadre de cette thèse, au moyen de la comparaison itérative d'images réelles à des images simulées par le modèle DART. Par la suite, les propriétés ainsi obtenues, permettent de finaliser la paramétrisation de la scène, pour enfin modéliser un bilan radiatif urbain réaliste. Cette méthode est présentée dans le chapitre suivant.

III. Calcul de Q* à partir de données satellites

1. Introduction

Le chapitre précédent a introduit différentes conditions nécessaires au calcul du bilan radiatif urbain à l'aide de mesures satellites combinées à un modèle de bilan radiatif 3D. Ces conditions sont rappelées brièvement ici :

- La disponibilité de séries temporelles d'images satellites utilisant des bandes spectrales qui échantillonnent le spectre électromagnétique, du visible à l'infrarouge thermique.
- Un modèle de bilan radiatif 3D qui simule à la fois des images satellites (i.e. images monodirectionnelles de luminance), l'éclairement du paysage via le transfert radiatif atmosphérique, et des cartes de bilan radiatif Q^*, en prenant en compte la variabilité 3D (géométrie, propriétés optiques, température) du paysage.
- La connaissance des conditions d'éclairement de la scène.
- La disponibilité d'un modèle 3D de la ville étudiée, avec le relief associé et si disponible la végétation urbaine.
- La connaissance de la distribution 3D des propriétés optiques et de la température des éléments du paysage.

Les quatre premières conditions sont remplies par le modèle et les données présentées dans le chapitre II. Les modèles 3D urbains des trois villes (Londres, Bâle, Héraklion) étudiées sont fournies par les partenaires du projet URBANFLUXES (UoB, UoR, FORTH). Ces modèles incluent le relief, les bâtiments, et la végétation urbaine, avec une précision de l'ordre du mètre, ce qui est plus que suffisant pour étudier le fonctionnement radiatif de la canopée urbaine à l'échelle de la ville. De plus, divers traitements, par exemple basés sur le fait que les murs sont verticaux, ont permis de décomposer ces modèles urbains par classe / groupe d'éléments urbains (e.g. toit, mur, rivière), ce qui permet au modèle DART de leur assigner des propriétés spécifiques. D'autre part, la distribution angulaire et l'intensité de l'éclairement peuvent provenir de données extérieures, soit indirectement via la procédure qui corrige les images satellites des effets atmosphériques (e.g., épaisseur optique des aérosols) ou directement via les tours fixes qui mesurent l'éclairement local dans les courtes et grandes longueurs d'onde. De plus, le travail bénéficie de séries temporelles de plusieurs types d'images satellites, corrigées des effets atmosphériques par le DLR. Ces images permettent de renseigner sur les variations spatiale et temporelle des paysages urbains. Initialement étalonnées en luminance, ces images ont été transformées par le DLR en réflectance pour les courtes longueurs d'onde, et en température et émissivité de surface, pour les grandes longueurs d'onde, grâce à des méthodes de *spatial spectral unmixing* (Mitraka et al., 2015).

La solution innovante développée et implémentée dérive directement d'images satellites multi-bandes des cartes de températures et de réflectance de matériaux urbains que DART utilise pour simuler les cartes de Q^*. Cette méthode d'inversion est très utile, car elle permet de cartographier les réflectances et températures des matériaux avec une précision impossible à atteindre par des moyens autres que la télédétection, sachant que Q^* est très dépendant de ces propriétés. Des méthodes similaires existent, utilisant également des modèles de transfert radiatif prenant en compte les effets dus à la structure 3D de la surface, et inversant les propriétés des matériaux à partir d'images satellites dans les domaines thermique et des courtes longueurs d'onde, notamment la méthode décrite dans (Fontanilles, 2009). Cette méthode utilise le modèle de transfert radiatif TITAN (Fontanilles, 2008) pour désagréger les propriétés des matériaux de canyons urbains à partir de données hyperspectrales. L'innovation de l'approche adoptée ici vient de la comparaison itérative d'images satellites simulées par DART et des images satellites corrigées des effets atmosphériques à l'échelle de la ville, à partir de sa représentation 3D complète. Pour cela, elle utilise les images DART de luminance par type de matériau. Cette méthode d'inversion donne des cartes de propriétés de résolution spatiale similaire aux images satellites utilisées, par matériau et par bande spectrale du capteur satellite. Il est donc important d'utiliser des images satellites avec des résolutions spatiale et spectrale bien adaptées. De manière schématique (Figure 3.1), la comparaison itérative des images DART et satellite donne des cartes de température et/ou facteurs multiplicatifs des réflectances des matériaux par type de matériau et par bande spectrale, de plus en plus précises que DART applique pour simuler des images qui convergent vers l'image satellite considérée. Finalement, DART utilise ces

cartes pour simuler Q^* à la date d'acquisition de l'image satellite. De plus, DART simule Q^*_{sw} à toute date, sous réserve que la réflectance des matériaux est proche de précision plus ou moins proche de l'acquisition satellite sous réserve que les matériaux ont des réflectances proches des réflectances à la date de l'image satellite utilisée. Dans ce cas, des séries horaires et diurnes de Q^*_{sw} peuvent être estimées en considérant l'évolution horaire de l'éclairement. La construction de séries temporelles est présentée par la suite.

Ci-dessous, cette méthode d'inversion itérative (paragraphe III.2) est présentée, de même que le calcul de Q^*_{sw} (paragraphe III.3) et l'adaptation au calcul de Q^*_{lw}, et finalement l'approche développée pour créer rapidement des séries temporelles de Q* à partir de bases de données (LUTs – Look-Up Tables) pré calculées.

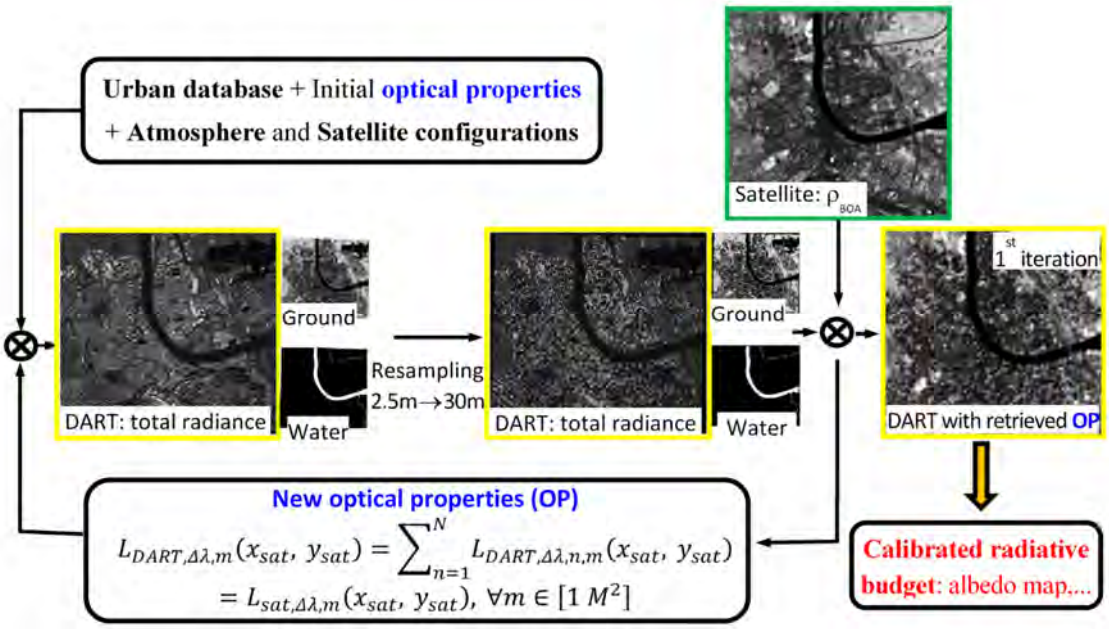


Figure 3.1 : Méthode de cartographie des réflectances et températures des matériaux urbains par comparaison itérative d'images DART et satellite. DART calcule Q^*_{sw} à partir de ces propriétés et de l'éclairement local. Une méthode similaire permet de calculer la distribution spatiale des températures, et ainsi obtenir Q^*_{lw}.

2. Méthode itérative d'inversion des propriétés des matériaux de surface

2.1. Présentation générale

La méthode utilisée pour inverser les propriétés des matériaux de surfaces à partir d'images satellite est une méthode itérative et adaptative d'inversion à contributions multiples (en anglais AMCR – Adaptative Multiple Contribution Retrieval). Elle est itérative, car les propriétés sont calculées par comparaisons d'une image satellite et d'images simulées par DART à chaque itération. Elle est adaptative, car le mode de comparaison des images DART et satellite diffère selon la complexité de la zone urbaine locale traitée (i.e. nombre de matériaux différents présents dans le groupe de pixels traités). Elle est à contributions multiples, car différents groupes d'éléments urbains contribuent à la luminance associée à tout pixel de l'image satellite. Pour simuler les images satellites, le modèle DART utilise les données suivantes : la configuration satellite (i.e. angle de visée, bandes spectrales), la distribution angulaire de l'éclairement (i.e. dates, composition de l'atmosphère, éclairement total), et une maquette 3D du paysage urbain (i.e. bâtiments, relief, végétation). Dans le travail réalisé, la direction de visée du capteur satellite est le nadir, mais la méthode d'inversion est conçue pour fonctionner pour toute configuration de visée. La résolution des images DART est plus fine que celle des images satellites utilisées, de manière à bien simuler tous les arbres de la ville, définis par leurs positions et dimensions. En effet, les arbres sont simulés par des cellules turbides (cf. Chapitre II) si bien qu'un arbre plus petit qu'une cellule turbide est

ignoré dans la simulation. Ceci explique que DART a été utilisé avec des voxels de dimension en général comprise entre 2.5m et 5m. Une récente innovation de DART (i.e., simulation d'arbres avec des triangles à partir de leur description turbide usuelle) permet désormais d'éviter cette limitation, et ainsi de simuler les images DART avec des voxels de grandes dimensions, ce qui réduit énormément les temps de calcul, et rend la méthode d'inversion encore plus opérationnelle. La distribution angulaire de l'éclairement provient de mesures extérieures, comme décrit précédemment. La maquette urbaine 3D est classée en différents groupes (e.g. sol, mur, toit, végétation) permettant au modèle DART d'assigner à chacun d'eux des réflectances et températures différentes. Au départ, avant la phase de comparaison avec les images satellites, les réflectances proviennent de bibliothèques standard fournies avec le modèle DART. Ainsi, cinq groupes sont distingués pour la ville de Bâle (Figure 3.2) : les toits, les murs, les arbres, le sol (regroupant les routes et tous les éléments de relief), et les éléments aquatiques.

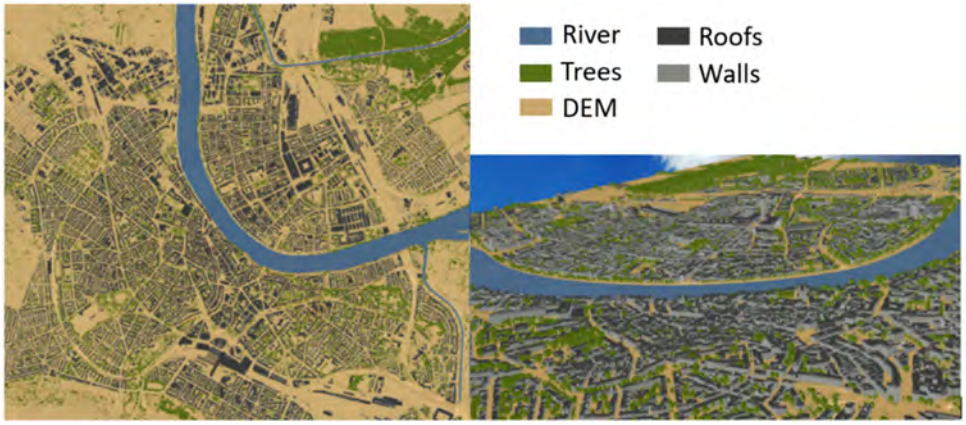


Figure 3.2 : Vues nadir (gauche) et oblique (droite) de la base de données géométrique de la ville de Bâle dans l'outil "Vue 3D" de DART. Chaque groupe d'élément urbain est distingué par une couleur différente.

En utilisant ces données et des réflectances par exemple issues des bases de données de DART, on peut obtenir des images de télédétection simulées telles que dans la Figure 3.3 montre une image BOA de la ville de Bâle simulée par DART à 865nm (bande NIR de Sentinel-2) avec des voxels de 5m et des réflectances par défaut constantes par groupe d'élément urbain, correspondant aux conditions d'observation de l'image Sentinel 2 du 24 Juin 2016. Les groupes d'éléments urbains (i.e. sols, toits, etc.) se distinguent clairement par leurs différentes teintes, mais ces teintes sont spatialement constantes, ce qui n'est pas réaliste. La comparaison (Figure 3.4) de cette image, après son ré-échantillonnage à la résolution de 20m, avec l'image Sentinel 2 corrigée des effets atmosphériques illustre que les réflectances arbitraires et spatialement constantes appliquées aux différents groupes urbains ne rendent pas compte de la réalité du paysage. La méthode d'inversion pour cartographier les réflectances des matériaux urbains utilise les images DART par matériau, c'est-à-dire des images qui donnent la luminance ou réflectance par groupe d'élément urbain. La Figure 3.5 illustre ce type d'images.

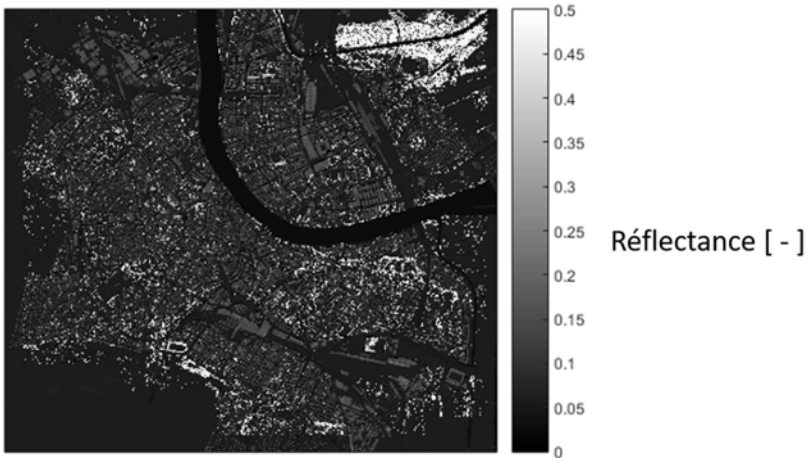


Figure 3.3 : Image "réflectance nadir" DART simulée avec des réflectances de matériau spatialement constantes. Bande NIR (865nm) de Sentinel-2. 24/06/2016. Résolution spatiale de 5m.

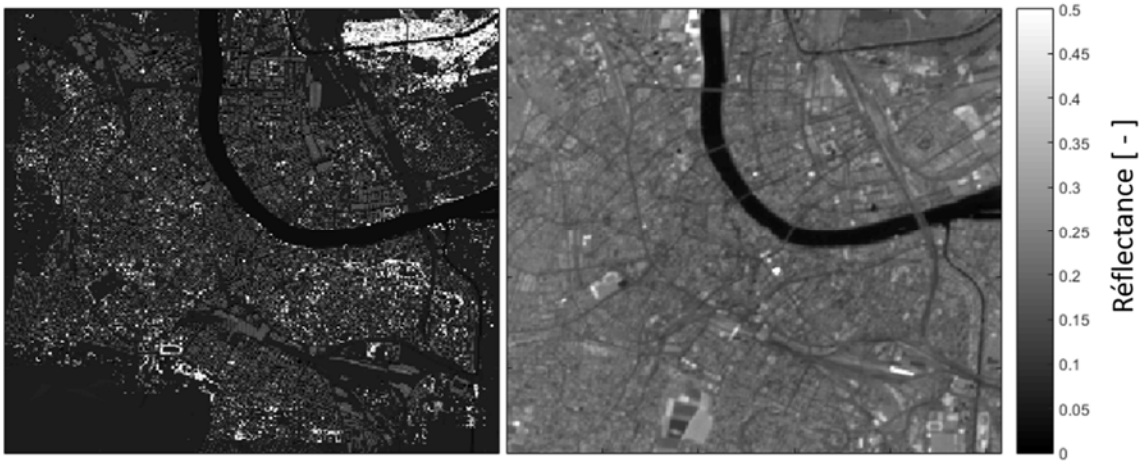


Figure 3.4 : Images "réflectance nadir" DART (gauche) et Sentinel-2 corrigée des effets atmosphériques (droite) acquise le 24 Juin 2016. Bande NIR (865nm). Résolution spatiale de 20m.

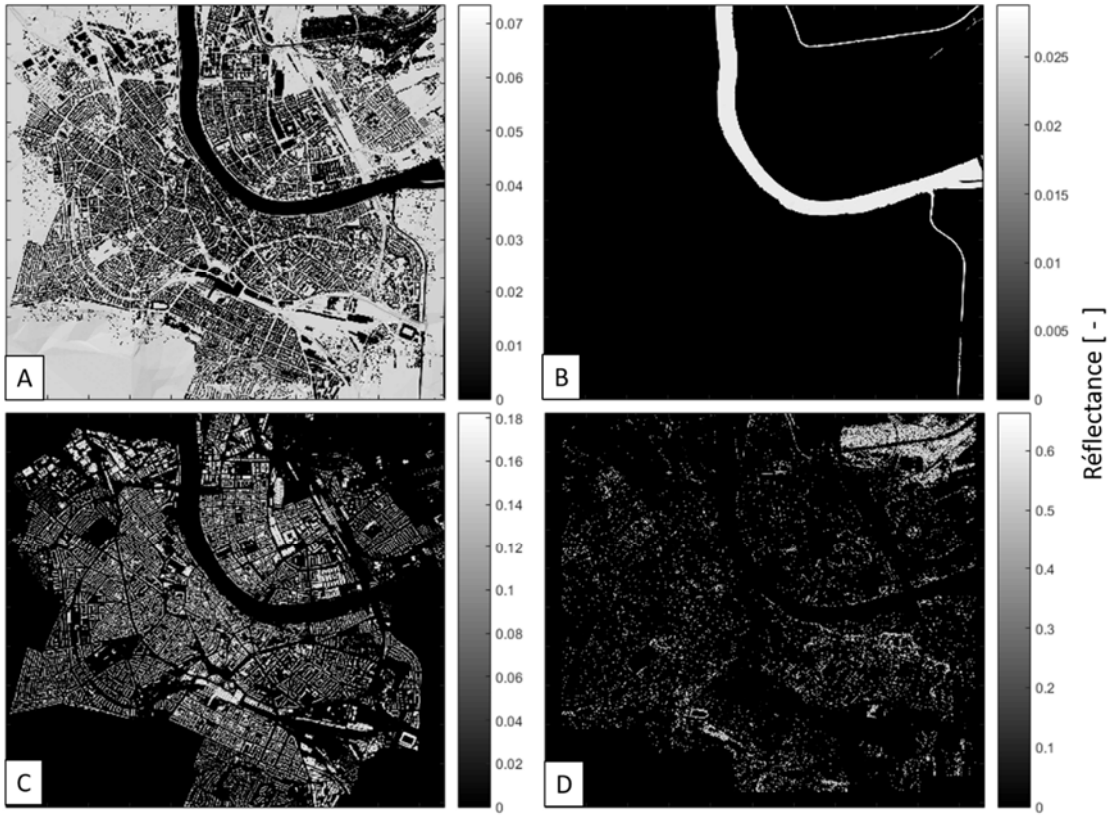


Figure 3.5 : Exemples d'images DART de "réflectance nadir" par matériau à 865nm et 5m de résolution. Ville de Bâle. Conditions d'acquisition de l'image Sentinel-2 du 24.06.2016. A : groupe 'sol' ; B : groupe 'rivière' ; C : groupe 'toits' ; D : groupe 'végétation'.

A partir de ces images totales et partielles (i.e. par matériau) de luminance (ou de réflectance) dans les courtes et grandes longueurs d'onde, la méthode d'inversion fournit des cartes de réflectance et de température par matériau urbain, et par bande spectrale du capteur satellite considéré. DART emploie ces propriétés pour calculer le bilan radiatif dans les domaines des courtes (SW – de 0.35 à 3.5 μm) et grandes (LW – au-delà de 3.5 μm), longueurs d'onde, puis le bilan total en tant que somme de ces deux composantes.

2.2. Inversion des propriétés optiques dans les courtes longueurs d'onde

L'inversion par comparaison itérative des images DART et satellite est réalisée en deux grandes étapes, chacune ayant un mode de fonctionnement propre. La première étape donne une première approximation de la cartographie des propriétés des éléments urbains en négligeant les diffusions multiples. Ensuite, dans la phase 2, une approche itérative basée sur les propriétés obtenues dans la phase précédente permet d'affiner cette cartographie tout en prenant en compte les diffusions multiples. Toute image DART simulée dans les étapes 1 et 2 suit les mêmes traitements de géoréférencement et de ré-échantillonage spatial en vue de sa comparaison avec l'image satellite. Les comparaisons sont effectuées de manière indépendante par bande spectrale de l'image satellite utilisée. L'intégration spectrale est réalisée à la fin du processus itératif de l'étape 2, quand les propriétés des éléments urbains sont estimées être calculées avec une précision suffisante. Toutes les simulations DART sont réalisées pour les conditions d'observation de l'image satellite : direction de visée, état de l'atmosphère (e.g. épaisseur optique des aérosols : Figure 3.6) et éclairement BOA (e.g. mesures des tours de flux : Figure 3.7). De manière à réduire les temps de calcul, DART pré-calcule la distribution angulaire de l'éclairement spectral atmosphérique pour éviter de le re-calculer pour chaque image urbaine simulée.

Les Figure 3.6 et Figure 3.7 illustrent les données utilisées par le modèle d'atmosphère de DART. L'épaisseur optique des aérosols est disponible à chaque acquisition satellite après correction des effets atmosphériques, tandis que les mesures de flux d'éclairement total (i.e. intégrés sur tout le spectre) sont disponibles en continu par intervalles de 30 minutes. Des données similaires existent dans les autres villes concernées par l'étude et seront présentées par la suite. La simulation DART du transfert radiatif atmosphérique donne les luminances atmosphériques spectrales BOA et TOA ainsi que les fonctions de transfert atmosphériques utilisées par DART pour simuler le couplage radiatif "Terre – Atmosphère" lors des simulations des images urbaines. En fait, seule la moyenne spatiale de l'épaisseur optique des aérosols a été utilisée, car cette dernière varie peu sur les surfaces considérées. D'autre part, contrairement à l'exitance urbaine, l'éclairement urbain est supposé être spatialement constant et égal à l'éclairement mesuré par les tours de flux locales. De plus, les mesures locales de bilan radiatif au niveau des tours de flux sont utilisées pour tester la validité des bilans radiatifs dérivés des mesures satellites.

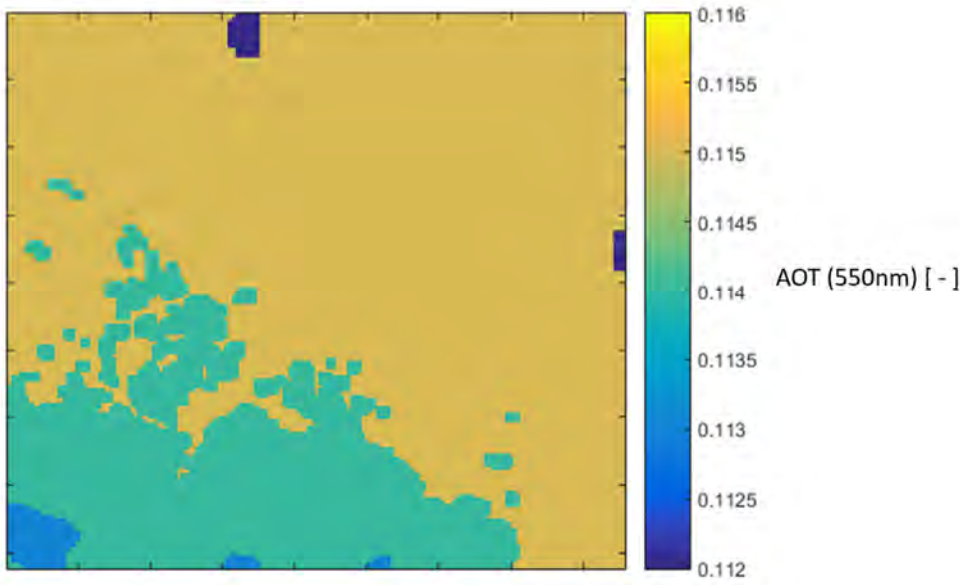


Figure 3.6 : Carte d'épaisseur optique des aérosols (à 550nm) obtenue lors de la correction atmosphérique par le DLR de l'image Landsat-8 de la ville de Bâle acquise le 21.08.2015. Résolution : 100m. Source : DLR.

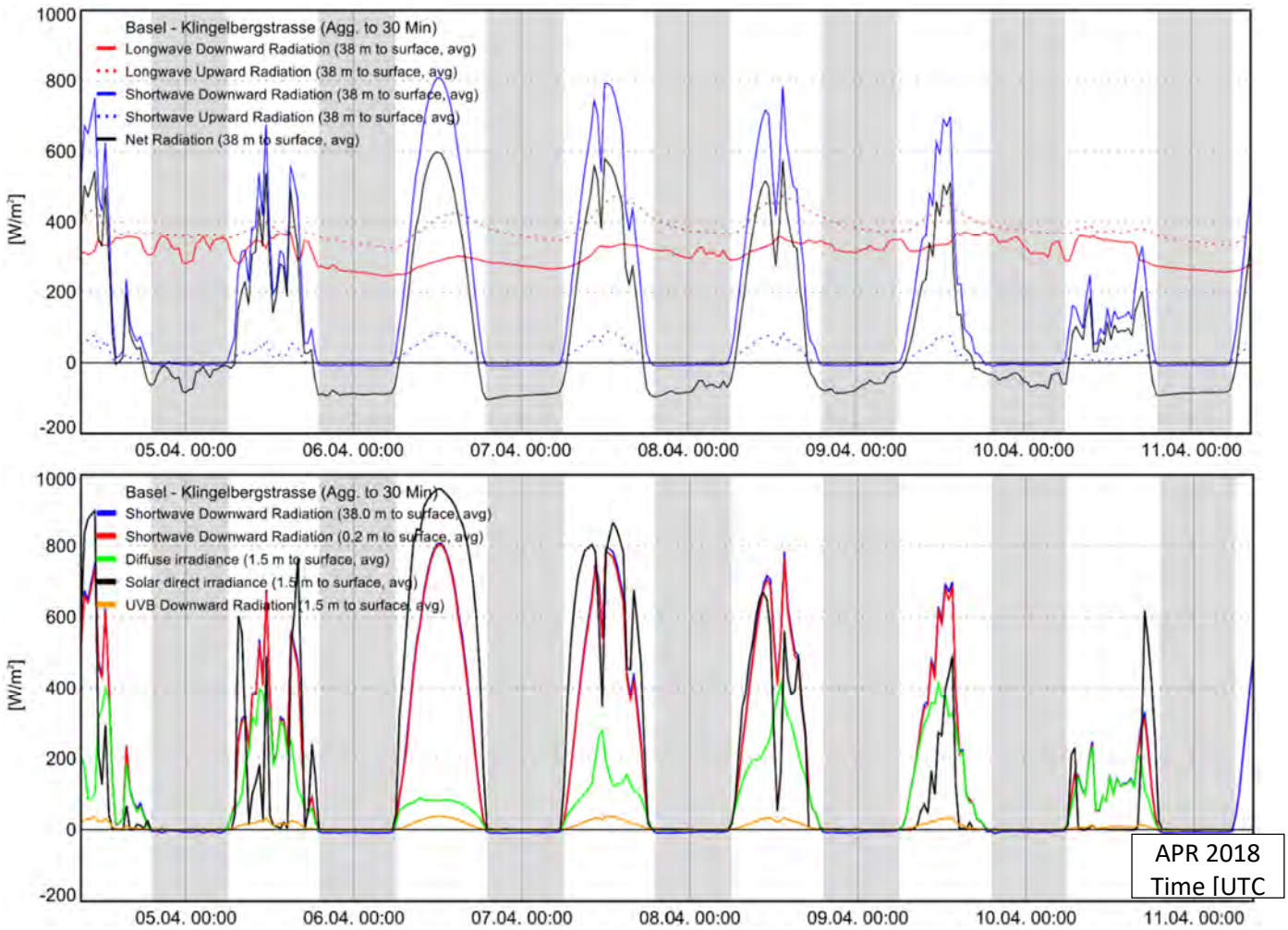


Figure 3.7 : Eclairement dans les grandes et courtes longueurs d'onde mesuré par une tour de flux à 38m au-dessus de la surface au centre de Bâle (Knlingelbergstrasse). Haut : bilan radiatif ainsi qu' éclairement et exitance dans les courtes et grandes longueurs d'onde [W/m²]. Bas : éclairements solaires directs et diffus dans les courtes longueurs d'onde, à différentes altitudes [W/m²]. Les données sont agrégées à des intervalles de temps de 30 minutes, pour la semaine du 5 Avril au 11 Avril 2018. (Source : Université de Bâle - https://mcr.unibas.ch/dolueg2/)

2.2.1. Première étape

Cette étape donne une carte de réflectances d'ordre un par matériau urbain. L'image DART simulée avec ces réflectances de matériau serait égale à l'image satellite si les mécanismes de diffusion multiple étaient négligeables. Dans ce cas, l'éclairement $E_{n,o}$ de tout élément de surface urbain n n'est dû qu'aux rayons solaires qui n'ont pas interagi avec les surfaces terrestres (i.e., éclairement solaire direct et éclairement solaire diffus direct). $E_{n,o}$ dépend de la géométrie de l'élément i et d'une manière générale de l'architecture urbaine (i.e., effets d'ombre totale ou partielle). Par contre, $E_{n,o}$ est indépendant des réflectances de matériau. DART peut donc calculer $E_{n,o}$ pour tout élément i à partir de la seule base de données géométrique de la ville et de la distribution angulaire de l'éclairement solaire et atmosphérique du sommet de la canopée urbaine.

Les étapes 1 et 2 utilisent les deux faits suivants :

- La luminance de tout pixel d'image satellite selon une direction Ω_v est la somme des luminances des éléments urbains qui contribuent au pixel selon Ω_v, pondérées par la surface efficace $\sigma(\Omega_v)$ de chacun d'eux selon Ω_v.
- La luminance d'un élément n est le produit de son éclairement E_n par sa réflectance ρ_n, supposée lambertienne, divisée par π. A l'étape 1, E_n=$E_{n,o}$. Dans la réalité, du fait des diffusions multiples au sein de la canopée urbaine, E_n dépend aussi de la luminance des autres surfaces urbaines, et donc de l'éclairement et de la réflectance de ces surfaces. Par suite, E_n dépend des produits et puissances des surfaces autour de l'élément n.

A l'étape 1, la luminance $L_{x,y}(\Omega_v)$ de tout pixel (x, y) de l'image satellite est donc supposée pouvoir être écrite comme une équation linéaire :

$$L_{x,y}(\Omega_v).\Delta x.\Delta y.|\overline{\Omega}_{nadir}.\overline{\Omega}_v| = \sum_{n=1}^{N}\sigma_n(\Omega_v).\rho_n.E_{n,o}.|\overline{\Omega}_n.\overline{\Omega}_v| \quad (3.0)$$

où $\overline{\Omega}_{nadir}$ est la verticale, $\overline{\Omega}_n$ est la normale de l'élément n, et N est le nombre d'éléments urbains qui contribuent directement au pixel. Vu que plusieurs éléments contribuent en général à la luminance d'un pixel (i.e., N > 1), la détermination des réflectances de matériau implique en général de traiter simultanément plusieurs pixels voisins, avec l'hypothèse que dans ce groupe de pixel, tous les éléments urbains du même groupe ont la même réflectance. Cela permet ainsi de constituer un système d'équations contenant un nombre d'équations supérieur au nombre d'inconnues (i.e. de type d'éléments) de la zone considérée. Ces équations, et les différentes étapes de la procédure de cette étape 1, sont détaillées ci-dessous.

Etape 1.a

DART simule deux types d'images : une image de luminance de surface totale $L_{DART,\Delta\lambda}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$, et des images de luminance par type d'élément n $L_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$, par bande $\Delta\lambda$ du capteur satellite utilisé pour la comparaison. Ω_{sat} représente la direction de visée du capteur satellite, caractérisé par son angle zénithal θ_{sat} et son angle azimutal ϕ_{sat}, et (x_{DART}, y_{DART}) représente les coordonnées des pixels des images dans le repère de DART. Ce repère a une résolution spatiale plus fine que l'image satellite, pour des raisons de précision de la simulation. Les réflectances des matériaux sont supposées être lambertiennes. La réflectance d'un matériau n qui contribue au pixel DART d (x_{DART}, y_{DART}), selon la direction de visée Ω_{sat} est notée : $\rho^0_{\Delta\lambda,n,d}(x_{DART}, y_{DART})$. Deux cas sont possibles pour fixer sa valeur initiale :

- Si $\rho^0_{\Delta\lambda,n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$ est inconnu, il est fixé à une valeur plausible issue des bibliothèques DART, et spatialement constant.
- Si $\rho^0_{\Delta\lambda,n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$ est connu (e.g. mesure terrain ou application de la méthode d'inversion à une image satellite), il est conservé. L'application de la méthode à la nouvelle image satellite va le mettre à jour.

Dans un pixel DART d, l'éclairement moyen incident sur un élément n est :

$$E_{DART,\Delta\lambda,n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat}) = \frac{\pi.L_{DART,\Delta\lambda,n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{\text{sat}})}{\rho^0_n(x_{DART}, y_{DART})}.\frac{\Delta x_{DART}.\Delta y_{DART}.cos\theta_{sat}}{\sigma_{n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})} \quad (3.1)$$

où $\Delta x_{DART}, \Delta y_{DART}$ sont les dimensions des voxels selon les axes x et y de la simulation DART (correspondant à la résolution de l'image simulée dans le cas d'une prise de vue au nadir), et $\sigma_{n,d}$ est la section efficace de l'élément n dans le pixel DART d selon la direction d'observation $\Omega_{sat}(\theta_{sat}, \phi_{sat})$. Cette section est automatiquement calculée par le modèle DART. Le rapport $\frac{\Delta x_{DART}.\Delta y_{DART}.cos\theta_{sat}}{\sigma_{n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})}$ représente le fait que la luminance de tout pixel d de l'image DART totale est par mètre carré de la section efficace de d (i.e., $\Delta x_{DART}.\Delta y_{DART}.cos\theta_{sat}$) alors que la luminance d'un élément urbain est exprimée par mètre carré de sa section efficace dans le pixel d. Si le pixel contient un seul type d'élément, ces deux aires sont égales et le rapport alors égal à 1.

- **Etape 1.b**

Les images DART de luminance totale $L_{DART,\Delta\lambda}$ et élémentaires $L_{DART,\Delta\lambda,n}$ sont géoréférencées dans le système de coordonnées de l'image satellite utilisée, puis échantillonnées spatialement à la résolution satellite. Plusieurs méthodes de géo-référencement sont possibles selon le mode de représentation 3D de la ville :

- Si le système de coordonnées de la représentation 3D est connu et identique à celui des images satellites utilisées, une simple translation des images en sortie à l'aide d'un point de référence est suffisante (DART conserve les positions relatives des différent pixels). L'origine des coordonnées de l'image dans la simulation DART étant le coin en haut à gauche, il suffit de le recaler selon le système de coordonnées de l'image satellite. Une rotation est également potentiellement nécessaire si le modèle 3D a été entré dans DART sans prêter attention à sa disposition (notamment son axe 'Nord-Sud').
- Si ce système de coordonnées est connu mais diffère de celui de l'image satellite, un changement de système de coordonnées est nécessaire. Dans ce cas, l'approche adoptée utilise des fonctions de la bibliothèque GDAL (Geospatial Data Abstraction Library – http://www.gdal.org/), notamment gdal_translate et gdalwarp, en renseignant les deux systèmes de coordonnées et les coordonnées des coins en tant que points d'ancrage.
- Si le système de coordonnées de la représentation 3D du paysage est inconnu ou non spécifié, l'approche consiste à sélectionner des points d'ancrages reconnaissables dans les images DART et satellite. Cela est notamment possible en comparant une image DART à haute résolution (e.g. 2.5m) avec des cartes de Google Maps. Une fois les points identifiés, le géo-référencement de l'image finale est réalisé avec un logiciel (e.g. ILWIS : https://www.itc.nl/ilwis/) où avec la bibliothèque GDAL. La Figure 3.8 donne un exemple de points d'ancrage utilisés pour géo-référencer une image DART de Bâle, simulée sans végétation à 2.5m de résolution. Chaque point est affecté de coordonnées issues de Google Maps, et par exemple utilisé par ILWIS comme point de contrôle, ce qui permet de générer un système de géo-référencement applicable à toutes les images DART simulées avec la même base de données géométrique urbaine. La Figure 3.9 montre, après géo-référencement, l'image DART superposée à une image satellite Landsat-8 à 30m de résolution spatiale.

Note : le logiciel ILWIS a initialement été utilisé pour géoréférencer et échantillonner les images DART, car son interface graphique facilitait la mise au point des traitements. Il a ensuite été remplacé par des scripts en langage Python et des fonctions de la bibliothèque GDAL pour rendre l'approche plus universelle et aussi plus efficace pour traiter un grand nombre d'images. En effet, la seule procédure d'inversion d'une image Landsat-8 (7 bandes spectrales utilisées) de la ville de Bâle avec une base de données géométriques comportant 5 types d'éléments, requiert le traitement de 42 images par itération (7 images de luminance totale et 35 images de luminance par élément).

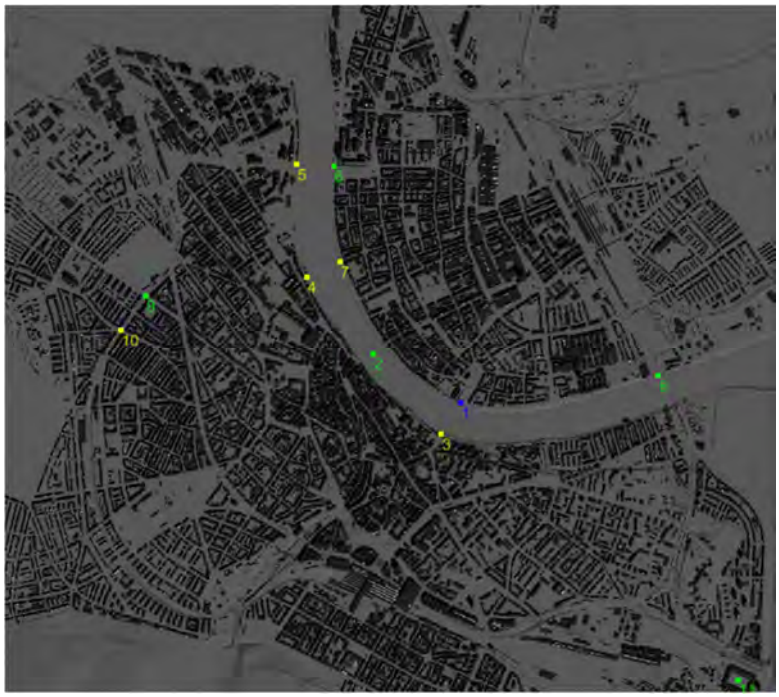


Figure 3.8 : Exemple de jeu de points de contrôle utilisés pour géo-référencer une image DART de la ville de Bâle. Les points sont sélectionnés sur une image DART à 2.5m de résolution, simulée sans végétation.



Figure 3.9 : Image DART (Δr=2.5m) superposée à une image Landsat-8 (Δr=30m) de la ville de Bâle.

L'échantillonnage spatial des images DART modifie leurs luminances. Cette modification est illustrée ici pour le cas simple où un pixel satellite m correspond à en nombre entier D^2 de pixels DART d'indice d ($d \in [1\ D^2]$). Cette condition est aisée à satisfaire en choisissant judicieusement la résolution des simulations DART.

Luminance totale : $L_{DART,\Delta\lambda,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = \frac{\sum_{d=1}^{D^2} L_{DART,\Delta\lambda,d}}{D^2}$ (3.2)

Luminance d'un élément n : $L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat,\Omega_{sat}}) = \frac{\sum_{d=1}^{D^2} L_{DART,\Delta\lambda,n,d}}{D^2}$ (3.3)

Eclairement d'un élément n :

$$E_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = \frac{\sum_{d=1}^{D^2} E_{DART,\Delta\lambda,n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat}).\sigma_{n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})}{\sum_{d=1}^{D^2} \sigma_{n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})} \quad (3.4)$$

Section efficace d'un élément n du pixel m observé dans la direction de visée du satellite :

$$\sigma_{n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = \sum_{d=1}^{D^2} \sigma_{n,d}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat}) \quad (3.5)$$

En première approximation, la réflectance des éléments de type n est supposée être identique dans les D^2 pixels d contenus dans le pixel satellite m : $\rho_{n,d}^0 = \rho_{n,m}^0\ \forall d \in [1\ D^2]$, où $\rho_{n,d}^0$ est la réflectance initiale (étape 1a) du matériau n du pixel DART d. $E_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ peut être exprimée comme dans l'équation (3.1) :

$$E_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = \frac{\pi.L_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})}{\rho_{n,m}^0(x_{sat}, y_{sat})} . \frac{\Delta x_{sat}.\Delta y_{sat}.cos\theta_{sat}}{\sigma_{n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})} \quad (3.6)$$

- **Etape 1c**

Une fois géoréférencées et échantillonnées, les images DART de luminance totale sont comparées aux images satellites de manière à déterminer pour tout pixel satellite m et toute bande $\Delta\lambda$, une nouvelle estimation de la réflectance $\rho_{n,m}^1(x_{sat}, y_{sat})$ par type d'élément n, qui sera appliquée à tout pixel DART d inclus dans m à la première itération de l'étape 2. Pour cela, les images DART et satellite sont itérativement comparées via une fenêtre glissante de dimension croissante avec le degré d'itération. Ainsi, la taille de la fenêtre glissante est 1x1 pixel à la première itération, ce qui permet d'obtenir la réflectance des éléments correspondant aux pixels purs (i.e. contenant un unique type d'élément urbain). La taille de la fenêtre glissante croît jusqu'à atteindre la taille M telle que $M^2 > N$, ce qui permet d'assurer l'existence de solutions au système d'équation créé pour les pixels contenus dans la fenêtre. Cette approche itérative permet donc de s'adapter à toute complexité de paysage.

Pour tout pixel DART, l'on a :

$$L_{DART,\Delta\lambda,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = \sum_{n=1}^{N} L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) \quad (3.7)$$

Pour tout pixel satellite m de toute fenêtre de comparaison u de taille M^2, on doit avoir :

$$\sum_{n=1}^{N} L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = L_{sat,\Delta\lambda,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}), \forall m \in [1\ M^2] \quad (3.8)$$

A ce stade de l'inversion, une seule simulation DART a été réalisée : la luminance $L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ est calculée en utilisant des réflectances de matériaux arbitraires $\rho_{n,u}^0(x_{sat}, y_{sat})$ spatialement constantes. L'objectif est d'obtenir une nouvelle réflectance de matériau $\rho_{n,u}^1(x_{sat}, y_{sat})$ telle que la nouvelle luminance $L'_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ soit égale à la luminance satellite, sachant que $L'_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ est dérivé de $L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ sans prendre en compte les effets des diffusions multiples :

$$\frac{L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})}{\rho_{n,u}^0(x_{sat}, y_{sat})} = \frac{L'_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})}{\rho_{n,u}^1(x_{sat}, y_{sat})} \quad (3.9)$$

Cette simple règle de trois est d'autant plus imprécise que les diffusions d'ordre supérieur à 1 sont importantes par rapport aux diffusions d'ordre 1. $\rho_{n,u}^1(x_{sat}, y_{sat})$ n'est donc qu'une approximation. Cette réflectance est

constante dans chaque cellule u de la fenêtre glissante. Elle correspond à une réflectance lambertienne équivalente qui assure l'égalité des luminance DART et satellite. Le terme "réflectance équivalente" correspond au fait que la réflectance peut ne pas être la réflectance du matériau de l'élément urbain n si la géométrie de ce dernier n'est pas exacte dans la base de données urbaine. La résolution du système d'équation suivant, pour chaque cellule u de la grille, donne les nouvelles réflectances de matériau :

$$\sum_{n=1}^{N} L'_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}) = L_{sat,\Delta\lambda,m}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat}), \forall m \in [1\ M^2] \quad (3.10)$$

L'approche développée suppose que les surfaces sont lambertiennes. Cette approximation devrait être corrigée dans le futur. Ainsi, des surfaces comme les fenêtres et rivières pourraient être caractérisées par des propriétés spéculaires. Cependant, les résultats de cette étude montrent que cette hypothèse "lambertienne" est très acceptable. En effet, l'architecture 3D de la canopée urbaine est la source majeure de l'anisotropie radiométrique urbaine. Ainsi, une canopée composée de surfaces individuelles lambertiennes est en général non lambertienne.

Pour tout pixel m de la cellule u considérée, l'équation (3.9) transforme le système (3.10) de M^2 équations en :

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{\rho^1_{n,u}(x_{sat},y_{sat})}{\rho^0_{n,u}(x_{sat},y_{sat})} . L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat}) = L_{sat,\Delta\lambda,m}(x_{sat}, y_{sat}), \forall m \in [1\ M^2] \quad (3.11)$$

Ce système peut ne pas avoir de solution, même si la taille M de la fenêtre d'analyse vérifie $M^2 > N$. Ceci survient par exemple si un pixel de la cellule contient N éléments, et si les $M^2 - 1$ autres pixels contiennent tous le même type d'élément. Le système comprend alors $M^2 - 1$ équations à une inconnue et une équation à N inconnues. Une solution est tout d'abord de décaler la grille selon un offset en x et/ou en y (typiquement le point de départ de la fenêtre glissante est décalé d'une ligne et d'une colonne de l'image) afin de changer les situations rencontrées. Si certains pixels n'ont toujours pas de solution, soit la grille est augmentée, soit une valeur par défaut est assignée aux matériaux dans les pixels sans "solution". L'attribution d'une valeur par défaut permet de gagner du temps de calcul par rapport à une nouvelle analyse avec une fenêtre agrandie, mais n'est naturellement pas réaliste. Cependant, elle est supposée être améliorée dans les itérations de l'étape 2, qui s'appuient sur l'impact induit par le changement de réflectance du matériau sur la luminance DART.

Les images DART simulées et satellite mesurées sont donc comparées successivement avec des fenêtres de taille croissante de 1x1 pixel à MxM pixels, et en plus possiblement décalées s'il existe des pixels sans solution. Le nombre de systèmes d'équations à résoudre est important. Les pixels pour lesquels tous les matériaux présents ont été résolus ne sont donc pas traités dans les étapes ultérieures pour améliorer les temps de calcul. Les figures qui suivent illustrent le fonctionnement de l'algorithme de comparaison. La Figure 3.10 montre une représentation schématique d'un pixel satellite et d'éléments qu'il peut contenir.

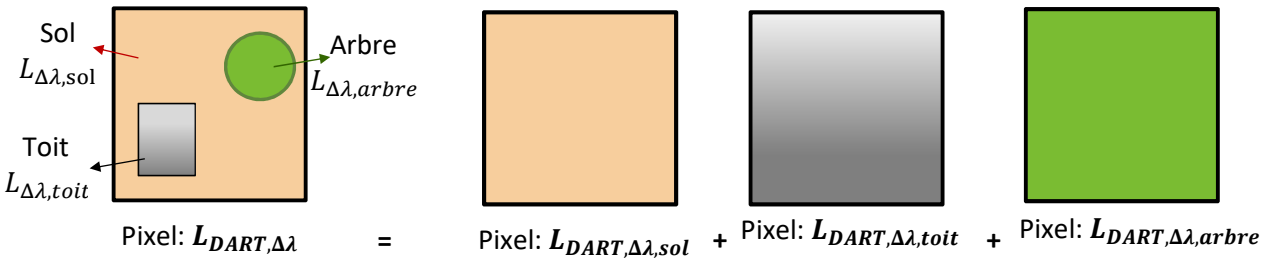


Figure 3.10 : Pixel schématique contenant les types d'éléments urbains "sol" (beige), "toit" (gris) et "arbre" (vert) de luminances respectives $L_{\Delta\lambda,sol}$, $L_{\Delta\lambda,toit}$ et $L_{\Delta\lambda,arbre}$. Pour tout pixel, DART simule la luminance totale $L_{DART,\Delta\lambda}$ et les luminances par type d'élément (i.e. $L_{DART,\Delta\lambda,sol}$, $L_{DART,\Delta\lambda,toit}$, $L_{DART,\Delta\lambda,arbre}$)

La luminance DART totale du pixel de la Figure 3.10 selon la direction (Ω) dans la bande spectrale $\Delta\lambda$ est :

$$L_{DART,\Delta\lambda}(\Omega) = \frac{L_{\Delta\lambda,sol}(\Omega).\sigma_{sol}(\Omega) + L_{\Delta\lambda,arbre}(\Omega).\sigma_{arbre}(\Omega) + L_{\Delta\lambda,toit}(\Omega).\sigma_{toit}(\Omega)}{\sigma_{sol}(\Omega) + \sigma_{arbre}(\Omega) + \sigma_{toit}(\Omega)}$$
$$= L_{DART,\Delta\lambda,sol}(\Omega) + L_{DART,\Delta\lambda,arbre}(\Omega) + L_{DART,\Delta\lambda,toit}(\Omega) \quad (3.12)$$

où σ_X est la section efficace des éléments de type X selon la direction Ω, pour le pixel considéré. La section efficace du pixel est : $\sigma_{pixel}(\Omega) = \sigma_{sol}(\Omega) + \sigma_{arbre}(\Omega) + \sigma_{toit}(\Omega)$.

La comparaison des luminances $L_{DART,\Delta\lambda}(\Omega)$ et $L_{satellite,\Delta\lambda}(\Omega)$ de ce pixel (Figure 3.10) revient à déterminer les 3 inconnues $L_{DART,\Delta\lambda,sol}(\Omega)$, $L_{DART,\Delta\lambda,arbre}(\Omega)$ et $L_{DART,\Delta\lambda,toit}(\Omega)$, soit $L_{\Delta\lambda,sol}(\Omega)$, $L_{\Delta\lambda,arbre}(\Omega)$ et $L_{\Delta\lambda,toit}(\Omega)$, car $L_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,sol}(\Omega) = \frac{L_{\Delta\lambda,sol}(\Omega).\sigma_{sol}(\Omega)}{\sigma_{pixel}(\Omega)}$, $L_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,arbre}(\Omega) = \frac{L_{\Delta\lambda,arbre}(\Omega).\sigma_{arbre}(\Omega)}{\sigma_{pixel}(\Omega)}$ et $L_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,toit}(\Omega) = \frac{L_{\Delta\lambda,toit}(\Omega).\sigma_{toit}(\Omega)}{\sigma_{pixel}(\Omega)}$. Pour les courtes longueurs d'onde, cela revient à déterminer de nouvelles réflectances. Dans la Figure 3.10, la direction (Ω) est le nadir, c'est-à-dire la verticale. Cependant, les luminances des trois éléments sont affectées par l'architecture 3D du site, et sont de plus interdépendantes du fait des diffusions multiples entre ces éléments. La Figure 3.11 illustre ces effets avec deux images DART (composition colorée RVB), étalonnées en réflectance, de site urbain 3D schématique, et simulées pour deux directions d'observation (nadir, oblique) : les réflectances "observées" des éléments urbains dépendent de leur forme et / ou environnement alors que chacun d'eux est caractérisé par une réflectance spécifique spatialement constante. Ainsi, la réflectance "observée" du sol dépend de sa localisation au sein du milieu du milieu urbain en lien avec la variabilité spatiale de son éclairement (i.e. effets d'ombre). De même, élément, la réflectance "observée" du toit dépend de son inclinaison relative à l'éclairement solaire, et la réflectance "observée" des arbres varie avec la direction d'observation, en lien avec la densité volumique et distribution angulaire de leurs éléments foliaires. D'autre part, les murs, en réfléchissant l'éclairement incident dans toutes les directions, participent à augmenter la réflectance "observée" du sol et des arbres, même s'ils ne sont pas directement observés par le satellite, comme dans l'image nadir. Il convient de noter que le type "sol" peut inclure des différentes catégories d'éléments comme des routes ou du gazon avec des réflectances de matériau spécifiques. De même, le type "mur" peut inclure des parois vitrées, etc.

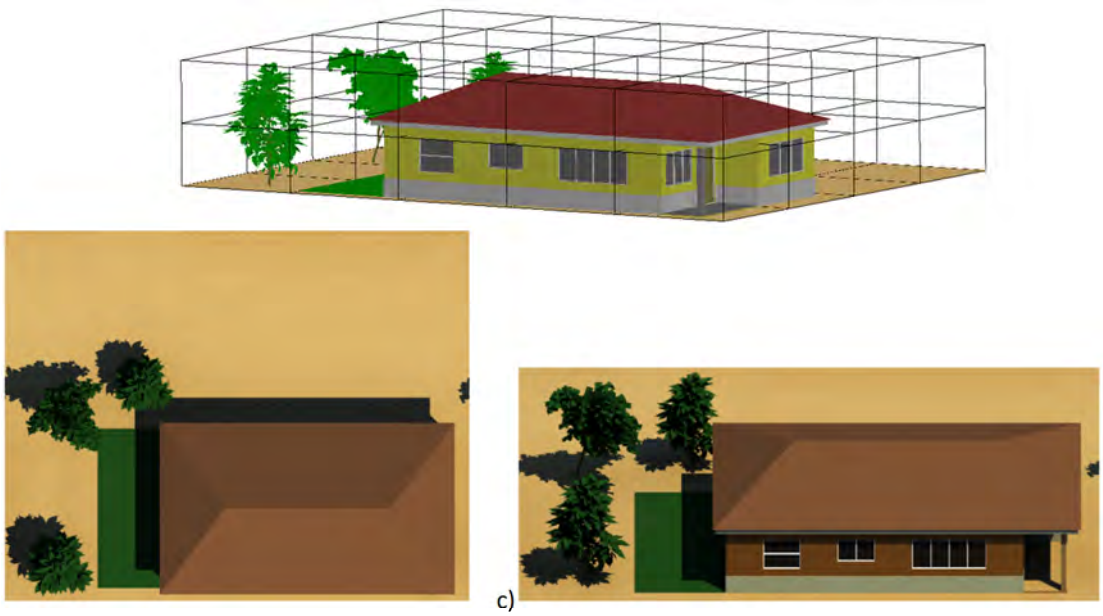


Figure 3.11 : Images DART de paysage schématique. a) Scène 3D DART, à la résolution spatiale 10mx10mx5m, comprenant 3 arbres et 1 bâtiment, simulés avec des surfaces triangulaires. b) Composition colorée DART au nadir. c) Composition colorée DART pour un angle zénithal de visée de 60°.

Il est donc très important de quantifier l'impact de l'architecture 3D urbaine sur la luminance des éléments du paysage pour inverser précisément leurs réflectances. Dans cette première étape de l'algorithme d'inversion, deux types de simplification sont effectuées. (1) La mise à jour des réflectances de matériau est réalisée comme si la luminance d'un élément ne dépend que de cet élément, même si la simulation DART initiale des luminances tient compte des diffusions multiples et de l'architecture 3D urbaine, avec des réflectances de matériau initiales probablement inexactes. Ainsi, la réflectance "observée" du sol à l'ombre est beaucoup plus faible que la réflectance "observée" du sol non à l'ombre. Pour illustrer la mise à jour des réflectances de matériau, considérons un pixel couvert de végétation, très sujette aux diffusions multiples, dont la luminance DART initiale est deux fois plus faible que la luminance satellite. Ce pixel étant pur, l'algorithme va simplement doubler l'albédo foliaire de la végétation du pixel, comme si la végétation ne donnait pas lieu à des diffusions multiples. Dans la simulation DART suivante à l'étape 2, l'emploi de l'albédo foliaire ω multiplié par deux induira donc une luminance trop élevée pour la végétation, en particulier du fait des diffusions multiples de la végétation. (2) Tout élément urbain appartenant au même type d'élément (e.g. toit, rue, arbre) a la même réflectance de matériau dans chaque maille d'analyse, ce qui est rarement le cas. Cette simplification est nécessaire pour résoudre le système d'équations. Ainsi, pour résoudre un pixel comme celui de la Figure 3.10, avec 3 inconnues, l'algorithme va utiliser une fenêtre de taille $M^2 = 4 > 3$, comme illustré par la Figure 3.12.

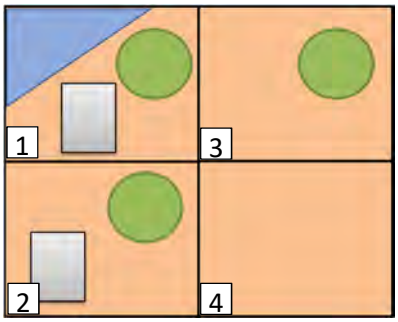


Figure 3.12 : Maille d'analyse u (4 pixels) de l'algorithme d'inversion. Le système a autant d'équations que d'inconnues: le sol (beige), la végétation (vert), les toits (gris), et la surface d'eau (bleu).

En utilisant cette zone étendue de 4 pixels, on peut définir 4 équations à partir de la comparaison entre les images DART et satellite. En utilisant les notations introduites, ce système s'écrit alors :

$$\begin{aligned}
&L'_{DART,\Delta\lambda,sol,1} + L'_{DART,\Delta\lambda,veg,1} + L'_{DART,\Delta\lambda,toit,1} + L'_{DART,\Delta\lambda,eau,1} = L_{sat,\Delta\lambda,1} \\
&L'_{DART,\Delta\lambda,sol,2} + L'_{DART,\Delta\lambda,veg,2} + L'_{DART,\Delta\lambda,toit,2} = L_{sat,\Delta\lambda,2} \\
&L'_{DART,\Delta\lambda,sol,3} + L'_{DART,\Delta\lambda,veg,3} = L_{sat,\Delta\lambda,3} \\
&L'_{DART,\Delta\lambda,sol,4} = L_{sat,\Delta\lambda,4}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

où $L'_{DART,\Delta\lambda,X}$ est la luminance de l'élément X que DART aurait dû obtenir pour satisfaire le système d'équations.

En considérant que les réflectances de matériau sont spatialement constantes dans la maille d'analyse u, l'on a :

$$\begin{aligned}
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,1} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,veg,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,veg,u}} L_{DART,\Delta\lambda,veg,1} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,toit,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,toit,u}} L_{DART,\Delta\lambda,toit,1} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,eau,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,eau,u}} L_{DART,\Delta\lambda,\text{eau},1} = L_{sat,\Delta\lambda,1} \\
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,2} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,veg,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,veg,u}} L_{DART,\Delta\lambda,veg,2} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,toit,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,toit,u}} L_{DART,\Delta\lambda,toit,2} = L_{sat,\Delta\lambda,2} \\
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,3} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,veg,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,veg,u}} L_{DART,\Delta\lambda,veg,3} = L_{sat,\Delta\lambda,3} \\
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,4} = L_{sat,\Delta\lambda,4}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Le système (3.13) peut être résolu. Etant "pur" (i.e. 100% de sol), le pixel 4 a déjà été résolu lors de la première comparaison des images DART et satellite avec la grille de maille 1x1 pixel. Le système (3.13) ne comprend donc que les 3 premières équations. Parfois le système a plusieurs solutions. Ces solutions sont retenues ou non selon qu'elles satisfont des conditions prédéfinies. Ainsi, une réflectance ne peut être négative, mais peut être supérieure à un, comme pour les surfaces vitrées observées selon des directions dites spéculaires. Parfois un type d'élément d'une même maille d'analyse u a deux solutions. La solution retenue est alors la propriété du premier pixel traité par l'algorithme. Parfois, le système (3.13) est insolvable, comme illustré par la Figure 3.13.

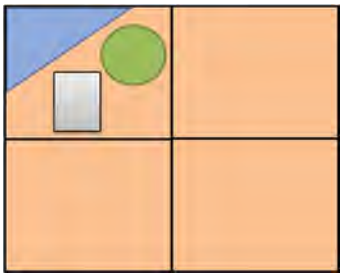


Figure 3.13 : Représentation de schématique de système insoluble pour l'algorithme d'inversion. Comme dans la Figure 3.12, quatre éléments sont présents : sol (beige), végétation (vert), toit (gris), et rivière (bleu).

Le système d'équations correspondant à la Figure 3.13 est :

$$\begin{aligned}
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,1} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,veg,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,veg,u}} L_{DART,\Delta\lambda,veg,1} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,toit,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,toit,u}} L_{DART,\Delta\lambda,toit,1} + \frac{\rho^1_{\Delta\lambda,eau,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,eau,u}} L_{DART,\Delta\lambda,eau,1} = L_{sat,\Delta\lambda,1} \\
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,2} = L_{sat,\Delta\lambda,2} \\
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,3} = L_{sat,\Delta\lambda,3} \\
&\frac{\rho^1_{\Delta\lambda,sol,u}}{\rho^0_{\Delta\lambda,sol,u}} L_{DART,\Delta\lambda,sol,4} = L_{sat,\Delta\lambda,4}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Les propriétés des 3 pixels de sol pur (Figure 3.13) ont déjà été obtenues lors de l'inversion avec la grille de 1x1 pixels. En général, elles diffèrent entre les 3 pixels. D'autre part, les propriétés des éléments du pixel en haut à gauche ne peuvent être résolues. Par suite, une fois toute l'image analysée avec la présente grille d'analyse, l'algorithme va réaliser une nouvelle analyse en décalant la grille d'analyse comme illustré par la *Figure 3.14*. Le système d'équations de ce nouveau schéma est résoluble sans agrandir à nouveau la maille de la grille d'analyse.

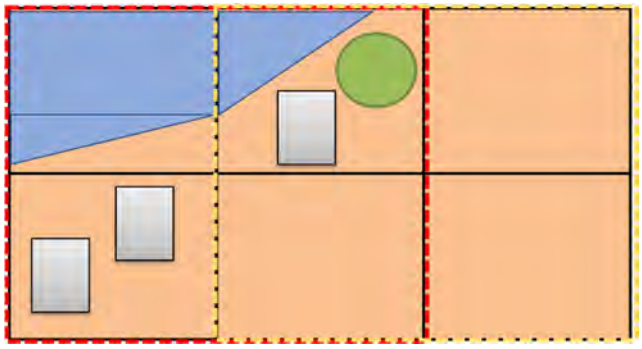


Figure 3.14 : Schéma illustrant deux mailles d'analyse La maille encadrée en jaune est la maille de la Figure 3.13. La maille encadrée en rouge est la maille "jaune" décalée d'un pixel selon l'axe horizontal.

En présence de pixels non encore résolus, la maille de la grille d'analyse est augmentée. Ce cas est illustré par la Figure 3.15. Les pixels de la maille 2x2 encadrée en jaune ne forment pas un système d'équation soluble, de même que le système correspondant aux pixels de la maille 2x2 encadrée en rouge. L'algorithme considère alors une grille de plus grande maille (3x3 pixels), encadrée en violet, pour tenter de trouver une solution aux pixels

non résolus. Cette approche dégrade un peu la résolution spatiale des résultats non encore obtenus dans les comparaisons précédentes réalisées avec de plus petites mailles d'analyse. Cette résolution préliminaire par groupes de pixel entraîne des effets d'irrégularités visibles sur les cartes de facteurs optiques (i.e. facteurs multiplicatifs appliqués aux réflectances de matériaux dans la simulation DART ultérieure). La Figure 3.16 illustre ces effets avec la carte de facteurs optiques du groupe 'sol' obtenue par comparaison des images de luminance DART et Sentinel-2, dans le proche infrarouge (865nm), au 24 Juin 2016, à 20m de résolution : les 'tâches' observées correspondent aux régions où le facteur appliqué est constant sur plusieurs pixels voisins.

L'étape 1c donne donc une carte de réflectance $\rho^{1}_{\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat})$ par type de matériau, par bande spectrale de l'image satellite et à la résolution de celle-ci. En fait, ce sont des cartes de facteurs multiplicatifs des réflectances de matériau initiales définies pour la simulation initiale, dans le système de coordonnées de l'image satellite.

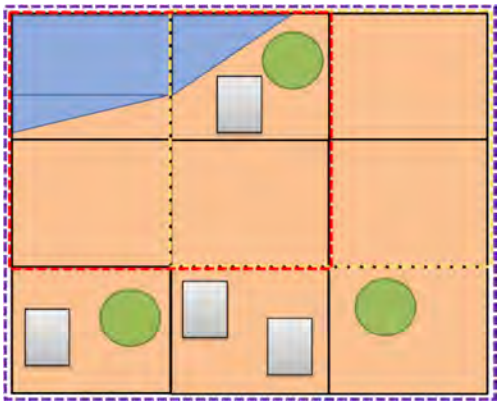


Figure 3.15 : Schéma présentant deux grilles d'analyse de mailles de 2x2 pixels et une grille de de maille de 3x3 pixels. Les éléments présents sont le sol (beige), la végétation (vert), le toit (gris), et l'eau (bleu). Le premier groupe de pixel considéré est encadré en pointillés jaune, le deuxième en pointillés rouge, et le troisième en pointillés violets.

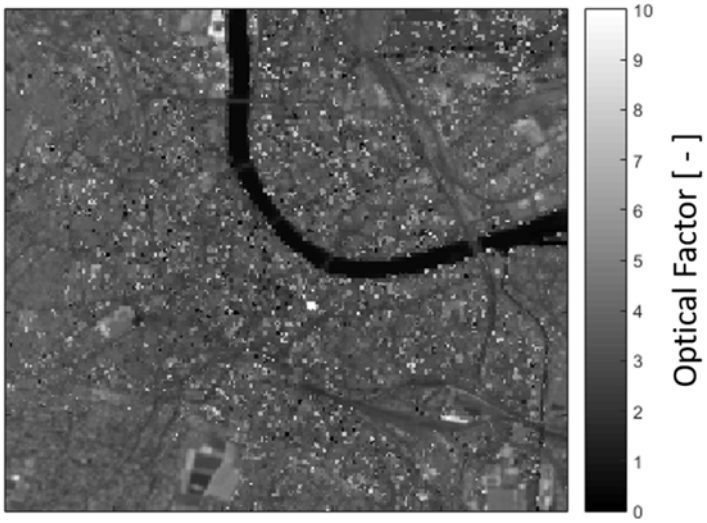


Figure 3.16 : Carte de facteurs optiques du sol dérivée de la comparaison d'images de luminance DART et Sentinel-2 du 24 Juin 2016, dans le proche infrarouge (865nm), à 20m de résolution.

- **Etape 1d**

Une transformation géométrique (i.e. géoréférencement et rééchantillonnage) inverse à celle effectuée à l'étape 1b transforme les cartes de réflectance $\rho^1_{\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART})$ dans le système de coordonnées et résolution spatiale du paysage simulé par DART. Pour cela, les cartes de réflectance (i.e., portion de l'image satellite utilisée) doivent être incluses dans la zone modélisée par DART, de manière à éviter d'éventuels effets de bords (cf. chapitre suivant). Durant ce géoréférencement, les réflectances de matériau des régions hors de la zone d'étude mais dans la zone modélisée par DART sont conservées égales aux valeurs utilisées lors de la simulation DART initiale. La *Figure 3.17* illustre cette transformation géométrique : l'image a été géoréférencée dans le système de coordonnées DART, agrandie à la taille de la scène modélisée, et rééchantillonnée spatialement à la dimension des voxels DART (e.g. 5m dans le cas présent). On peut noter que dans les zones essentiellement composées de sol (e.g. partie en bas à gauche), sont finement résolues. Le chapitre IV donne la précision de cette étape 1. L'étape suivante (i.e. étape 2) de l'algorithme d'inversion consiste à améliorer les cartes de réflectance $\rho^1_{\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART})$ via une approche itérative basée sur une nouvelle simulation DART par itération.

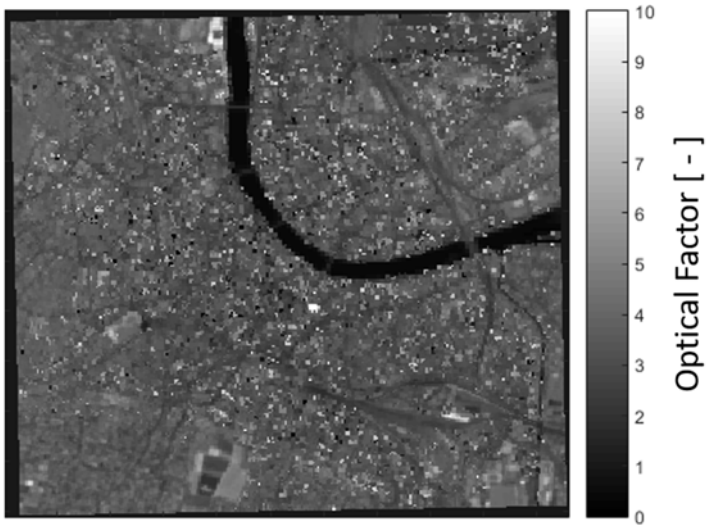


Figure 3.17 : Carte de facteurs multiplicatifs (PIR: 865nm) du sol à 5m de résolution, dérivée d'image Sentinel-2 (24/06/2016).

2.2.2. Deuxième étape

Cette étape améliore les cartes $\rho^1_{\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART})$ obtenues à l'étape 1. Elle démarre avec ces cartes et opère de manière itérative : à chaque itération k, DART utilise les réflectances $\rho^{k-1}_{\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART})$ de matériau obtenues à l'itération précédente $k-1$ pour simuler une nouvelle image qui sera comparée à l'image satellite. Toute image DART est simulée pour les conditions d'observation (θ_V,ϕ_V) et d'éclairement de l'image satellite. L'amélioration des cartes de réflectance s'appuie sur l'évolution de $L^j_{\Delta\lambda,DART}(x_{sat}, y_{sat})$ (i.e. $\rho^j_{\Delta\lambda,DART}(x_{sat}, y_{sat})$) en fonction des propriétés $\rho^j_{\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART})$ lors des itérations antérieures (i.e. $j < k$), compte tenu de $L_{\Delta\lambda,sat}(x_{sat}, y_{sat})$, ce qui renseigne sur l'évolution de la luminance de chaque pixel DART en fonction de la réflectance des matériaux présents. DART tient compte automatiquement des effets d'environnement dus à l'architecture 3D urbaine, de la présence de plusieurs types d'éléments urbains, et de la variation spatiale des réflectances de matériau. Par rapport à l'étape 1, l'étape 2 est plus simple et plus rapide (hors simulation DART), car les images DART et satellite sont comparées par pixel et non par groupe de pixels de taille adaptative. Son algorithme s'appuie sur des adaptations de la méthode de dichotomie et de la méthode de Newton. La prise en compte des effets des diffusions multiples est soit implicite soit explicite via la résolution directe d'équations du 2e ou 3e degré. Il est décrit ci-dessous pour une itération k avec $k > 1$ ($k = 1$ correspond à l'étape 1).

- **Etape 2a**

Les images de luminance totale $L^k_{DART,\Delta\lambda}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$ et élémentaires $L^k_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$ par type d'élément de paysage n sont simulées à partir des cartes de réflectance de matériau $\rho^k_{\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART})$.

- **Etape 2b**

Comme à l'étape 1b, les images DART de luminance totale $L^k_{DART,\Delta\lambda}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$ et élémentaires $L^k_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{DART}, y_{DART}, \Omega_{sat})$ sont géoréférencées dans le système de coordonnées de l'image satellite, puis rééchantillonnées spatialement à la résolution satellite, ce qui donne des cartes de luminance totale $L^k_{DART,\Delta\lambda}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ et élémentaires $L^k_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{sat}, y_{sat}, \Omega_{sat})$ par élément n.

- **Etape 2c**

Les images de luminance DART et satellite sont comparées pixel à pixel. Si elles diffèrent très peu selon des critères prédéfinis, la procédure est stoppée. Si ce n'est pas le cas, de nouvelles réflectances $\rho^{k+1}_{\Delta\lambda,n}(x_{sat}, y_{sat})$ sont recherchées avec des méthodes qui diffèrent selon le type de matériau. (1) Pour les matériaux autres que la végétation, adaptations des méthodes de dichotomie et de la méthode de Newton permettent une prise en compte implicite des diffusions multiples. (2) Pour la végétation, l'efficacité des méthodes de dichotomie et de Newton est moindre, car sa luminance est beaucoup plus affectée par les diffusions multiples que la luminance des autres matériaux, surtout dans le proche et moyen infrarouge. Par suite, pour limiter le nombre d'itérations nécessaires à la convergence des réflectances de matériau, la forte augmentation non linéaire de la luminance de la végétation due aux diffusions multiples est représentée de manière explicite par des équations de degré 2 ou 3. Cette méthode dite explicite ralentit la comparaison d'images DART et satellite réalisée par itération, mais accélère la convergence, car elle réduit le nombre de simulations DART nécessaires. Cette résolution d'équations n'est réalisée que pour les pixels où le taux de couvert végétal est supérieur à un seuil prédéfini, ce qui permet de régler le compromis entre la vitesse de calcul et la précision de chaque itération. Cette méthode explicite n'est pas appliquée à tous les pixels, car elle augmente beaucoup le temps de calcul sans réel gain en précision.

Pour chaque pixel satellite m des images de luminances simulées, on a :

$$L^k_{DART,\Delta\lambda,m} = \sum_n L^k_{DART,\Delta\lambda,m,n} \tag{3.15}$$

Pour tout pixel m où la contribution de la végétation à la luminance $L^k_{DART,\Delta\lambda,m}$ est inférieure à un seuil donné, il est supposé que pour avoir l'égalité des luminances DART et satellite, la luminance de matériau n devrait être :

$$L^{k+1}_{DART,\Delta\lambda,m,n} = \frac{L_{sat,\Delta\lambda,m}}{L^k_{DART,\Delta\lambda,m}} . L^k_{DART,\Delta\lambda,m,n} \tag{3.16}$$

Cette expression assure l'égalité de la luminance satellite à la somme des nouvelles luminances élémentaires pour tout pixel, tout en conservant la contribution relative des éléments n à la luminance totale. La méthode de recherche des nouvelles propriétés utilise les luminances $L^k_{DART,\Delta\lambda,m,n}$ et $L^{k-1}_{DART,\Delta\lambda,m,n}$. Deux cas sont considérés :

- La méthode de Newton est applicable (i.e., la nouvelle réflectance est dans un intervalle donné tel que [0 1]) : elle utilise la dérivée de la luminance $L_{DART,\Delta\lambda,m,n}(\rho)$ au pixel m, calculée avec les luminances DART des deux dernières itérations réalisées, pour exprimer la luminance de matériau souhaitée pour le pixel m :

$$L^{k+1}_{DART,\Delta\lambda,n} = \frac{L^k_{DART,\Delta\lambda,n} - L^{k-1}_{DART,\Delta\lambda,n}}{\rho^k_{DART,\Delta\lambda,n} - \rho^{k-1}_{DART,\Delta\lambda,n}} . \left(\rho^{k+1}_{DART,\Delta\lambda,n} - \rho^k_{DART,\Delta\lambda,n}\right) + L^k_{DART,\Delta\lambda,n} \tag{3.17}$$

La nouvelle réflectance se déduite de l'équation (3.17) :

$$\rho^{k+1}_{DART,\Delta\lambda,n} = \frac{\rho^k_{DART,\Delta\lambda,n} - \rho^{k-1}_{DART,\Delta\lambda,n}}{L^k_{DART,\Delta\lambda,n} - L^{k-1}_{DART,\Delta\lambda,n}} . \left(L^{k+1}_{DART,\Delta\lambda,n} - L^k_{DART,\Delta\lambda,n}\right) + \rho^k_{DART,\Delta\lambda,n} \tag{3.18}$$

La combinaison des équations (3.16) et (3.18) donne pour chaque pixel satellite m :

$$\rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k+1} = \frac{\rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} - \rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k-1}}{L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} - L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k-1}} . L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} . \left(\frac{L_{sat,\Delta\lambda}}{L_{DART,\Delta\lambda}^{k}} - 1 \right) + \rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} \quad (3.19)$$

La *Figure 3.18* illustre cette méthode. Elle montre l'évolution de la luminance d'un pixel contenant un matériau unique (en ligne bleue continue) en fonction de la réflectance du matériau. Cette évolution n'est pas linéaire du fait de diffusions multiples. ρ_0 et ρ_1 sont les réflectances du matériau aux deux dernières itérations ; L_0 et L_1 sont les luminances DART associées. ρ_S (pointillés rouge) est la réflectance que devrait avoir le matériau pour que DART donne la luminance satellite L_s. L'intersection de la luminance satellite L_s et de la tangente $\frac{L_1 - L_o}{\rho_1 - \rho_o}$ (pointillés verts) donne la nouvelle réflectance. Ici, elle est légèrement surestimée. Si la luminance du pixel était une fonction parfaitement linéaire de la réflectance du matériau, la solution serait de suite exacte.

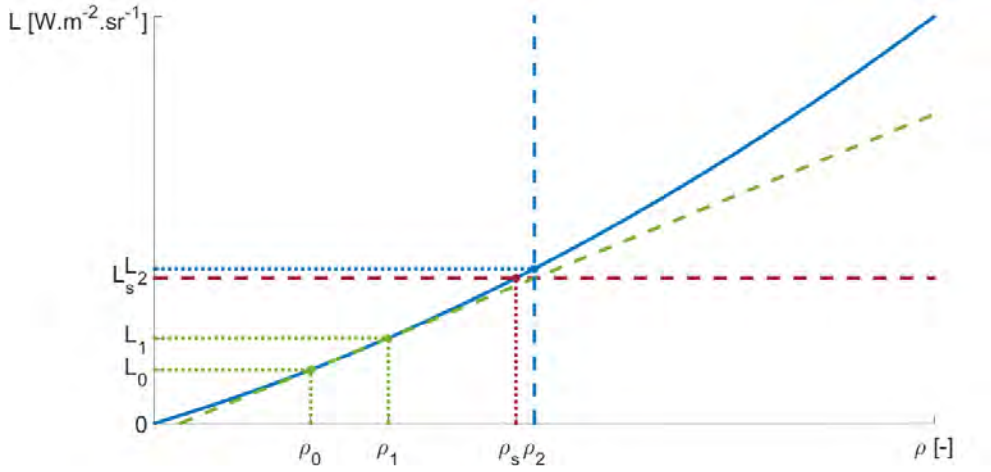


Figure 3.18 : Illustration de la méthode de Newton pour le cas d'une fonction de luminance donnée (ligne bleue continue) en fonction de la réflectance. La solution retenue ρ_2 correspond à l'intersection de la luminance satellite L_S (pointillés rouges) et de la tangente (pointillés verts) calculée à partir des itérations précédentes représentées ici par les indices 0 et 1.

- Méthode de Newton non applicable : une méthode de dichotomie pondérée est appliquée. Pour tout pixel satellite m, la nouvelle réflectance du matériau n est :

$$\rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k+1} = \rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} \pm \alpha |\rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} - \rho_{DART,\Delta\lambda,n}^{k-1}| \quad (3.20)$$

où $L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k+1}$ est défini par l'équation (3.16) et le poids α est fonction des luminances des itérations précédentes et de la luminance escomptée :

$$\alpha = \left| \frac{L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k+1} - L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k}}{L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k} - L_{DART,\Delta\lambda,n}^{k-1}} \right| \quad (3.21)$$

Le signe $\pm$ dépend de la position de la luminance satellite par rapport aux luminances DART des deux dernières itérations. Il est positif si la luminance doit être augmentée, et négatif si elle doit être diminuée pour atteindre la valeur escomptée. La valeur du poids α permet de prendre avantage du caractère quasi linéaire de la luminance des matériaux hors végétation, tout en se rapprochant plus rapidement qu'avec une dichotomie classique de la valeur voulue pour les cas de pixels plus affectés par les diffusions multiples.

Pour les pixels où la contribution de la végétation à la luminance totale dépasse le seuil défini, la dépendance de la luminance en fonction des ordres supérieurs de diffusion est exprimée explicitement. Ainsi, pour $k \geq 3$, pour chaque matériau n de chaque pixel satellite m, et chaque bande spectrale $\Delta\lambda$, on a :

$$L_{\Delta\lambda,m,n}(\rho) = A_{\Delta\lambda,m,n} . \omega + B_{\Delta\lambda,m,n} . \omega^2 + C_{\Delta\lambda,m,n} . \omega^3 \quad (3.22)$$

Avec ω l'albédo foliaire de la végétation. Les coefficients A, B, et C dépendent de la bande spectrale considérée, du matériau, et de son environnement 3D. En supposant qu'ils sont constants dans les trois dernières itérations ($k \geq 3$), on a :

$$\begin{aligned} L^{k-2}_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,n} &= A_{\Delta\lambda,m,n}.\omega^{k-2}_{\Delta\lambda,n} + B_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k-2}_{\Delta\lambda,n})^2 + C_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k-2}_{\Delta\lambda,n})^3 \\ L^{k-1}_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,n} &= A_{\Delta\lambda,m,n}.\omega^{k-1}_{\Delta\lambda,n} + B_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k-1}_{\Delta\lambda,n})^2 + C_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k-1}_{\Delta\lambda,n})^3 \\ L^{k}_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,n} &= A_{\Delta\lambda,m,n}.\omega^{k}_{\Delta\lambda,n} + B_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k}_{\Delta\lambda,n})^2 + C_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k}_{\Delta\lambda,n})^3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Il s'agit d'un système à trois équations linéaires à trois inconnues (A, B, C). Une fois résolu, la nouvelle propriété du matériau n dans le pixel m, pour la bande spectrale $\Delta\lambda$, est alors donnée par la résolution de l'équation :

$$L^{k+1}_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,m,n} = A_{\Delta\lambda,m,n}.\omega^{k+1}_{\Delta\lambda,m,n} + B_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k+1}_{\Delta\lambda,m,n})^2 + C_{\Delta\lambda,m,n}.(\omega^{k+1}_{\Delta\lambda,m,n})^3 \quad (3.24)$$

L'équation (3.24), combinée à l'expression (3.16) de la luminance $L^{k+1}_{\mathrm{DART},\Delta\lambda,m,n}$ escomptée, donne la nouvelle réflectance de matériau. En fait, des critères de choix sont définis, car plusieurs solutions peuvent être obtenues :

- Si la luminance escomptée est plus grande que la luminance obtenue à la dernière itération, la solution choisie est celle qui donne un albédo foliaire ω supérieur à l'albédo foliaire actuel, tout en restant dans l'intervalle autorisé (e.g. [0 1]. Si plusieurs solutions vérifient ce critère, l'albédo le plus proche de l'albédo actuel est choisi. Si aucune solution ne répond à ces critères, le nouvel albédo est par une simple dichotomie entre l'albédo actuel et 1.
- Si la luminance escomptée est plus faible que la luminance actuelle de l'élément dans le pixel, la solution est entre 0 et l'albédo du matériau à l'itération en cours. Si plusieurs solutions existent, l'albédo le plus proche est choisi. Si aucune solution n'est obtenue, la solution est calculée par simple dichotomie simple entre 0 et l'albédo actuel.

Après la première simulation de l'étape 2 (i.e. $k = 2$), il n'existe que 2 valeurs précédentes d'albédo foliaire et de luminance DART. Dans ce cas, la luminance en fonction de l'albédo foliaire est supposée être un polynôme de degré 2, mais le reste de la procédure est identique :

$$L_{\Delta\lambda,m,n}(\rho) = A_{\Delta\lambda,m,n}.\omega + B_{\Delta\lambda,m,n}.\omega^2 \quad (3.25)$$

La *Figure 3.19* illustre les procédures et les choix effectués dans cette prise en compte explicite des effets des diffusions multiples. Elle montre l'évolution de la réflectance DART d'un pixel pur de végétation, dont l'albédo foliaire varie de 0 à 1 [-], pour les 6 bandes spectrales du spectroradiomètre de Sentinel-2, du visible à l'infrarouge moyen (*Tableau 3.1*). Les effets d'environnement combinés aux différences d'éclairement solaire et diffus expliquent les petites différences entre les 6 courbes.

Numéro de bande (correspondance S2)	***Longueur d'onde centrale [nm]***
B1 (B2)	490
B2 (B3)	560
B3 (B4)	665
B4 (B8a)	865
B5 (B11)	1610
B6 (B12)	2190

Tableau 3.1 : Bandes spectrales Sentinel-2 utilisées pour illustrer la diffusion multiple d'un pixel de végétation.

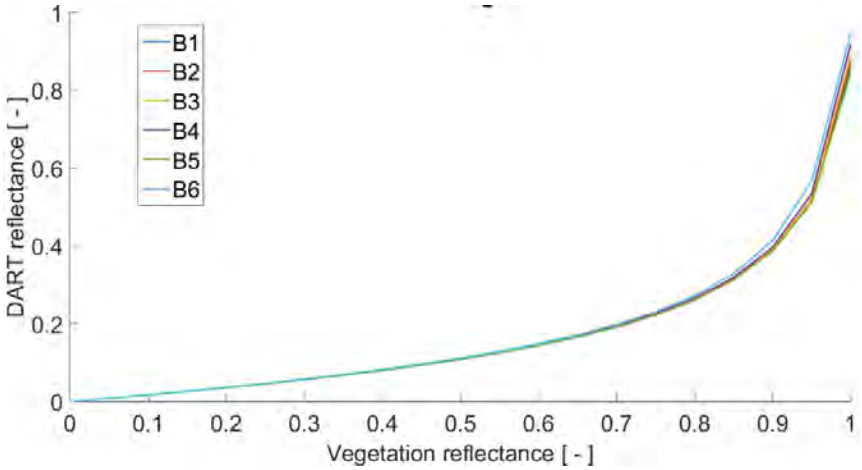


Figure 3.19 : Réflectance DART d'un pixel pur de végétation en fonction de l'albédo foliaire.

Il apparait que la réflectance DART de la végétation varie de manière non linéaire en fonction de l'albédo foliaire ω_f, en particulier pour $\omega_f > 0.6$, du fait des diffusions multiples. Ce comportement joue donc un rôle important pour les bandes spectrales du proche et moyen infrarouge où ω_f est élevé. Il explique pourquoi dans ces bandes, les méthodes de Newton et de dichotomie ne permettent pas de converger rapidement vers la solution. Effet, de faibles variations de ω_f peuvent induire de fortes variations de la réflectance DART.

La Figure 3.20 illustre le calcul des réflectances de matériau à partir des résultats des itérations précédentes, pour un pixel de végétation pure, pour la bande 6 (infrarouge moyen : 2190nm) de Sentinel 2 (*Tableau 3.1*). La réflectance DART (courbe bleue) est approchée par un polynôme de degré 2 (courbe rouge) en fonction de l'albédo foliaire, défini par 2 itérations si $K = 3$, et par un polynôme de degré 3 (courbe jaune) défini à partir de 3 itérations si $K > 3$. L'intersection de la réflectance satellite avec la réflectance DART d'ordre 3 est plus précise que son intersection avec la réflectance DART d'ordre 2, ce qui accélère la convergence. Les termes ω_o, ω_1, ω_2, et ω_3 montrent l'évolution de l'albédo foliaire inversé ω_{inv} vers la "vraie" réflectance ω_S. En général, ω_{inv} est précis dès la 3e itération (i.e. ω_3) de l'étape 2, car c'est à partir de cette itération que la réflectance DART peut être représentée par un polynôme de degré 3 selon l'albédo foliaire. Dans cet exemple, dès la première itération de l'étape 2, la valeur inversée ω_1 est très proche de ω_S, mais en fait elle est simplement égale à la borne supérieure de l'intervalle de l'albédo autorisé, ici pris à 0.9 pour éviter des divergences si l'albédo approche 1.

- **Etape 2d**

L'étape 2.c de l'itération k a donné des cartes de facteurs multiplicatifs des réflectances initiales, à la résolution spatiale et système de coordonnées de l'image satellite, et par bande spectrale de celle-ci, ce qui correspond à des cartes de réflectance $\rho^{k+1}_{\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat})$ par type n de matériau et pixel m de l'image satellite. L'étape 2.d applique à ces cartes la même transformation géométrique (i.e. géoréférencement, rééchantillonnage) que l'étape 1d pour les rendre compatibles au système de coordonnées DART. L'étape 2a L'itération $k+1$ peut alors démarrer avec les cartes $\rho^{k+1}_{\Delta\lambda,n,m}(x_{sat}, y_{sat})$. La procédure sera stoppée après l'étape 2b si $L^{k+1}_{DART,\Delta\lambda} \approx L_{sat,\Delta\lambda}$, pour tout pixel satellite. On a alors les cartes de réflectance et d'exitance, par bande spectrale de l'image satellite, et le bilan radiatif Q^*_{SW} peut alors être calculé, comme expliqué dans le paragraphe III.3.

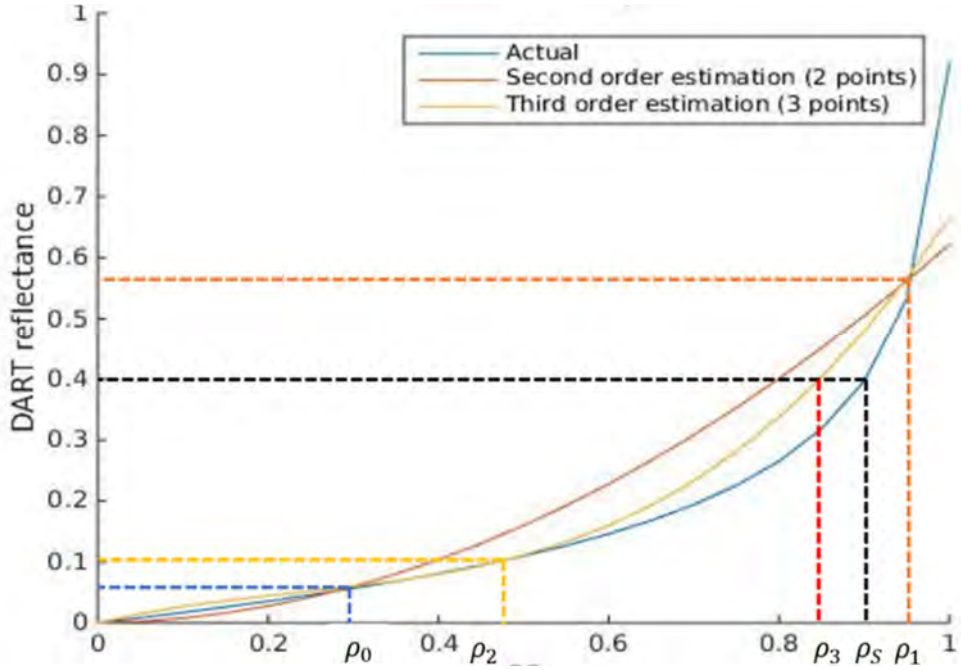


Figure 3.20 : Exemple de considération explicite des termes d'ordre supérieur pour l'inversion de l'albédo foliaire ω, à l'aide des résultats obtenus dans les itérations précédentes.

2.3. Adaptation au domaine thermique

La simulation d'images dites thermiques nécessite deux propriétés par type matériau : température et émissivité (i.e. 1 – réflectance) spectrale. Idéalement, ces deux propriétés sont dérivées de l'image satellite. DART les utilise pour simuler les images thermiques avec la loi de Planck ou la loi de Stephan-Boltzmann. Ici, la loi de Planck est utilisée pour simuler des images par bande spectrale thermique. Ainsi, à la longueur d'onde λ et pour la direction Ω, la luminance totale d'un pixel (x,y) caractérisé par la température $T(x,y)$ et l'émissivité $\epsilon_{\Delta\lambda}(x,y,\Omega)$ est :

$$L_{DART,\Delta\lambda}(x,y,\Omega,\mathrm{T(x,y)}) = \epsilon_{\Delta\lambda}(x,y,\Omega).L_{B,\Delta\lambda}(T(x,y)) \quad (3.26)$$

où $L_{B,\lambda}$ est la luminance de Planck, définie par :

$$\mathrm{L_B}(\lambda,T) = \frac{(2hc^2)}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1)} \quad (3.27)$$

avec h la constante de Planck ($h = 6.62606896.10^{-34}\,J.s$), c la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 299792458\,m.s^{-1}$), et k la constante de Boltzmann ($k = 1.3806504.10^{-23}\,J.K^{-1}$).

En plus de la luminance totale, DART simule la luminance par type de matériau n, de température $T_n(x,y)$:

$$L_{DART,\Delta\lambda,n}(x,y,\Omega,\mathrm{T_n}(x,y)) = \frac{\sigma_n(x,y,\Omega)}{\sigma_{pixel}(x,y,\Omega)}.\epsilon_{\Delta\lambda,n}(x,y,\Omega).L_{B,\Delta\lambda}(T_n(x,y)) \quad (3.28)$$

où $\sigma_n(x,y,\Omega)$ est la surface efficace du matériau n selon la direction Ω, et $\sigma_{pixel}(x,y,\Omega)$ est la surface efficace du pixel selon la direction Ω. Le terme σ_n est compris entre 0 et 1. Il vaut 1 si le pixel est pur. Il dépend de la distribution 3D de cet élément, mais aussi de l'architecture 3D urbaine l'environnant. Ainsi, un bâtiment peut totalement ou partiellement masquer un élément urbain selon la direction Ω. Comme pour les courtes longueurs d'onde, la réflectance, et donc l'émissivité, des éléments est supposée être lambertienne. Leur émissivité $\epsilon_{\Delta\lambda,n}$ ne dépend donc pas des directions d'éclairement et d'observation, contrairement à l'émissivité $\epsilon_{\Delta\lambda}(x,y,\Omega)$ du pixel. Ainsi, on a :

$$L_{DART,\Delta\lambda,n}(x,y,\Omega,\mathrm{T_n}(x,y)) = \frac{\sigma_n(x,y,\Omega)}{\sigma_{pixel}(x,y,\Omega)}.\epsilon_{\Delta\lambda,n}(x,y).L_{B,\Delta\lambda}(T_n(x,y)) \quad (3.29)$$

Avant de procéder à l'inversion des propriétés d'émissivité et de température des matériaux par comparaison avec une images de luminance satellite thermique, une étape préliminaire est nécessaire pour déterminer les cartes $\sigma_n(x_{sat},y_{sat},\Omega)$ pour chaque matériau, dans les conditions d'observation de l'image satellite utilisée pour l'inversion, et à la résolution de l'image satellite. Pour ce faire, une simulation DART est réalisée dans une bande spectrale quelconque, avec pour le matériau n une température de 300K et une émissivité de 1, et pour les autres matériaux une température de 0K et une émissivité de 1. Les images de luminance par matériau sont alors rééchantillonnées et géoréférencées pour correspondre au système de coordonnées de l'image satellite, si bien que pour chaque pixel (x_{sat},y_{sat}), l'on a :

$$L_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{sat},y_{sat},\Omega,300K) = \frac{\sigma_n(x_{sat},y_{sat},\Omega)}{\sigma_{pixel}(x_{sat},y_{sat},\Omega)}.L_{B,\Delta\lambda}(300K) \quad (3.30)$$

Le rapport $\frac{L_{DART,\Delta\lambda,n}(x_{sat},y_{sat},\Omega,300K)}{L_{B,\Delta\lambda}(300K)}$ donne des cartes de cartes de surface efficace de matériau $\sigma_n(x_s,y_s,\Omega_\mathrm{s})$, qui seront utilisées pour inverser l'image satellite selon la direction Ω. La Figure 3.21 montre des cartes de σ_n pour trois types d'éléments ('sol', 'toits', et 'eau') de la ville d'Héraklion (en Grèce), pour la direction verticale et la résolution spatiale de 30m de Landsat-8, l'un des capteurs satellites utilisés dans cette étude. Un pixel de valeur 1 indique un pixel pur, alors qu'un pixel de valeur 0 indique que l'élément n n'est pas visible selon la verticale.

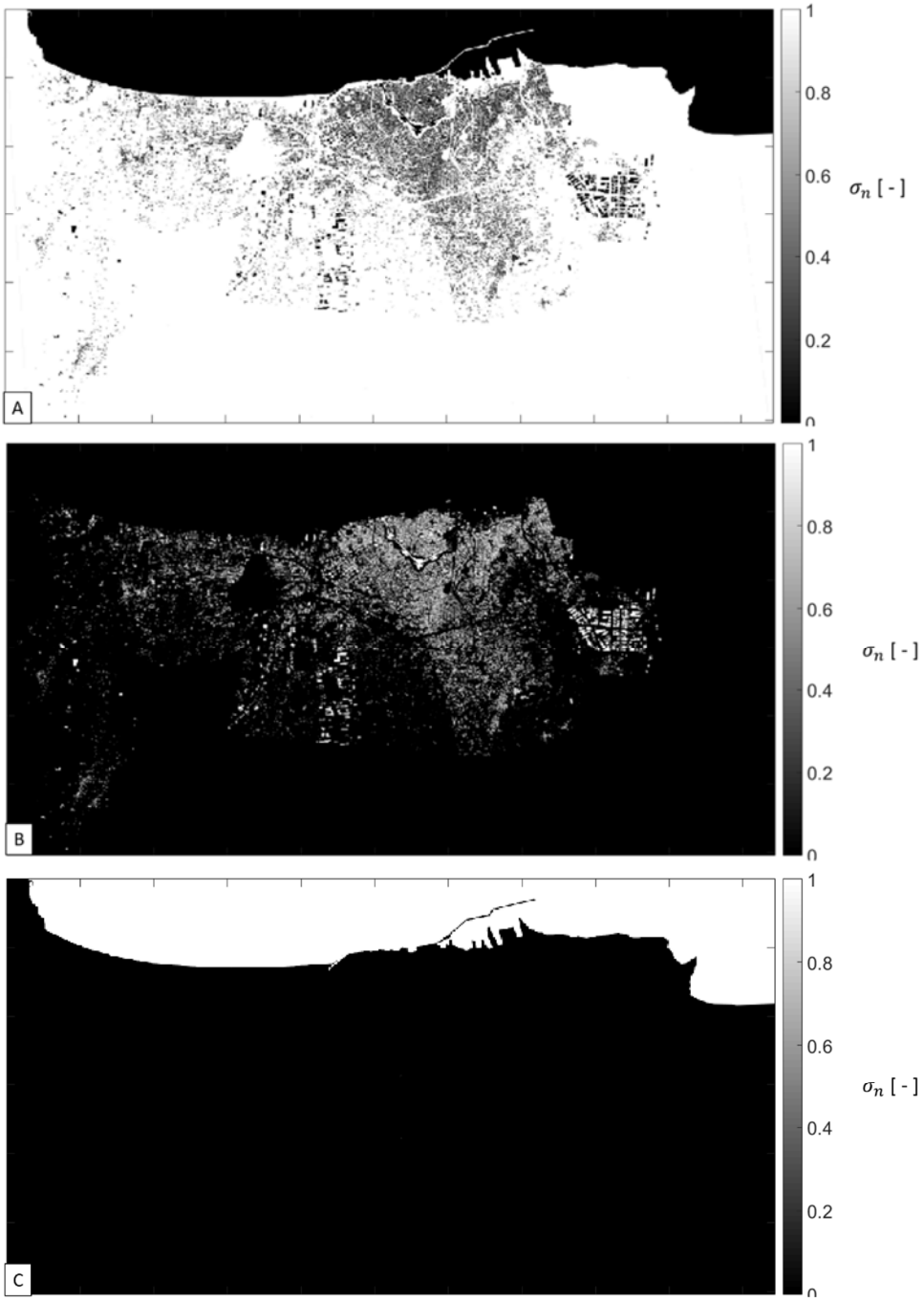


Figure 3.21 : Cartes de σ_n de 3 éléments (A : 'sol' ; B : 'toits' ; C : 'eau') de la ville d'Héraklion, pour la direction verticale, à 30m de résolution. Les valeurs des pixels vont de 0 (élément n non visible) à 1 (n est le seul élément visible)

Une fois les cartes σ_n déterminées, la méthode d'inversion des propriétés thermiques d'intérêt est similaire à la méthode qui dérive les cartes de réflectances de matériaux des images satellites dans les courtes longueurs d'ondes via la comparaison par pixel ou par groupe de pixels d'images de luminances DART et satellite corrigée des effets atmosphériques, par bande spectrale. Cependant, une difficulté spécifique aux grandes longueurs d'onde est que l'inversion doit fournir non une carte mais deux cartes de propriétés : une carte d'émissivité et une carte de température. Il y a donc deux fois plus d'inconnues dans les systèmes d'équations à résoudre. D'autre part, la luminance thermique satellite renseigne uniquement sur le produit $\epsilon . L_B(T)$. Par suite, il est impossible de séparer les variables de ce produit en augmentant le nombre de pixels pour chaque système d'équations. La stratégie adoptée est alors d'utiliser deux images de luminance thermique satellite du même capteur dans deux bandes spectrales proches, en faisant l'hypothèse que l'émissivité est identique dans ces deux

bandes spectrales. Cela permet d'obtenir un nombre suffisant d'équations pour déterminer simultanément la température thermodynamique et l'émissivité de chaque matériau. Si le capteur satellite considéré possède des bandes thermiques supplémentaires, il est alors possible de déterminer l'émissivité de chaque type de matériau dans ces bandes spectrales, sans avoir à recourir à des hypothèses sur le comportement spectral de l'émissivité. A l'inverse, si le capteur satellite considéré pour l'inversion ne possède qu'une unique bande spectrale thermique, la solution consiste à prédéfinir l'émissivité par matériau, si bien que seule la température est alors inversée. Les valeurs de température inversées permettront alors d'ajuster les approximations faites sur l'émissivité. La solution la plus simple consiste à assigner la même émissivité à tous les matériaux.

La première étape d'inversion pour une maille d'analyse u contenant M^2 pixels satellite m, N types d'éléments différents, dans les bandes spectrales thermiques $\Delta\lambda_1$ et $\Delta\lambda_2$ du capteur satellite correspond à l'inversion des réflectances aux courtes longueurs d'onde, en remplaçant le système d'équations (3.11) par le système couplé :

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{\sigma_{n,m}(\Omega)}{\sigma_{pixel}(\Omega)} . \epsilon_{\Delta\lambda_{1,2},n,m} . L_B(\lambda_1, T_{n,m}) = L_{sat,\Delta\lambda_1,m} \quad \forall m \in [1\ M^2] \qquad (3.31)$$

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{\sigma_{n,m}(\Omega)}{\sigma_{pixel}(\Omega)} . \epsilon_{\Delta\lambda_{1,2},n,m} . L_B(\lambda_2, T_{n,m}) = L_{sat,\Delta\lambda_2,m} \quad \forall m \in [1\ M^2]$$

On résout ces systèmes pour inverser en tout pixel de l'image satellite les valeurs d'émissivité $\epsilon_{\Delta\lambda_{1,2},n,m}$ (supposée constante entre les deux bandes spectrales considérées) et de température $T_{n,m}$ par type de matériau n. Les valeurs $\sigma_{n,m}$ sont connues via l'étape préliminaire décrite précédemment. Si l'image satellite comporte B bandes thermiques supplémentaires, ce système couplé est augmenté de B équations non couplées, ce qui permet d'estimer le comportement spectral de l'émissivité pour chaque élément de chaque pixel, en utilisant les valeurs de température de matériau déjà inversées, ces dernières ne dépendant pas de la longueur d'onde considérée.

$$\sum_{n=1}^{N} \sigma_{n,m}(\Omega) . \epsilon_{\Delta\lambda,n,m} . L_B(\lambda, T_{n,m}) = L_{sat,\Delta\lambda,m} \quad \forall m \in [1\ M^2] \qquad (3.32)$$

Si l'image satellite a une seule bande thermique disponible, le système (3.32) est résolu en attribuant à tout matériau une émissivité arbitraire et fixe ; seule la température thermodynamique par matériau est inversée. Si aucune solution n'est trouvée par l'algorithme dans un pixel selon les bornes réalistes prédéfinies, on applique aux matériaux de ce pixel des propriétés issues des données satellites (température de surface, émissivité de surface). On perd alors l'avantage de distinguer les différents matériaux, mais cela permet d'avoir un point de départ réaliste pour les itérations suivantes.

Cette étape fournit des cartes d'émissivité et de température par type de matériau et par bande spectrale de l'image satellite. Comme pour l'inversion des réflectances dans les courtes longueurs d'onde, cette première estimation est ensuite affinée via la comparaison itérative des images DART et satellite. Pour le domaine thermique, l'inversion effectue une dichotomie sur les propriétés recherchées. Cette inversion est moins élaborée que pour les courtes longueurs d'ondes pour deux raisons principales :

- **Disponibilité des images satellites thermiques :** durant la majeure partie de cette étude, les images Landsat-8 ont été les seules images thermiques corrigées des effets atmosphériques disponibles. Malheureusement, ces images n'avaient qu'une bande thermique exploitable (B10 : 10.89μm). Des images ASTER avec plusieurs bandes thermiques ont été disponibles, mais tardivement, si bien qu'elles n'ont servi qu'à tester la portabilité de la méthode d'inversion à tout type d'image satellite thermique (cf. chapitre IV).
- **Précision du bilan radiatif Q_{lw}^* aux grandes longueurs d'onde :** la précision obtenue avec les images Landsat-8 à une bande thermique s'est avérée suffisante pour le calcul du bilan d'énergie urbain, si bien que l'amélioration de la méthode d'inversion a plutôt porté sur les courtes longueurs d'ondes (cf. chapitre IV).

Comme pour les courtes longueurs d'onde, les cartes de température et d'émissivité par bande spectrale sont obtenues une fois que la différence entre les images de luminances DART et satellite devient plus faible qu'un seuil prédéfini. Ces cartes sont ensuite utilisées par DART pour simuler Q_{lw}^* (cf. paragraphe III.3). La Figure 3.22

présente des cartes de température de matériaux (sol et rivière) de la ville de Bâle, le 30 Août 2015, dérivées d'une image de luminance Landsat-8 à 10.89μm, en fixant l'émissivité à 0.98 pour tous les matériaux. Les zones noires indiquent les pixels où l'élément n'est pas présent ou masqué par des nuages. Les valeurs de température trouvées sont cohérentes avec des cartes de température de surface générées par d'autres méthodes par DLR (qui ne comportent pas la distinction par matériau). Plus de résultats et leurs interprétations seront donnés dans le chapitre IV.

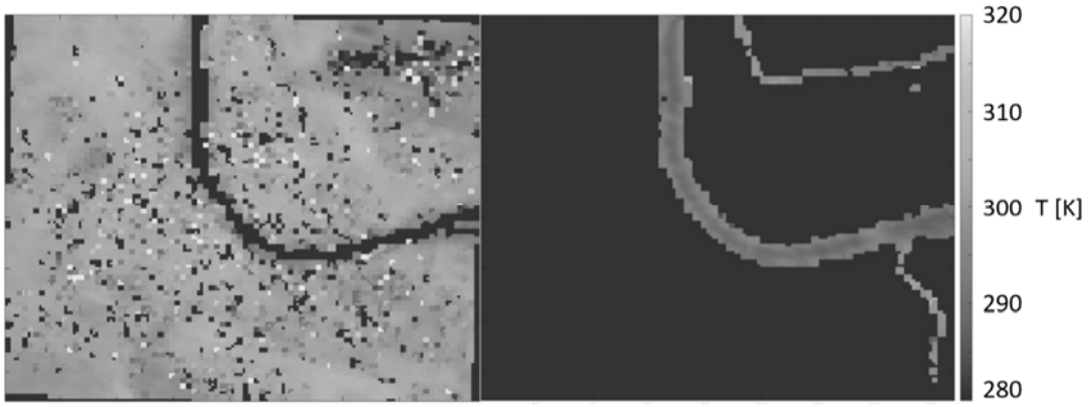


Figure 3.22 : Carte de températures de matériaux dérivées d'une image de luminance Landsat-8 (bande 10), pour la ville de Bâle le 30 Août 2015, au nadir. Gauche : carte de température du sol. Droite : carte de température de la rivière.

3. Calcul de Q* au passage du satellite

Ce chapitre présente le calcul des cartes de bilan radiatif Q^* à partir des cartes de réflectance et de température obtenues par inversion d'images satellites. Ce bilan radiatif est concomitant à la date d'acquisition de l'image satellite, car il est calculé avec les valeurs de réflectance et de température inversées à cette date. Le calcul de Q^* requiert deux intégrations : une intégration angulaire qui transforme la carte de luminance urbaine $L_{\Delta\lambda}(\Omega)$ en une carte d'exitance $M_{\Delta\lambda}$ par bande spectrale $\Delta\lambda$, et une intégrale spectrale pour obtenir la carte d'exitance M sur le domaine spectral d'intérêt pour Q^*, sachant que Q^* est la différence entre l'éclairement E et l'exitance M. Cette approche est détaillée ci-dessous avec le calcul de Q^*_{sw} aux courtes longueurs d'onde et Q^*_{lw} aux grandes longueurs d'onde. Les calculs de Q^*_{sw} et Q^*_{lw} diffèrent en deux points majeurs. (1) L'éclairement est d'origine solaire aux courtes longueurs d'onde (i.e., E_{sw}) et d'origine atmosphérique aux grandes longueurs d'onde (i.e., E_{lw}). (2) L'exitance spectrale M_λ aux courtes longueurs d'onde est le produit $A_\lambda.E_\lambda$, si bien que M_λ peut être calculé à toute date où les réflectances de matériau urbain sont proches des réflectances de matériau dérivées de l'image satellite, et sachant que l'éclairement E_λ est en général disponible. Ce point est détaillé dans le chapître III.3. Par contre, l'exitance aux grandes longueurs d'onde ne peut être simplement estimé à toute date, car elle dépend de la température qui varie beaucoup vite dans le temps que les réflectances de matériau urbain.

3.1. Calcul du bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde

Le bilan radiatif pour la bande spectrale $\Delta\lambda$ est :

$$Q^*_{\Delta\lambda} = E_{\Delta\lambda} - M_{\Delta\lambda} \tag{3.33}$$

où l'exitance spectrale est l'intégrale angulaire de la luminance spectrale sur l'ensemble des directions $\Omega(\theta, \phi)$:

$$M_{\Delta\lambda} = \int_\Omega L_{\Delta\lambda}(\Omega)\cos(\theta)d\Omega \tag{3.34}$$

En utilisant la notion d'albédo $A_{\Delta\lambda}$ pour la bande spectrale $\Delta\lambda$, l'équation (3.33) s'écrit :

$$Q^*_{\mathrm{sw},\Delta\lambda} = E_{\mathrm{sw},\Delta\lambda} - E_{\mathrm{sw},\Delta\lambda}.A_{\Delta\lambda} \quad (3.35)$$

L'albédo $A_{\Delta\lambda}$ est l'intégrale sur $\Delta\lambda$ de l'intégrale angulaire de la réflectance spectrale directionnelle de surface $\rho_\lambda(\Omega)$ pondérée par l'éclairement solaire spectral E_λ : $A_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\Delta\lambda}\int_\Omega \rho_\lambda(\Omega).E_\lambda.\cos(\theta).d\Omega}{\pi.E_{\Delta\lambda}}$. Dans la mesure où $\Delta\lambda$ est petit, l'albédo pour la bande spectral $\Delta\lambda$ s'écrit :

$$A_{\Delta\lambda} = \frac{\int_\Omega \rho_{\Delta\lambda}(\Omega).\cos(\theta).d\Omega}{\pi} \quad (3.36)$$

DART calcule automatiquement une carte $A_{\Delta\lambda}$ via une intégration angulaire sur toutes les directions utilisées pour modéliser le transfert radiatif urbain, à partir des cartes de réflectance de matériau $\rho_{\Delta\lambda}$ obtenues par inversion de l'image satellite et pour les mêmes conditions d'éclairement (i.e. position du soleil, composition de l'atmosphère) que lors de l'acquisition de l'image satellite. La *Figure 3.23* montre l'albédo $A_{\Delta\lambda}$ d'un pixel pour la ville de Bâle, pour 6 bandes Sentinel-2, du visible à l'infrarouge moyen. Ces 6 bandes ont été sélectionnées parmi toutes les bandes Landsat, car elle échantillonnent bien le domaine spectral d'intérêt pour calculer Q^*_{sw}. La Figure 3.24 montre une image d'albédo spectral simulée par DART dérivée de l'image Sentinel-2 à 665nm (B4), pour la ville de Bâle, le 24 Juin 2016. Le point rouge indique le pixel utilisé pour la *Figure 3.23*.

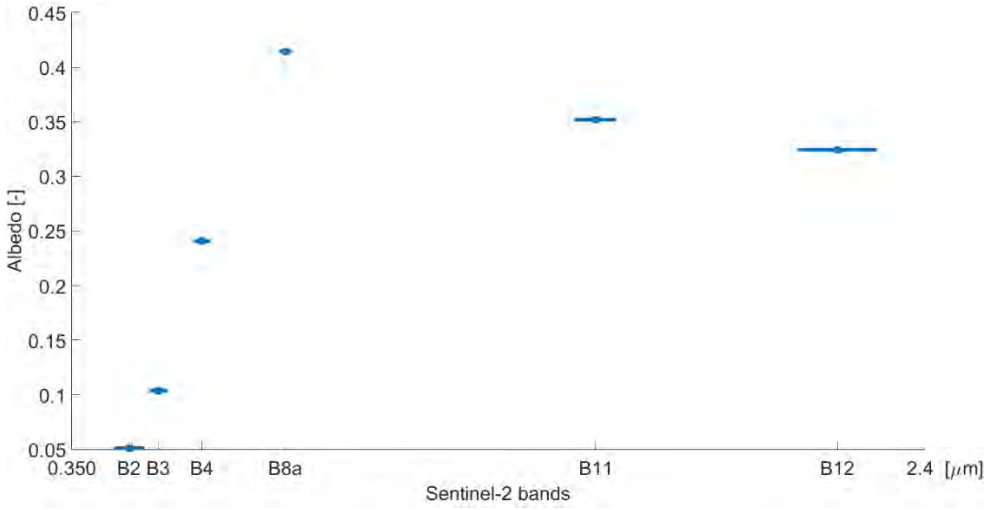


Figure 3.23 : Albédo spectral d'un pixel DART pour 6 bandes de Sentinel-2 (2,3,4, 8a, 11, 12).



Figure 3.24 : Carte d'albédo spectral à 665nm et 20m de résolution, simulée par DART à partir de l'image B4 de Sentinel-2 du 24.06.2016 à 10:37. La Figure 3.23 affiche l'albédo spectral du pixel "rouge".

L'intégration spectrale de l'albédo est réalisée à partir des albédos $A_{\Delta\lambda}$ et éclairements au bas de l'atmosphère $E_{\mathrm{BOA},\Delta\lambda}$ par bande spectrale $\Delta\lambda$ de l'image satellite. En l'absence de mesures in-situ, DART calcule $E_{\mathrm{BOA},\Delta\lambda}$ via la simulation de $E_{\mathrm{BOA},\lambda}$ avec une résolution spectrale fine (e.g. $5nm$), de l'ultraviolet à l'infrarouge moyen (Figure 3.25), pour la configuration atmosphérique et solaire à la date de l'image satellite. La contrainte est que l'éclairement total E_{BOA} soit égal à l'éclairement $E_{\mathrm{BOA,mes}}$ mesuré in-situ par les tours de flux. Pour cela, un modèle d'atmosphère et d'aérosols est tout d'abord défini dans DART. L'hypothèse simplificatrice utilisée est que pour une direction solaire donnée, la couverture nuageuse et l'épaisseur optique $\Delta\tau_{aerosol}$ des aérosols sont les deux seules sources de variation de $E_{\mathrm{BOA},\lambda}$. Ici, le terme $\Delta\tau_{aerosol}$ est utilisé pour représenter à la fois l'impact du couvert nuageux et des aérosols. Ainsi, dans le cas d'un couvert nuageux important, $\Delta\tau_{aerosol}$ est important de sorte que E_{BOA} soit correct. Un programme a été développé pour calculer la valeur de $\Delta\tau_{aerosol}$ qui assure l'égalité des éclairements simulés et mesurés ($E_{\mathrm{BOA}} = E_{\mathrm{BOA,mes}}$) via un calcul itératif de $E_{\mathrm{BOA},\lambda}$ où $\Delta\tau_{aerosol}$ est multiplié par un facteur variable à chaque itération. Cette approche fournit donc $\Delta\tau_{aerosol}$, ce qui caractérise l'atmosphère, et $E_{\mathrm{BOA},\lambda}$ qui sera utilisé pour le calcul du bilan radiatif total à la date de mesure de $E_{\mathrm{BOA,mes}}$. Il est nécessaire de préciser que pour toutes les simulations réalisées, la couverture nuageuse était très faible, pour permettre l'utilisation de données satellites. Ainsi, cette méthode de détermination de l'éclairement spectral a été testée et validée pour ces conditions, et est en train d'être développée et améliorée pour les cas où la couverture nuageuse serait plus importante. En effet, les nuages et les aérosols ont des comportements très différents, et l'hypothèse réalisée n'est à priori valide que pour une contribution des nuages très faible.

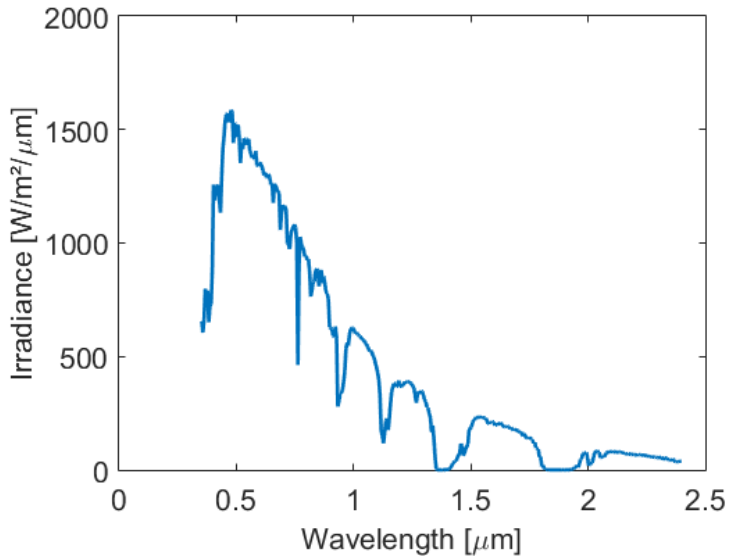


Figure 3.25 : Spectre d'éclairement BOA simulé par DART pour la configuration atmosphérique du 24.06.2016 à 10:37 à Bâle (Suisse). Simulation réalisée avec 410 bandes spectrales de 5nm de largeur, entre 0.350µm et 2.4 µm

L'éclairement total E_{BOA} $[W.m^{-2}]$ est l'intégrale de l'éclairement spectral $[W.m^{-2}.\mu m^{-1}]$:

$$E_{BOA,total} = \int_{\lambda} E_{BOA,\lambda} d\lambda \tag{3.37}$$

L'albédo A est intégré sur tout le domaine spectral d'intérêt $\Delta\lambda_{sw}$. Une difficulté provient du fait que les bandes spectrales de l'image satellite ne recouvrent pas tout $\Delta\lambda_{sw}$. Par suite, A est calculé en tant que somme des exitances par bande spectrale de l'image satellite et des exitances des régions spectrales entre les bandes spectrales de l'image satellite. Ces exitances des régions spectrales entre les bandes spectrales de l'image satellite sont des intégrales du produit de $E_{BOA,\lambda}$ par l'albédo spectral A_{λ} obtenu par interpolation sur les albédos $A_{\Delta\lambda}$ par bande spectrale de l'image satellite. De manière schématique l'on a donc pour tout pixel (x, y) :

$$A(x,y) = \frac{\int A_{\lambda}(x,y,\lambda).E_{sw,BOA}(\lambda).\mathrm{d}\lambda}{\int E_{sw,BOA}(\lambda).\mathrm{d}\lambda} \tag{3.38}$$

La *Figure 3.26* montre une carte d'albédo $A(x, y)$ pour la ville de Bâle, le 24.06.2016 à 10:37. Elle est ré-échantillonnée à la résolution spatiale de 100m requise pour le calcul des cartes de bilan d'énergie urbain dans le cadre du projet URBANFLUXES.

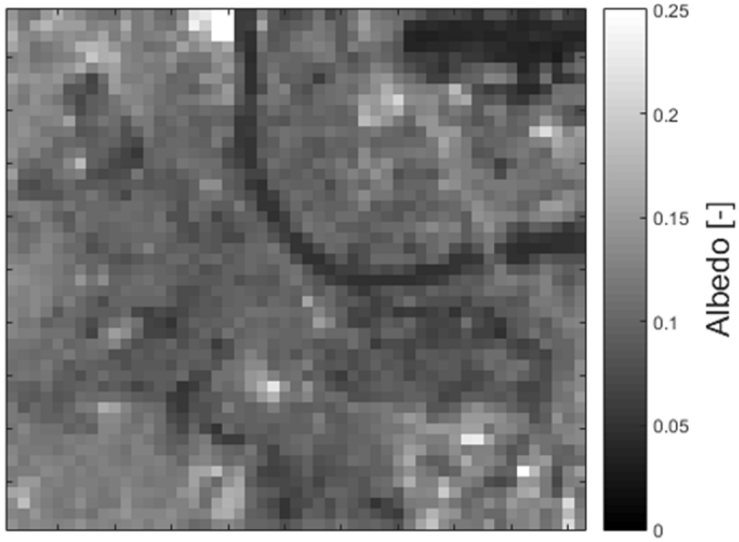


Figure 3.26 : Carte d'albédo de Bâle, à 100m de résolution (grille URBANFLUXES), dérivée de l'image Sentinel-2 du 24 Juin 2016 à 10h37.

Le bilan radiatif dans les courtes longueurs d'ondes est calculé avec l'expression :

$$Q_{sw}^{*} = E_{sw,BOA} - A.E_{sw,BOA} \tag{3.39}$$

La *Figure 3.27* montre la carte de Q_{sw}^{*} pour le 24.06.2016 à 10h37 au-dessus de Bâle. Le point rouge indique la position de la tour de flux BKLI utilisée pour étalonner l'éclairement BOA de DART en bas de l'atmosphère. Les variations de Q_{SW}^{*} sont cohérentes avec notre connaissance de la structure 3D de la canopée urbaine de Bâle et des matériaux qui la composent. Par exemple, la partie Nord-Est de la carte contient une forêt et a des valeurs de Q_{SW}^{*} élevées. Cependant, nous pouvons noter des valeurs anormalement basses dans le coin Sud-Ouest. Ces valeurs sont dues au fait que la représentation 3D de la ville n'était pas disponible pour cette zone au moment de l'étude. Ainsi, elle a été traitée comme une zone de sol nu composée de matériaux lambertiens, avec le relief donné par le MNT disponible. La précision des résultats est analysée dans le chapitre IV. Cependant, cette première analyse qualitative souligne déjà l'intérêt de disposer d'une représentation 3D précise et complète des paysages étudiés.

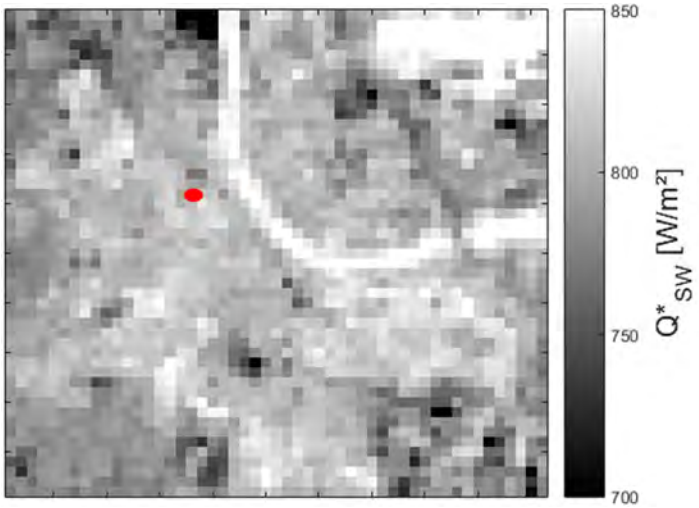


Figure 3.27 : Carte de Q_{SW}^{*} $[W.m^{-2}]$ pour la ville de Bâle le 24.06.2016 à 10h37, à 100m de résolution. Le point rouge représente l'emplacement de la tour de flux BKLI.

3.2. Calcul du bilan radiatif dans le domaine thermique

Contrairement au cas des courtes longueurs d'onde, les deux intégrations angulaires et spectrales sont directement réalisées par DART via l'emploi de la loi de Stefan-Boltzmann. Ainsi, l'exitance thermique est :

$$\mathrm{M_{lw}(T)} = \epsilon.\sigma.\mathrm{T}^4\ [W.m^{-2}] \tag{3.40}$$

A partir des cartes de température et d'émissivité par matériau dérivées de l'image satellite thermique, DART simule la carte d'exitance thermique M_{LW} du paysage urbain. Le bilan radiatif est calculé avec :

$$Q^*_{lw} = E_{lw,BOA} - M_{lw} \tag{3.41}$$

La *Figure 3.28* présente la carte de bilan radiatif thermique le 30.08.2015 à 10h16 pour la ville de Basel, dérivée de l'image thermique Landsat-8 acquise à la même date. En général, Q^*_{lw} est négatif, car l'éclairement incident est plus faible que l'exitance urbaine. Une analyse qualitative de la carte Q^*_{lw} montre que la distribution de Q^*_{lw} est cohérente avec l'architecture urbaine. Ainsi, Q^*_{lw} est maximal pour la rivière et est sous estimé dans la zone Sud-Ouest où la représentation 3D des bâtiments est manquante.

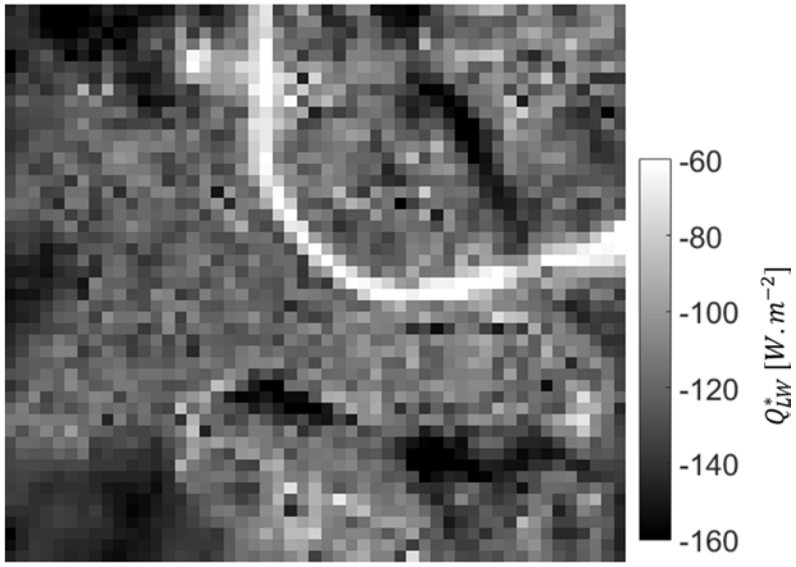


Figure 3.28 : Carte Q^*_{lw} $[W.m^{-2}]$ de la ville de Bâle le 30.08.2015 à 10h16, à 100m de résolution.

Le bilan radiatif total est la somme des bilans radiatifs aux courtes et grandes longueurs d'onde :

$$Q^* = Q^*_{lw} + Q^*_{lw}\ \ [W.m^{-2}] \tag{3.42}$$

La Figure 3.29 présente une carte de bilan radiatif total pour la ville de Bâle le 30.08.2015 à 10h16, dérivée d'une image Landsat-8 acquise à cette date.

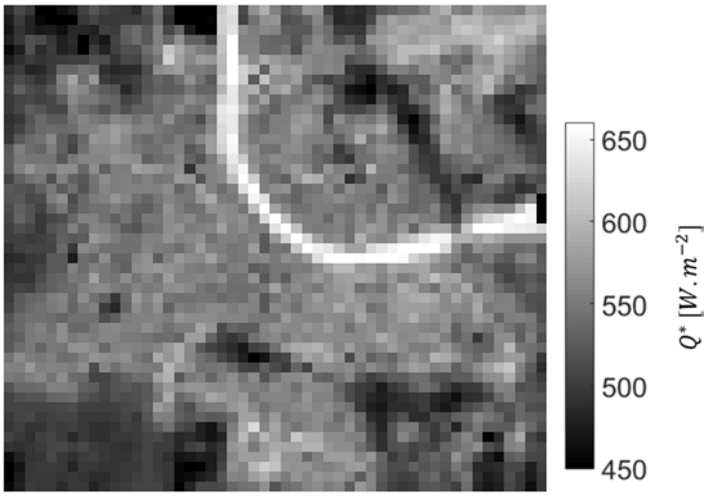


Figure 3.29 : Carte de $Q^*\ [W.m^{-2}]$ pour la ville de Bâle le 30.08.2015 à 10h16, à 100m de résolution.

4. Création de séries temporelles

La méthode de calcul du bilan radiatif urbain décrite précédemment n'est valable que pour la date d'acquisition de l'image satellite. Ceci est en général une contrainte au vu de la répétitivité actuelle des satellites. Ainsi, le satellite Landsat-8 a un taux de revisite de 16 jours. Ce taux de revisite est en plus diminué par le couvert nuageux, ce qui limite grandement la possibilité de créer des séries temporelles adaptées au suivi du bilan radiatif urbain. D'autre part, l'exécution de la méthode d'inversion nécessite beaucoup de simulations et de traitements complexes qui exigent de grands temps et puissances de calcul. Ainsi, avec la capacité de calcul à disposition pour l'étude[1], une simulation DART de toute une ville peut nécessiter 6 à 8 heures de calcul[2]. De plus, la résolution des nombreux systèmes d'équations posés par l'algorithme d'inversion est aussi très couteuse en temps de calcul. Par suite, le temps de calcul d'une carte de bilan radiatif pour une date donnée peut nécessiter plus d'une journée de calcul. Cette remarque souligne l'intérêt d'une approche plus efficace pour créer des séries temporelles de cartes de Q^*. Cette approche est présentée ci-dessous. Elle a été mise en œuvre dans le cadre du projet URBANFLUXES, dédié à l'estimation du bilan de chaleur anthropogénique en milieu urbain via l'utilisation d'images de satellites d'observation de la Terre.

4.1. Séries temporelles dans les courtes longueurs d'onde

Dans le domaine des courtes longueurs d'onde, la méthode développée pour réaliser des séries temporelles en limitant les calculs nécessaires se base sur l'hypothèse que la réflectance des matériaux urbains varie peu dans le temps. Cette hypothèse n'est cependant pas toujours acceptable. Ainsi :

- La réflectance de la végétation varie avec les saisons avec la variation de la biomasse et des propriétés optiques foliaires. Ce changement est relativement lent et progressif.
- La ville étudiée évolue avec en particulier la construction et destruction de bâtiments. Ce changement est relativement lent.
- Les précipitations (pluie/neige) modifient la réflectance des éléments urbains. Ainsi, la neige augmente la réflectance de surface, alors que la pluie tend à la diminuer. Selon les villes, ce changement est plus ou moins soudain et persistant.

[1] Serveur Dartcalc 2 du CESBIO : 20 coeurs/40 threads cadencés à 3.1 Ghz (Xeon E5-2687), 512 Go de RAM DDR4 cadencé à 2133 Mhz, disques SSD à 750 Mo/s.

[2] Ce temps vient d'être très diminué du fait de la récente introduction dans DART de la librairie Embree d'INTEL (https://embree.github.io/) dédiée au suivi de rayons optimisé dans des paysages simulés avec des triangles.

Il est important de noter que la méthode d'inversion développée est adaptée à l'évolution de la végétation et de la ville, sous réserve que les images satellites soient acquises avec une fréquence temporelle suffisante. Ce n'est pas le cas pour les précipitations, car leur impact sur la réflectance des éléments urbains est soudain.

Dans le cas où la réflectance des matériaux varie peu ou lentement dans le temps, les cartes de réflectance dérivées d'une image satellite acquise à une date t_{sat} sont valides sur des périodes plus ou moins proches de t_{sat}, ce qui permet de calculer des cartes de Q^* durant ces périodes, sans nécessiter de nouvelle image satellite. Les conditions d'éclairement sont alors le seul changement à considérer. En effet, les éclairements solaires direct $E_{BOA,direct}$ et diffus $E_{BOA,diffus}$ ne sont pas mêmes que lors de l'acquisition de l'image satellite. De plus, l'albédo urbain n'est lui aussi plus le même, car il dépend des conditions d'éclairement.

L'éclairement $E_{BOA,total}$ au bas de l'atmosphère est en général supposé être la somme de deux termes :

$$E_{BOA,total} = E_{BOA,direct} + E_{BOA,diffus} \quad (3.43)$$

De même, l'albédo est souvent supposé être la combinaison linéaire de deux termes pondérés par $E_{BOA,direct}$ et $E_{BOA,diffus}$ tels que :

$$E_{BOA,total}.A = E_{BOA,direct}.A_{bs} + E_{BOA,diffus}.A_{ws} \quad (3.44)$$

où A_{bs} est l'albédo dû à un rayonnement incident selon la seule direction du soleil ; c'est l'albédo "ciel noir". Inversement, A_{ws} est l'albédo dû à un rayonnement incident isotrope ; c'est l'albédo "ciel blanc".

Par suite, l'exitance vaut :

$$M_{sw} = M_{sw,direct} + M_{sw,diffus} \quad (3.45)$$

où $M_{sw,direct} = E_{BOA,direct}.A_{bs}$ et $M_{sw,diffus} = E_{BOA,diffus}.A_{ws}$ sont les exitances respectivement dues aux éclairement direct et diffus.

De même, le bilan radiatif s'écrit :

$$Q^*_{sw} = Q^*_{sw,direct} + Q^*_{sw,diffus} \quad (3.46)$$

La solution conçue pour créer efficacement des séries temporelles de Q^*_{sw} repose sur le pré-calcul de Look-Up Tables (LUT), c'est-à-dire de bases de données d'albédo A_{bs} et A_{ws}. Pour cela, l'espace des directions descendantes incidentes sur la canopée urbaine est discrétisé de manière à encadrer tous les angles solaires possibles, pour un site urbain donné. La Figure 3.30 illustre cette discrétisation pour la ville de Bâle ; l'échantillonnage des angles solaires encadre toutes les directions solaires possibles au cours d'une année. En utilisant les propriétés de matériaux inversées, l'albédo A_{bs} est simulé par direction solaire échantillonnée et par bande spectrale de l'image ayant servi à l'inversion. Cette simulation est naturellement effectuée sans prise en compte de l'atmosphère, qui amènerait une proportion d'éclairement diffus. De plus, l'albédo *ciel blanc* est aussi simulé en considérant cette fois un éclairement atmosphérique isotrope. Dans la réalité, l'éclairement diffus n'est pas complètement isotrope au-dessus de la canopée, mais cette hypothèse s'est avérée fournir de bons résultats. Des travaux sont en cours pour considérer l'anisotropie de l'éclairement diffus, et estimer le gain en précision que cela pourrait apporter. En discrétisant l'espace des directions en M directions, on obtient alors $M + 1$ cartes d'albédo par bande spectrale.

Le calcul de séries temporelles de Q^* nécessite de connaître le spectre des éclairements spectraux direct et diffus correspondants. Une difficulté est que les mesures in-situ ne renseignent en général que sur les éclairements direct et diffus spectralement intégrés. Par suite, DART simule le spectre de ces éclairements pour toute direction solaire considérée, à partir d'une atmosphère "moyenne". Les *Figure 3.31* et *Figure 3.32*. montrent ces éclairements pour un angle zénithal solaire de 25° (i.e. soleil haut dans le ciel) et de 80° (i.e. soleil proche de

l'horizon). L'éclairement total $E_{BOA,total}$ et le rapport $\frac{E_{BOA,direct}}{E_{BOA,diffus}}$ des éclairements direct et diffus varient beaucoup avec la direction solaire. Cela souligne l'importance de connaître les spectres d'éclairement par direction solaire considérée, et non uniquement les éclairements totaux, direct et diffus mesurés.

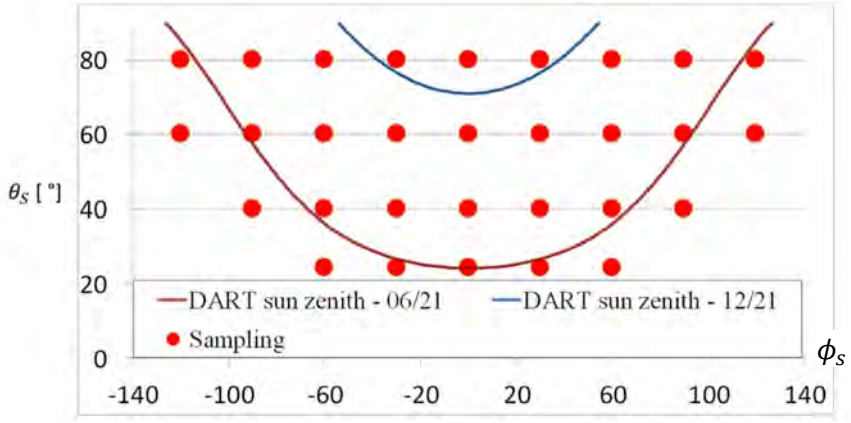


Figure 3.30 : Discrétisation des directions solaires possibles pour la ville de Bâle. La courbe bleue indique l'évolution de l'angle solaire durant le solstice d'hiver, et la courbe rouge durant le solstice d'été. Les points rouges représentent l'échantillonnage choisi pour discrétiser les angles possibles.

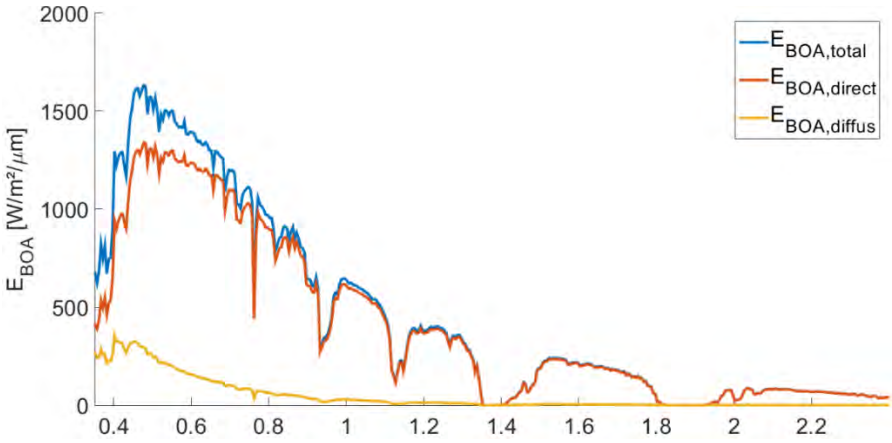


Figure 3.31 : Eclairement spectral pour un angle zénithal solaire de 25°. Bleu : éclairement total. Rouge : éclairement direct. Jaune : éclairement diffus.

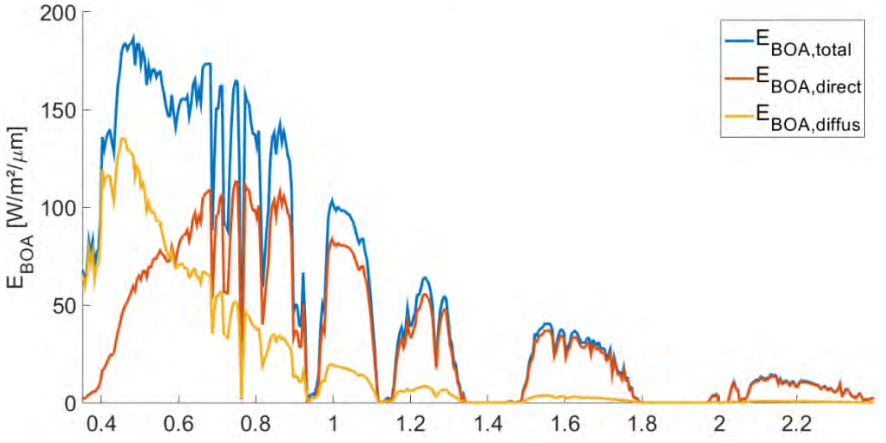


Figure 3.32 : Eclairement spectral pour un angle zénithal solaire de 80°. Bleu : éclairement total. Rouge : éclairement direct. Jaune : éclairement diffus.

La création de série temporelle de cartes de Q_{sw}^{*} s'appuie sur des mesures in-situ d'éclairement et sur le pré-calcul de LUT d'albédos et de spectres d'éclairement pour différentes directions d'éclairement, solaires. Les différentes étapes de l'approche sont indiquées ci-dessous :

- **Etape 1 : Détermination des angles solaires azimutaux et zénithaux**

DART calcule les angles solaires azimutaux et zénithaux à partir de la date et des coordonnées du site urbain.

- **Etape 2 : Interpolation de l'albédo**

La carte d'albédo *ciel noir* est générée par interpolation bilinéaire sur les cartes d'albédo *ciel noir* dont les angles solaires encadrent la direction solaire considérée. Cette interpolation se fait pour chaque bande spectrale.

- **Etape 3 : Interpolation de l'éclairement**

Les spectres d'éclairement direct, diffus et total sont générés par interpolation bilinéaire selon les angles solaires sur les spectres d'éclairement dont les angles solaires encadrent la direction solaire considérée.

- **Etape 4 : Calibration de l'éclairement**

Les 3 éclairements spectraux simulés sont étalonnés par les éclairements total, diffus, et direct mesurés :

$$E_{BOA,cor,\lambda} = E_{BOA,mesuré} \cdot \frac{E_{BOA,simulé,\lambda}}{\int_{\lambda} E_{BOA,simulé,\lambda} . d\lambda}.$$

Ainsi, les spectres d'éclairement corrigés suivent les comportements spectraux simulés, tout en respectant l'éclairement spectralement intégré mesuré sur le terrain.

- **Etape 5 : Interpolation et intégration spectrale de l'albédo**

Comme pour le calcul du bilan radiatif au passage du satellite, l'albédo spectral *ciel noir* interpolé angulairement et l'albédo spectral *ciel blanc* sont interpolés spectralement, avant d'être intégrés selon l'expression (3.38) :

$$A_{bs}(x,y) = \frac{\int A_{bs,\lambda}(x,y,\lambda).E_{BOA,\lambda,direct,cor}(\lambda).\mathrm{d}\lambda}{\int \mathrm{E}_{\mathrm{BOA},\lambda,\mathrm{direct,cor}}(\lambda).\mathrm{d}\lambda} \quad \text{et} \quad A_{ws}(x,y) = \frac{\int A_{ws,\lambda}(x,y,\lambda).E_{BOA,\lambda,diffus,cor}(\lambda).\mathrm{d}\lambda}{\int \mathrm{E}_{\mathrm{BOA},\lambda,\mathrm{diffus,cor}}(\lambda).\mathrm{d}\lambda}$$

- **Etape 6 : Calcul de Q_{SW}^{*}**

Le bilan radiatif est calculé selon l'expression (3.46) comme somme de ses composantes directes et diffuses :

$$Q_{sw,direct}^{*} = E_{BOA,direct} - E_{BOA,direct} . A_{bs}$$
$$Q_{sw,diffus}^{*} = E_{BOA,diffus} - E_{BOA,diffus} . A_{ws}$$
$$Q_{sw}^{*} = Q_{sw,direct}^{*} + Q_{SW,diffus}^{*}$$

Ainsi, la carte de Q_{sw}^{*} est obtenue pour toute date désirée, sans nécessiter de nouvelle simulation DART. Pour limiter les approximations effectues avec l'hypothèse de variations faibles des propriétés optiques des matériaux, il est nécessaire de mettre à jour ces propriétés optiques dès que possible. Pour effectuer cette mise à jour, deux méthodes sont possibles :

- Une méthode précise mais nécessitant un temps de calcul conséquent : pour chaque nouvelle acquisition satellite, on réalise une nouvelle inversion itérative complète des propriétés optiques des éléments.
- Une méthode approchée mais très rapide : pour toute nouvelle image satellite, le LUT des albédos est mis à jour par un facteur multiplicatif égal au rapport de la nouvelle image par l'image satellite ayant servi à calculer le LUT d'albédos. Ce rapport est calculé par pixel et par bande spectrale.

La première méthode est la plus précise, mais nécessite de créer de nouveaux LUTs. A l'inverse, la deuxième méthode est très rapide, mais plus imprécise. Un compromis entre les deux méthodes peut être réalisé selon la

précision requise, l'intervalle de temps entre les images satellites acquises et aussi la vitesse d'obtention des résultats. Durant la période entre deux acquisitions satellites, les réflectances des matériaux sont supposées constantes, si bien que le bilan radiatif peut être simulé très rapidement pour toute date.

4.2. Adaptation au domaine thermique

Dans le domaine thermique, il est possible de faire la même approximation que pour la réflectance de matériau dans les courtes longueurs d'ondes, mais uniquement pour les émissivités de matériaux. En effet, cette dernière varie de manière identique à la réflectance. Cependant, cette approximation est impossible à faire pour la température des matériaux, qui varie continuellement au cours de la journée. Ces variations étant complexes à estimer pour chaque matériau composant la canopée urbaine étudiée, une autre approche a dû être choisie pour pouvoir obtenir des séries temporelles de Q_{lw}^{*} en limitant les temps de calcul. L'approche adoptée consiste à utiliser des données d'observation de la Terre dans les grandes longueurs d'onde provenant de satellites avec un haut taux de revisite : les satellites MODIS-Aqua et MODIS-Terra. En effet, ces satellites réalisent des acquisitions sur la totalité du globe avec une fréquence de 1 à 2 jours. Idéalement, la meilleure solution, et la plus précise, serait de réaliser l'inversion complète des propriétés d'émissivité et de température des matériaux pour chaque acquisition MODIS, mais cela entraînerait des calculs extrêmement lourds et longs. D'autre part, la méthode d'inversion développée n'est pas bien adaptée à résolution spatiale des images MODIS.

Une autre solution, beaucoup plus simple, a donc été choisie pour compléter la partie thermique Q_{lw}^{*} du bilan radiatif. Cette solution utilise des cartes de températures de surface T_{surf} et d'émissivité de surface ϵ_{surf} à 100m de résolution. Les températures sont obtenues pour chaque acquisition MODIS et les émissivités pour chaque acquisition à haute résolution spatiale (e.g. Landsat-8, Sentinel-2) par des méthodes de *spatial spectral unmixing* (Mitraka et al., 2015). Ces cartes sont fournies par les partenaires du projet URBANFLUXES pour lequel cette fréquence temporelle de cartes de bilan radiatif est nécessaire. La Figure 3.33 montre les cartes de température et d'émissivité de surface de la ville de Bâle pour l'image MODIS du 24.06.2016 à 11h05.

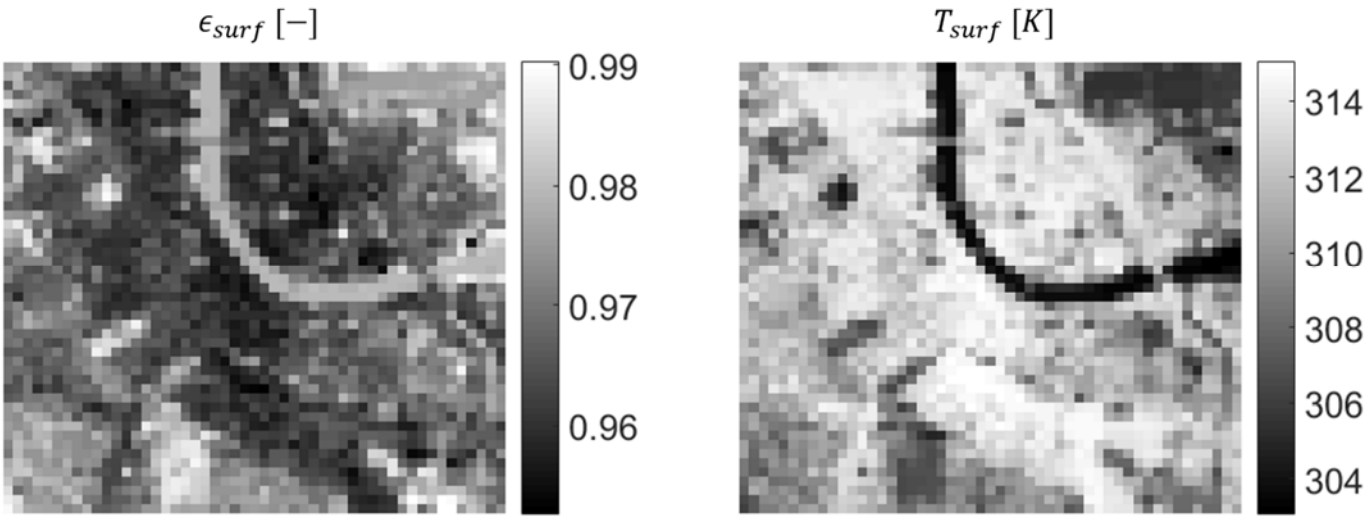


Figure 3.33 : Cartes d'émissivité de surface (gauche) et de température de surface (droite), à 100m de résolution, le 24.06.2016 (à 11h05 pour la température) pour la ville de Bâle (Source : FORTH)

Le bilan radiatif Q_{LW}^{*} est calculé à partir de l'exitance de surface M_{surf} et de l'éclairement total mesuré dans les grandes longueurs d'ondes par les tours de flux :

$$Q_{lw}^{*} = E_{BOA,lw,mesuré} - M_{surf} \quad (3.47)$$

avec M_{surf} calculé selon la loi de Stefan-Boltzmann : $M_{surf} = \epsilon_{surf}.\sigma.T_{surf}^{4}$ (3.48)

En calculant pour chaque date d'acquisition MODIS la composante Q_{sw}^{*} à l'aide de la méthode des LUT, on obtient alors la carte de bilan radiatif total :

$$Q^{*} = Q_{sw}^{*} + Q_{lw}^{*}$$

Cette méthode approchée combinée à l'utilisation des LUT permettant d'obtenir la composante du bilan dans les courtes longueurs d'onde pour toute date (y compris donc les dates d'acquisition MODIS) permet d'accéder à des cartes de bilan radiatif complet avec une très bonne fréquence temporelle, en sacrifiant une partie de la précision dans les grandes longueurs d'onde que DART apportait via une représentation précise des phénomènes radiatifs au sein du paysage urbain. Cependant, le chapitre IV montre que cette approche est très précise.

IV. Résultats, validation, et études de sensibilité

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus par la méthode de calcul de cartes de bilan radiatif urbain à partir d'images satellites et du modèle 3D DART. Ces résultats ont contribué au projet URBANFLUXES dédié à l'estimation du bilan d'énergie urbain, notamment pour estimer le flux de chaleur anthropogénique urbain.

- L'objectif principal : **obtention de cartes de bilan radiatif urbain à partir d'images satellites** à une résolution suffisante pour rendre compte des variations spatiales au sein de la ville (100m). Cela nécessite une modélisation précise des différents phénomènes radiatifs se produisant au sein d'une canopée urbaine possédant une structure tri-dimensionnelle complexe et anisotrope.
- Un objectif intermédiaire, directement lié à la réalisation de l'objectif principal : la méthode développée doit pouvoir restituer précisément la réflectance et température des différents matériaux urbains, pour **simuler précisément des images** satellites, via une modélisation précise de **tous les phénomènes radiatifs**.
- Un objectif directement lié aux besoins du projet URBANFLUXES : réaliser un outil, à la fois précis et efficace en termes de temps de calcul, qui **crée des séries temporelles de cartes de bilan radiatif**. En effet, les séries temporelles Q^* sont nécessaires pour estimer les flux anthropogéniques. Une fréquence de l'ordre d'une carte de bilan radiatif par jour sur une année est désirée pour les besoins du projet. La précision des résultats est essentielle car les erreurs sur l'estimation de chaque composante du bilan énergétique total (bilan radiatif, bilan de chaleur turbulente et latente, flux énergétique de stockage) se cumulent.
- Un objectif **d'adaptabilité** : les méthodes développées ne doivent pas dépendre d'un paysage urbain particulier, mais êtres applicables à toute canopée urbaine (ou paysage naturel) sous réserve de disponibilité des données nécessaires (e.g. base de données géométrique urbaine).

Ces différents objectifs ont été remplis au cours de cette thèse. Dans ce chapitre, les différents sites d'études et d'application sont d'abord présentés. Ensuite, les résultats obtenus sur ces sites sont introduits puis validés. Enfin, des études de sensibilités sont réalisées afin de justifier les différentes hypothèses introduites et d'identifier les sources possibles d'erreur et d'amélioration de ces méthodes.

2. Les sites d'application de l'étude

Les trois sites urbains du projet URBANFLUXES ont été choisis pour tester les méthodes développées : un quartier de Londres, au Royaume-Uni, la ville de Bâle, en Suisse, et la ville d'Héraklion, en Grèce (Figure 4.1). Ces sites ont été choisis pour plusieurs raisons. D'une part, toutes ces villes ont à disposition les données nécessaires pour le calcul des composantes du bilan énergétique total, et en particulier le bilan radiatif. Ensuite, leurs modes de fonctionnement énergétique diffèrent, en particulier pour les raisons suivantes :

- Le **climat** : il est tempéré pour Londres, continental pour Bâle et méditerranéen pour Héraklion. Pour le bilan radiatif, le climat affecte l'éclairement incident au cours d'une année, à la fois en terme d'intensité qu'en terme de proportion de l'éclairement diffusée ou directement transmise par l'atmosphère.
- La **structure tri-dimensionnelle** : les aménagements de ces trois villes diffèrent en termes de densité des bâtiments, de hauteur des immeubles, etc. Ainsi Londres est une ville très dense avec beaucoup de tours, tandis que Héraklion, et plus encore Bâle, sont moins étendues, moins denses et possèdent moins de quartiers regroupant de hautes constructions.
- Les **matériaux** de construction des bâtiments : ces matériaux diffèrent selon les villes, ce qui entraîne des fonctionnements radiatifs et énergétiques différents.
- Les **activités humaines** : elles varient selon les villes, en lien avec le trafic et la densité des bâtiments industriels et de la population. Ces facteurs impactent beaucoup le flux de chaleur anthropogénique urbain, objectif principal du projet URBANFLUXES.

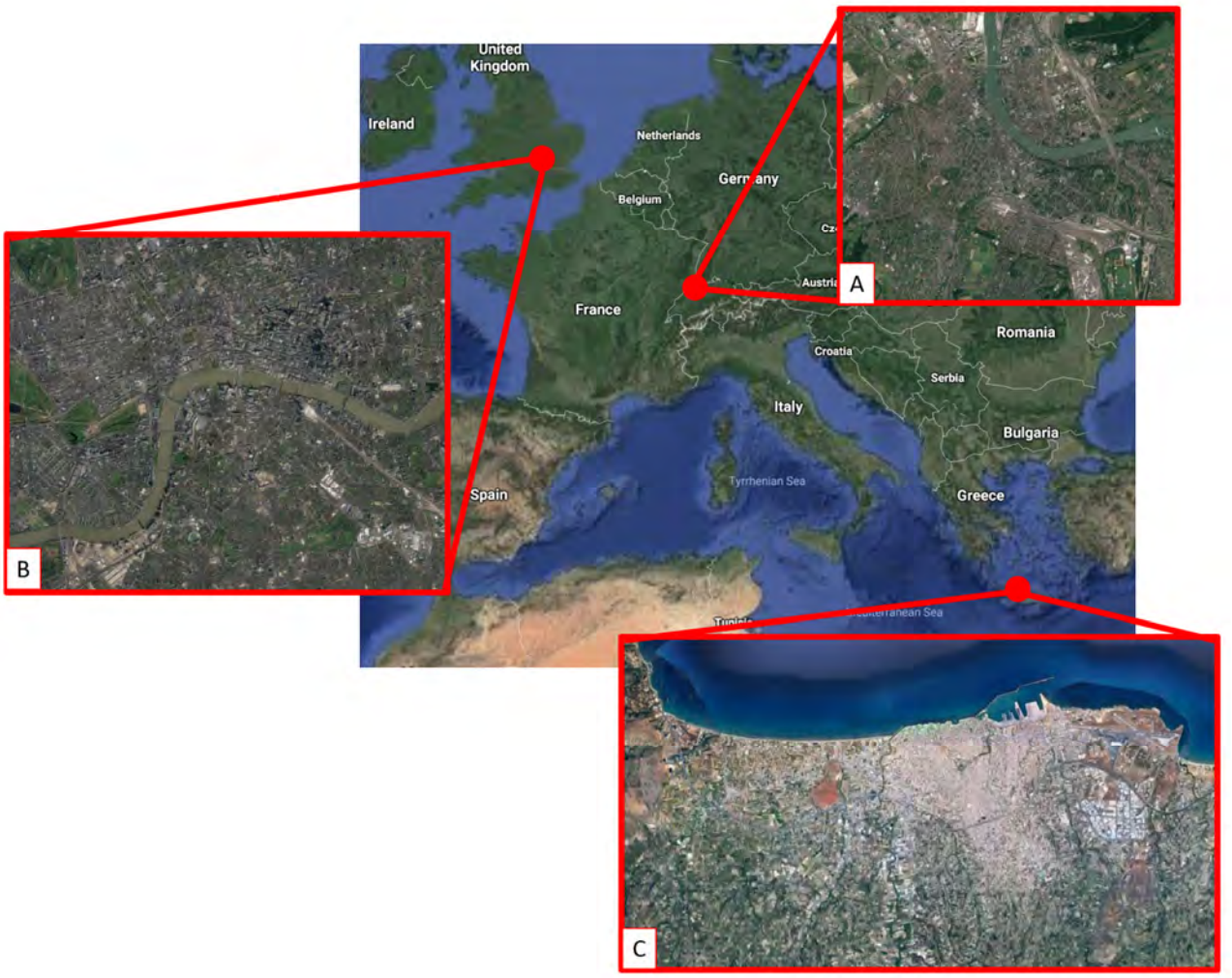


Figure 4.1 : Les 3 sites urbains étudiés. A : Bâle (Suisse) ; B : Londres (Royaume-Uni) ; C : Héraklion (Grèce)

Le paragraphe suivant présente les trois sites d'étude et leur modélisation dans le modèle DART.

2.1. Bâle

Le site d'étude comprend la quasi-totalité de la ville de Bâle. Les cartes de bilan radiatif Q^* ont une résolution spatiale de 100m. Elles couvrent une zone de 4900x5100m², soit 49x51 pixels à 100m de résolution. Elle latitude varie de 5265531.8m à 5270431.8m, et la longitude varie de 391450.7m à 396550.7m, dans le système de coordonnées de référence EPSG:32632 - WGS 84 / UTM zone 32N. Dans la Figure 4.2, l'image en fond est une composition colorée Sentinel-2 du 24.06.2016, à 20m de résolution, corrigée des effets atmosphériques.

Les simulations DART ont été effectuées sur une zone qui couvre le site d'étude, à l'aide d'une représentation 3D des bâtiments de la ville, d'un modèle numérique de terrain simulé avec des triangles, de la position, hauteur et diamètre de la couronne de plus de 60,000 arbres avec dans la ville, et des coordonnées de la ville, pour calculer la direction solaire à toute date. DART a simulé les troncs des arbres avec des triangles et les couronnes des arbres en tant que matière turbide dans des volumes ellipsoïdaux. La résolution des simulations DART a été fixée à 5m, après une étude sur la précision des résultats obtenus en fonction du temps de calcul pour chaque simulation. La Figure 4.3 montre une représentation 3D du site.



Figure 4.2 : Grille (vert) correspondant aux cartes de bilan radiatif de la ville de Bâle, à 100m de résolution. L'image en fond est une composition colorée Sentinel-2 du 24.06.2016, à 20m de résolution.



Figure 4.3 : Maquette DART de la ville de Bâle, en vue oblique dans l'outil de visualisation 3D de DART. En vert la végétation, en gris foncé les toits, en gris clair les murs, en bleu l'eau, et en beige le relief.

Chaque couleur de la Figure 4.3 indique un type de matériau spécifique. Ainsi, 7 groupes de matériaux sont identifiés : le relief (ou 'sol'), les toits, les murs, la rivière, la végétation. Les deux autres groupes sont des 'structures' de toits et de murs. Pour les toits, ce sont des structures qui dépassent de leur représentation plate de base. Ils sont visibles sur la figure en gris clair sur les différents toits. La représentation 3D de la ville de Bâle est de très bonne qualité. Les défauts majeurs sont l'absence des ponts et des bâtiments de la zone Sud-Ouest du site la carte, qui font partie d'une juridiction différente (Bâle est à la frontière de la Suisse, de l'Allemagne, et de la France). Les paragraphes suivants indiquent les défauts induits par ces absences. La Figure 4.4 présente une vue aérienne de la maquette de Bâle, et un zoom sur les éléments de structures présents dans la scène. L'ellipse bleue indique la partie de la maquette où les bâtiments sont absents.



Figure 4.4 : Vue aérienne (a) de la maquette 3D de la ville de Bâle, visualisée avec l'outil 'vue 3D' de DART. Le cercle bleu indique une zone bâtie où les bâtiments sont absents dans la maquette. Le points rouge et jaune indiquent respectivement l'emplacement des tours de flux BKLI et BAES. A droite : zoom de la représentation sur des éléments de structures de toit.

Bâle possède plusieurs points de mesures, dont une tour de flux (BKLI) qui a servi à valider les résultats en termes de bilan radiatif et également à étalonner l'éclairement de la scène lors des différentes simulations. La deuxième tour (BAES) présente dans la zone d'intérêt n'a pas pu être utilisée à cause d'un défaut d'étalonnage durant la période de l'étude. Les emplacements de BKLI et BAES sont respectivement indiqués par un point rouge et un point jaune dans la Figure 4.4**.** La Figure 4.5 présente l'image de température de surface du 30.08.2015 à 11 :16 (UTC+1), à 100m de résolution avec indication des deux tours et des pixels qui impactent leurs mesures. Le pixel central (gris foncé) contribue à 20% du signal mesuré et les pixels adjacents (gris clair) à 10%. La tour BKLI est un mat de 18m de haut situé sur le toit d'un bâtiment haut de 20m. Elle réalise donc des mesures à 38m du sol. Ces mesures sont notamment des mesures d'éclairement total et d'exitance dans les courtes et les grandes longueurs d'onde. De plus, l'éclairement est séparé en proportion diffuse et directe.

Bâle est le site d'étude où les méthodes développées dans cette thèse, en particulier la méthode d'inversion, ont été conçues. En effet, Bâle a été le premier site entièrement renseigné et donc simulable par DART. De plus, la qualité des données (base de données géométrique urbaine, mesures de flux, etc.) est exceptionnelle. Ceci explique que beaucoup de résultats sont présentés pour la ville de Bâle. Cependant, les méthodes développées sont applicables à toute ville, et ont donc été utilisées avec succès sur Londres et Héraklion.

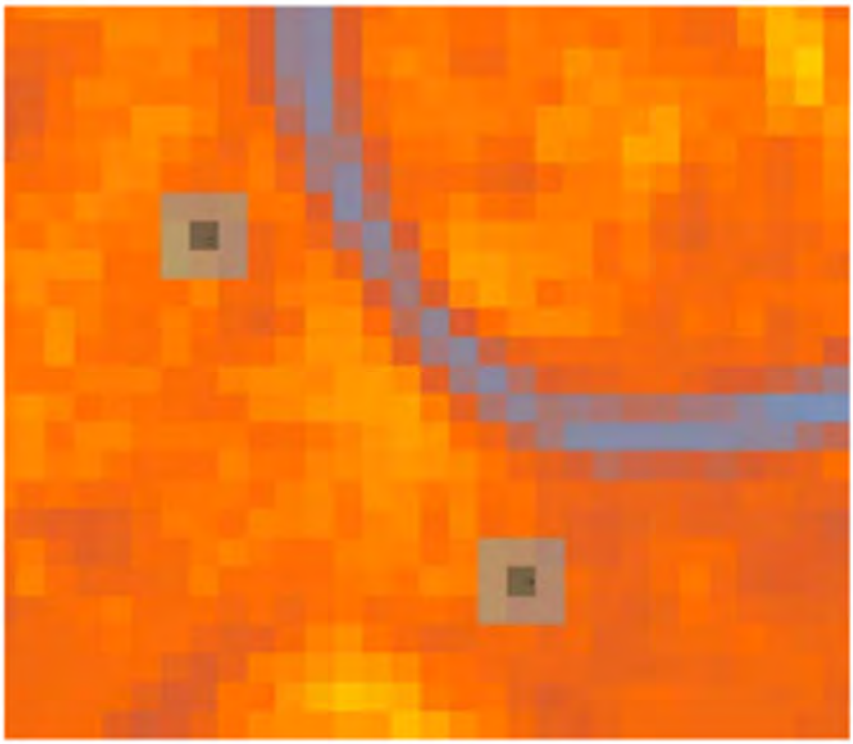


Figure 4.5 : Carte de température de surface au 30.08.2015 à 11 :16 (UTC+1) avec indication des zones qui contribuent aux mesures des tours BKLI et BAES. Le pixel central (gris foncé) contribue à 20% de la mesure et les pixels adjacents (gris clair) à 10%. Les températures varient de 295K (bleu) à 320K (jaune).

2.2. Londres

Ce site est un quartier de Londres. La ville complète n'a pas été traitée car sa base de données géométrique n'était pas totalement disponible, et aussi parce que la ville est trop étendue pour être simulée en une fois par DART dans l'état actuel du modèle. Les cartes de bilan radiatif Q^* correspondent à une grille de 100m de résolution spatiale (Figure 4.6) qui couvre une zone de 3600x4700m², soit 36x47 pixels à 100m de résolution. La latitude varie de 5709974.3m à 5713574.3m, et la longitude varie de 281591.0m à 286291.0m, dans le système de coordonnées de référence EPSG:32631 - WGS 84 / UTM zone 31N. L'image en fond est une composition colorée Sentinel-2 du 06.06.2016, à 20m de résolution, corrigée des effets atmosphériques.

Cette grille est exactement la zone couverte par les simulations DART, car la base de données géométriques urbaine externe à cette zone a été disponible trop tardivement. Cette base de données comprend une représentation 3D des bâtiments, un modèle numérique de terrain raster à 0.7m de résolution, transformé en objet 3D à facettes, la position de la végétation urbaine et les coordonnées de la ville, utilisées pour calculer l'éclairement et la direction solaire à toute date. La position de la végétation est disponible sous la forme d'un modèle numérique d'élévation de la végétation. En vue de sa simulation dans DART, ce modèle d'élévation a été transformé en un ensemble de cellules turbides. La Figure 4.7 montre la maquette 3D obtenue**.** Chaque couleur indique un type de matériau spécifique. Cinq groupes de matériaux sont identifiés : le relief (ou 'sol'), les toits, les murs, la rivière, la végétation. Ici encore, les ponts ne sont pas tous représentés. De plus, la limitation stricte de la zone implique la coupure nette de certains bâtiments aux bords de la simulation. Ce défaut a été traité en agrandissant manuellement le relief au sol, afin de ne pas créer d'effets de bord dus au dépassement de quelques bâtiments de la zone de simulation, que DART reproduit alors automatiquement du côté opposé de la scène pour des raisons de continuité. La résolution des simulations DART a été fixée à 5m, après une étude de la précision des résultats obtenus en fonction du temps de calcul pour chaque simulation.

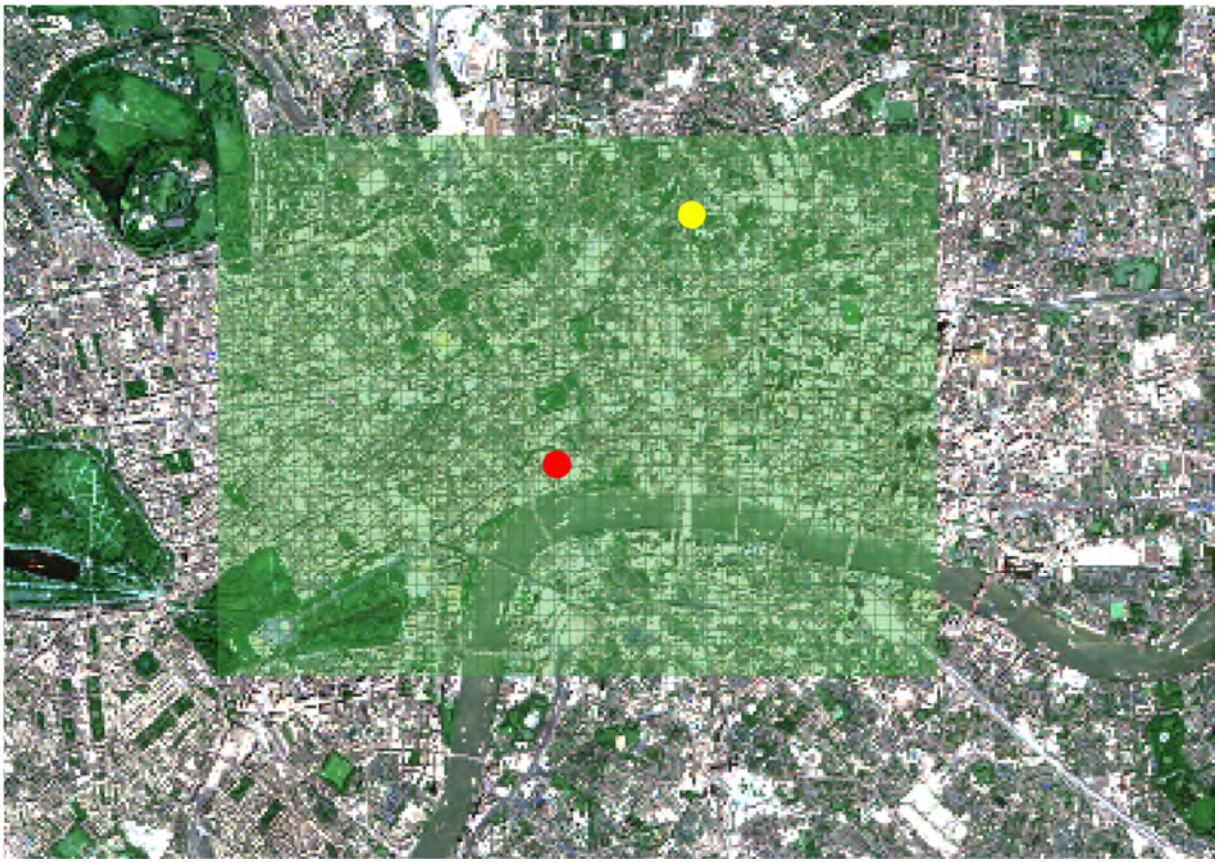


Figure 4.6 : Grille (vert) des cartes de bilan radiatif de Londres, à 100m de résolution. L'image en fond est une composition colorée Sentinel-2 du 06.06.2016, à 20m de résolution. Les points rouges et jaunes indiquent respectivement les points de mesures KSSW et IMU

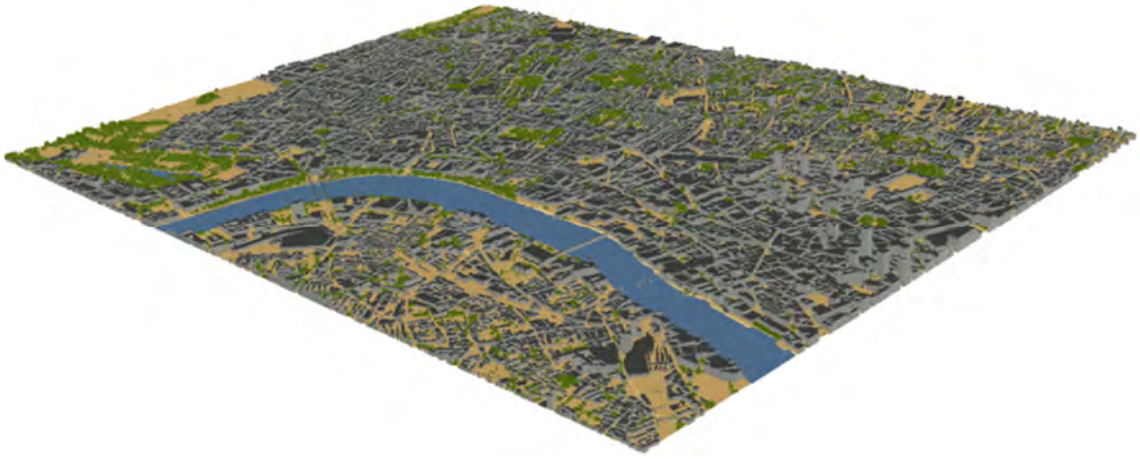


Figure 4.7 : Maquette 3D DART de Londres, en vue oblique affichée avec l'outil de visualisation 3D de DART. En vert la végétation, en gris foncé les toits, en gris clair les murs, en bleu l'eau, et en beige le relief.

Deux tours de flux (IMU : Islington MichaelCliffe Upper; et KSSW : Kings College London, Strand Campus, Strand Building, West Roof) du réseau LUMA (http://www.met.reading.ac.uk/micromet/LUMA/Network.html) ont été utilisées pour valider les données de bilan radiatif de Londres. Dans la Figure 4.6**,** un point jaune repère IMU et un point rouge repère KSSW. KSSW a donné l'éclairement total et l'exitance dans les courtes et grandes longueurs d'onde. IMU a donné la répartition diffus/direct de l'éclairement. Initialement, cette distinction était réalisée par le point de mesure KSS45W, situé au même emplacement que KSSW, mais celui-ci a été déplacé en Avril 2016 au point de mesure IMU. Les tours KSSW et IMU effectuent des mesures en continu sur des intervalles de 15

minutes. L'utilisation conjointe de ces deux points de mesures est faite sous l'hypothèse que l'éclairement incident au-dessus de la canopée urbaine varie peu spatialement.

Le site de Londres a permis de tester les algorithmes de calcul de bilan radiatif dans un environnement plus dense que celui de Bâle. Il a ainsi permis d'affiner la méthode d'inversion pour pallier à des problèmes non observés sur le site de Bâle. Ainsi, le fait que les bordures de la scène soient très nettement délimitées entraîne des effets de bord non observés pour Bâle. Ce point est développé plus loin dans un paragraphe qui présente une étude de sensibilité concernant les effets de bord en fonction de la disposition des scènes simulées.

2.3. Héraklion

Le site d'étude contient l'intégralité de la ville d'Héraklion. Il est beaucoup plus étendu que les deux autres sites d'étude. Les cartes de bilan radiatif Q^* correspondent à une grille de 8300x14400m² à 100m de résolution spatiale, soit 83x144 pixels. La latitude varie de 3905095.3m à 3915795.3m, et la longitude varie de 320480.7m à 338580.7m, dans le système de coordonnées de référence EPSG:32635 - WGS 84 / UTM zone 35N. La Figure 4.8 affiche cette zone avec en image en fond une composition colorée Sentinel-2 du 17.06.2016, à 20m de résolution, corrigée des effets atmosphériques. Une tour de flux (UF-HER-13), mise en place par le projet URBANFLUXES, mesure l'éclairement incident dans les courtes et grandes longueurs d'ondes à 27m au-dessus du sol, par pas de 30 minutes. Un point rouge indique sa position (latitude 35339115m, longitude 25150846m).

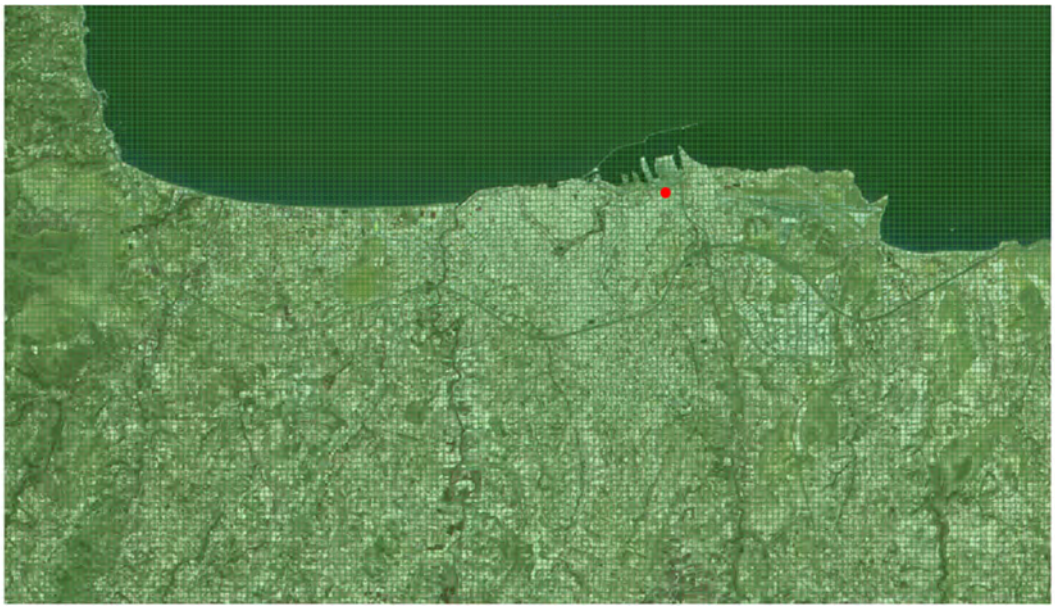


Figure 4.8 : Grille des cartes de bilan radiatif de la ville d'Héraklion, à 100m de résolution. L'image en fond est une composition colorée Sentinel-2 du 17.06.2016, à 20m de résolution. Le point rouge indique la tour de flux (UF-HER-13) utilisée pour les mesures d'éclairement.

Les simulations DART ont été effectuées dans la zone correspondant exactement aux cartes Q^* à l'aide d'une base de données géométriques 3D urbaine, d'un modèle numérique de terrain raster à 1m de résolution, transformé en objet à facettes, de la position, hauteur et diamètre de couronne des arbres, et les coordonnées moyennes de la ville pour calculer l'éclairement et la direction solaire à toute date. Chaque arbre a été simulé avec un tronc constitué de triangles et une couronne ellipsoïdale remplie de matière turbide. Cependant, les arbres n'étaient disponibles que pour le centre d'Héraklion. La *Figure 4.9* montre la maquette 3D d'Héraklion. Chaque couleur indique un type de matériau différent. Quatre groupes de matériaux sont distingués : le relief (ou 'sol'), les bâtiments, la mer, la végétation. Les murs et les toits ne sont pas distingués, car ils sont dans un même groupe de la base de données géométriques urbaine disponible.



Figure 4.9 : Maquette DART de la ville d'Héraklion, en vue oblique, affichée par l'outil de visualisation 3D de DART. En vert la végétation, en gris foncé les bâtiments, en bleu l'eau, et en beige le relief. En haut : vue globale. En bas : zoom sur le centre-ville.

Du fait de la taille étendue de la zone modélisée, la résolution des simulations DART a été fixée à 10m, après une étude de la précision des résultats obtenus en fonction du temps de calcul pour chaque simulation. Cette résolution plus large que pour les autres cas d'études permet de simuler l'intégralité de la zone avec un temps de calcul raisonnable, sans réelle perte de précision pour la simulation du bilan radiatif à 100m de résolution. D'autre part, cette résolution est suffisante pour l'inversion des propriétés par comparaison avec des images satellites, car les images satellites utilisées ont une résolution minimale de 20m (pour Sentinel-2). Ce site d'étude, de par sa taille et son relief prononcé, a permis de confirmer la capacité d'adaptation de la méthode d'inversion à tout type de milieu urbain. D'autre part, le fait que la tour de flux ne mesure que l'éclairement total, sans distinction entre éclairement diffus et direct, a conduit au développement de la méthode de création de séries temporelles de spectres d'éclairement, très utile pour les sites où le seul éclairement total est mesuré.

3. La simulation d'images satellites

Les images satellites simulées constituent un résultat intermédiaire de la méthode d'inversion développée. La similitude des images DART et satellite étant un indicateur de la précision de la méthode, il est utile d'estimer avec quelle précision DART peut simuler une image satellite, même si à ce stade la précision avec laquelle une image DART doit être simulée pour obtenir une carte Q^* avec une précision donnée n'est pas connue. Ce paragraphe présente des images satellites simulées par DART à partir de réflectances de matériau dérivées de ces images satellites. L'efficacité de la méthode d'inversion est évaluée selon les sites d'étude et les images satellites utilisées. En effet, l'algorithme d'inversion opère de la même manière pour tout site d'étude, mais la précision des résultats diffère selon les sites, en particulier du fait de la diversité des architectures 3D urbaines et des images satellites. Dans les courtes longueurs d'ondes, deux capteurs satellites ont été utilisés : tout d'abord Landsat-8, puis Sentinel-2 une fois leurs corrections atmosphériques disponibles. Les images Sentinel-2 ont été inversées après la mise au point de la méthode d'inversion initialement appliquée aux images Landsat-8, ce qui a donné des cartes Q^* très précises, comme montré plus loin. Les cartes de réflectance dérivées des images Sentinel-2 ont surtout servi à créer des séries temporelles de bilan radiatif des trois villes, et à estimer la précision avec laquelle la méthode d'inversion permet de simuler une image satellite, en analysant l'apport des différentes itérations de cette méthode. Dans le domaine thermique, le capteur Landsat-8 a été utilisé pour simuler des images de luminance thermique dans la bande 10 (10895nm). Les résultats présentent une bonne précision tant en termes de luminance qu'en terme de bilan radiatif thermique à 100m de résolution. Par suite, dans la dernière partie de ce travail, les efforts d'amélioration de la méthode d'inversion ont surtout porté sur la partie "courtes longueurs d'onde". Les résultats qualitatifs de ce paragraphe sont détaillés ci-dessous. Dans la suite, l'erreur relative entre une valeur mesurée x_{mes} et simulée x_{sim} désigne la quantité suivante : $\epsilon_{rel} = \frac{|x_{sim} - x_{mes}|}{x_{mes}}$

La *Figure 4.10* montre une image Landsat-8 (B5 – 864.6nm, 30m de résolution) de Bâle acquise le 30.08.2015 et l'image DART associée obtenue par inversion. La *Figure 4.11* montre un résultat similaire pour une image Sentinel-2 (B8a - 865nm, 20m de résolution) acquise le 24.06.2016. Deux raisons expliquent que la simulation DART s'avère être beaucoup plus bruitée pour Landsat-8 que pour Sentinel 2. (1) L'inversion "Landsat-8" est réalisée avec la version initiale de la méthode d'inversion, alors que l'inversion "Sentinel-2" est réalisée avec la version finale de la méthode d'inversion. (2) Sentinel 2 a une meilleure résolution spatiale que Landsat-8, ce qui permet une meilleure estimation des réflectances de matériau. Par contre, il convient de noter que les résultats en termes de cartes de bilan radiatif à 100m de résolution sont similaires (*c.f.* suite du chapitre). Ce résultat illustre la capacité de la méthode à simuler fidèlement des images satellites. En effet, les images DART comme celles de la *Figure 4.10* ont des erreurs relatives par bande spectrale de l'ordre de 10%, alors que les images DART inversées avec la méthode d'inversion finale avec Sentinel-2 ont des erreurs relatives absolue moyenne de l'ordre de 1%. Le Tableau 4.1 présente ces erreurs relatives pixel à pixel pour 6 bandes spectrales de l'image Sentinel-2 du 24.06.2016, représentatives du spectre dans les courtes longueurs d'onde.



Figure 4.10 : Images de réflectance DART (gauche) et Landsat-8 (droite) du 30.08.2015, à 30m de résolution. Bande B5 : 864.6nm. L'image Landsat-8 est corrigée des effets atmosphériques.

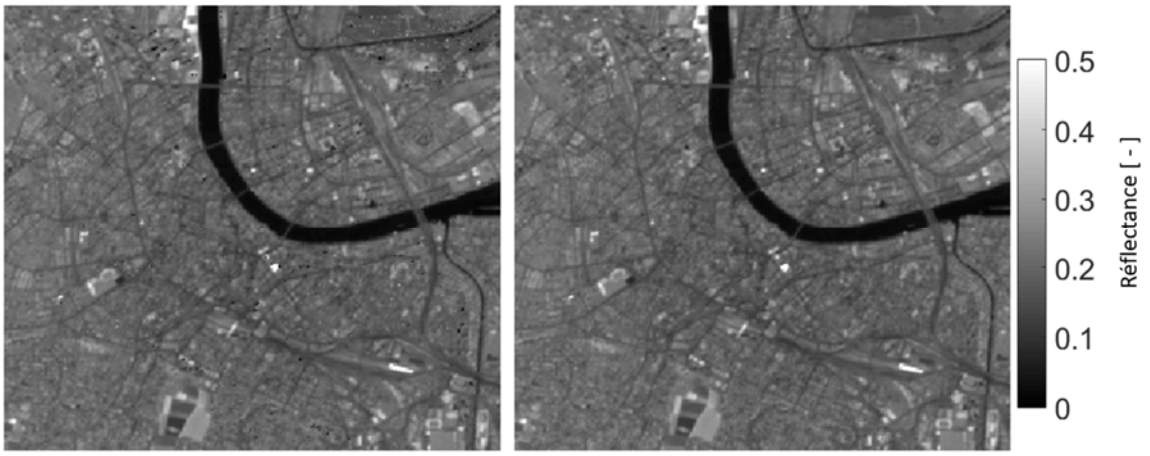


Figure 4.11 : Images de réflectance DART (gauche) et Sentinel-2 (droite) du 24.06.2016, à 20m de résolution. Bande 8a (865nm) de Sentinel 2. L'image Sentinel-2 est corrigée des effets atmosphériques.

BANDE (LONGUEUR D'ONDE [NM])	ERREUR RELATIVE [%]
B2 (490)	0.11
B3 (560)	0.17
B4 (665)	0.19
B8A (865)	0.96
B11 (1610)	0.35
B12 (2190)	1.8

Tableau 4.1 : Erreurs relatives dans la comparaison entre les images simulées et mesurées pour une acquisition Sentinel-2 du 24.06.2016, pour 6 bandes spectrales.

L'erreur relative est toujours inférieure à 2%, avec de beaucoup plus fortes valeurs dans le proche infrarouge que dans le visible, du fait des plus fortes diffusions multiples, surtout dans la végétation. Elle tend à augmenter avec la longueur d'onde comme la réflectance des matériaux urbains. Elle est maximale dans ce cas pour B12 (2190nm), car les réflectances des matériaux urbains sont maximales pour cette bande, et donc les diffusions multiples. Ceci est confirmé par la carte d'erreur relative pour la bande 8a (Figure 4.12) : les erreurs maximales surviennent pour les pixels de végétation, notamment dans la forêt située dans le coin Nord-Est. Des observations similaires sont réalisées pour B12.

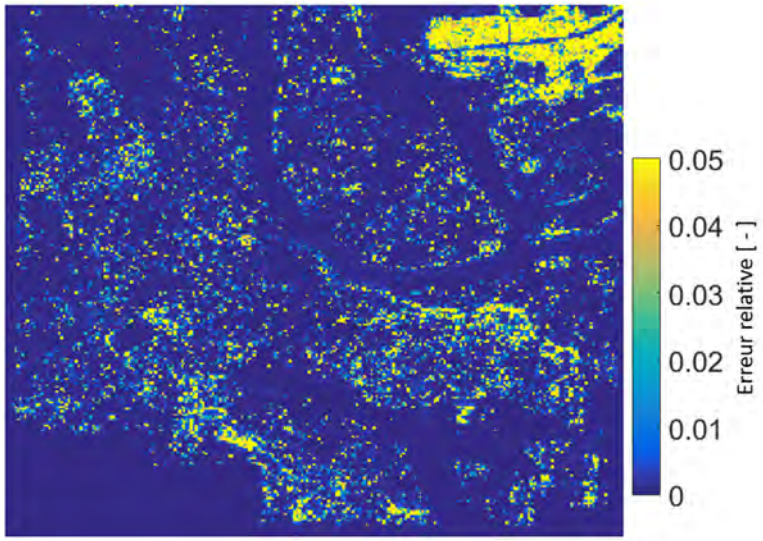


Figure 4.12 : Carte d'erreur relative entre une image de référence Sentinel-2 du 24.06.2016 et une image simulée par DART pour la bande B8a su capteur Sentinel-2 (655nm)

De manière générale, les pixels ne contenant que des éléments du groupe sol sont très bien inversés, tandis que les pixels plus complexes regroupant différents éléments montrent au final de plus grandes disparités par rapport à l'image de référence. De plus, on observe que les manquements à la représentation 3D (e.g. les ponts, les bâtiments au Sud-Ouest) ne perturbent pas la simulation d'images de réflectance. En effet, les parties 'vides' se voient attribuer les propriétés de ce qui est observé dans la réalité. Cependant, ces défauts apparaissent lors de l'intégration angulaire réalisée pour calculer l'albédo ou l'exitance. En effet, une surface bâtie et une surface non bâtie, mais qui donne la même réflectance pour la direction d'observation satellite, n'ont pas le même albédo en raison de l'impact de l'architecture 3D. Des images satellites ont aussi été simulées pour les deux autres sites d'études à partir de l'inversion d'images Landsat-8. En effet, comme déjà indiqué, Bâle a servi de "laboratoire" pour développer la méthode d'inversion dans les courtes longueurs d'onde (cf Figure 4.11), et analyser son efficacité (cf paragraphe 6). Par contre, pour Londres et Héraklion, la méthode d'inversion finale a directement été utilisée avec les images Sentinel-2 pour le calcul de séries temporelles de bilan radiatif. La Figure 4.13 montre une acquisition Landsat-8 de Londres le 02.10.2015 à 30m de résolution pour la bande à 864.6nm, ainsi que l'image DART correspondante.

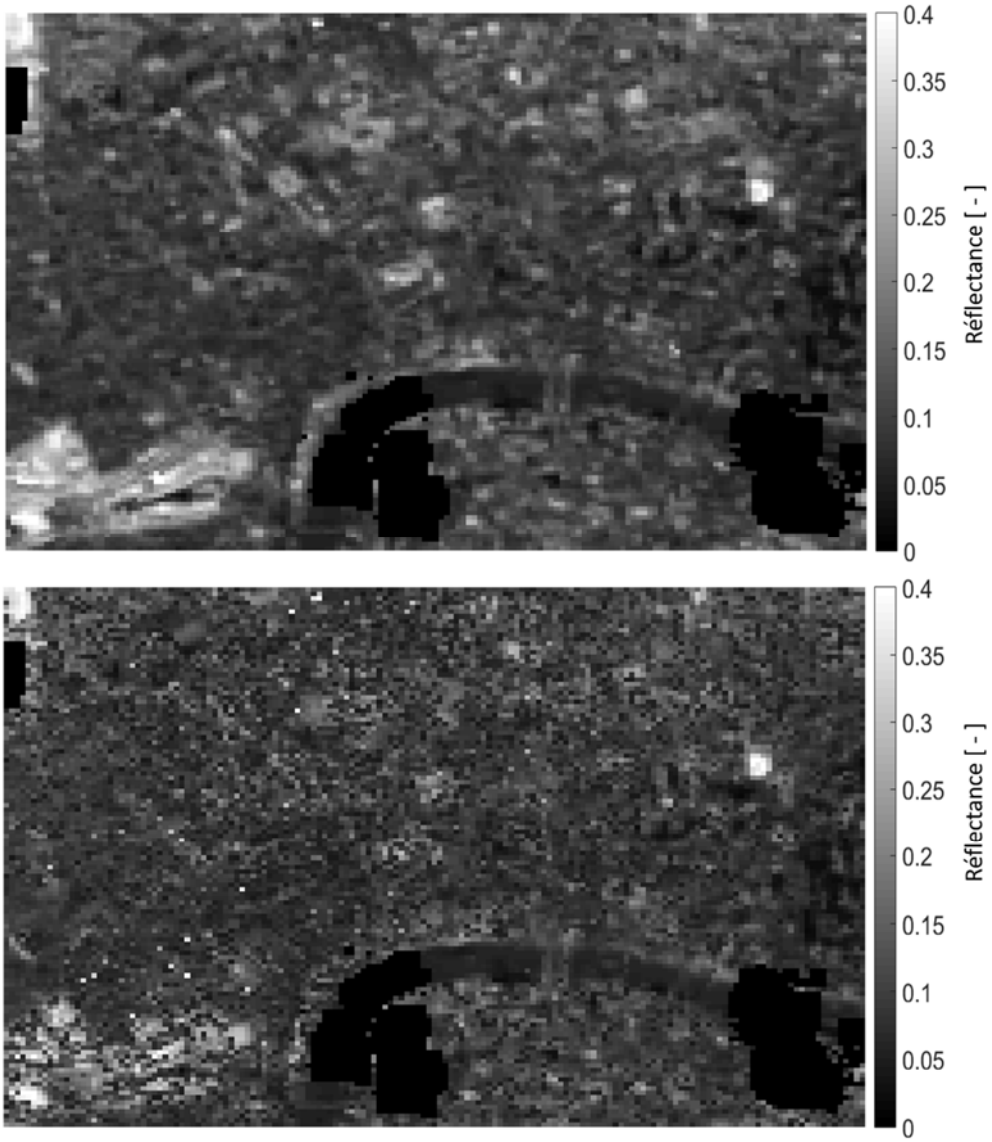


Figure 4.13 : Haut : Image Landsat-8 de Londres au 02.10.2015, à 30m de résolution, avec masque de nuages. Bande 5 (864.6nm) Bas : image DART correspondante après inversion des réflectances de matériau.

Le même type de bruit que pour Bâle est observé dans la Figure 4.13, avec une erreur relative entre les images DART et Landsat-8 de 13.0%. Ce bruit est très présent pour Londres du fait de la plus grande densité et complexité

du bâti, ce qui augmente le nombre des équations à résoudre par groupe de pixel de la maille d'analyse utilisée lors de la comparaison des images DART et satellite pour dériver la réflectance des matériaux présents, surtout avec la résolution de 30m des acquisitions Landsat-8. Cependant, même avec une telle erreur, l'erreur commise sur le bilan radiatif à 100m de résolution est faible.

Le site d'Héraklion comprend une large zone composée uniquement de relief, avec donc une complexité du bâti bien moindre que pour Londres. Ceci explique que dans la Figure 4.14, l'image DART d'Héraklion est beaucoup plus proche de l'image Landsat de Londres. Ainsi, l'erreur relative entre les images Landsat et DART est 2.1%. On note également qu'il n'y a pas de biais observé entre les images de télédétection simulées et réelles, quelle que soit la ville considérée, excepté pour les premières itérations (pour lesquelles la végétation est notamment systématiquement sous-estimée), comme il est observé dans le paragraphe 6.1.

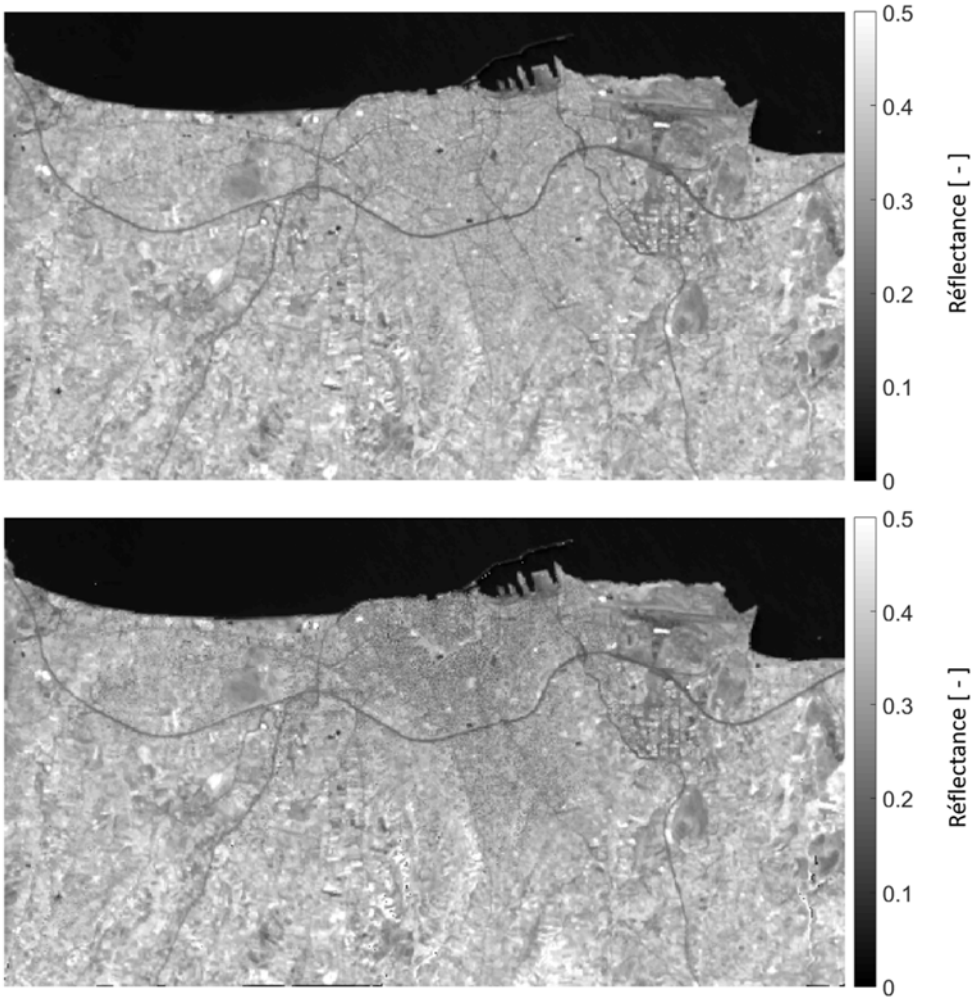


Figure 4.14 : Haut : image Landsat-8 de la ville d'Héraklion au 13.07.2016 à 30m de résolution, avec masque de nuages. Bande 5 (864.6nm) Bas : image DART obtenue après inversion des réflectances de matériau.

Des images ont aussi été simulées dans le domaine thermique via la méthode d'inversion. La Figure 4.15 présente une image de luminance thermique Landsat-8 de la ville d'Héraklion pour le 29.07.2016, dans la bande 10 du capteur (10.895μm), ainsi que l'image simulée par DART correspondante après inversion de la température. La résolution des images de luminance satellite, originalement de 100m, a été ramenée à 30m.

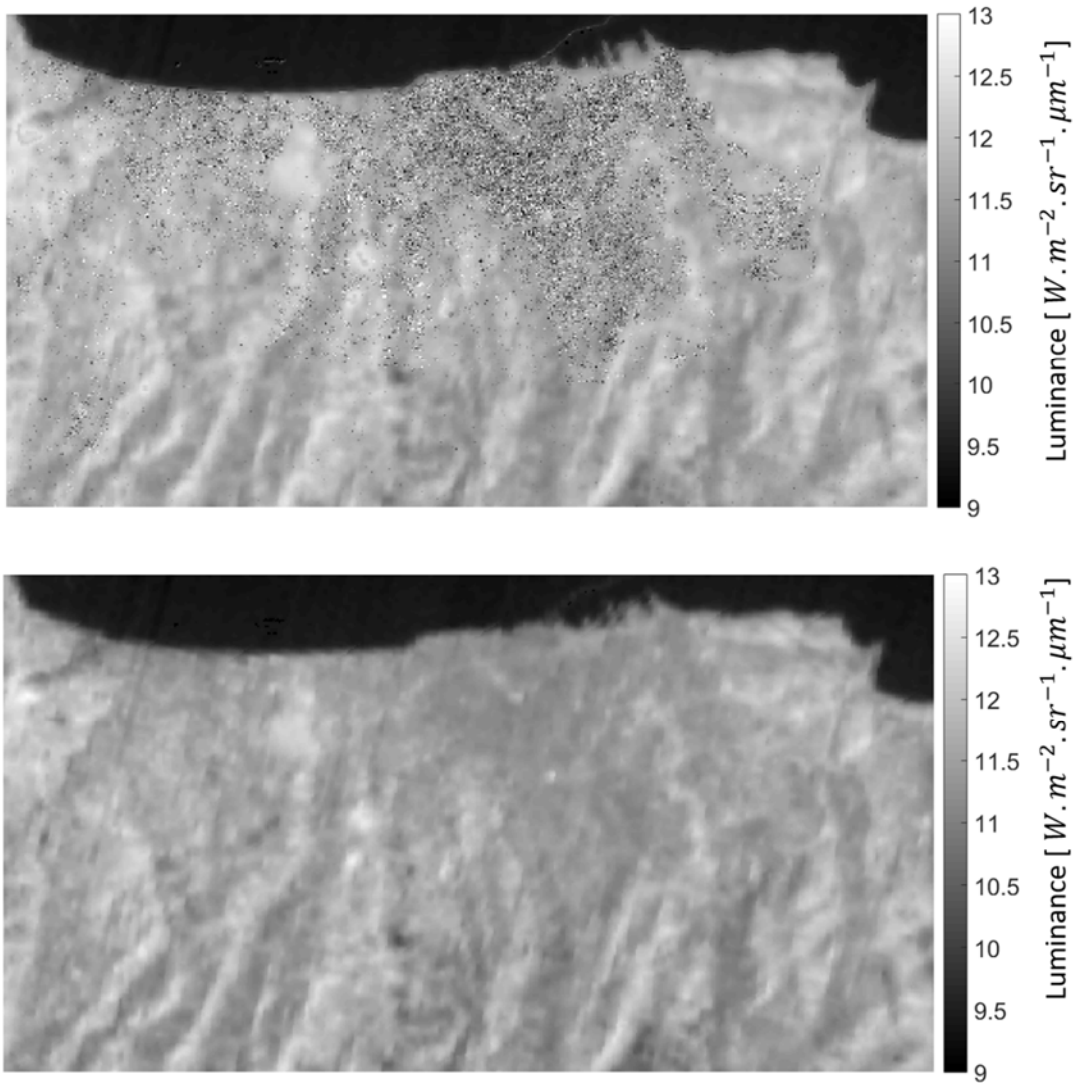


Figure 4.15 : Bas : image Landsat-8 de la ville d'Héraklion au 29.07.2016, corrigée des effets atmosphériques. Bande 10 (10895nm). 30m de résolution. Haut : image DART obtenue par inversion des températures.

La comparaison des images DART et Landsat-8 thermiques montre de très faibles différences hors de la ville (i.e., zones de relief sans bâti) et un bruit au sein de la ville. DART présente une erreur relative moyenne de seulement 1.8%. La Figure 4.16 montre la distribution spatiale de cette erreur relative. Comme déjà noté, l'erreur relative est très faible (< 5%) quand les pixels sont composés d'un élément unique (e.g. mer ou relief). Quand la surface devient plus complexe, c'est-à-dire quand davantage d'éléments différents sont présents dans chaque pixel, l'erreur augmente et devient de l'ordre de 10%. Pour cette simulation d'Héraklion, l'erreur relative moyenne est donc faible en raison du grand nombre de pixels qui comprennent un unique élément. D'autre part, l'effet de la complexité des pixels et du bruit induit est amplifié par le fait que les images de luminance thermique, même si ré-échantillonnées à 30m, sont originalement à 100m, ce qui augmente le nombre d'éléments par pixel.

La Figure 4.17 et la Figure 4.18 illustrent la comparaison d'images de luminance thermiques DART et Landsat, respectivement pour Bâle et Londres. Un bruit conséquent apparaît au niveau des centres-villes. Cependant, ces images sont très proches : l'erreur relative moyenne est faible, avec 2.1% pour Bâle (Figure 4.17) et 2.2% pour Londres (Figure 4.18). La Figure 4.19 affiche la distribution spatiale de ces erreurs. Comme déjà indiqué, les zones de pixels purs sont plus fidèlement inversées (e.g., zone Sud-Ouest de Bâle) D'autre part, la méthode d'inversion initiale appliquée à Landsat-8 est plus efficace dans le thermique qu'aux courtes longueurs d'onde. Ce résultat illustre pourquoi les efforts ont plus porté sur l'amélioration de l'inversion dans les courtes longueurs d'onde. Cependant, comme souligné dans le paragraphe suivant, les cartes de bilan radiatif à 100m de résolution

éstimées avec ces propriétés relativement imprécises sont très proches de la réalité, même avec la méthode d'inversion préliminaire appliquée aux images Landsat-8.

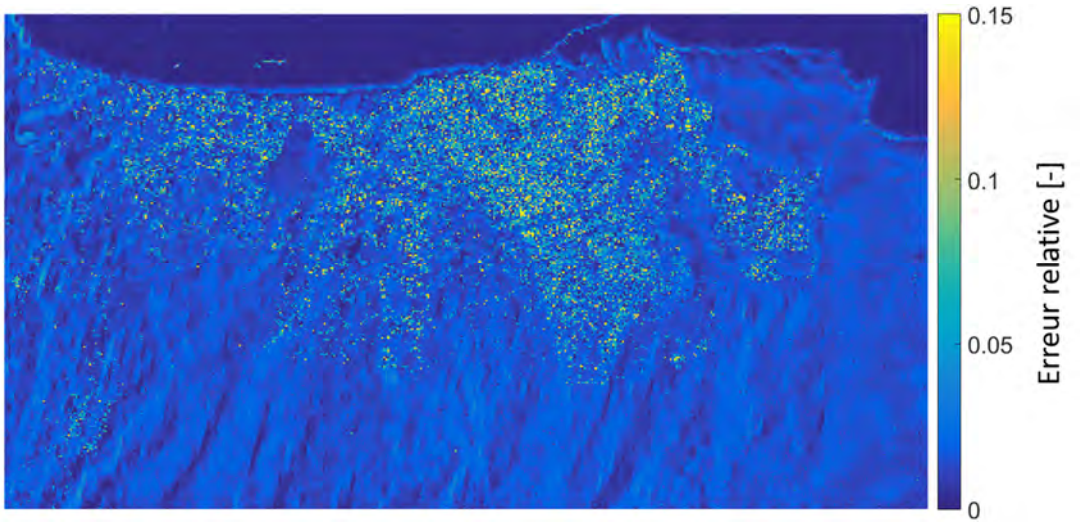


Figure 4.16 : Carte d'erreur relative entre une image de référence Landsat-8 du 29.07.2016 et une image DART pour la bande B10 du capteur Landsat-8 (10895nm)

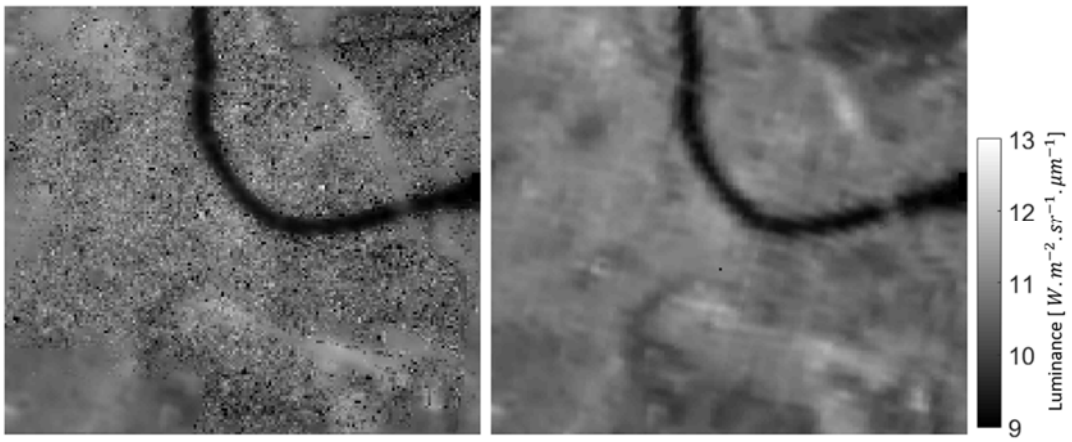


Figure 4.17 : Droite : image Landsat-8 de Bâle au 30.08.2015. Bande 10 (10895nm) à 30m de résolution, corrigée des effets atmosphériques. Gauche : image DART correspondante après inversion de la température.

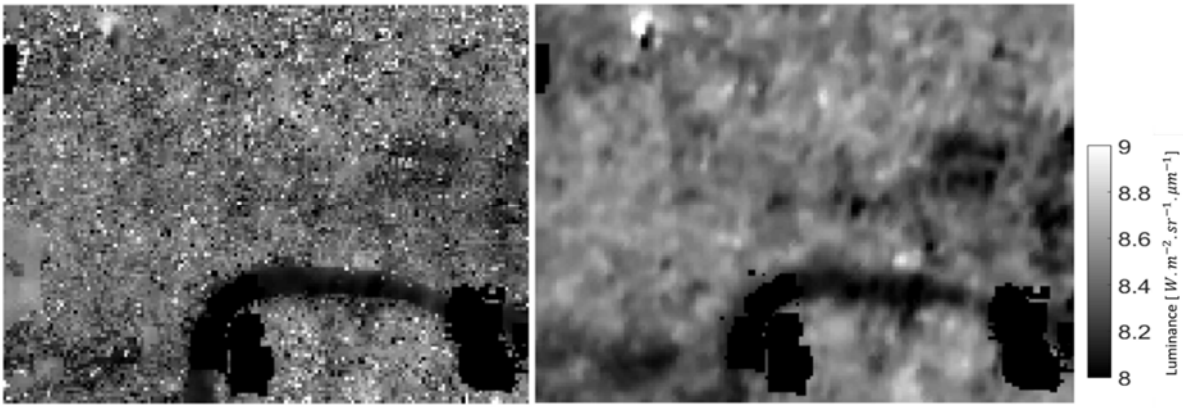


Figure 4.18 : Droite : image Landsat-8 de Londres du 02.10.2015, corrigée des effets atmosphériques à 30m de résolution. Bande 10 (10895nm). Gauche : image DART après inversion des températures. Les nuages sont masqués dans les deux images.

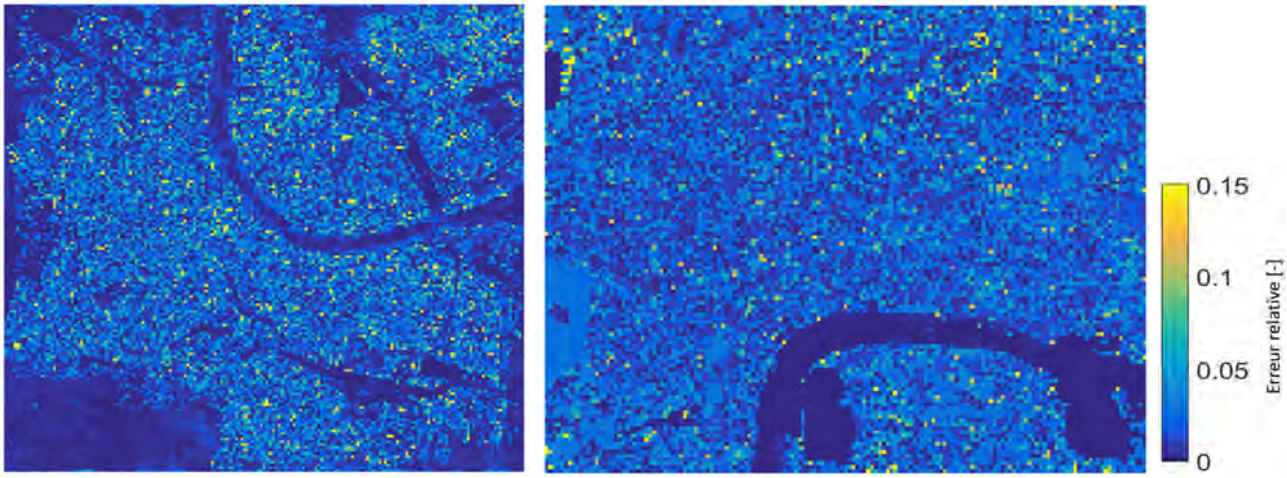


Figure 4.19 : Cartes d'erreurs relatives des images DART obtenues par inversion de l'image Landsat-8 dans la bande 10. Gauche : Bâle au 30.08.2015. Droite : Londres au 02.10.2015.

4. Cartes de Q^* au passage du satellite

De manière classique, la construction de cartes de bilan radiatif passe par la détermination de cartes d'albédo aux courtes longueurs d'onde, et de cartes d'exitance aux grandes longueurs d'onde. Ces deux produits, une fois combinés aux valeurs d'éclairement aux courtes et grandes longueurs d'onde, permettent d'obtenir la carte de bilan radiatif. L'obtention de cette carte avec la méthode d'inversion, implique d'utiliser les images acquises par un satellite (e.g., Landsat-8) qui observe la Terre dans les courtes et grandes longueurs d'onde. Si seulement des images thermiques sont disponibles, il convient d'estimer les réflectances des matériaux, par exemple par extrapolation de cartes de réflectance de matériaux précédemment établies. Si les données sont seulement disponibles dans les courtes longueurs d'onde (e.g. Sentinel-2), seules les cartes de Q^*_{sw} peuvent être créées.

Le bilan radiatif au passage du satellite a été dérivé de plusieurs capteurs satellites : Landsat-8, pour les cartes Q^* via le calcul direct de Q^*_{sw} et Q^*_{lw} ; ASTER, pour le calcul de Q^*_{lw} et possiblement Q^* si une image aux courtes longueurs d'onde a été récemment acquise ; Landsat-7, combiné à ASTER, si cette combinaison de capteurs satellites est plus proche de la date considérée qu'une image Landsat-8 ; Sentinel-2, pour les cartes de Q^*_{sw}, et aussi pour créer des séries temporelles Q^* à l'aide de données MODIS (cf. paragraphe 5). Ces cartes sont illustrées ci-dessous, ainsi que des tableaux récapitulatifs de validation de cette inversion au passage du satellite.

La Figure 4.20 présente un exemple de carte d'albédo, d'exitance thermique, et de bilan radiatif total de la ville d'Héraklion, issue de l'inversion d'une image Landsat-8 acquise le 29.07.2016 à 8h53. Plusieurs observations peuvent être faites. Tout d'abord, un effet de bord est visible au bas de l'image (et plus légèrement à droite). Cet effet de bord est dû à la gestion des frontières de la scène par le modèle DART. Ici, le paysage est supposé être infiniment répétitif, si bien que les rayons lumineux qui sortent par une face verticale de la scène ré-entrent dans cette scène par la face verticale symétrique. Cette approche est en général un bon compromis. Cependant, des imprécisions surviennent si l'altitude d'un bord de la scène diffère beaucoup de l'altitude du bord symétrique de la scène, comme c'est le cas ici entre le bord nord (mer) et le bord sud (relief). La grille finale étant incluse dans cette grille simulée, cet effet de bord disparaît naturellement. Ensuite, on observe que l'albédo est comme attendu plus faible dans la ville, avec une valeur de l'ordre de 0.15. Cette faible valeur, combinée à la basse exitance thermique du centre-ville, implique une valeur finale de bilan radiatif élevée, ce qui est attendu d'une ville dans un climat méditerranéen en plein été. On observe également des valeurs de Q^* plus faibles en s'éloignant de la ville, en partie dû à la différence de matériaux et aux ombres induites par le relief.

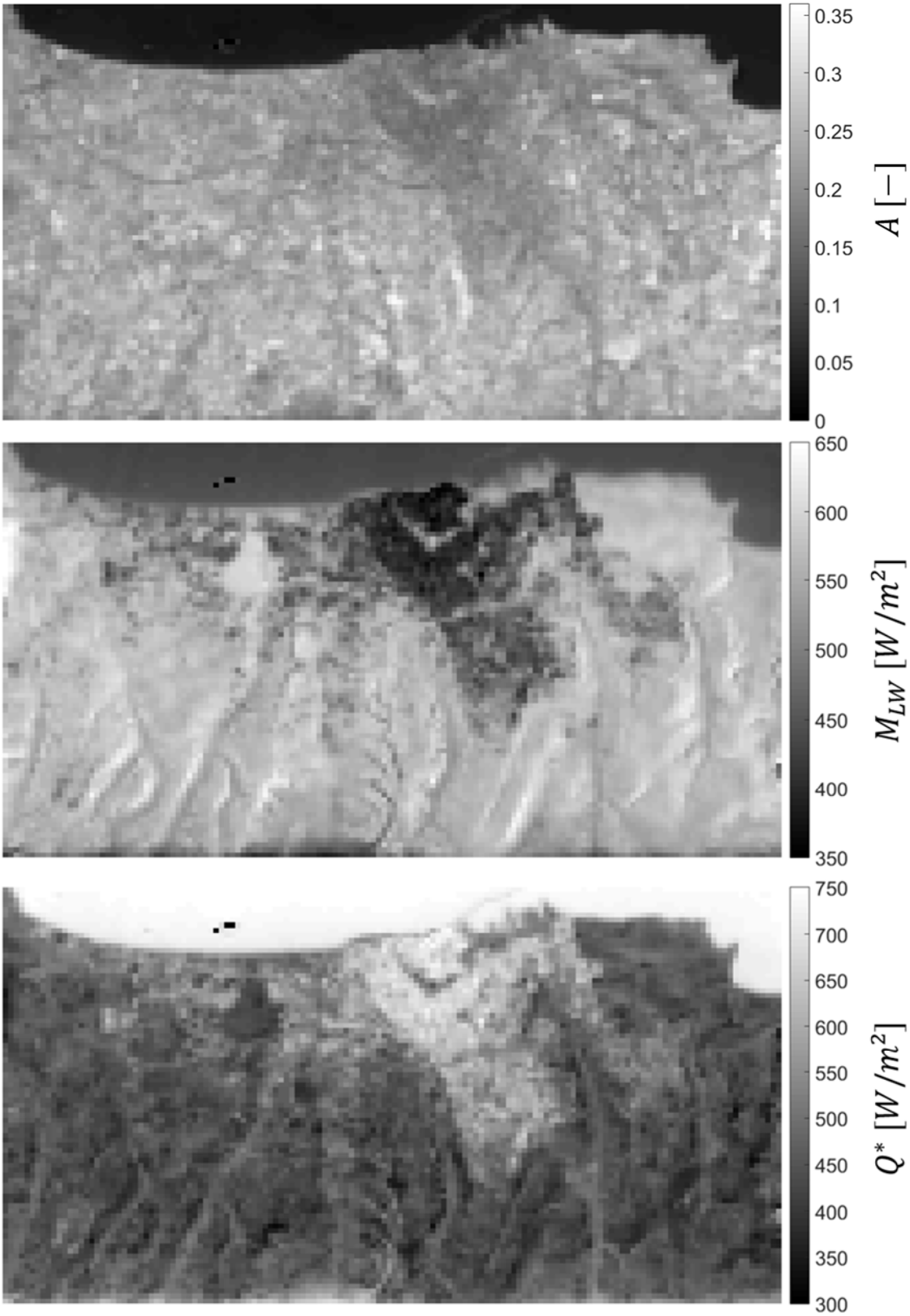


Figure 4.20 : Cartes simulées d'albédo (en haut), d'exitance thermique (au milieu), et de bilan radiatif (en bas) pour la ville d'Héraklion, à partir d'une image Landsat-8 du 29.07.2016 à 8h53, à 100m de résolution, corrigée des effets atmosphériques.

La Figure 4.21 présente un résultat similaire pour Londres, à partir d'une image Landsat-8 du 08.07.2013 à 11h00. Des effets de bords affectent les premières et dernières lignes et colonnes de pixels. En effet, pour Londres, la

grille d'analyse est égale à la taille de la scène simulée, si bien que ces lignes et colonnes ne peuvent être éliminées. La tour utilisée pour la validation est hors de cette zone. Le bilan radiatif est maximal pour la rivière, comme attendu. Il est aussi très élevé pour deux quartiers contenant de hauts immeubles, ce qui augmente naturellement le bilan radiatif local.

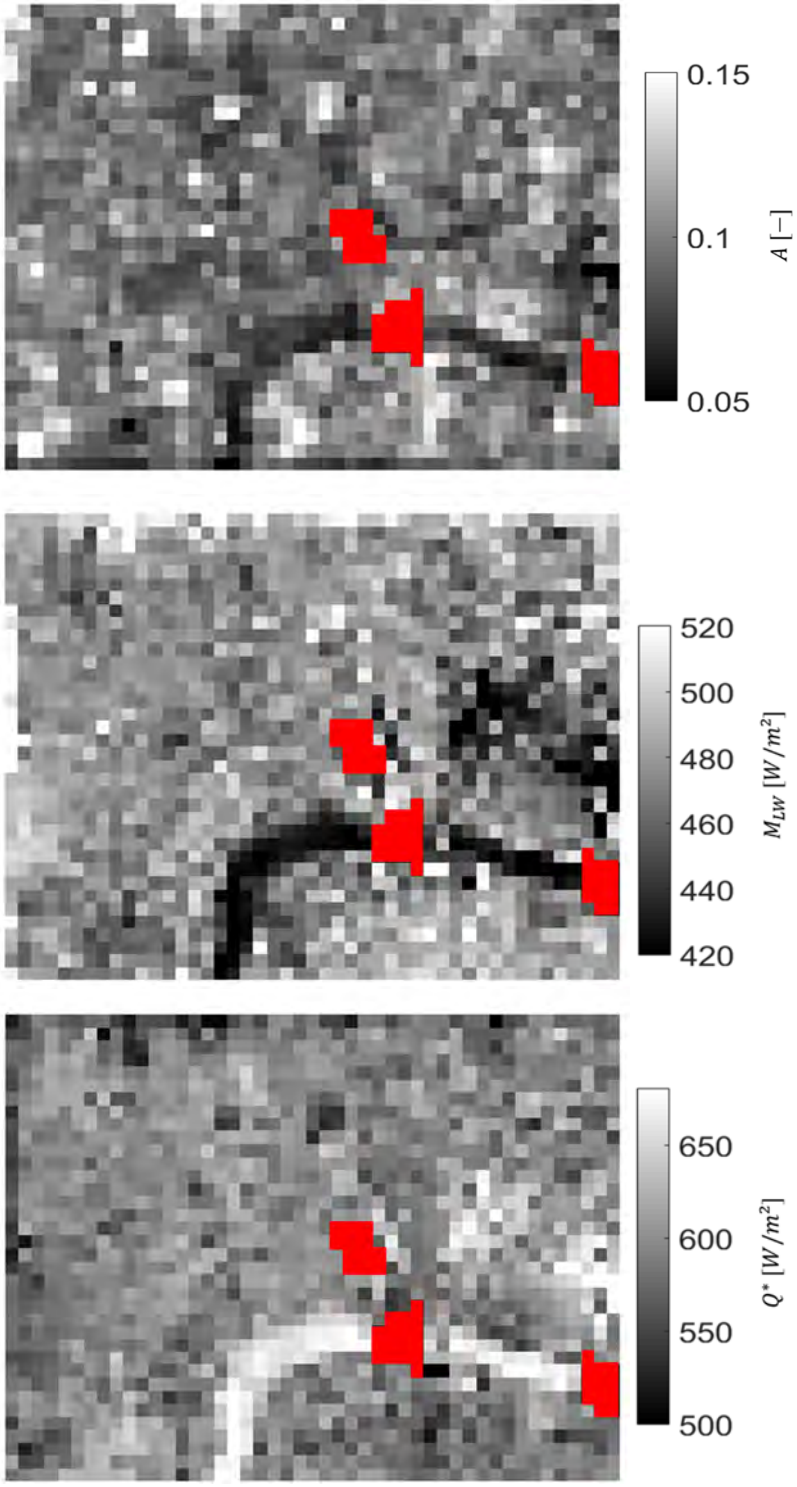


Figure 4.21 : Cartes d'albédo (haut), d'exitance thermique (milieu), et de bilan radiatif (bas) de Londres, dérivées d'une image Landsat-8 du 08.07.2016 à 11h00, à 100m de résolution. Masques de nuages en rouge.

La Figure 4.22 présente un résultat pour la ville de Bâle obtenu avec la combinaison d'une image ASTER (pour le thermique) du 28.03.2014 à 10h40 et d'une image Landsat-7 (pour les courtes longueurs d'onde) du 28.03.2014 à 10h13. Le bilan radiatif de la zone en bas à gauche de l'image est sous-estimé, car le bâti de cette zone est absent de la base de données géométriques urbaine. En effet, quoique similaire à la zone bâtie de la ville, le bilan radiatif y est beaucoup plus bas d'environ 30 à 40 W/m², car l'absence bâti dans la maquette urbaine induit un plus fort albédo et par suite une plus forte exitance. Le reste de l'image est conforme aux attentes, avec en particulier un bilan radiatif maximum pour la végétation et la rivière. Ce résultat illustre la capacité de la méthode d'inversion à gérer des acquisitions provenant de capteurs satellites différents.

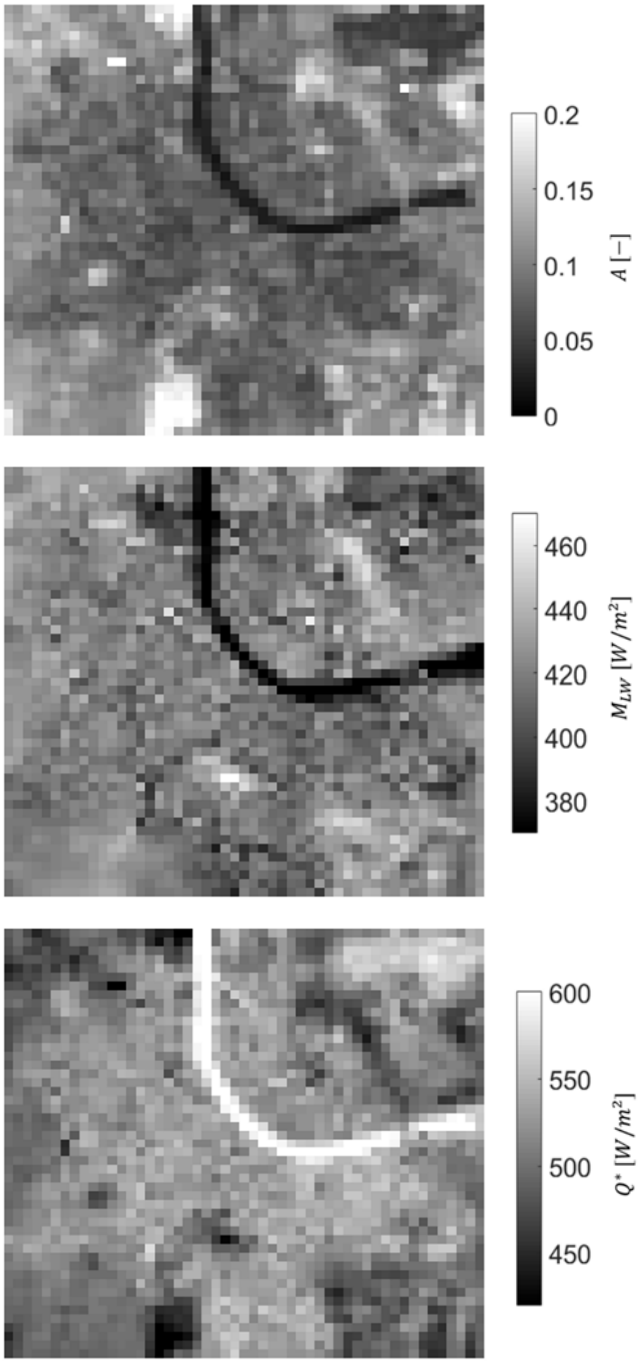


Figure 4.22 : Cartes simulées d'albédo (haut), d'exitance thermique (milieu), et de bilan radiatif (bas) de Bâle, à partir d'une image Landsat-7 du 28.03.2014 à 10h13 et d'une image ASTER du 28.03.2014 à 10h40, à 100m de résolution, corrigée des effets atmosphériques.

La Figure 4.23 montre des cartes d'albédo dérivées d'images Sentinel-2 pour chaque ville. Les comportements spatiaux de l'albédo sont conformes aux attentes à priori en fonction des types de paysage rencontré. Les réflectances de matériau dérivées de ces images Sentinel 2 sont celles utilisées pour créer les LUTs utilisés pour générer les séries temporelles de cartes Q^*. Les bilans radiatifs simulés Q^* aux emplacements des tours de flux de Bâle et Héraklion ont été sauvegardés pour chaque image satellite utilisée, de manière à évaluer leur précision par comparaison avec les bilans radiatifs mesurés par les tours de flux .

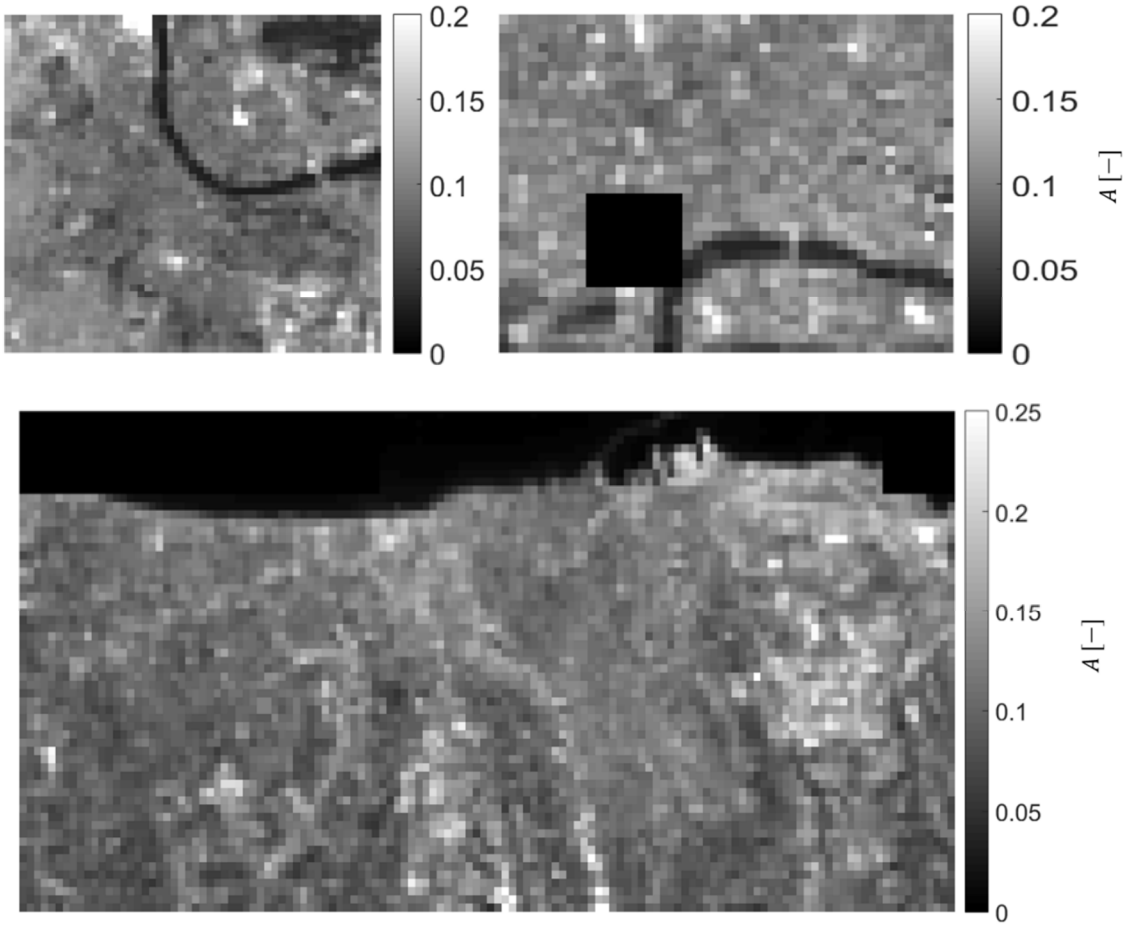


Figure 4.23 : Cartes d'albédo des 3 villes, à 100m de résolution, dérivées d'images Sentinel-2 du 05.05.2016 à 10h30 pour Bâle, du 29.01.2016 à 09h04 pour Londres, et du 04.05.2016 à 10h59 pour Héraklion, avec un masque couvrant les nuages.

Le Tableau 4.2 résume les résultats de la validation réalisée avec les tours de flux pour 19 images Landsat-8 de Bâle : valeurs mesurées et simulées par DART du bilan radiatif total et courtes longueurs d'onde, et exitance aux grandes longueurs d'onde. Le Tableau 4.3 résume ces résultats pour 4 images Landsat-8 de Londres. Pour cette ville, la validation des cartes obtenues pour la date d'acquisition de l'image satellite utilisée est limitée en raison du faible nombre d'images satellites pour lesquelles la tour de flux n'est pas couverte par des nuages. On définit la RMSE (Root Mean Square Error) par la racine de la moyenne de la différence au carré entre les simulations et les observations. On a :

- Ville de Bâle : le RMSE du bilan radiatif total est 10.8 W/m², ce qui par rapport aux mesures correspond à une erreur relative de 1.9%. Pour le bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde, le RMSE est 8.6 W/m², soit une erreur de pour 1.1%. Pour l'exitance thermique, le RMSE est 11.3 W/m², soit une erreur de 1.6%.
- Ville de Londres : le RMSE du bilan radiatif total est 13.1 W/m², soit une erreur relative de 2.8%. Pour le bilan radiatif aux courtes longueurs d'onde, le RMSE est 12.7 W/m² , soit une erreur de 2.0%. Pour l'exitance thermique, le RMSE est 4.44 W/m², soit une erreur de 1.0%.

La précision est similaire pour les composantes courtes et grandes longueurs d'onde du bilan radiatif. Elle est très bonne, mais l'approche utilise peu de points de comparaison. Afin de multiplier ce nombre de points, le test de validation a ensuite été réalisé avec des séries temporelles de Q^*, calculées avec la méthode des LUT.

Date	Q* [W/m²]		Q*$_{SW}$ [W/m²]		M$_{LW}$ [W/m²]	
	BKLI	DART	BKLI	DART	BKLI	DART
05.08.2015	612	616	725	731	492	488
15.08.2013	582	580	706	712	463	461
21.08.2015	582	574	700	709	468	477
30.08.2015	544	546	661	663	507	497
01.10.2015	404	415	500	510	383	395
02.11.2015	310	293	405	390	377	379
04.07.2015	622	630	755	735	546	510
05.06.2013	665	641	790	788	469	489
08.06.2014	632	623	769	756	531	527
11.06.2015	639	626	765	752	493	493
14.03.2015	413	406	524	519	370	373
14.10.2014	409	391	503	496	418	429
15.04.2015	578	587	722	722	461	452
20.03.2014	483	477	598	594	413	414
24.04.2015	596	599	740	742	452	452
25.04.2013	601	612	734	734	470	459
26.02.2015	384	374	485	478	355	358
14.07.2013	621	629	752	757	489	486
17.07.2014	645	652	767	769	503	498

Tableau 4.2 : Cartes d'albédo des 3 villes, à 100m de résolution, dérivées d'images Sentinel-2. Bâle : 05.05.2016 à 10h30. Londres : 29.01.2016 à 09h04. Héraklion : 04.05.2016 à 10h59. Masque de nuages.

Date	Q* [W/m²]		Q*$_{SW}$ [W/m²]		Q*$_{LW}$ [W/m²]	
	KSSW	DART	KSSW	DART	KSSW	DART
06.06.2013	599	616	735	745	-136	-129
08.07.2013	572	583	707	719	-134	-135
02.10.2015	320	334	432	444	-111	-109
16.02.2016	199	208	296	312	-97	-102

Tableau 4.3 : Mesures de la tour KSSW et simulations DART du bilan radiatif total, du bilan radiatif aux courtes longueurs d'onde et exitance aux grandes longueurs d'onde, dérivées d'images Landsat-8 de Londres.

5. Séries temporelles

Des séries temporelles de cartes de bilan radiatif ont été créées à partir de bases de données d'albédo pré calculées utilisant des propriétés optiques issues de l'inversion d'images Sentinel-2, avec mise à jour des cartes d'albédo à chaque acquisition Sentinel-2, et des températures et émissivités de surface issues d'acquisitions MODIS. Pour l'année 2016, 5 images Sentinel-2 ont été utilisées pour mettre à jour des propriétés optiques de Londres, 11 pour Bâle, et 15 pour Héraklion. Ainsi, il a été possible de créer une carte de bilan radiatif, d'albédo et d'exitance thermique pour chaque acquisition MODIS (Terra et Aqua) utilisable au cours de l'année 2016 et

du début de 2017, pour chaque ville. Le Tableau 4.4 indique le nombre de dates où les cartes ont été générées, avec indication du nombre de dates où les tours de flux utilisées ne sont pas couvertes par des nuages.

	MODIS Aqua		MODIS Terra	
	Total	Tour non couverte	Total	Tour non couverte
Bâle	200	161	205	155
Londres	223	141	201	156
Héraklion	352	-	369	-

Tableau 4.4 : Nombre de dates traitées pour les séries temporelles. La colonne 'tour non couverte' donne le nombre d'images utilisables pour la validation. Héraklion n'a pas de tour de flux utilisable pour la validation.

Un total de 1550 dates a donc été traité dans les séries temporelles, dont 613 ont été utilisables pour leur validation à l'aide des mesures réalisées par les tours de flux. Ces dates incluent des images de jour et de nuit. Pour Bâle, les acquisitions de jour sont entre 9h50 et 13h10, et de nuit entre 20h30 et 2h40. Pour Londres, les acquisitions de jour sont entre 11h et 13h35 et de nuit entre 21h et 3h15. Pour Héraklion, les acquisitions de jour sont entre 09h10 et 11h50 et de nuit entre 19h45 et 00h50.

La mise à jour régulière des propriétés optiques a montré des changements de Q^* très importants sur les zones urbaines couvertes de végétation. En effet, la phénologie de la végétation provoque le changement naturel de ses propriétés optiques durant l'année. De même, Q^* varie beaucoup en raison de l'évolution de la proportion d'éclairement solaire direct et diffus selon la position du soleil. Cette évolution est automatiquement prise en compte par le calcul de Q^* à partir des bases de données de cartes d'albédo et des mesures locales d'éclairement solaire. De plus, la distribution spatiale de Q^* varie aussi localement en fonction des ombres au cours de la journée et de l'année du fait du déplacement du Soleil.

Pour chaque ville et chaque pixel des cartes de Q^*, il a été possible de tracer l'évolution de Q^* au cours de l'année. Ainsi, la Figure 4.24 illustre une telle évolution pour un site donné de chaque ville durant l'année 2016. Pour Bâle et Londres, le pixel choisi est celui du l'emplacement de la tour de flux, tandis qu'un point arbitraire a été choisi pour Héraklion. Dans les 3 cas, le pixel choisi est un point du centre-ville. On remarque une évolution régulière durant l'année, avec un maximum en été et un minimum en hiver pour les trois villes. De manière générale, chaque courbe a plus de points en été, car la couverture nuageuse est moindre. Les valeurs négatives correspondent aux acquisitions nocturnes durant lesquelles seule l'exitance et l'éclairement thermiques participent au bilan radiatif urbain. La régularité de ce bilan radiatif est également due au fait que les dates considérées dans cette série temporelle sont des dates où le ciel est principalement dégagé.

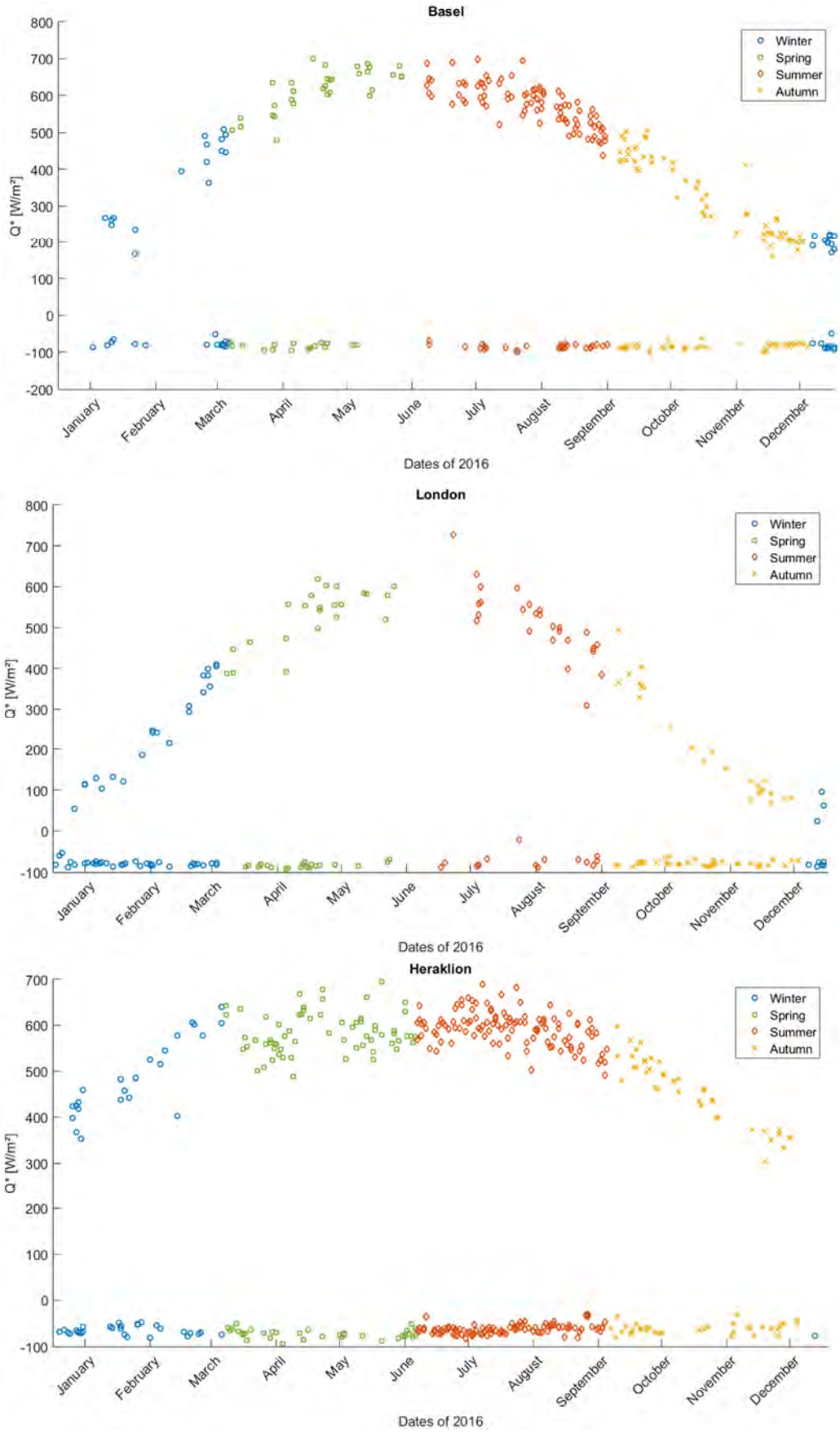


Figure 4.24 : Evolution temporelle du bilan radiatif en un point donné par site urbain, durant l'année 2016.

La Figure 4.25 et la Figure 4.26 montrent les résultats des comparaisons entre les simulations et les mesures des tours de flux. La corrélation est très bonne : haut coefficient r^2 (>0.99) et faible RMSE. $RMSE_S$ désigne la RMSE systématique, c'est-à-dire la racine de la moyenne des différences au carré entre les régressions des simulations et les observations. Sa valeur donne une information sur l'erreur linéaire commise par le modèle de régression. $RMSE_U$ désigne la RMSE non-systématique, c'est-à-dire la racine de la moyenne des différences au carré entre les régressions des simulations et les simulations. Elle correspond à une mesure des erreurs dues aux procédés aléatoires affectant les régressions (Wilmott, 1981; Wilmott et al., 1985; Wilmott, Robeson & Matsuura, 1981). Les erreurs relatives absolues par rapport aux mesures sont aussi très faibles, avec une valeur de 4.45% pour Bâle et de 4.35% pour Londres sur année 2016. Ce résultat justifie hypothèses simplificatrices utilisées pour construire les bases de données et les séries temporelles. En effet, quoique supérieure à l'erreur commise sur la valeur de Q^* obtenue par l'application de la méthode d'inversion directement avec l'image acquise à chaque date d'acquisition des images satellites (e.g., erreur de 1.9% pour Bâle ; cf paragraphe 4), cette erreur est en général inférieure à 5%. De plus, la précision des estimations est indépendante de la saison considérée, et peu de mises à jour des propriétés optiques des éléments ont été réalisées (5 pour Londres, 11 pour Bâle), ce qui conforte l'hypothèse de l'évolution lente de ces propriétés dans le paysage urbain.

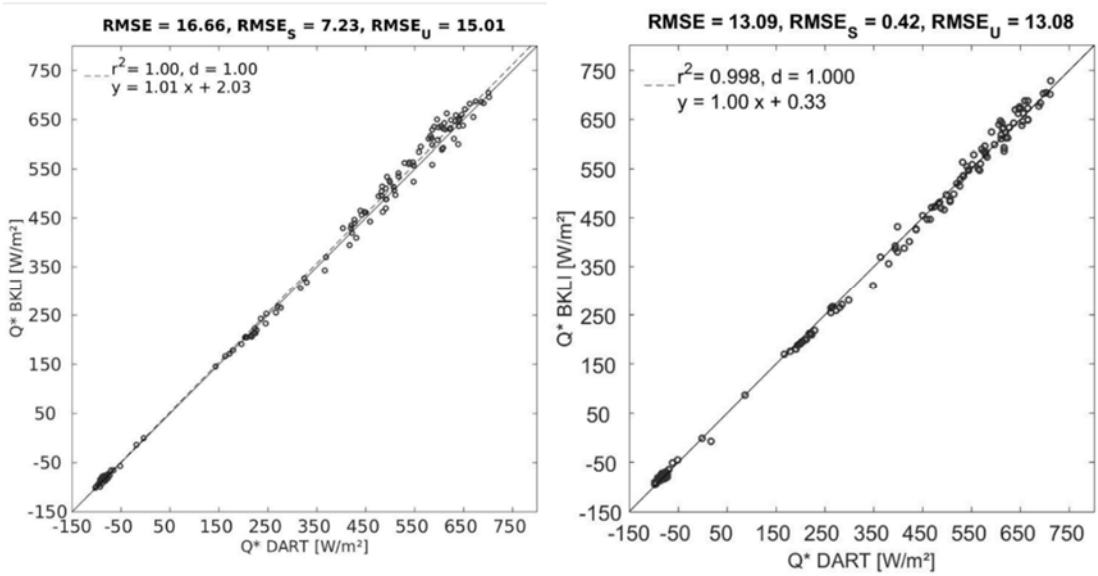


Figure 4.25 : Corrélogrammes de comparaison des valeurs de Q^* simulées et mesurées par la tour BKLI de la ville de Bâle, pour la série MODIS-A (à gauche) et MODIS-T (à droite).

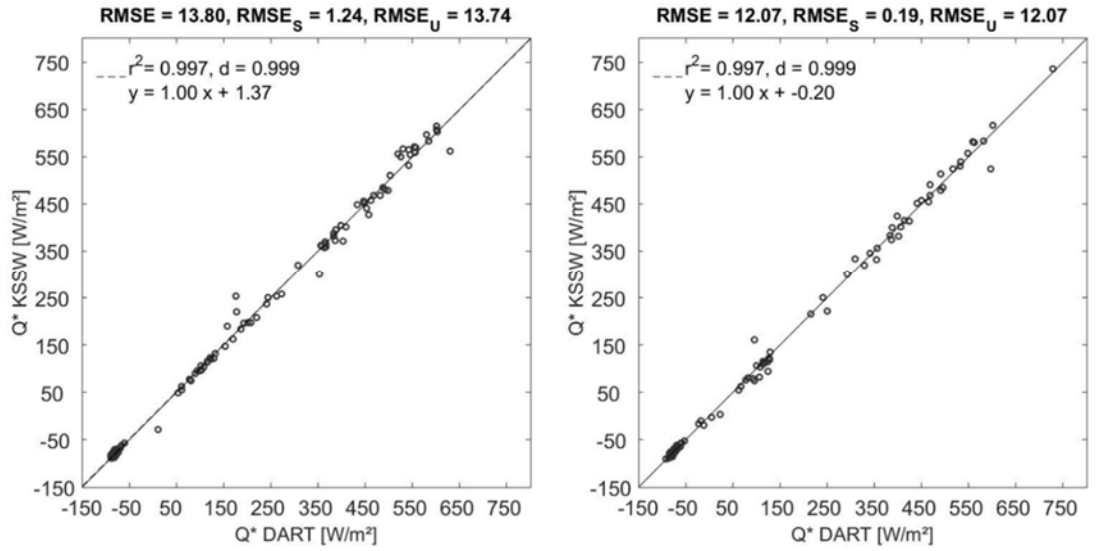


Figure 4.26 : Corrélogrammes de comparaison entre les valeurs simulées et mesurées de Q^* au niveau de la tour de flux KSSW, dans la ville de Londres, pour la série MODIS-A (à gauche) et MODIS-T (à droite).

Comme dans le paragraphe précédent, les résultats aux courtes et grandes longueurs d'ondes peuvent être distingués. Cette distinction permet notamment d'observer l'ampleur de l'approximation faite en utilisant la méthode thermique simplifiée. La Figure 4.27 et la Figure 4.28 affichent les valeurs simulées et mesurées de Q^*_{sw} pour Bâle et Londres, respectivement. La Figure 4.29 et la Figure 4.30 montrent les résultats concernant Q^*_{sw}.

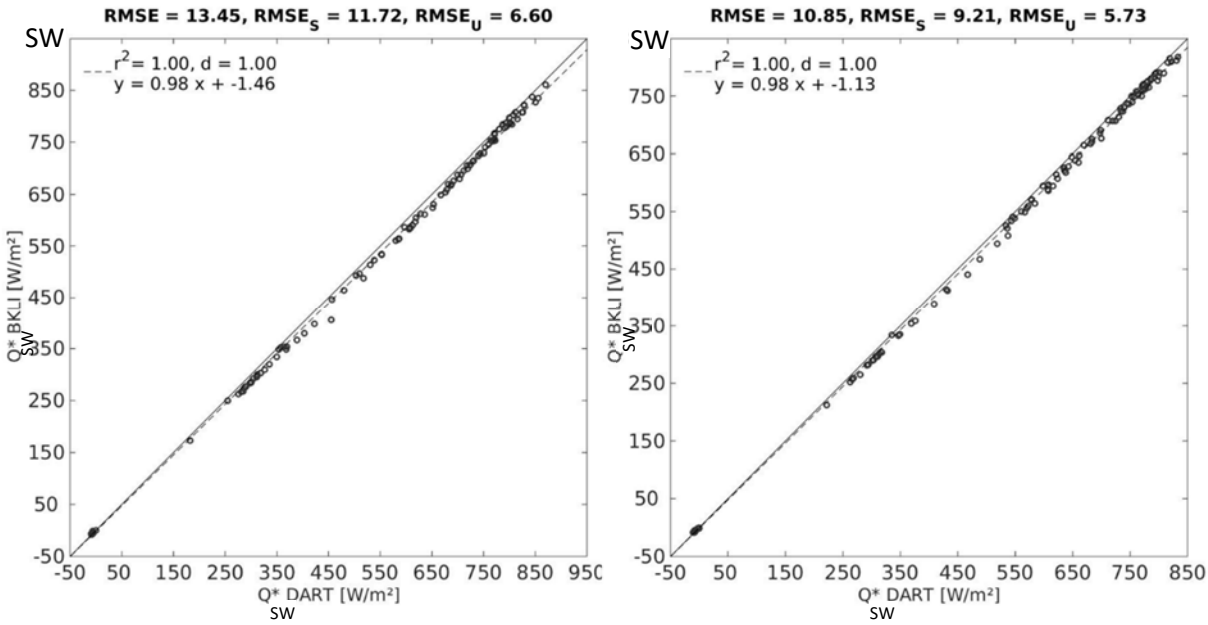


Figure 4.27 : Corrélogrammes de comparaison entre les valeurs de Q^*_{SW} simulées et mesurées au niveau de la tour de flux BKLI de la ville de Bâle, pour la série MODIS-A (à gauche) et MODIS-T (à droite).

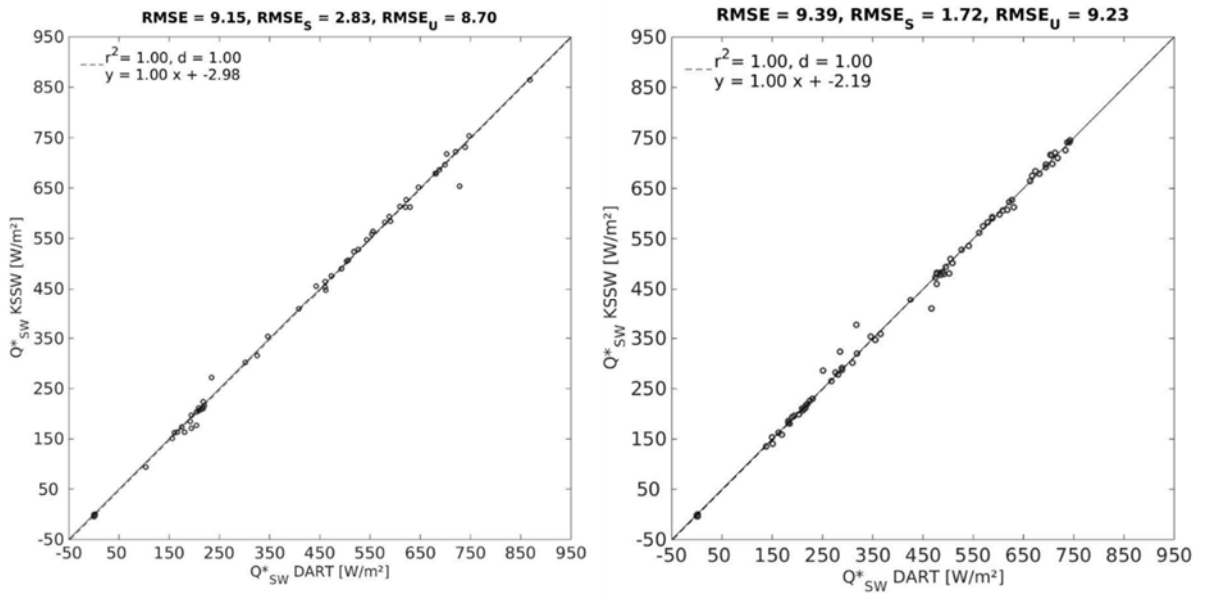


Figure 4.28 : Corrélogrammes de comparaison entre les valeurs de Q^*_{SW} simulées et mesurées au niveau de la tour de flux KSSW de Londres, pour la série MODIS-A (à gauche) et MODIS-T (à droite).

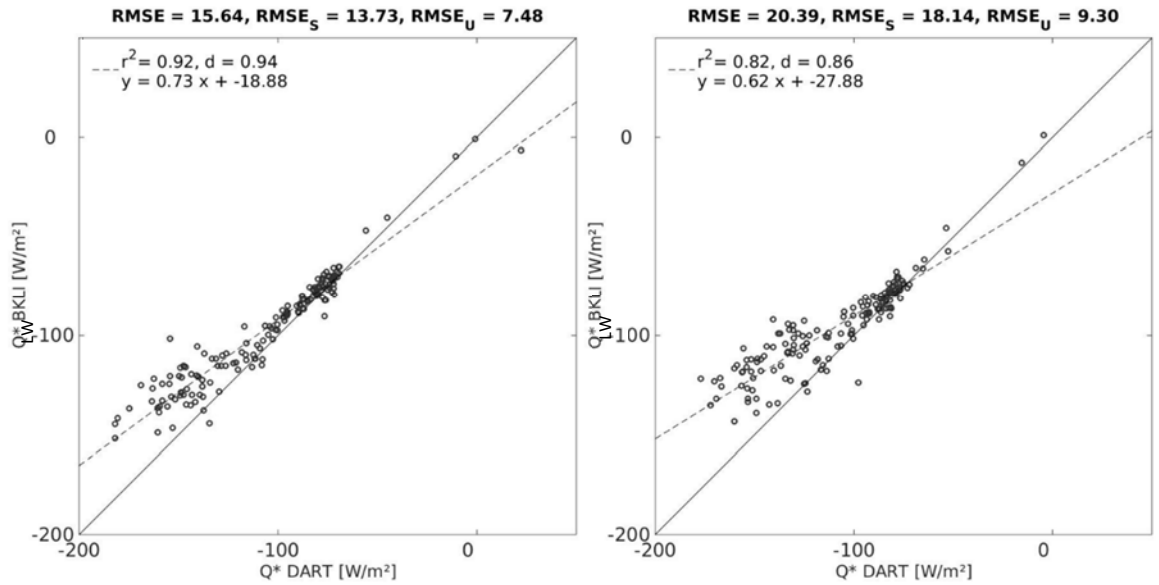


Figure 4.29 : Corrélogrammes de comparaison entre les valeurs de Q^*_{LW} simulées et mesurées par la tour de flux BKLI de la ville de Bâle, pour la série MODIS-A (à gauche) et MODIS-T (à droite)

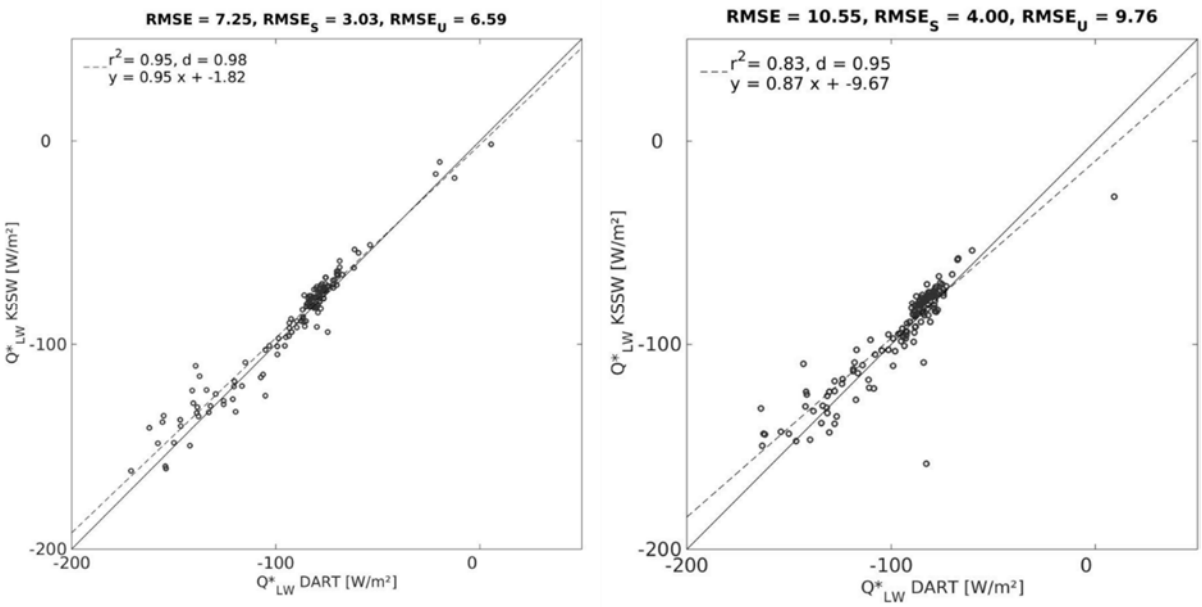


Figure 4.30 : Corrélogrammes de comparaison entre les valeurs de Q^*_{lw} simulées et mesurées au niveau de la tour KSSW de la ville de Londres, pour la série MODIS-A (à gauche) et MODIS-T (à droite)

Ces figures permettent plusieurs observations. La principale est que la méthode utilisée pour la création de séries temporelles dans le domaine thermique implique une réelle perte de précision. Cependant, sans une nouvelle approche, elle est nécessaire car la comparaison itérative pour chaque acquisition satellite thermique dans la création de séries temporelles de cette ampleur n'est pas réalisable. On observe par contre que l'estimation du bilan radiatif dans les courtes longueurs d'ondes est très précise. En effet, pour la combinaison des deux séries temporelles sur Bâle, on trouve une erreur relative moyenne de 2.7%, et de 1.1% sur Londres. On observe également que pour le cas de Bâle, la majeure partie de l'erreur provient d'un biais systématique. Ce biais est attribué à la réflectance des murs. En effet, vu que les images utilisées pour l'inversion sont pour une observation au nadir, les murs ne sont pas visibles. Cependant, ils affectent directement le bilan radiatif et indirectement les images satellites par le biais des diffusions multiples. Les résultats suggèrent que la réflectance des murs a été

paramétrée à une valeur trop basse (au moins dans les environs de la tour de flux), ce qui explique une surestimation de Q^*_{sw}. Plus de détails sont donnés à ce sujet dans le paragraphe 6.

La méthode a aussi été appliquée aux premières images Sentinel-3 disponibles à la fin de l'étude, de la même manière que pour les données MODIS. Les résultats des séries temporelles résultantes sont similaires, comme le montre la Figure 4.31 qui présente les comparaisons de Q^* simulées et mesurées au niveau des tours de flux de Bâle et Londres dans cette nouvelle série temporelle. Ces séries ont été générées à partir de 66 acquisitions Sentinel-3 du 17.11.2016 au 12.06.2017 pour Londres, et de 117 du 17.11.2016 au 27.09.2017 pour Bâle.

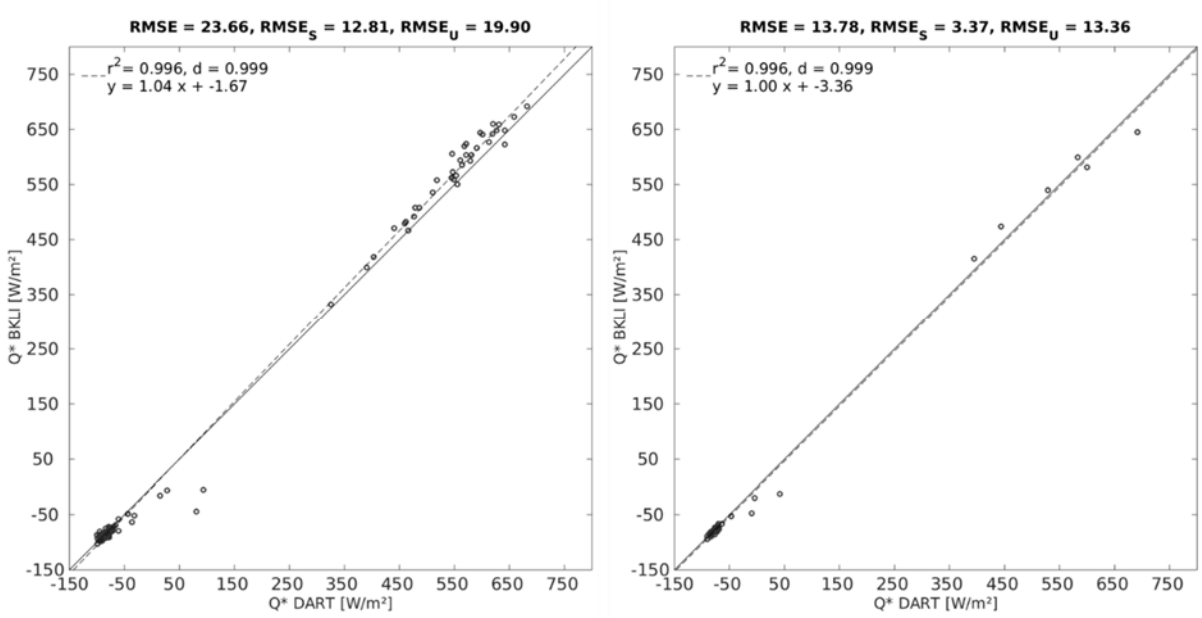


Figure 4.31 : Corrélogrammes de comparaison entre les valeurs de Q^* simulées et mesurées au niveau des tours de flux BKLI à Bâle (droite) et KSSW à Londres (gauche), pour la série d'acquisition de Sentinel-3

6. Etudes de sensibilité

6.1. Impact des itérations

Ce paragraphe présente une analyse du fonctionnement des itérations successives de la méthode de comparaison des images simulées et satellites, avec en particulier l'évolution des images simulées. L'exemple utilisé est celui de la simulation d'une image de réflectance de la ville de Bâle, pour la bande 8a de Sentinel-2 (865nm), en utilisant l'acquisition du 24.06.2016 à 10h37. La Figure 4.32 présente l'image de référence Sentinel-2 (a), l'image DART rééchantillonnée à la résolution spatiale de Sentinel-2 (i.e. 20m) sans calibration des propriétés (b), à la fin de l'itération 1 (c), de l'itération 2 (d), et de l'itération 3 (e). Toutes les images sont des images de réflectance avec la même échelle de valeurs, de 0 à 0.5. Comme attendu, à chaque itération, l'image DART se rapproche un peu plus de l'image Sentinel-2, ce qui signifie que la précision des simulations augmente bien avec le nombre d'itérations effectuées. Un rectangle vert encadre une zone de forêt où la méthode a un impact particulièrement important. Cela s'explique par le fait que la réflectance de la végétation est très impactée par les diffusions multiples dans le domaine du proche infrarouge du spectre électromagnétique.

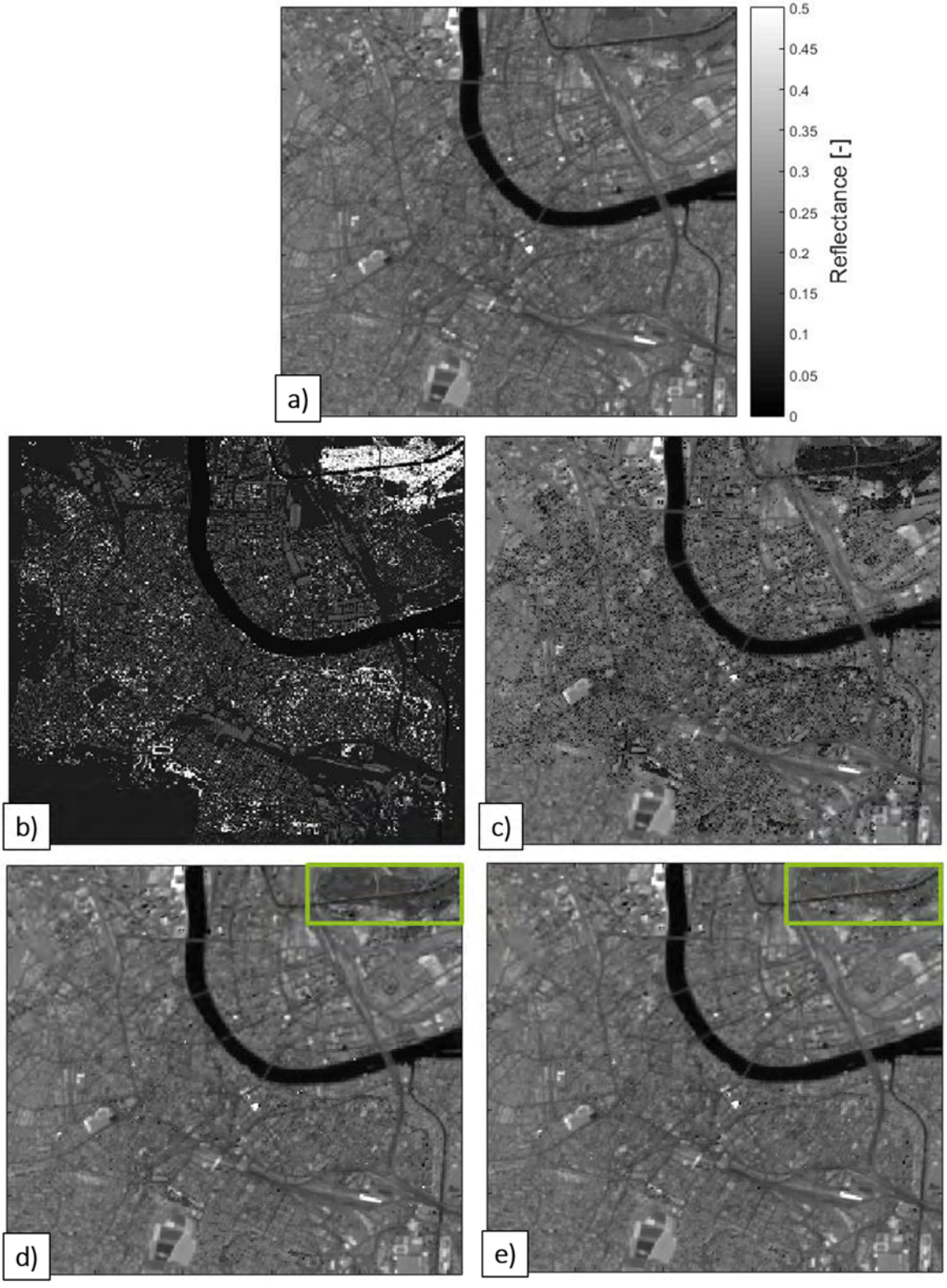


Figure 4.32 : Calibration itérative de DART. (a) Image Sentinel-2 du 24.06.2016 (B8a-865nm) à 20m de résolution. (b) Image de réflectance simulée DART sans calibration à 20m de résolution. (c) Image DART après 1 itération (d) 2 itérations (e) 3 itérations.

La Figure 4.33 illustre de manière quantitative le rapprochement des deux images. Elle montre l'augmentation de la corrélation entre les deux images au fur et à mesure de la procédure d'inversion. La comparaison est effectuée à chaque itération, pixel à pixel entre l'image DART et l'image Sentinel-2, à 20m de résolution.

Conformément aux attentes, la comparaison initiale (en haut à gauche) montre de grandes disparités entre les deux images lorsque les propriétés optiques sont encore arbitraires. Le graphique en haut à droite montre l'amélioration atteinte après la première itération (i.e. première étape de comparaison), celui en bas à gauche montre le résultat après l'itération 2, et en bas à droite après l'itération 3.

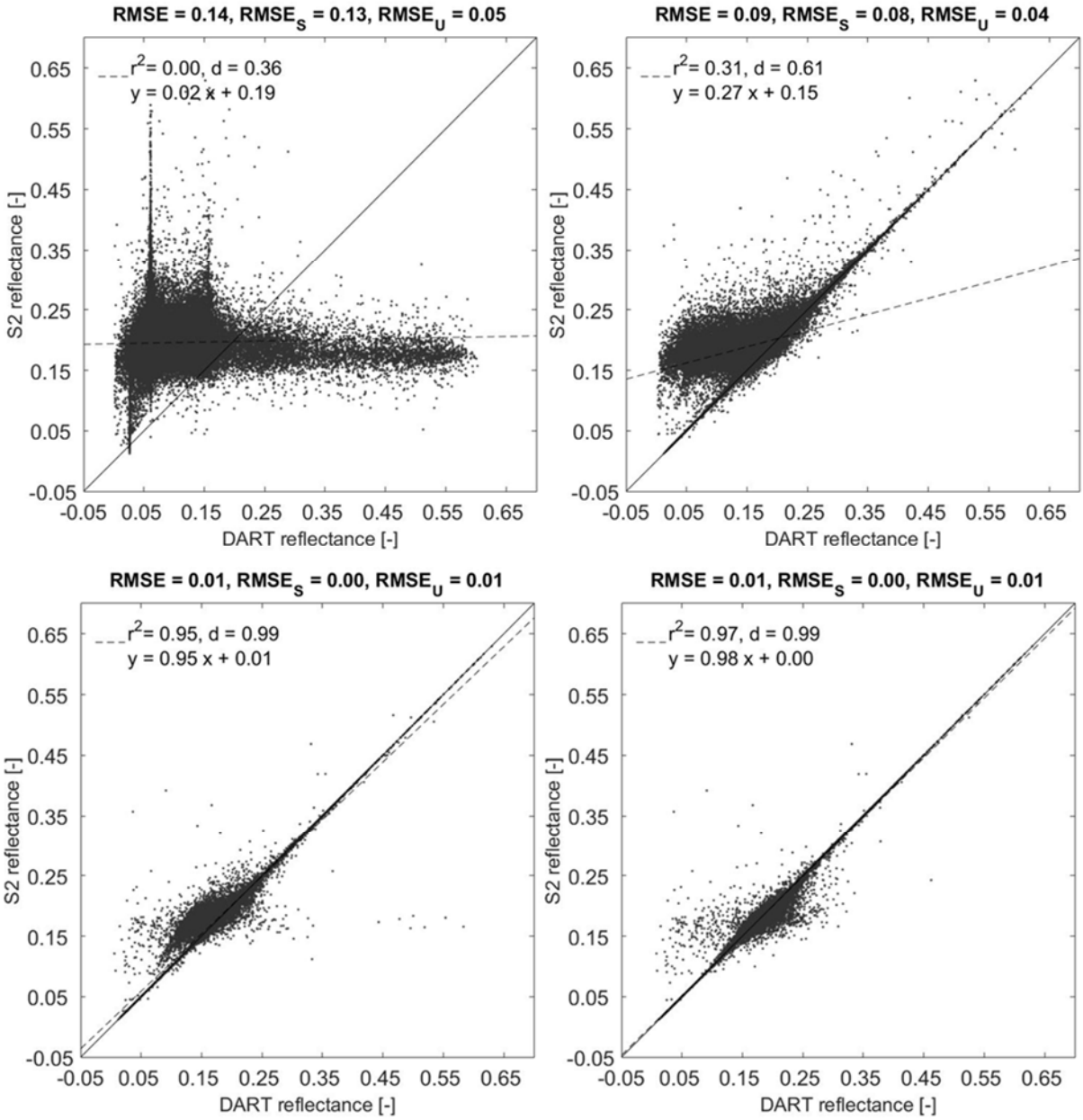


Figure 4.33 : Comparaison des pixels de réflectance DART et Sentinel-2 (B8a, 865nm ; 24.06.2016) à différentes étapes de l'inversion. En haut à gauche : sans calibration, en haut à droite : fin de la première étape de comparaison, en bas à gauche, fin de l'itération 2, en bas à droite : fin de l'itération 3.

Entre la première image et la carte finale de réflectance, le coefficient r^2 entre l'image DART et Sentinel-2 passe de 1% à 97%, et la RMSE passe de 0.14 à 0.01. Il est important de noter que ces performances dépendent de la bande spectrale considérée. Ainsi, la convergence est de manière générale plus rapide pour les bandes spectrales du domaine visible, car les mécanismes de diffusion multiple sont en général faibles dans ce domaine. La convergence pour la bande B12 (2190nm) est similaire mais légèrement moins performante que pour la bande B8a de Sentinel-2 pour les raisons déjà observées (RMSE=0.02 [-], r^2=0.946). Une illustration supplémentaire de

cette convergence est donnée dans la *Figure 4.34*, où la variation de réflectance est analysée pour 3 types de pixels choisis.

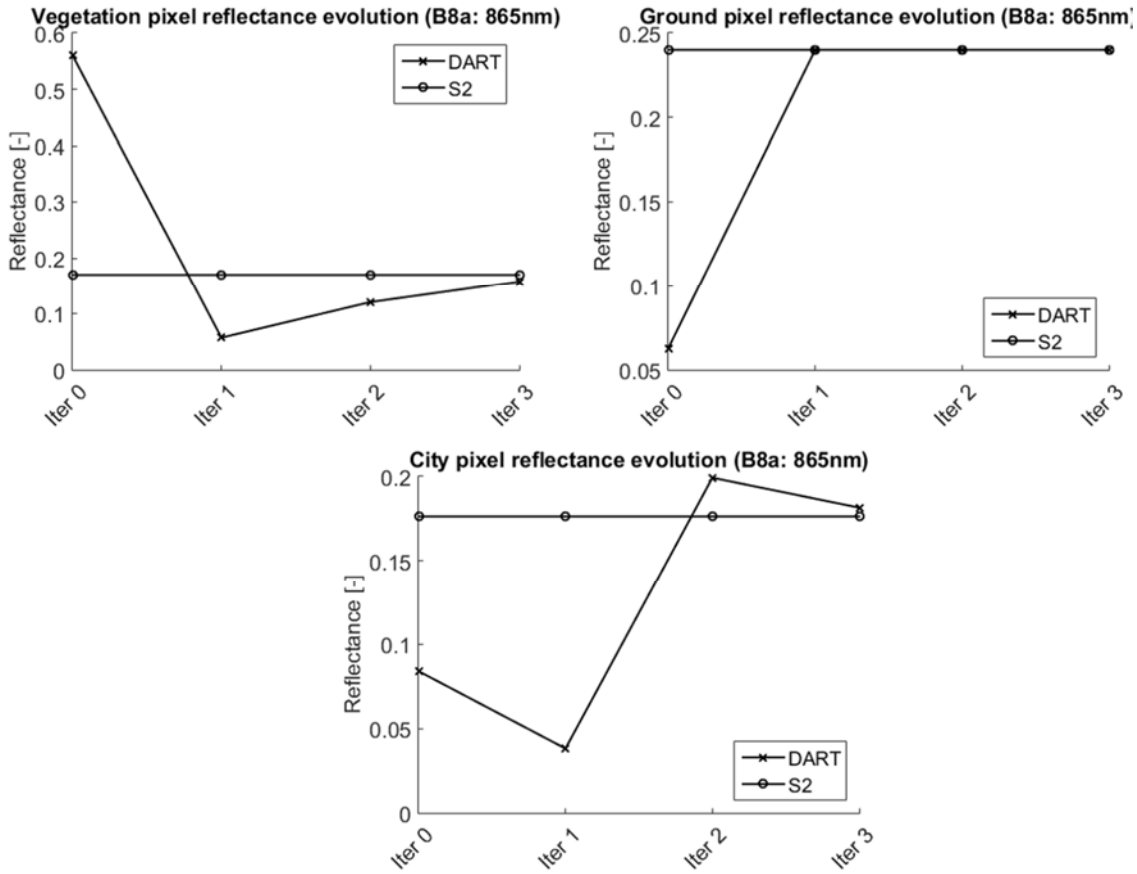


Figure 4.34 : Evolution de la réflectance DART (croix) et Sentinel-2 (ronds) de pixels correspondant à 3 types de couvert urbain. En haut à gauche : végétation pure. En haut à droite : sol pur. En bas : centre-ville.

Lors de l'application de la méthode développée, la réflectance DART converge vers la réflectance Sentinel-2. Trois types de pixels sont considérés :

- Végétation pure : la réflectance initiale DART surestime la réflectance Sentinel-2. Ceci est simplement dû au fait que les propriétés optiques initiales foliaires sont trop élevées. La première itération conduit à des propriétés plus faibles, impliquant une réflectance DART plus faible, qui sous-estime cette fois la réflectance Sentinel-2. Cela est dû au fait que la première étape d'inversion néglige en partie les diffusions multiples. Les itérations successives permettent de corriger cette erreur et de converger vers la réflectance voulue.
- Sol pur : la méthode d'inversion est très efficace pour ce type de surface. En effet, les effets de diffusion multiple y sont principalement causés par les surfaces environnantes et sont donc relativement faibles,. Ainsi la réflectance DART est déjà très proche de la réflectance satellite dès la première étape de comparaison.
- Pixel mixte de centre-ville : ce pixel a été sélectionné afin de montrer que la première étape de comparaison peut augmenter la différence entre les images DART et satellie. Ce comportement s'explique par l'impact de diffusions multiples dues aux zones voisines et pour lesquelles la méthode a attribué des propriétés optiques de matériau imprécises. Cependant, les itérations successives permettent de corriger les erreurs et de converger vers le résultat voulu.

L'impact de ces itérations sur le bilan radiatif est illustré par la *Figure 4.35* pour le 24.06.2016 dans les courtes longueurs d'onde. Cette figure présente l'évolution de Q_{sw}^{*} au niveau de la tour BKLI de Bâle, pour des propriétés optiques inversées en utilisant l'acquisition Sentinel-2 du 24.06.2016, pour les premières itérations de la

méthode. Les ronds bleus sont les valeurs de Q^*_{SW}, et la ligne rouge correspond à la mesure de la tour de flux. 'Iter 1' correspond à la première étape de comparaison, 'Iter' 2 et 'Iter 3' aux deux itérations suivantes.

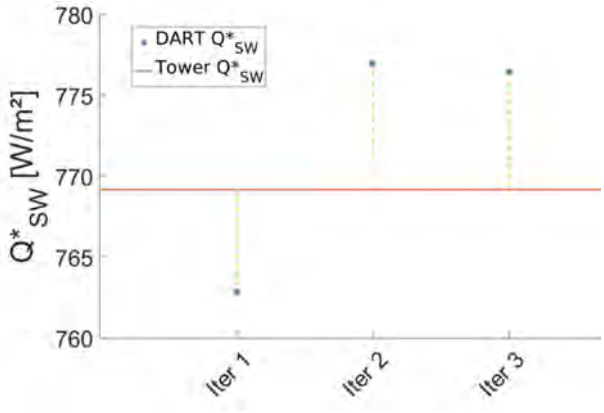


Figure 4.35 : Evolution de Q^*_{SW} simulé par DART (ronds bleus) comparé à la valeur mesurée (trait rouge) au cours des itérations successives de la méthode, au niveau de la tour BKLI.

On observe que la première itération permet déjà de se rapprocher précisément de la valeur mesurée, qui est ici sous-estimée. Après la deuxième itération, le bilan radiatif est surestimé mais l'erreur commise reste similaire en valeur absolue. La 3e itération, pour laquelle les images satellites et DART sont très proches, n'améliore pas énormément la précision du bilan radiatif. Comme indiqué à la fin du paragraphe précédent, le biais restant est attribué à la réflectance des murs de la scène, qui semble trop basse au niveau de la tour de flux, impliquant une valeur de bilan radiatif trop élevée. Ce résultat suggère deux remarques :

- la méthode d'inversion pourrait utiliser la réflectance des murs comme paramètre d'ajustement, sous réserve que les murs autour de la tour de flux ont des réflectances similaires aux réflectances des murs de l'ensemble de la ville, ce qui n'est pas toujours le cas.
- La comparaison des valeurs de Q^* au niveau de la tour devrait être effectuée en tenant compte du fait que l'angle de vue des instruments de la tour est relativement grand, contrairement à l'angle de vue instantanée du capteur satellite. Cet angle de vue a deux implications majeures. (1) Les capteurs de la tour de flux mesurent le rayonnement issu d'une zone centrée sur la tour, qui est plus importante que la zone associée au pixel satellite centré sur la tour de flux. (2) Les capteurs de la tour mesurent le rayonnement issu des murs contrairement aux capteurs satellites qui observent la Terre à la verticale. Le premier point est partiellement pris en compte en comparant les valeurs de Q^* mesurées par la tour à un ensemble de pixels centrés sur la tour de flux. Par contre, le deuxième point n'est pas pris en compte. La récente introduction dans DART de la modélisation de capteurs radiométriques au sein de tout paysage terrestre, naturel et urbain, permettra d'améliorer cette étape de comparaison entre les mesures satellites et le mesures des capteurs de la tour de flux.

6.2. Impact des murs

Dans ce paragraphe, l'impact des murs est plus précisément étudié. En effet il a été supposé dans les paragraphes précédents que la contribution des murs au bilan radiatif final pouvait expliquer les biais restants sur ce dernier après avoir obtenu des simulations d'images satellites très proches des images réelles. La Figure 4.36 montre les environs de la tour de flux dans la représentation 3D de la ville de Bâle modélisée par DART. Une quantité importante de surface de murs contribuent au signal mesuré par la tour de flux. L'impact de leur réflectance sur le bilan radiatif final a été estimé par une simulation DART supplémentaire du bilan radiatif, en utilisant les propriétés optiques inversées dans l'itération 3 (pour le 24.06.2016) pour tous les éléments, en multipliant la réflectance attribuée aux murs par un facteur 2 (cette réflectance restant dans des intervalles réalistes, c'est-à-

dire entre 0 et 1). Le résultat est présenté dans la Figure 4.37, qui est dans la continuité de la Figure 4.35. L'itération 'Iter 3b' est identique à l'itération 3, avec une réflectance de murs modifiée.



Figure 4.36 : Représentation 3D de la zone observée par la tour de flux BKLI de Bâle, visualisée dans l'outil 'vue 3D' de DART. Le point rouge représente la position de la tour de flux.

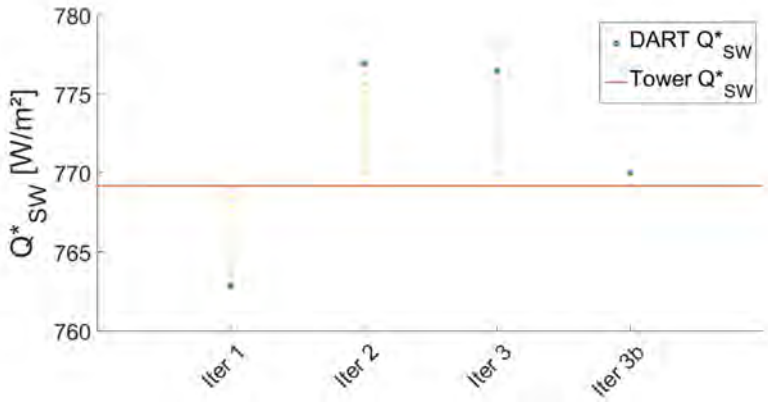


Figure 4.37 : Evolution de Q^*_{SW} au niveau de la tour BKLI simulé par DART (ronds bleus) comparé à la valeur mesurée (trait rouge) au cours des itérations successives de la méthode. Une itération supplémentaire a été effectuée (Iter 3b) dans laquelle la réflectance des murs a été multipliée par 2.

Il apparaît que la modification de la réflectance des murs peut entraîner une modification du bilan radiatif final de l'ordre de l'erreur résiduelle constatée. Cela confirme que le biais observé dans les séries temporelles peut être corrigé en ajustant convenablement la réflectance des murs. Cependant, deux considérations majeures restent à effectuer avant de procéder à ce paramétrage. D'une part, ce paramètre ne peut être ajusté que dans la zone couverte par la tour de flux, et le modifier revient à modifier l'intégralité des murs de la scène. Or, la réflectance des murs n'est naturellement pas constante spatialement sur l'intégralité de la ville. De plus, comme déjà indiqué plus haut, les capteurs satellites et la tour de flux n'observent pas exactement la même chose. La Figure 4.38 montre une photo hémisphérique 'fish-eye' prise du haut de la tour de flux. Cette photo illustre le champ de vision du capteur de la tour de flux. Elle permet d'illustrer le fait que le capteur de la tour de flux voit les façades des immeubles voisins, ce qui influence bien évidemment sa mesure. En effet, les façades occupent une fraction importante du champ de vision du capteur de la tour de flux. Il en résulte que l'exitance urbaine

mesurée par le capteur de la tour de flux est influencée par les réflectances des murs : cette exitance tend à augmenter si la réflectance des murs augmente.



Figure 4.38 : Photo 'fish-eye' prise du haut de la tour de flux BKLI à Bâle. Elle illustre le champ de vue du capteur de rayonnement. Les cercles blancs représentent les facteurs de vue, c'est-à-dire le pourcentage de contribution des surfaces observées (Source University of Basel) à la mesure de ce capteur.

6.3. Impact des mises à jour de propriétés optiques

Dans le cadre de la construction de séries temporelles, la méthode développée fait l'hypothèse que très souvent, ces propriétés varient peu sur un petit intervalle de temps, en l'absence de fortes précipitations comme la neige et de périodes de développement rapide de la végétation. Cette hypothèse a été vérifiée dans le paragraphe 5 lors de la validation des séries temporelles. Elle est illustrée ici avec des exemples de l'impact de la mise à jour ou non des propriétés optiques. Un test direct de cette hypothèse est l'emploi de propriétés de matériau inversées à une date t et appliquées pour simuler le bilan radiatif à une autre date t'. La *Figure 4.39* montre la carte Q^*_{sw} simulée pour l'image Landsat-8 du 21.08.2015 (en haut à gauche), la carte simulée dans les mêmes conditions, mais avec les propriétés optiques inversées avec l'image Landsat du 05.08.2015 (en haut à droite), et la carte de différence relative entre ces deux cartes de bilan radiatif (en bas de la figure). La différence relative moyenne pour ce cas est 0.89%, ce qui conforte l'hypothèse de départ. Bien évidemment, cette hypothèse est plus ou moins valable selon la période de l'année considérée, et selon le type de surface. Ainsi, les propriétés optiques de la végétation changent en général beaucoup plus rapidement que la réflectance des matériaux de construction.

Il convient de noter que la prise en compte de l'évolution temporelle des propriétés optiques des matériaux urbains, par exemple suite à un évènement neigeux, est automatiquement prise en compte par la méthode développée via l'inversion d'images satellites à des dates appropriées. Cette remarque souligne l'intérêt des satellites avec une importante revisite (e.g., Sentinel 2). Comme déjà indiqué, deux approches permettent d'utiliser toute nouvelle image satellite :

- la base de données de cartes d'albédo "ciel blanc" et "ciel noir" est mise à jour en la multipliant par une image égale au rapport de la nouvelle image satellite en luminance divisée par l'image satellite en luminance qui a été utilisée pour calculer la base de données des cartes d'albédo. Cette opération est très rapide.

- une nouvelle base de données de cartes d'albédo "ciel blanc" et "ciel noir" est créée à partir de la nouvelle image satellite. Cette opération est beaucoup plus couteuse en temps de calcul que l'approche précédente.

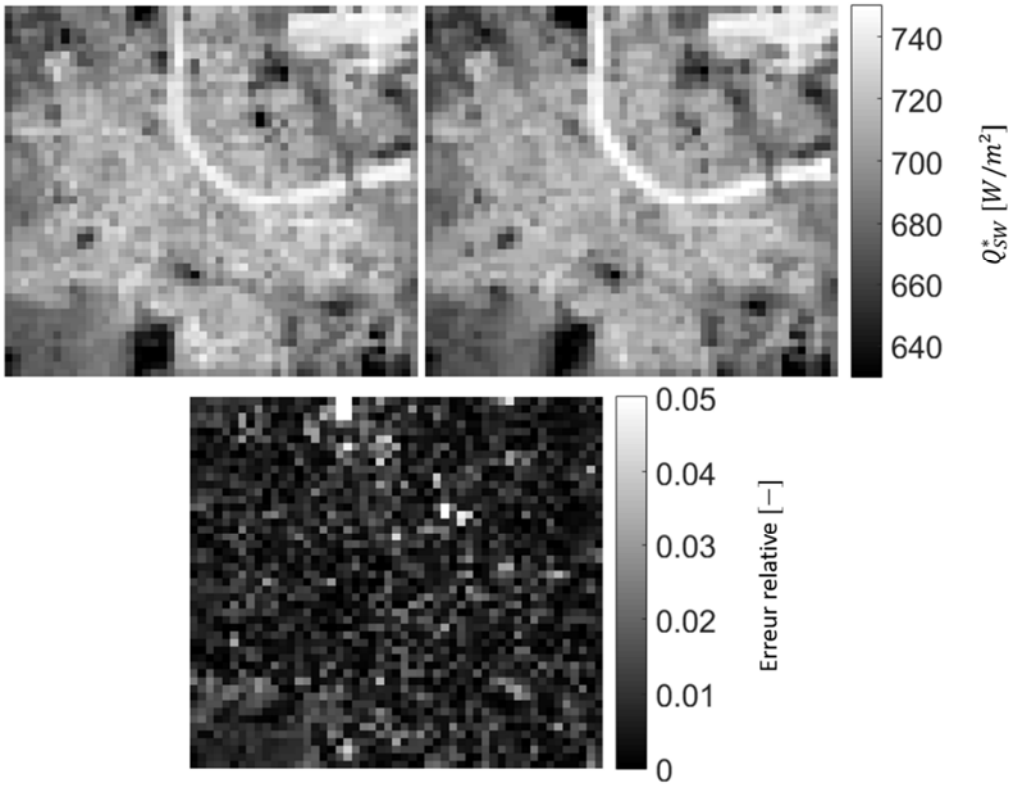


Figure 4.39 : En haut à gauche : carte Q_{sw}^{*} simulée le 21.08.2015 à partir de propriétés optiques dérivées de l'image Landsat de ce même jour. En haut à droite : carte Q_{sw}^{*} simulée le 21.08.2015 à partir de propriétés dérivées de l'image satellite du 05.08.2015. En bas : carte d'erreur relative.

Il est donc intéressant d'évaluer la précision de la méthode qui met à jour la base de données de cartes d'albédo avec une simple carte de facteurs multiplicatifs. Cette précision est évaluée ici pour la cas d'images Sentinel-2. La Figure 4.40 montre la comparaison entre les mesures de la tour de flux BKLI et les valeurs de Q_{sw}^{*} de la série temporelle calculées pour des dates proches (en vert) de la date t_o (24.06.2016) de l'image du 24.06.2016 utilisée pour créer la base de données d'albédo, et pour des dates t (en gris) plus ou moins éloignées de t_o, mais avec une base de données de cartes d'albédo étalonnée avec les images satellites acquises aux dates les plus proches des dates t. Les erreurs renseignées en haut de la figure correspondent pour la première ligne aux cartes de bilan radiatif utilisant les propriétés mise à jour et pour la deuxième ligne celles utilisant les propriétés optiques initialement inversées. Ainsi, on observe que même si la précision reste très bonne, la RMSE passe de 14.08 W/m² à 5.27 W/m² quand on ne considère que les images utilisant les propriétés inversées initialement. Cela montre bien qu'il vaut mieux utiliser complètement la méthode à chaque nouvelle acquisition satellite si l'on veut une précision optimale. Cependant, cela montre aussi d'une part que la méthode de mise à jour simplifiée permet d'atteindre une précision satisfaisante, et d'autre part que l'utilisation des propriétés initiales est très efficace pour toutes les dates entourant celle de l'acquisition satellite utilisée pour cette inversion initiale.

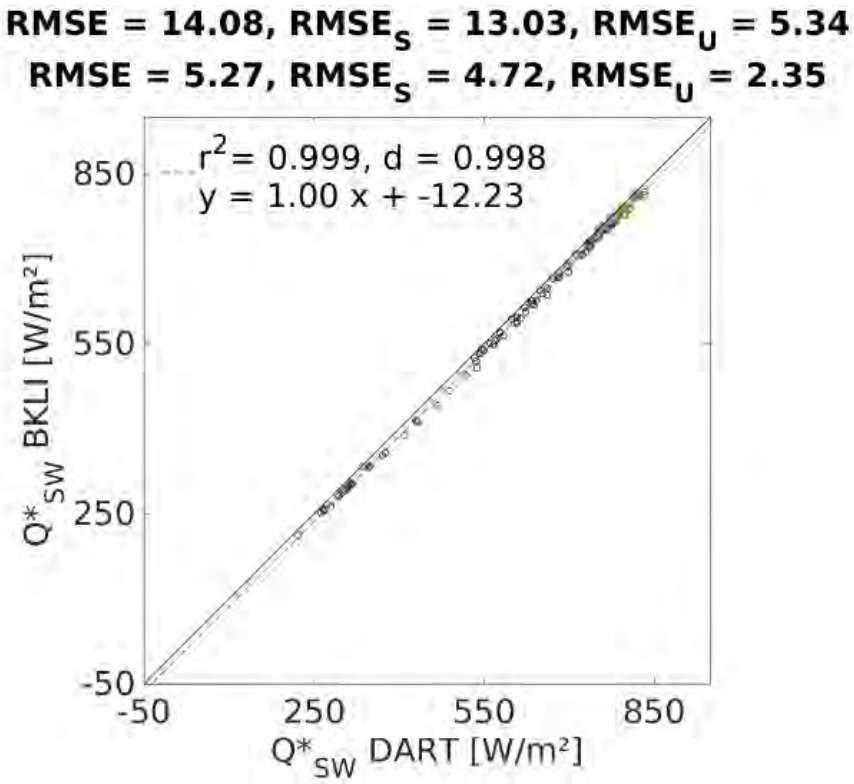


Figure 4.40 : Comparaison de Q^*_{sw} mesuré et simulé à des dates proches de la date t_o (vert) de l'image satellite utilisée pour créer la base de données de cartes d'albédo utilisée, et simulé à des dates t (gris) avec cette même base de données mise à jour avec la méthode "multiplicative" appliquée à l'image satellite acquise à la date la plus proche de t, plus ou moins éloignées de t_o.

6.4. Impact de la représentation 3D

Il a déjà été noté l'importance de la précision de la base de données géométriques urbaines pour le calcul de cartes de bilan radiatif. Cette précision a peu d'influence sur la simulation d'images satellites, car les défauts de la représentation 3D sont compensés par la sur- ou sous-estimation des propriétés optiques de matériau pour les éléments urbains dont la géométrie est inexacte. C'est le cas par exemple de l'absence des ponts dans la base de données géométriques de la ville de Bâle. L'étalonnage de DART avec l'image satellite fait apparaître les ponts dans l'image DART, car la réflectance de la surface d'eau au niveau des ponts prend tout simplement la valeur de la réflectance des ponts dans l'image satellite. Il est apparu que des défauts importants dans la base de données géométriques urbaine (e.g. bâtiments manquants) peuvent beaucoup impacter les valeurs simulées de bilan radiatif. En effet, ce dernier est directement impacté par la structure 3D des scènes modélisées, étant une intégrale selon toutes les directions de visée. Ainsi, dans les parties de Bâle où manquent les bâtiments, on a observé une sous-estimation du bilan radiatif importante.

Une autre question relative à la l'intérêt de prendre en compte ou non l'architecture urbaine est d'estimer l'erreur commise en supposant que la mesure satellite donne une réflectance que l'on suppose lambertienne, c'est-à-dire isotrope, au niveau de chaque pixel. En effet, l'architecture urbaine implique en général une forte anisotropie de la luminance urbaine, à la fois dans les courtes et grandes longueurs d'onde. Pour évaluer l'impact de ces effets directionnels, une série temporelle d'une journée (24 mesures à intervalles d'une heure pour le 24.06.2016) d'exitance dans les courtes longueurs d'onde a été simulée avec et sans cette hypothèse lambertienne, au niveau de la tour BKLI de Bâle. La simulation sans cette hypothèse lambertienne a été réalisée en utilisant le LUT d'albédos établi avec les propriétés optiques de matériau dérivées de l'image satellite du jour considéré (24.06.2016). La Figure 4.41 montre les résultats obtenus. Elle affiche l'évolution horaire de Q^*_{sw} simulé et mesuré par la tour de flux le 24.06.2016. L'hypothèse "lambertienne" (courbe jaune) induit de fortes erreurs, en particulier durant la période autour du midi solaire. Cette erreur atteint 20 W/m². Par contre, la méthode

d'inversion développée donne des estimations très précises de Q_{sw}^{*} ; l'erreur est de l'ordre de 1.6 W/m², c'est-à-dire un ordre de grandeur comparable à la précision des mesures des tours de flux. L'ampleur de l'erreur commise dépend des structures 3D en présence, et est naturellement plus élevée si les structures urbaines sont plus prononcées (i.e., effets directionnels plus importants). D'autre part, lors de comparaisons avec les mesures de tours de flux, il ne faut pas oublier l'incertitude sur ces mesures.

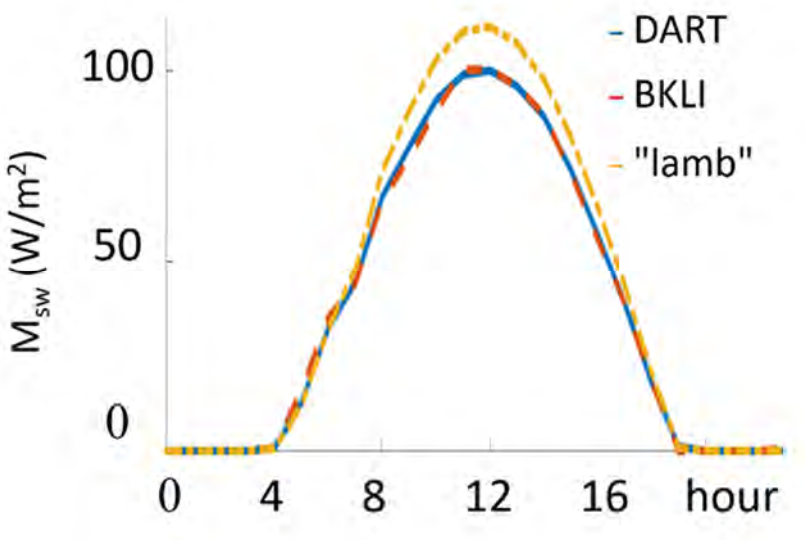


Figure 4.41 : Evolution horaire de l'exitance M_{sw} [W/m²] au niveau de la tour , simulée par DART (bleu), calculée avec l'hypothèse "Lambertien" (jaune) et mesurée (rouge).

7. Utilisation des résultats obtenus par des études extérieures

7.1. Utilisation des résultats dans le projet URBANFLUXES

Les résultats de la méthode développée dans cette étude, et particulièrement les séries temporelles de bilan radiatif, ont pu être utilisées dans le projet URBANFLUXES. Un article soumis au journal Nature | Scientific Reports est inclus dans ce paragraphe : *Urban energy exchanges monitoring from space*. Il présente les méthodes et résultats du projet URBANFLUXES, dont le but est de démontrer le potentiel des missions d'observation de la Terre actuelles dans l'estimation du bilan d'énergie urbain, en utilisant des observations météorologiques locales et des mesures de flux directes pour la validation des résultats. Une précision relative de 5% a été validée entre les valeurs de bilan radiatif calculés par le biais de la télédétection et les mesures. Les fractions de facettes de murs ainsi que les types de matériaux ont été déterminés comme étant les paramètres les plus important dans l'estimation du flux de chaleur de stockage des canopées urbaines. De plus, il a été observé que l'approche d'imagerie satellite sous-estime les flux de chaleur turbulente, le flux de chaleur sensible étant le plus affecté par les variations de température de surface (-64.1, +69.3 W/m² pour une perturbation de $\pm 2K$). Enfin, le flux de chaleur anthropogénique est généralement sous-estimé, mais permet d'observer une variabilité spatiale raisonnable pouvant être utilisé pour identifier les *hot-spots*, permettant ainsi d'apporter des informations utiles aux plans d'aménagement urbain et à la modélisation du climat urbain. Ces résultats ont été présentés lors de *Demonstration Events* aux utilisateurs intéressés, notamment aux responsables des aménagements urbains dans les villes de l'étude. Le texte de l'article est reporté ci-dessous, et les références sont déplacées en annexe C, pour ne pas surcharger le paragraphe.

Urban energy exchanges monitoring from space

Nektarios Chrysoulakis[1*], Sue Grimmond[2], Christian Feigenwinter[3], Fredrik Lindberg[4], Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry[5], Mattia Marconcini[6], Zina Mitraka[1], Stavros Stagakis[1], Ben Crawford[2], Frans Olofson[4], Lucas Landier[5], William Morrison[2] and Eberhard Parlow[3]

[1]Foundation for Research and Technology Hellas, Institute of Applied and Computational Mathematics, N. Plastira 100, Vassilika Vouton, 70013, Heraklion, Greece, zedd2@iacm.forth.gr

[2]University of Reading, UK, c.s.grimmond@reading.ac.uk

[3]University of Basel, Switzerland, eberhard.parlow@unibas.ch

[4]University of Gothenburg, Sweden, fredrikl@gvc.gu.se

[5]CESBIO, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, France, jean-philippe.gastellu@cesbio.cnes.fr

[6]German Aerospace Center (DLR), Germany, mattia.marconcini@dlr.de

One important challenge facing the urbanization and global environmental change community is to understand the relations between urban form, energy use and carbon emissions[1,2]. Missing from the current literature are scientific assessments that evaluate the impacts of different urban spatial units on energy fluxes; yet, this type of analysis is needed by urban planners, who recognize that local scale zoning affects energy consumption and local climate[3]. However, satellite-based estimation of urban energy fluxes at neighbourhood scale is still a challenge. Here we show the potential of the current satellite missions to retrieve urban energy budget, supported by meteorological observations and evaluated by direct flux measurements. We found an overall agreement within 5% between satellite and in-situ derived net all-wave radiation; and identified that wall facet fraction and urban materials type are the most important parameters for estimating heat storage in urban canopy. Moreover, we found that satellite approaches underestimate measured turbulent heat fluxes, with sensible heat flux being most sensitive to surface temperature variation (-64.1, +69.3 W m^{-2} for ±2 K perturbation); and also underestimate anthropogenic heat flux. However, the latter presents reasonable spatial patterns that can be used to identify hot-spots, towards supporting both urban planning and urban climate modelling.

The Urban Energy Balance (UEB) is a three-dimensional (3D) issue because of the 3D nature of cities, including the fluxes into, or out of, or the storage change within the control volume (Fig. 1). During the last fifteen years, significant advances have been made in understanding urban processes, associated with higher computational capacity, improved resolution of satellite sensors and increased ability to couple advance urban surface parameterization schemes with atmospheric models[4,5,6,7,8,9,10,11,12]. Earth Observation (EO) has been widely used to study the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, but to a lesser extent to quantify heat fluxes[13,14,15,16,17,18]. Recent studies[19,20] have investigated the potential of EO to derive turbulent heat fluxes and identify and analyse the associated uncertainties.

Both Earth System Science and urban planning communities need spatially disaggregated UEB data at local scale (neighbourhood, or 100 m x 100 m). However, such information is practically impossible to derive by in-situ fluxes measurements and the EO-based estimation of spatiotemporal patterns of the different UEB components is challenging. Therefore, the question arises whether EO can provide reliable estimates of UEB for the times of satellite acquisitions. Here we address this by investigating the potential of the current satellite missions to retrieve UEB fluxes at local scale, supported by meteorological observations. Given the range of city forms, sizes and settings, we explored this in three locations: London (UK), Basel (Switzerland) and Heraklion (Greece).

EO data from various sources were used to extract urban surface morphology and characteristics. Surface cover and material type were derived using advanced machine learning and fusion techniques and detailed spectral un-mixing approaches[21] (e.g. Fig. 2a). Using EO-derived high resolution Digital Surface Models (DSM), surface roughness parameters (such as plan area index, frontal area index, roughness length and zero-displacement height) were calculated by morphometric analysis[22]. Examples of the morphometric analysis results are given in Extended Data Fig. 1. Satellite-derived thermal radiance at 1 km x 1 km was downscaled[23] to 100 m x 100 m. Although uncertainties of the downscaling method exist as Mitraka et al.[24] pointed out, the downscaled temperatures evaluated using in-situ

surface temperature observations from the micrometeorological flux towers are within 2.4 K (e.g. Extended Data Fig. 2).

The focus time period (2016 and the first half of 2017) allowed the seasonal cycle to be examined (e.g. Extended Data Fig. 3, London). For all cities this was appropriate with net all-wave radiation (Q*), net change in heat storage (ΔQ_S) and turbulent heat flux (Q_H) peaking in summer. Q_H and ΔQ_S peak in August, whereas turbulent latent heat flux (Q_E) is relatively minor throughout the year in city centres.

The study of Q* from EO takes advantage of the fact that Q* and EO acquisitions are mostly due to the same surface elements (e.g. roofs, streets, vegetation). However, deriving Q* maps from EO is not straightforward as urban reflectance and thermal emission have anisotropic behaviour, caused by the 3D urban geometry and distribution of urban material optical and thermal properties[5]. Here, the DART (Direct Anisotropic Radiative Transfer) model[9] takes into account this anisotropy. It simulates reflected and emitted radiation using information derived from EO satellite images (see more details in Methods). For example, Q* in Basel (Fig. 3a) range between 496 and 633 W m^{-2}. The highest fluxes occur near the river and in a vegetated region in the upper right of the domain. As shown in Fig. 3d, the average observed - modelled (EO-derived) MAE (Mean Absolute Error) in Q* for 2016 was at 19.9 W m^{-2} with the scatter about the linear regression best fit line (Mean Absolute Deviation - MAD) of 24.1 W m^{-2}; overall agreement within 5%. Uncertainty arises from simplifying the complex urban surface structure and surface elements (e.g. walls) that are not directly seen by satellites, except through multiple scattering, although they contribute to Q*.

ΔQ_S of an urban canopy is approximately 2 - 6 times larger than for non-urban canopies. Here, ΔQ_S was estimated using the Element Surface Temperature Method (ESTM)[6], which reduces the 3D urban structure to one-dimensional (1D) elements (see details in Methods). A sensitivity analysis identified that the fraction of wall facet and materials were the two most important variables for a reasonable estimation of ΔQ_S. Daytime ΔQ_S is largest (up to 300 W m^{-2}) in densely built areas (e.g. London, Fig. 2b, along river Thames in the city centre and in the area of Canary Wharf), where tall buildings dominate.

Areas with low building density obtain, as expected, smaller ΔQ_S values. Uncertainty was assessed using two alternative approaches, implemented based on the SUEWS[10] modelling platform: OHM[25], and AnOHM[26]. All approaches produced similar results, but different spatial patterns were identified, mostly depending on the forcing data. To evaluate ESTM performance, observations from sites with uniform cover were used. In these less complex areas, ΔQ_S can be directly measured with ground heat flux plates. MBE (Mean Bias Error) between -1.1 and 21.7 W m^{-2} were found.

The turbulent heat fluxes are strongly modified by the high roughness of the urban surface and the complexity of the distribution of sources/sinks of heat and water by human activities. Here, the Aerodynamic Resistance Method (ARM) was used to derive Q_H and Q_E at local scale[19]. For its implementation, beyond the EO-derived downscaled land surface temperature (LST) and surface roughness parameters, air temperature and humidity were provided by networks of meteorological stations (see details in Methods). For example, in Basel (Fig. 3b), the highest Q_H values (up to 270 W m^{-2}) are found in the most densely built-up areas and industrial areas. Q_H values have similar spatial patterns and magnitudes to ΔQ_S, whereas Q_E (Fig. 3c) is much smaller in built-up areas (less than 150 W m^{-2}), obtaining its highest values in correspondence of water and vegetation. The local scale footprint[27] was determined for Eddy Covariance (EC) measurements. The measured turbulent heat fluxes are generally higher in all cities (e.g. Fig. 3e, comparisons with Q_H observations at BAES - Basel Aeschenplatz - flux tower in Basel), the average observed – modelled (EO-derived) MAE for 2016 was found at 63.9 W m^{-2} and the MAD at 94.5 W m^{-2}. Similarly, the EO-derived Q_E underestimates observations (Fig. 3f). The main reasons led to these underestimations were the drawbacks and uncertainties of the ARM[19] and its inputs variables. A sensitivity analysis[20] indicated that, overall, the EO-derived Q_H is most sensitive to LST variation (+69.3, -64.1 W m^{-2} for ±2 K perturbation).

Direct measurements of Q_F are extremely difficult to obtain. Here the residual of the UEB approach was used to calculate Q_F, which results in uncertainties caused by each term. Energy balance closure typically compares available energy ($Q^* - \Delta Q_S$) with turbulent heat fluxes ($Q_H + Q_E$). In Basel, at both towers, the

total EC turbulent heat fluxes tends to be slightly greater than the available energy during winter months, when Q_F is expected to be highest due to building space heating (Fig. 4a,b). The relative spatial pattern of EO-derived Q_F for central Basel, from 24 June 2016 at 11:05 UTC (Fig. 4c) appears reasonable with clear correlation with building density. However, the absolute Q_F values for individual pixels are all negative (physically unrealistic). This suggests individual UEB components are incorrect and it is probably the underestimation of Q_H. Highest relative Q_F is found south of the river in the most densely built areas in Fig. 4c. Independent Q_F models based on inventories[28] also confirm that building sources are the dominant source of Q_F. This positive correlation between built-up areas indicates that EO can be used to identify hot-spot areas with relatively high Q_F.

Based on the analysis for individual UEB components, we draw the conclusion that the current satellite missions have the potential to provide information about spatial patterns of urban energy exchanges, if supported by suitable meteorological measurements. Synergistic analysis of specific satellite observations is able to identify and map spatial distributions of heat fluxes at local scale, several times per day. The developed EO-based methods are easily transferable to any city and have the potential to support sustainable planning strategies, since knowledge of UEB patterns at neighbourhood level is needed in urban planning (e.g. to reduce or prevent Q_H and Q_F hot spots), in health studies (e.g. to estimate impact on thermal comfort) and in future proofing (e.g. to plan and implement interventions towards reduction of heat emissions). Finally, the frequency of heat waves is expected to increase[29] with UHI exacerbating the respective warming, resulting in increased energy demand for cooling systems in low and mid-latitude cities, which in turn adds to heat emissions and raises temperatures further[30]. Our satellite-based approach is expected to advance the current knowledge of the impacts of heat fluxes on energy consumption in cities, leading to the development of tools and strategies to mitigate these impacts, improving thermal comfort and energy efficiency.

Figure Legends

Figure 1 | Conceptual illustration of the fluxes in the energy balance of an urban building–soil–air volume. The equivalent surface energy budget per unit surface area through the top of the volume is: $Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$ (W m^{-2}), where, Q* is the net all-wave radiation flux, Q_F is the anthropogenic heat flux (resulting from vehicular emissions, heating and cooling of buildings, industrial processing and metabolic heat release by people), Q_H is the turbulent sensible heat flux, Q_E is the turbulent latent heat flux, ΔQ_S is the net change in heat storage within the volume and ΔQ_A is the net advected flux. Arrows are drawn in the direction to which the corresponding flux is considered positive. ΔQ_s and ΔQ_A (= Q_{in} - Q_{out}) are positive if the internal energy of the volume increases.

Figure 2 | Land cover and heat storage for the city of London, UK. **a,** Categorization in seven land cover classes that includes: buildings, impervious surfaces (i.e., roads, parking lots, sidewalks, etc.), water, bare soil, low vegetation (lower than 2 m) and high vegetation (higher or equal to 2 m) split into evergreen and deciduous trees. **b,** Net change in heat storage (ΔQs) patterns at 100 m x 100 m, from 19 July 2016 at 11:00 UTC. Highest values are observed in central densely built areas, as well as in the area of Canary Warf (centre right).

Figure 3 | Spatial patterns of radiation and turbulent heat fluxes for the central area of Basel on August 23, 2016, at 09:50 UTC; and scatterplots of modelled (EO-derived) vs observed fluxes for all available 2016 cloud-free satellite scenes. **a,** EO-derived net all-wave radiation (Q*) patterns on August 23, 2016, at 09:50 UTC. **b,** EO-derived turbulent sensible heat flux (Q_H) patterns on August 23, 2016, at 09:50 UTC. **c,** EO-derived turbulent latent heat flux (Q_E) patterns on August 23, 2016, at 09:50 UTC. **d,** Modelled - observed Q* for the BAES flux tower area for 2016. **e,** Modelled - observed Q_H for the area of BAES flux tower for 2016. **f,** Modelled - observed Q_E for the area of BAES flux tower for 2016. In all scatterplots season (colour) and wind direction (symbols), 1:1 line (solid), linear regression best fit line (dashed) and

extent of 80% of the data points (dotted lines) are indicated. Linear regression statistics, a: slope, b: intercept (W m^{-2}); MAE: mean absolute error (W m^{-2}), MAD: mean absolute difference (W m^{-2}).

Figure 4 | Estimation of Q_F as a residual by regressing turbulent heat fluxes vs available energy in the central area of the city of Basel. **a,** Scatterplot for the area that the BAES flux tower is located for all available 2016 cloud-free satellite scenes: sum of the observed turbulent fluxes ($Q_H + Q_E$) vs available energy (observed Q* - modelled ΔQ_S), with season (colour, same as in fig. 3d) and wind direction (symbols) indicated, with 1:1 line (solid), linear regression best fit line (dashed) and extent of 80% of the data points (dotted lines). Linear regression statistics, a: slope, b: intercept (W m^{-2}); MAE (W m^{-2}) and MAD (W m^{-2}). **b,** Similar scatterplot for the BKLI (Basel Klingelbergstrasse) flux tower area. **c,** Relative spatial patterns of the anthropogenic heat flux (Q_F) for central Basel, on June 24, 2016 at 11:05 UTC, scaled from 0 to 1 (unitless). The river and parks are outlined (blue and green, respectively) and masked. The locations of the two flux towers (white plus) are shown (BAES: lower right; BKLI: upper left), with buffers of radius 500 m and 100 m (white dashed lines).

Figure 1

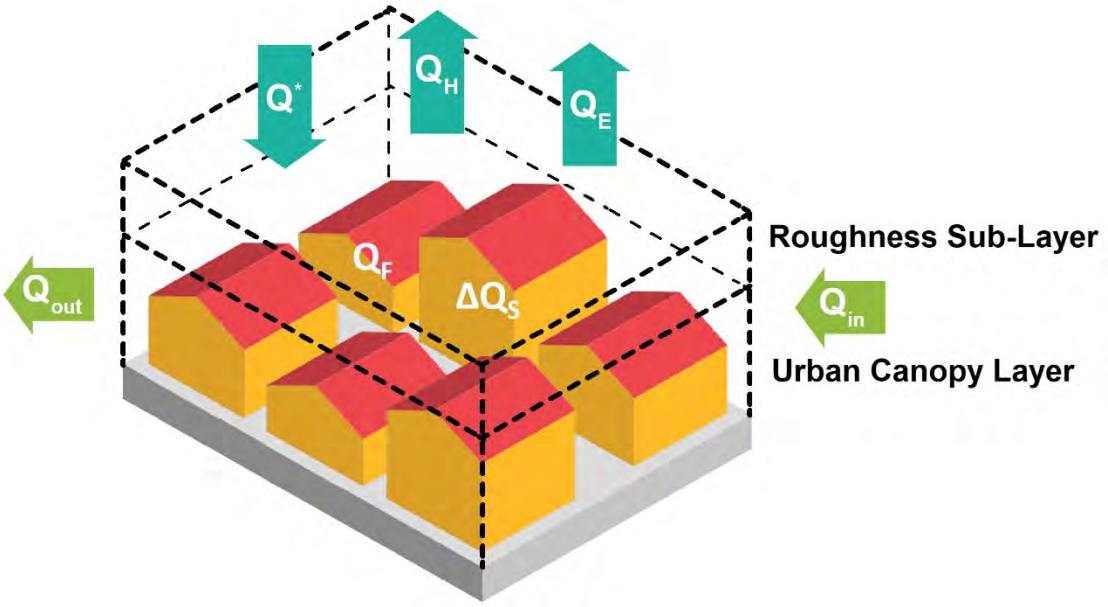


Figure 2

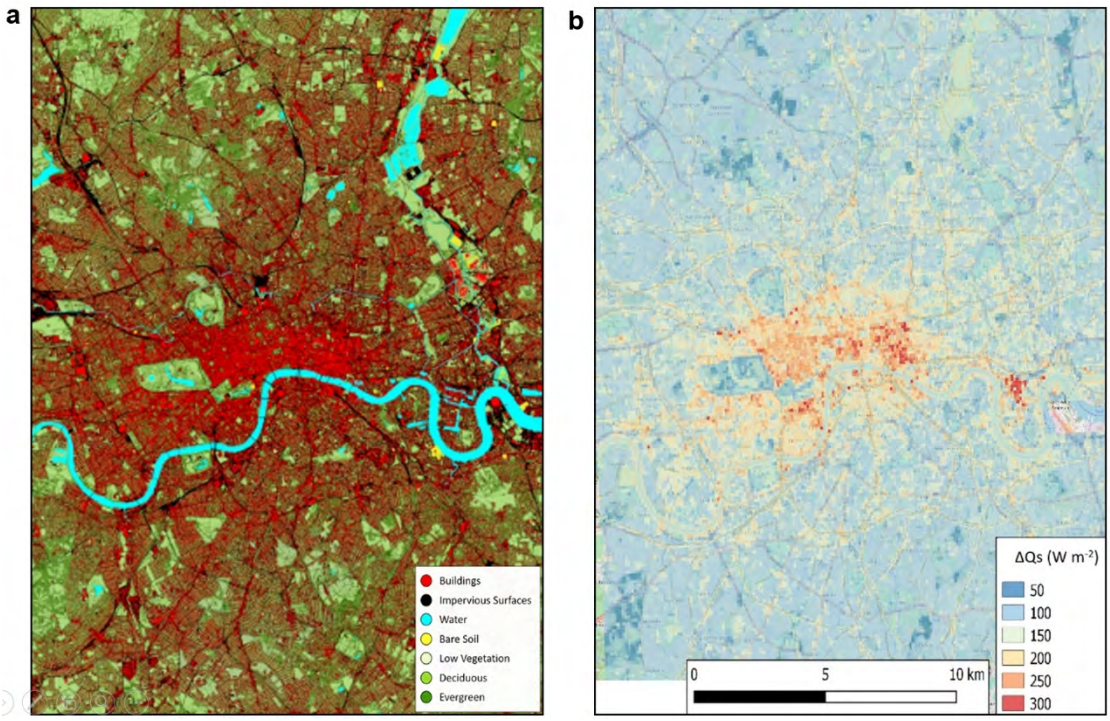


Figure 3

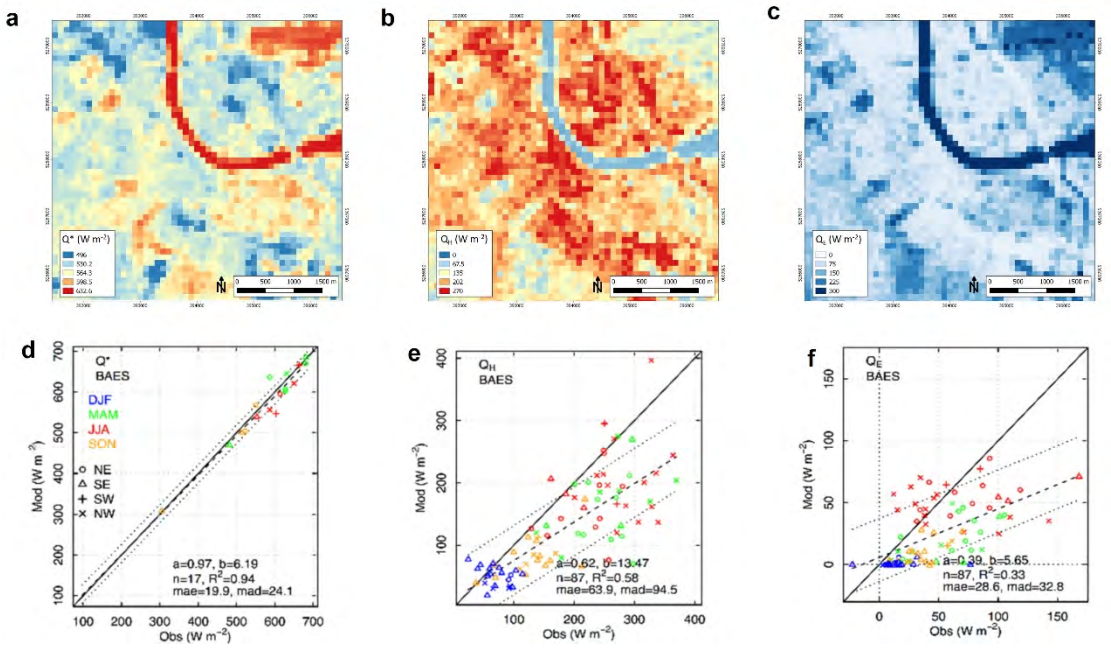
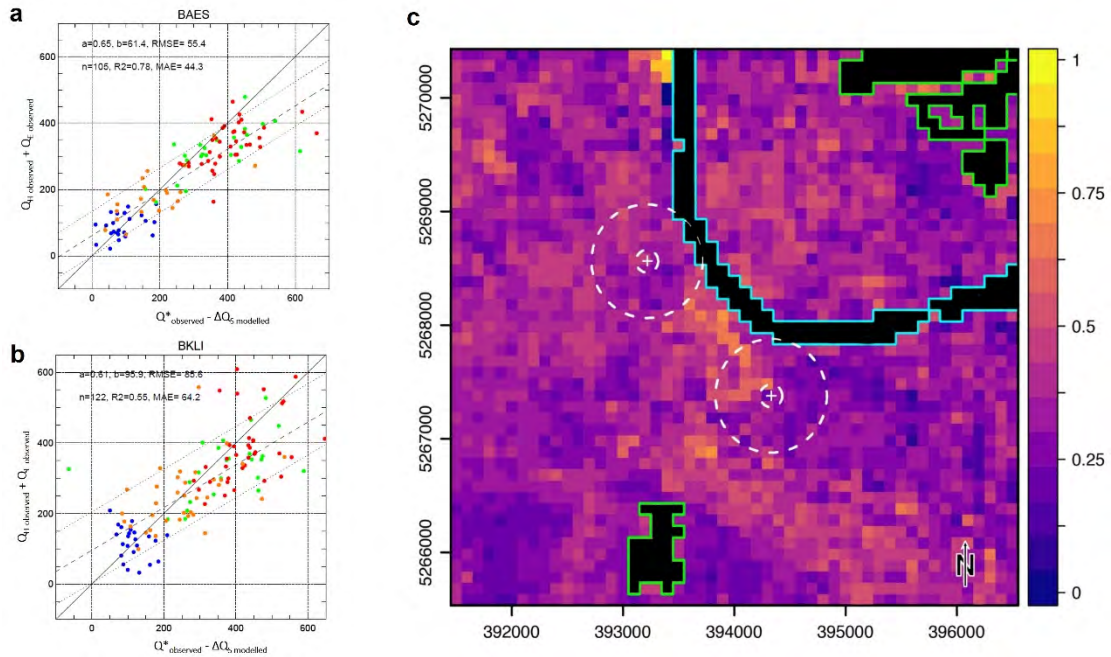


Figure 4



Methods

Case studies and datasets. Three different case studies were selected: a highly urbanized mega city (London, UK); a typical central European medium size city, that requires a substantial amount of energy for heating (Basel, Switzerland); and a smaller, low latitude Mediterranean city that requires a substantial amount of energy for cooling (Heraklion, Greece). Meteorological data were collected using Wireless Sensors Networks (WSN) of conventional meteorological stations and towers measuring the net all-wave radiation and the EC turbulent heat fluxes in all cities. In London, information from Large Aperture Scintilometers was also accessible[20]. High spatial resolution satellite imagery (between 10 m x 10 m and 30 m x 30 m) from Copernicus Sentinel 2 and Landsat 5/7/8, as well as very high resolution data (better than 10 m x 10 m) from Copernicus Contributing Missions, such as SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), RapidEye, TerraSAR-X and TanDEM-X were used. Concerning thermal infrared data, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Sentinel 3 and ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) observations were employed[21]. Synergies between Sentinels 2 and 3 proved useful to identify the surface cover dynamically. In particular, their common spectral bands at different spatial resolutions provided perspectives of the same scene at different scales (hence insights on the observed radiation mixture) and allowed obtaining fractional surface cover information that was used to estimate surface emissivity and LST locally[23]. All UEB fluxes were estimated at 100 m x 100 m resolution.

EO data analysis. Surface characteristics concern morphology, cover and biophysical parameters. Morphology requires details on the location and shape of urban objects. To this purpose, DSMs were derived either from very high resolution optical stereo imagery (for Heraklion) or airborne LiDAR observations (for London and Basel)[21]. Surface structure parameters (i.e., building volume, sky view factor, plan area index, frontal area index, roughness length and zero-displacement height) were derived by morphometric analysis[31], using the Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP)[22].

Information about urban surface cover and its spatial and temporal changes was obtained from EO using advanced machine learning techniques and detailed spectral mixture models[32]. In particular, multi-temporal acquisitions were used to update the surface cover fraction abundance maps for the selected information classes of interest. Furthermore, by fusing hyperspectral observations with multispectral observations and spectral libraries[33], it was also possible to categorize different roof materials[34]. Other required parameters (e.g. emissivity, albedo and vegetation indices) were derived as outlined in Marconcini et al.[21]. Since high spatial resolution thermal imagery is currently not available with daily coverage, the thermal radiance retrieved at 1 km x 1 km resolution from MODIS and Sentinel 3 data was downscaled to 100 m x 100 m and used for estimating the corresponding LST by means of the novel technique described in Mitraka et al.[23]. Uncertainties of this approach were also assessed quantitatively in Mitraka et al.[24]. The downscaled LST values were compared to in-situ surface temperature observations from the micrometeorological flux towers.

Estimation of net all-wave radiation. Q* is the difference of the incoming solar (shortwave) radiation and atmosphere thermal (longwave) emission, minus the outgoing reflected solar radiation and urban surface thermal emission. Satellites observe in few spectral bands from a unique viewing direction, whereas Q* is an integral over the whole spectral domain and over the whole hemisphere. Therefore, the DART[9,35] (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) model[9] was used here to estimate local scale Q*. DART simulates radiative transfer in the urban surface - atmosphere system with the exact kernel and discrete ordinate methods; specifically, it operates on scenes simulated as 3D arrays of rectangular cells. Here we developed a processing chain that calibrates DART with satellite images: the iterative comparison of the model output with these images allows obtaining a material optical property (OP) map per urban element at the spatial resolution of the considered satellite data. The procedure is iterative to account for the multiple scattering mechanisms and it is structured in six steps. a) The urban morphology and material type are given as input to DART. b) DART simulates at high spatial resolution

(e.g., 2.5 m) all spectral bands of the satellite sensor whose imagery is used for comparison; specifically, the simulation is performed accounting for the specific atmosphere and illumination conditions of the given input satellite scene. In the first iteration, spatially constant OP is set per urban element type. c) the DART output simulated spectral image is georeferenced and spatially resampled according to the input satellite scene. d) the DART-simulated and satellite images are compared on a pixel basis to improve the OP map per urban element, using the area of the urban elements within each satellite pixel (derived from the urban morphology and material database). The procedure iterates from step b) until the DART-simulated and satellite images fit. Three iterations are usually enough. e) DART simulates the angular spectral radiative flux along directions sampling the upper hemisphere. f) Shortwave (K*) and longwave (L*) exitance maps are computed as a double integral over the spectrum and the upper hemisphere. Finally, Q* (given by the sum of K* and L*) is resampled to 100 m x 100 m spatial resolution and compared against observations from the micrometeorological towers.

Estimation of the net change in heat storage. ΔQ_S is the net flow of heat stored in the urban volume, i.e. the air, trees, buildings, ground, etc. In urban areas, the net heat stored in the canopy is a relatively large fraction of Q* and directly evaluating ΔQ_S in the urban canopy is very difficult[35]. To determine ΔQ_S we use the Element Surface Temperature Method (ESTM), which reduces the 3D urban volume to four elements, i.e. building roofs, walls, and internal mass and ground (road, vegetation, etc.)[6]:

$$\Delta Q_S = \sum_i \frac{\Delta T_i}{\Delta t} \varrho c_i \Delta x_i f_i \qquad (1)$$

where $\Delta T_i/\Delta t$ is the rate of temperature change over the period for each element i, ρc_i is its volumetric heat capacity, Δx_i is its thickness and f_i its fraction (derived by spectral mixture analysis, i.e. f_i is the plan area index or the wall fraction, derived from morphometric analysis). Each element type generally has several sublayers (e.g. a wall can be built up by brick, insulation and wood). Accordingly, without measured internal element temperatures the average is determined with:

$$\varrho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(-k\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (2)$$

where Q is the heat flux through the surface and k is the thermal conductivity. For the inside surfaces of the roof and walls, and both surfaces for the internal mass (floors, internal walls), the surface temperature of element i is determined by setting the conductive heat transfer out of (in to) the surface equal to the radiative and convective heat losses (gains), as described by Offerle at al.[6].

The morphology of the urban surface was derived from high resolution DSM, including 3D information of vegetation[22]. As different land surface covers have different thermal properties, EO-derived detailed land cover information was also required. As described above, we took into consideration seven information classes (Extended Data Fig. 1). Surface materials types for impervious surfaces were split into three paved and five building categories. To this aim, the Urban Atlas[36] land use, Google street map and local knowledge were employed. Moreover, meteorological forcing data derived from the WSN were used, as well as EO-derived downscaled LST.

Estimation of the turbulent heat fluxes. The methodology ([19,20]) uses the ARM approach[37] to estimate Q_H:

$$Q_H = \rho c_p \frac{LST - T_a}{r_a} \quad (3)$$

where ρ is the density of air, c_p the specific heat of air at constant pressure (1005 J kg^{-1} K^{-1}), T_a is the air temperature provided by the WSN and r_a is the aerodynamic resistance (s m^{-1}). Analogously, Q_E is expressed as:

$$Q_E = \frac{\rho c_p}{\gamma}\frac{e_s^* - e_a}{r_a + r_s} \quad (4)$$

where e_s^* is the saturation water vapour pressure in hPa at the surface temperature, e_a is the atmospheric water vapour pressure in hPa, γ is the psychrometric constant (0.67 hPa K^{-1}) and r_s is the

stomatal resistance in s m^{-1}. Stomatal resistance was calculated after Kato et al.[38], using the simplified equation from Nishida et al.[39]:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{f_1(T_a)f_2(PAR)}{r_{sMIN}} + \frac{1}{r_{cuticle}} \quad (5)$$

where PAR is the photosynthetic active radiation, r_{sMIN} is the minimum stomatal resistance and $r_{cuticle}$ is the canopy resistance related to the diffusion through the cuticle layer of leaves (10^5 s m^{-1}). Functions f_1 and f_2 are calculated as per Nishida et al.[39] and r_{sMIN} can be determined for each vegetation type[38]. Q_E is calculated by land cover type and weighted by fraction of water, vegetation and pervious surfaces with the respective r_{sMIN} in every pixel. The aerodynamic resistance r_a can then be written as[37]:

$$r_a = \frac{1}{u_* k}\left[ln\left(\frac{z_{ref}-z_d}{z_{0m}}\right) - \psi_h\left(\frac{z_{ref}-z_d}{L}\right) + \ln\left(\frac{z_{0m}}{z_{0h}}\right)\right] \quad (6)$$

and $$u_* = Uk\left[ln\left(\frac{z_{ref}-z_d}{z_{0m}}\right) - \psi_m\left(\frac{z_{ref}-z_d}{L}\right) - \psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right)\right]^{-1} \quad (7)$$

where u_* is the friction velocity in m s^{-1}, k is the von Karman constant (0.4), z_{ref} is height of wind measurements, z_d is the zero-plane displacement height, L is the Monin-Obukhov length, z_{0m} and z_{0h} are the roughness lengths and $\psi_{m,h}$ are the stability functions for momentum and heat, respectively. z_{0h} values are usually reported as the dimensionless number $k\beta^{-1}$, defined as

$$k\beta^{-1} = ln\left(\frac{z_{0m}}{z_{0h}}\right) \quad (8)$$

Several studies used EC and/or scintillometry measurements to determine $k\beta^{-1}$ in the footprint of their measured fluxes. Here, flux tower measurements were used as reference values for the magnitude of the fluxes of momentum and sensible and latent heat during the satellite overpass. z_{0h} was calculated from the roughness Reynold's number as[40]:

$$z_{0h} = z_{0m}[7.4\ exp(-\alpha Re_*^{0.25})] \quad (9)$$

where α = 1.29 and $Re_* = z_{0m} u_* / \nu$ is the roughness Reynolds number with a kinematic molecular viscosity ν of 1.461 × 10^{-5} m s^{-1}.

Both, roughness length (for heat and momentum) and displacement height are needed in r_a calculation. Here they were calculated using the real urban surfaces parameterization of Kanda et al.[41], based on the outputs of the morphometric analysis (mean and maximum building height, standard deviation of building height, plan area index and frontal area index), as derived from 1 m x 1 m DSM, using UMEP[22,31].

To evaluate the EO-derived turbulent heat fluxes EC observations are used with the EC footprints. Here, the Korman and Meixner[27] footprint model is used, as it has provided robust results for urban flux towers in numerous studies[42].

Estimation of the anthropogenic heat flux. Once the other UEB components are known, Q_F is estimated as a residual. In this case Q_F includes the net errors of each UEB component estimation. The Q_F values can be also estimated by calculating the spatial Energy Balance Closure (EBC). If EBC is achieved, the regression between (Q_H + Q_E) and (Q^* - ΔQ_S) gives an estimate of Q_F and the respective uncertainty[6]. The following assumptions are made: a) All energy consumed in buildings is released into the environment after use. b) Advection occurs at all three scales: at the microscale, horizontal advection occurs e.g. for sensible heat between shadowed and sunlit patches and for latent heat between wet and dry patches; at the local scale, advective fluxes may occur due to the close proximity of urban parks, water bodies, and between built-up areas of different density; and at the meso-scale, advection occurs between the city and the surrounding rural environment (urban breeze), or, for coastal cities, due to the presence of sea breezes. The surrounding topography may also induce anabatic/katabatic effects. Moreover, the moisture advection is converted to equivalent latent heat flux, which can be of similar size with the sensible heat flux, but opposite in sign, thereby essentially offsetting each other[43]. Concerning the local scale study, it was assumed that advection is incorporated in the error of Q_F estimation from the energy balance closure. c) Any unmeasured terms are also incorporated in the error of Q_F estimation. The

resulting Q_F was evaluated by comparisons to Q_F estimates from alternative approaches, based on inventories[22,28,44,45].

Data availability statement. This research was conducted in the framework of the URBANFLUXES project that received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme and joined the H2020 Pilot on Open Research Data. Therefore, all the datasets related to the present study are included in the URBANFLUXES Data Repository as Open Data and can be accessed at: http://urbanfluxes.eu/data/.

Acknowledgment

The research was conducted in the framework of the project URBANFLUXES (http://urbanfluxes.eu), that has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme, under Grant Agreement No 637519.

7.2. Utilisation des résultats dans le modèle DART-EB

Les résultats de propriétés de matériaux inversées et les bilans radiatifs qui en découlent ont également été utilisées dans le modèle DART-EB. Ce modèle, présenté dans le chapitre I, est issu d'un couplage entre le modèle DART et un module de bilan d'énergie. Il utilise le bilan radiatif calculé par DART, et simule les mécanismes énergétiques permettant de simuler le bilan d'énergie total de paysages urbains. Un article de conférence de JURSE 2017 est inclus dans ce paragraphe. Il présente une approche de calcul du bilan d'énergie urbain s'appuyant sur la méthode développée pendant cette étude pour calculer le bilan radiatif et le modèle DART-EB, en prenant en compte la complexité des structures des canopées urbaines. Des résultats sont présentés sur les villes d'Héraklion et de Bâle, pour lesquels les propriétés de matériaux inversées servent à calculer le bilan radiatif du paysage urbain considéré et à paramétrer le modèle couplé de bilan d'énergie DART-EB. Les simulations DART-EB rendent compte d'une cohérence physique des résultats entre les villes de Bâle et d'Héraklion. Les profils de température de surface générés sur une ou deux journées complètes pour des points de contrôle à différents emplacements présentent de forts contrastes de valeurs. Cela prouve qu'une approche de modélisation prenant en compte la complexité 3D des paysages urbains permet d'augmenter la précision des simulations de bilan d'énergie. Le travail sur cet axe continue mais l'utilisation de la méthode développée ici pour un calcul plus précis du bilan radiatif bénéficie naturellement au calcul du bilan d'énergie urbain dans son ensemble, ce qui a pu être testé par le développement et l'utilisation de DART-EB. Cet article est retranscrit page suivante.

ASSESSING URBAN CANOPIES 3D RADIATIVE AND ENERGY BUDGETS WITH REMOTE SENSING AND DART MODEL

Al Bitar A., Landier L., Guilleron J., Lauret N., Gastellu-Etchegorry J.P., Tiangang Y.
CESBIO Université de Toulouse
CNRS, CNES, UPS, IRD
Toulouse, France
ahmad.albitar@cesbio.cnes.fr

Feigenwinter C.
Department of Environmental Sciences
University of Basel
Basel, Swirtzerland

Mitraka Z., Chrysoulakis N.
Institute of Applied and Computational Mathematics
FORTH – Hellas
Heraklion, Greece

Abstract— The quantification of energy budget of big cities has gained a high interest in the recent decade considering it's link to global change and to the energy nexus. The management of the energy consumption in large cities is following a new revolution as we enter the era of smart cities. But our knowledge of the different components of the energy budget at local scale is still limited. Recently with the development of high spatial and temporal resolution satellite imagery and the widespread of 3D databases of the urban canopy, new physically based deterministic approaches to quantify the energy budget components are being developed. In this study, which is part of the H2020 URBANFLUXES project, we show results on the combined use of remote sensing data and 3D radiative and energy budget modeling in urban canopies. The approach relies on the combination of physical modeling and remote sensing data in visible and TIR from LandSat-8 over the city of Heraklion and Basel in Switzerland. The modeling is based on the use of DART (Direct Anisotropic Radiative Transfer) model with a new Energy Budget module DART-EB that takes into consideration the complexity of urban canopies.

I. INTRODUCTION

The evaluation of energy budget in urban canopies is evolving towards high resolution 3D modelling to enable the quantification of the distributed energy components including the anthropogenic one. This is breaching the gap between energy budget for architectural applications and urban energy budget in climate research. This is a major stack for the twenty first century as the number of mega-cities is evermore expanding so there is need to have robust tools to assess the energy consumptions of the cities in order to elaborate adapted managing strategies and to put in place climate change mitigation solutions from local to city scale. Recent advancement in geomatics and remote sensing is delivering high temporal and spatial resolution data that can be a major asset in this evolution. This is one of the questions investigated by the H2020 URBANFLUXES project (www.urbanfluxes.eu) [1] to which this study pertains. In this study we show the use of such data in the deterministic 3D modelling tool DART [2] (Direct Anisotropic Radiative Transfer) (www.cesbio.ups-tlse.fr/dart). The computation of the energy budget components over urban canopies requires the use of a radiative budget model, a convective heat model, a sensible heat model and an anthropogenic fluxes module. At large scales contextual energy budget models like TEB [3] are widely used. But at local scales these models lack the description of the complexity of the urban canopy's geometry and surface properties. We investigate here whether a 3D radiative budget model can provide accurate and spatialized results. This approach requires extensive sources of data for geometry and surface characteristics which are currently facilitated by the availability of 3D urban databases and remote sensing data. These data can be used in the urban environment for two main objectives: parametrizing the physical model or analysing the dynamic changes in the surface states. In this study the two objectives are investigated. In the first objective the visible and thermal remote sensing data from LandSat8 are used to retrieve iteratively the spectral response at high resolution. This method [4] is based on the iterative inversion of the outputs from the 3D RT model DART to determine the spectral properties of each element of the scene in 3D and at high resolution. The method is also used to disaggregate the LandSAT8 thermal data at high resolution. In the second objective, the outputs of the first approach are used to force the spectral properties in the coupled RT and EB simulations using DARTEB. The two way coupling is done via the surface temperature. An overview of the approach in terms of inputs, outputs and coupled information is presented in Figure 1. A brief presentation of the two coupled models is also given. The results of the coupled model are then compared to the disaggregated surface temperature data from LandSAT8.

II. MATERIALS

This study concerns the cities of Heraklion, Greece and Basel, Switzerland.

978-1-5090-5808-2/17/$31.00 ©2017 IEEE

A. *Remote sensing data*

Remote sensing data from LandSAT-8 satellite are used. Additional data from Sentinel-2 are considered. Sentinel-3 data will be considered upon availability. The images were atmospherically corrected using ATCOR tool by the DLR team and using complementary information on the atmosphere status to ensure a proper modeling of the scenes.

B. *Urban database and in-situ data*

3D models of the areas of interest (LCZ – Local Climate zones) of each city were implemented. The models contain 3D buildings, water surfaces, digital elevation models and trees. In-situ data on surface temperature, material optical and thermal properties are used in the different models and the validation of the approaches. Data over Basel city are provided by the University of Basel team and over Heraklion from the FORTH team [1].

III. METHODS

A. *3D radiative modeling using DART*

At the centre of the modeling and inversion approaches used in this study is the DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) model. DART is a comprehensive physically based 3D radiative transfer model that simulates the Earth-atmosphere radiation interaction from visible to thermal infrared wavelengths. It simulates optical signals at the entrance of imaging radiometers and LiDAR scanners on board of satellites and airplanes. It also provides the 3D radiative budget of urban and natural landscapes including atmosphere an impact of topography. A vast array of instruments properties can be configured: sensor altitude, spatial resolution, UV to thermal infrared. A special attention is given for numerical solutions in DART by using multi- spectral discrete ordinate techniques with exact kernel, RayCarlo method, etc. DART is available from Paul Sabatier University as freeware for scientific non-commercial use. [1].

B. *DART for Urban Canopy Properties*

The urban environment is generally constituted of a large number of materials. Each material, due to climate alteration or original constitution, has a different spectral response. In many cases inner heterogeneities are observed in the same roof. This can be due to development of organic materials, humidity or exposure. Remote sensing data provides information on the spectral response at a given projection plan. On the other hand DART can compute the same information using a-priori spectral properties of the surfaces.

We introduce here an iterative calibration method that computes the actual optical properties for each type of elements in the scene per pixel or group of pixels of the satellite image. It provides the desired spatial variability in optical properties of urban elements contributing to the scene. We consider N different types of urban elements and subdivide the satellite image used for calibration in groups of M x M pixels, where each group contains more pixel than there are types of elements. Then, we compare the desired satellite radiance value and the combined contributions simulated by DART of all the elements over the groups of pixels. This leads to the solving of an equation system for the updated optical properties of the elements:

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{\rho_{n,u}^{k+1}(x_{sat},y_{sat})}{\rho_{n,u}^{k}(x_{sat},y_{sat})} \cdot L_{DART,\Delta\lambda,n,m}(x_{sat},y_{sat}) = L_{sat,\Delta\lambda,m}(x_{sat},y_{sat}), \forall m \in [1\ M^2] \quad (1)$$

where $L_{DART,\Delta\lambda,n,m}$ is the radiance of element n computed by DART for satellite pixel m, $L_{sat,\Delta\lambda,m}$ is the satellite radiance for pixel m, $\rho_{n,u}^{k}$ is the optical property of element n used in DART at iteration k, for group of pixels u, and $\rho_{n,u}^{k+1}$ is the optical property of element n to be used in DART at iteration k+1, for group of pixels u.

We solve (1) for all the pixels groups over the satellite image and obtain the new values $\rho_{n,u}^{k+1}$ for each urban element. We apply this method for each considered spectral interval and then interpolate the results to get the full spectral radiative properties of the elements. This process is repeated iteratively in order to converge towards optimal optical properties that can be used for more accurate 3D radiative budget computation. The products generated by DART serve then as inputs for the DARTEB model, to produce the energy budget. This also contributes to one of the major objective of the H2020 URBANFLUXES project: inquire parameters of urban canopies from satellite data.

C. *USE of DART for 3D Coupled RT & EB*

When modelling radiative transfer in the thermal domain the emitted radiance depends on the surface temperature of the objects. This information is not readily available and a dynamic (time dependent) energy budget model is needed to derive it. On the other hand the energy budget depends on the 3D incoming radiation that can be modeled using the 3D radiative model. Thus there is a strong two-way coupling between energy budget and 3D radiative transfer. Here we

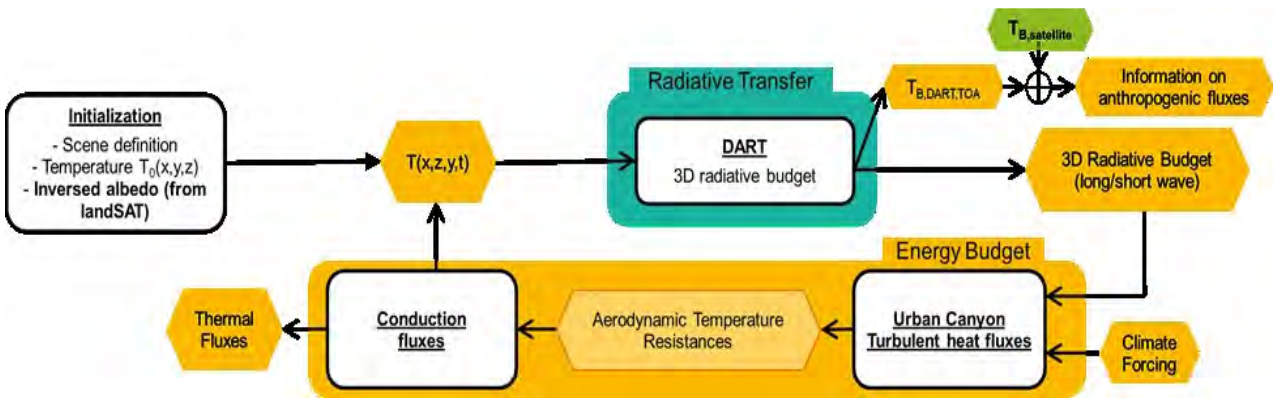


Fig. 1 Summary of the operational loop in the coupling between DART and DARTEB

present the DARTEB model which is a coupling between DART 3D radiative transfer model and 1D energy balance model. The two way coupling is done by exchanging the 3D surface temperature, as can be seen in Figure 1. It simulates the major energy mechanisms (heat conduction, turbulent momentum and heat fluxes, soil moisture, etc.) that contribute to the energy budget.

The main energy balance equations are similar to the TEB urban surface scheme [3]. The main difference is that a vertical wind profile is considered and a vertically dependent wall resistance is considered. The concept of a mean aerodynamic temperature is maintained as shown in Figure 2. Each surface type (wall, soil, and roof) is discretized into layers for simulating conduction fluxes to/from the ground and building interiors.

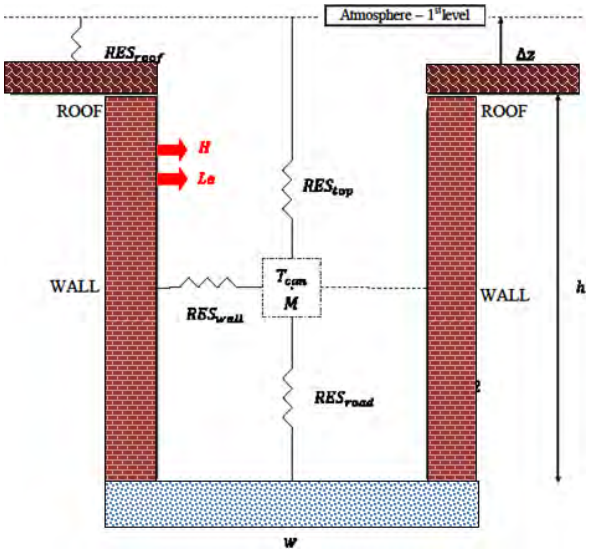
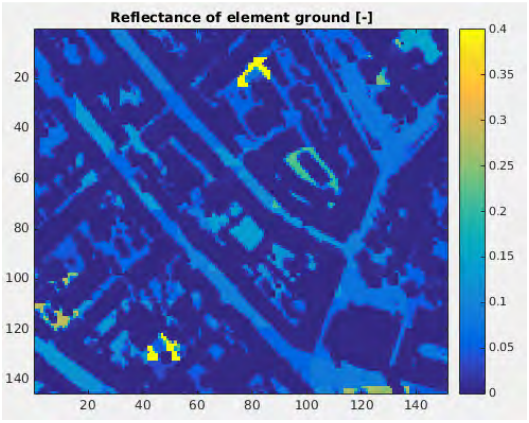


Fig. 2 Representation of a urban canyon DARTEB

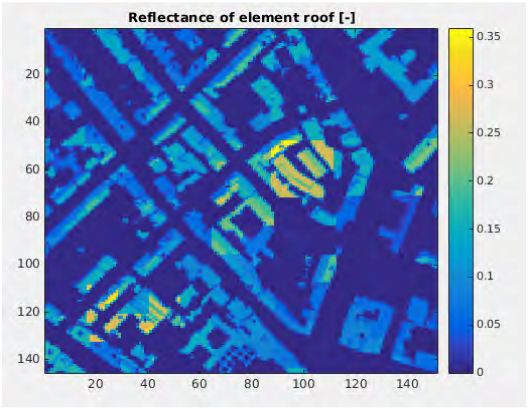
The 3D radiative budget and 3D temperature are assessed with a prognostic approach. A two way coupling is done at given time steps through surface temperature. Temperature values at time t lead to the 3D TIR (Thermal Infra Red) and energy budgets at time t+1, which allows one to compute the 3D temperature distribution at time t+1, using the 3D visible and NIR radiation budget at time t+1. Although, it uses an actual 3D radiative budget and it applies TEB equations at each point of the 3D scene, DARTEB is not a full 3D model (e.g., 1D wind profile is used instead of 3D wind distribution).

IV. Results

The iterative retrieval approach presented in section 3.1 was successfully conducted on the city of Basel, one of the study sites for the URBANFLUXES project. The data used is from a LandSAT-8 image of the city taken on April 4th, 2015. Figure 3 shows high resolution reflectance maps derived from LandSAT-8 30m data in for ground elements and roof elements. The results show inner roof heterogeneities which were not depicted in the original LandSAT-8 image due to resolution. This proves the ability of the approach to retrieve pixel based spectral properties. But some high values (>0.4) are observed over limited areas. They are due to compensation effects between the contributing elements in the scene. An additional moving grid algorithm is under implementation to remove these artefacts.



(a)



(b)

Fig. 3 High resolution (metric) reflectance image derived from a LandSAT-8 image (864.6nm, 30m)

The surface properties are then used to compute the radiative budget (Q*) over the complete city of Basel as shown in figure 4.

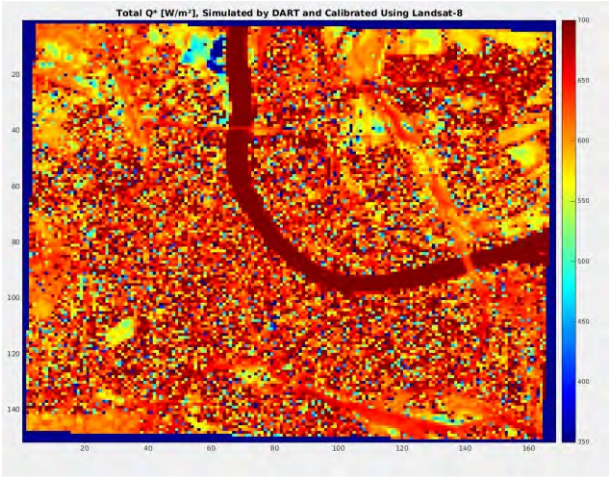


Fig. 4 Total radiative budget (W/m2) over the city of Basel as modeled by DART.

DARTEB was successfully validated [4] in the frame of the CAPITOUL project [3] of Meteo France for simulating the time evolution of the temperature of walls in a street of Toulouse (France). Here the model is applied to the Heraklion, Greece, site (Figure 5) and to the Basel, Switzerland site (Figure 6). In the two cases the results show a coherent dynamic of the surface temperature. The profiles in Figure 6-(c) show the temperature difference between the upper and lower wall obtained using the 3D approach.

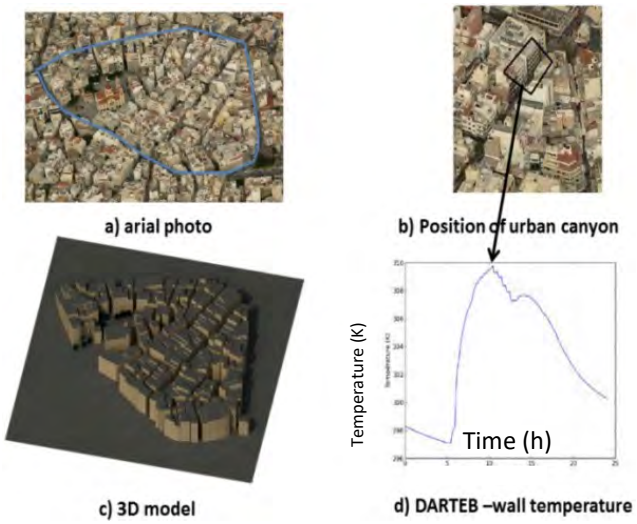
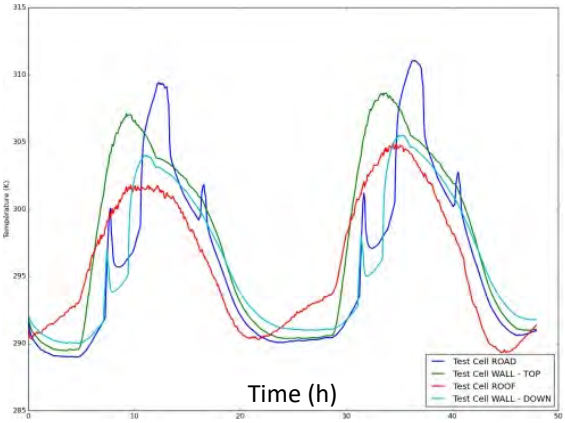


Fig. 5 Application of the DARTEB model over Heraklion, Greece.



(a)Google earth image (b) 3D model



(c) Surface temperature profiles

Fig. 6 Application of the DARTEB model to Basel Switzerland.

Future in-situ data will be used to validate the surface temperatures obtained by DARTEB.

V. Conclusions

We assess here the usefulness of the combined use of 3D radiative transfer modeling and remote sensing data for the evaluation of urban energy budget. Results are shown over Heraklion and Basel cities. The result show that spectral properties of the urban canopy surfaces can be retrieved using an iterative approach with DART simulations and LandSAT8 images. These are then used to compute the radiative budget over the 3D urban canopy. They are also used to force the spectral properties of the 3D urban canopy in a coupled 3D radiative transfer and energy budget model (DARTEB). The DARTEB simulations show physically consistent results over the city of Basel and Heraklion. Surface temperature profiles extracted in several control points exhibit high contrasting values proving that a 3D modeling approach can increase accuracy. Future work will focus on reducing the observed bias and then on the use of thermal components to improve the estimate of anthropogenic fluxes anomaly between remotely sensed thermal signature and modeled thermal signature.

Acknowledgment

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 URBANFLUXES research and innovation program. The authors acknowledge the support of the French Space Center (CNES) through the TOSCA-DART program.

References

[1] Chrysoulakis N.; Heldens W., Gastellu-Etchegorry J-P, Grimmond S.; Feigenwinter C., Lindberg F., DelFrate F., Klostermann, J. , Mitraka Z., Esch T., Al Bitar A., Gabey A., Parlow E., Olofson F., Urban Energy Budget Estimation from Sentinels: The URBANFLUXES Project, MUAS 2015.

[2] Gastellu-Etchegorry J.P., T. Yin, N. Lauret et al., "Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes", Remote Sensing, 7:2, 1667-1701, 2015.

[3] Masson V., "A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models", Boundary-Layer Meteorology, 94: 357-397, 2000.

[4] Landier L., A. Al Bitar, N. Lauret, T. Yin, J. P. Gastellu-Etchegorry, S. Aubert, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis, C. Feigenwinter, E. Parlow, W. Heldens, S. Kotthaus, S. Grimmond, and F. Lindberg, "Modeling parameters and remote sensing acquisition of urban canopies," in ICUC9, Toulouse, France (20-24 July), 2003, pp. 1–5.

[5] Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Liousse, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Connan, X. Briottet, S. Lachérade, P. Tulet, "The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOUL) experiment",Meteorol. Atmosph. Phys., 94: 357-397,2007.

V. Conclusion et Perspectives

1. Conclusion

L'objectif principal de ce travail de thèse était de cartographier le bilan radiatif des paysages urbains. L'approche retenue s'appuie sur l'emploi d'images satellites dans les courtes et grandes longueurs d'onde, nécessaires pour assurer un suivi des paysages urbains, à la fois régulier et à une résolution spatiale adaptée aux objectifs scientifiques associés au bilan d'énergie des milieux urbains. Elle a nécessité le développement d'une méthode originale d'inversion des images satellites basée sur l'emploi combiné d'un modèle physique de transfert radiatif 3D combiné à des bases de données géométriques urbaine. Le modèle de transfert radiatif DART a été choisi en raison de sa capacité à simuler avec précision et de manière efficace (temps de calcul, facilité d'emploi, etc.) à la fois les images satellites et le bilan radiatif des paysages terrestres naturels et urbains dans les courtes et grandes longueurs d'onde. D'autre part, le choix d'utiliser des bases de données géométrique urbaines est cohérent avec le fait que ces bases de données sont de plus en plus disponibles. Ce travail a été conduit dans le cadre d'un axe scientifique plus large qui est le suivi du bilan énergétique urbain et les flux de matière et d'énergie associés. Il a donc fallu établir des critères nécessaires d'une part pour s'assurer de la représentativité des bilans radiatifs calculés dans des milieux aussi complexes que les paysages urbains, et d'autre part pour permettre l'utilisation des produits calculés dans des études plus larges de bilan énergétique des villes. Ainsi, la méthode d'inversion développée ainsi que les séries temporelles de cartes de bilan radiatif calculées ont été utilisées dans le projet de la commission européenne H2020 URBANFLUXES (http://urbanfluxes.eu/). Ce projet de recherche vise à évaluer le bilan énergétique urbain et plus spécifiquement le flux de chaleur anthropogénique urbain (i.e. flux de chaleur causé par l'activité humaine au sein des villes) à partir d'images de satellites d'observation de la Terre. L'intérêt de cette approche est lié à l'augmentation des capteurs spatiaux, avec en plus des caractéristiques de plus en plus adaptées à l'étude des surfaces terrestres, et aussi à l'amélioration des modèles de simulation des images satellites et de bilan radiatif des paysages terrestres avec prise en compte de l'architecture 3D de ces paysages. La prise en compte de l'architecture 3D urbaine est particulièrement importante, car elle induit de très forts effets directionnels, à la fois dans les courtes et grandes longueurs d'onde, ce qui complique beaucoup l'extrapolation d'une mesure satellite à une quantité intégrée sur toutes les directions telle que le bilan radiatif urbain. La méthodologie développée contribue donc au suivi continu des phénomènes énergétiques.

Pour ce travail, plusieurs critères ont été respectés :

- Les cartes de bilan radiatif générées rendent compte de la variation spatiale des phénomènes radiatifs au sein de la ville. Une résolution des images finales de l'ordre de 100m a ainsi été choisie. Cependant, la méthodologie développée permet une résolution plus fine de l'ordre de grandeur de la résolution des images satellites.

- Le bilan radiatif est calculé sur une large zone afin de couvrir soit la ville complète, soit plusieurs quartiers. Cela permet d'observer des modes de fonctionnement différents selon les zones étudiées. Ainsi, il est possible de simuler des images thermiques qui font apparaître le phénomène d'ilot de chaleur urbain.

- Les phénomènes de propagation des radiations propres à la structure 3D complexe des paysages urbains sont explicitement modélisés. Cela permet de prendre en compte les mécanismes de diffusions multiples entre les différents éléments qui constituent le paysage urbain, les effets d'ombrage entre bâtiments, etc. ce qui finalement permet de simuler les comportements radiométriques très anisotropes des canopées urbaines.

- Des séries temporelles de cartes de bilan radiatif ont été générées. Elles permettent de renseigner sur l'évolution temporelle du bilan radiatif urbain, et par suite contribuent à notre connaissance sur

l'évolution du bilan d'énergie urbain. Ainsi, pour pouvoir suivre l'évolution des flux de chaleur anthropogénique, comme dans le cadre du projet URBANFLUXES, une fréquence temporelle de l'ordre du jour, voire même plus, est nécessaire. Cela implique que la méthode d'inversion des images satellites doit être efficace en termes de temps de calcul.

Ce manuscrit présente les approches choisies et développées afin de satisfaire les critères indiqués ci-dessus. Ainsi, les caractéristiques du modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) utiles à ce travail sont présentées. Un intérêt majeur de DART est de pouvoir représenter explicitement les paysages en trois dimensions. Dans ce travail, tous les bâtiments sont représentés par des facettes triangulaires juxtaposées, alors que la végétation est simulée sous forme de matière turbide. DART modélise les interactions "rayon - Matière" avec une méthode dite de suivi de flux, qui permet une modélisation explicite des mécanismes de diffusion multiple dans des milieux aussi complexes que les paysages urbains. Pour modéliser le transfert radiatif 3D, DART requiert une représentation 3D du paysage étudié. Dans le cas d'un paysage urbain, il est donc nécessaire de disposer de l'architecture 3D du bâti urbain, de la topographie, et aussi de la localisation et dimensions de la végétation urbaine. Ce travail a nécessité la simulation du bilan radiatif de grande zones urbaines, ce qui a nécessité de résoudre un certain nombre de problèmes techniques comme la limitation du nombre de triangles utilisés pour simuler les différents éléments de paysage, ce qui est essentiel pour que les simulations soient réalisées avec des temps de calcul raisonnables. De plus, des données sur l'éclairement et la composition de l'atmosphère locale ont été utilisées, afin de paramétrer la modélisation du transfert radiatif atmosphérique dans le modèle DART. Il a été ainsi possible de simuler les images satellites en luminance de paysages urbains, ainsi que leur bilan radiatif.

Cependant, si l'utilisation de DART décrite permet de prendre en compte tous les phénomènes dus au caractère tri-dimensionnel complexe des villes, c'est l'utilisation de l'imagerie satellite qui a permis de prendre en compte les variations spatiales du bilan radiatif du paysage. En effet, si les représentations 3D des villes sont disponibles de plus en plus fréquemment, les propriétés optiques et la température des matériaux urbains ne le sont presque jamais. L'intérêt de la méthode d'inversion introduite dans ce manuscrit est de donner accès à cette information. Cette méthode s'appuie sur des comparaisons itératives d'images de luminances acquises par satellites et simulées par DART dans les conditions du capteur satellite (e.g. angles de visée, conditions d'éclairement, date). Plusieurs améliorations de DART réalisées durant cette thèse par l'équipe DART a rendu ce travail possible : simulation d'images de luminance par groupe de matériau, possibilité de combiner la représentation 3D du paysage urbain avec une distribution 3D de propriétés optiques et / ou de températures. Ainsi, la méthodologie développée durant cette thèse conduit à l'établissement de systèmes d'équations de taille automatiquement adaptative à la zone de la ville dont on inverse les propriétés optiques et/ou températures de matériau. Ces systèmes d'équations sont établis par pixel ou par groupe de pixels selon le nombres de types de matériaux présents dans le pixel traité. Cela permet d'obtenir des cartes de propriétés optiques et de température de paysages urbains simples ou très complexes avec de nombreux types d'éléments (e.g., mur, toit, rue, eau, etc.). L'intérêt de réaliser plusieurs itérations successives de simulations et de comparer les images de luminance DART et satellites est de permettre la prise en compte précisément la complexité de l'architecture 3D urbaine. La méthode de résolution adoptée permet une convergence rapide vers des propriétés de matériau permettant une restitution précise de l'image satellite utilisée pour l'inversion. Ainsi, les images simulées par DART après l'inversion d'images satellites présentent une erreur relative de l'ordre de 1% pour les images dans les courtes longueurs d'onde, pour toute bande spectrale, et de l'ordre de 3% pour les images de luminance thermique. De plus, les différentes méthodes disponibles et approches développées lors des itérations successives permettent une inversion optimisée automatiquement selon le type de surface rencontrée, afin de limiter le nombre de simulations nécessaires. La méthode d'inversion a été développée pour fonctionner pour tout paysage et pour toute acquisition satellite, sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Elle a été appliquée avec succès pour les villes de Bâle, Londres, et Héraklion, et pour différents capteurs satellitaires possédant différentes résolutions spatiale et spectral, comme Landsat-8, Landsat-7, ASTER, et Sentinel-2.

L’utilisation des propriétés de matériaux ainsi inversées est ensuite utilisée pour simuler des cartes de bilan radiatif, par intégration spectrale et angulaire des luminances du paysage urbain. Cela a été rendu possible par un développement récent du modèle DART, qui permet de fournir des matrices de facteurs multiplicatifs de propriétés radiatives des matériaux, afin d’apporter une variabilité spatiale au cœur de la scène modélisée. Ainsi, des matériaux appartenant à un même groupe d’élément peuvent avoir des propriétés différentes, ce qui permet de bien rendre compte de la variabilité spatiale de la ville. La résolution de ces cartes de propriétés inversées est la même que la résolution de l’image satellite utilisée dans les comparaisons itératives, et peut donc fournir en sortie des cartes de bilan radiatif à cette même résolution. De manière à être utilisées pour calculer des cartes de bilan d'énergie des paysages urbains, dans le cadre du projet URBANFLUXES, elles ont été ré-échantillonnées à 100m de résolution quelle que soit la résolution satellite initiale (e.g. 20m pour Sentinel-2, 30m pour Landsat-8). On a également pu observer que plus la résolution de l’image satellite utilisée est bonne, plus l’inversion des propriétés optiques est précise. En effet, une meilleure résolution spatiale permet de notamment de réduire le nombre de pixels contenant un grand nombre de matériaux différents. La validation des cartes de bilan radiatif simulées a été réalisée à partir de mesures de bilan radiatif par des capteur radiométriques situés sur des tours de flux au centre des trois villes étudiées. Les résultats obtenus sont excellents. Ainsi, pour la ville de Bâle, l’erreur relative sur le bilan radiatif est ≈1.9% (RMSE ≈10.8 W/m²) avec des précisions similaires dans les domaines des courtes longueurs d’onde ou thermique. Cette valeur de l'erreur a été établie à partir de 19 cartes simulées dans des conditions sans nuage au-dessus de la tour de flux. Des résultats similaires ont été observés pour Londres : erreur relative globale de 2.8%. Cette erreur a été établie à partir de 4 cartes de bilan radiatif simulées sans couvert nuageux au-dessus de la tour de flux. Cette validation n'a pu être effectuée pour Héraklion, car les mesures de bilan radiatif n'étaient pas disponibles.

Les études du milieu urbain nécessitent en général des séries temporelles de cartes de bilan radiatif. Ces séries peuvent être simplement obtenues en appliquant la méthodologie développée à chaque image satellite disponible. Cette approche est cependant très couteuse en termes de temps de calcul, car elle nécessite de re-simuler les images satellites de toute la ville avec DART. Par suite, une méthode efficace en termes de calcul a été conçue et développée afin de créer des séries temporelles de bilan radiatif sans avoir à re-simuler les images satellites pour chaque pas de temps de la série temporelle. D'autre part, dans les courtes longueurs d'onde, l'approche développée permet de simuler les cartes de bilan radiatif urbain même en l'absence d'image satellite ; une image satellite acquise à une date plus ou moins proche de la série temporelle à calculer est cependant nécessaire. Dans les courtes longueurs d'onde, cette méthode utilise des bases de données de cartes d’albédo "ciel blanc" et "ciel noir" pré-calculées pour un échantillonnage discret des directions solaires possibles sur la zone considérée au cours d’une année. Ces cartes d’albédo sont générées en utilisant un jeu donné de propriétés optiques de réflectances inversées à l’aide d’au moins une image satellite, qui sont considérées constantes sur une période temporelle donnée. La faible variabilité temporelle des propriétés optiques des matériaux urbains a été vérifiée grâce à l’application des propriétés obtenues lors d’une inversion antérieure à une acquisition satellite différente. Des erreurs relatives de moins de 1% ont été constatées entre une image de luminance satellite et une image DART simulée utilisant des propriétés optiques inversée à partir d’une précédente acquisition (avec des écarts de l’ordre du mois entre les acquisitions). De plus, les cartes d’albédos de la base de données peuvent être mises à jour à chaque nouvelle acquisition satellite avec une approche très rapide ce qui s'est avéré permettre un suivi temporel précis même dans le cas ou des propriétés optiques de certains éléments urbains comme la végétation varient. La méthode de calcul d'une nouvelle carte de bilan radiatif à partir de ces bases de données se base sur l’interpolation linéaire des cartes existantes selon la date visée et les angles solaires des cartes d’albédo précalculées. En ajoutant des informations sur l’éclairement solaire direct et diffus de la scène pour la nouvelle date, on peut alors calculer très rapidement une nouvelle carte de bilan radiatif dans les courtes longueurs d’onde, sans réaliser de nouvelle simulation DART, à toute date, et sans nécessiter de nouvelle image satellite. Dans les grandes longueurs d'onde, le problème est plus complexe, car la température des éléments urbains varie beaucoup dans le temps, la résolution spatiale des images thermiques est moins bonne qu'aux courtes longueurs d'onde, et il n'existe pas de système satellite qui fournisse des séries d'images thermique avec une résolution spatiale et temporelle adaptées. Pour ces raisons, durant cette thèse, les séries temporelles de bilan radiatif ont été réalisées en créant des cartes de bilan radiatif thermique simplement à

partir de cartes de température de surface et d'émissivité dérivées de satellites à haut taux de revisite comme les satellites MODIS (1 à 2 acquisitions par jour), à partir de méthodes extérieures de *spectral-unmixing* mises en œuvre dans le cadre du projet URBANFLUXES. Cette approche diminue un peu la précision des résultats, mais elle est inévitable au vu des contraintes indiquées ci-dessus. Finalement, la méthode des LUTs permet de créer des cartes de bilan radiatif avec un temps de calcul de l'ordre de la minute, au lieu d'une ou plusieurs journées. De plus, grâce à la précision du bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde, la précision finale est bonne.

Les résultats finaux des cartes de bilan radiatifs ont été validés à l'aide de tours de flux présentes dans les villes de l'étude. Des séries temporelles ont été générées sur plusieurs centaines de dates de l'année 2016 sur les villes de Bâle, Londres, et Héraklion, et les résultats ont été comparés aux données fournies par les tours. Ainsi, la série temporelle de 316 cartes de Q^* réalisées pour Bâle sur l'année 2016, présente une erreur relative absolue moyenne de 4.45%. Cette erreur relative vaut 4.35% pour les 297 cartes de Q^* réalisées pour Londres en 2016-2017. Sur une année, Q^* varie d'environ 50 à 750 W/m² durant le jour, et entre -100 et -50 W/m² durant la nuit, selon la ville et la période de l'année. L'erreur RMSE sur ces séries temporelles est de l'ordre de 10 à 15 W/m² en moyenne sur toute la série temporelle (avec des erreurs plus faibles pour les valeurs d'exitance plus faibles). Comme déjà indiqué, cette validation n'a pas été possible pour Héraklion, car les tours de flux ne mesurent que l'éclairement (i.e., pas d'exitance). La précision est meilleure dans les courtes longueurs d'ondes que dans le thermique du fait de la simplification de ce dernier dans la méthode de génération des séries temporelles.

L'utilisation d'images nadir pour l'inversion des propriétés des matériaux a conduit à analyser l'impact des propriétés des murs sur le bilan radiatif. En effet, quoique invisibles depuis le satellite au nadir, les murs affectent la luminance des autres éléments urbains via les diffusions multiples. De plus, leur impact sur le bilan radiatif est relativement élevé. Il dépend en particulier de la densité et hauteur des immeubles. Leur impact est de l'ordre de grandeur de l'erreur RMSE observée sur les séries temporelles. Ils peuvent donc provoquer un biais systématique dans l'estimation de ce bilan. Les réflectances des murs peuvent donc être utilisées en tant que paramètre ajustable par la méthodologie développée. D'autre part, l'importance de la considération de la structure 3D du paysage urbain a été démontrée, par des observations de sous-estimation importante du bilan radiatif final pour des zones où la représentation des bâtiments n'était pas disponible. Il est intéressant de noter que les imprécisions de la représentation urbaines sont corrigées lors de l'inversion des propriétés optiques, mais uniquement pour les simulations d'images satellites. Les images DART font ainsi apparaitre des ponts alors que ceux-ci ne figurent pas dans les bases de données géométriques urbaines. Des comparaisons avec la méthode développée et des méthodes considérant la surface urbaine lambertienne ont illustré l'intérêt de la méthodologie développée, avec un gain en précision important. Ainsi, en simulant le bilan radiatif au niveau d'une tour de flux sur une journée entière avec la méthode de création de séries temporelles, l'erreur absolue moyenne au cours de la journée est de l'ordre de 1W/m² pour la méthode développée, contre une erreur 10 fois supérieure pour une méthode qui néglige l'architecture urbaine (i.e., hypothèse qualifiée de "lambertienne" dans le manuscrit). Les variations des propriétés optiques ont pu être observées au cours de l'année, principalement affectant les canopées végétales du fait de leur phénologie. Cependant, les mises à jours des bases de données d'albédo au cours des nouvelles acquisitions satellites ont permis de prendre en compte les évolution de propriétés de surfaces précisément, comme le montre la précision des séries temporelles générées.

Pour résumer, une méthodologie innovante a été développée pour simuler efficacement des séries temporelles de cartes de bilan radiatifs à haute résolution spatiale sur des villes entières, en utilisant uniquement des données satellites, une représentation en 3D de la ville étudiée, et des mesures d'éclairement locale. Cette méthode est d'un grand intérêt pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les propriétés optiques et thermiques sont directement utilisées par le modèle de transfert radiatif pour modéliser les interactions des différents éléments de paysage représenté avec le rayonnement électromagnétique. La précision des produits du modèle (e.g. albédo et exitance) dépend en partie de la précision des propriétés affectées aux différents matériaux, l'autre contributeur principal étant la précision de la représentation 3D. Ensuite, parce que ces données ne sont pas disponibles de

manière efficace sur la grande majorité des villes, alors que les images satellites le sont, et les propriétés des matériaux varient temporellement et spatialement. Enfin, la robustesse de cette méthode peut permettre de pallier à des imprécisions du reste des données, comme les imprécisions ou défauts des représentation 3D des éléments urbains, y compris la végétation, qui changent également avec le temps. La précision des résultats a été testée, en donnant d'excellents résultats. De plus, les bilans radiatifs ont été utilisés avec succès dans le projet URBANFLUXES, et dans le modèle de bilan d'énergie DARTEB. La méthode fonctionne pour tout paysage urbain, pour toute date, et toute image satellite, avec cependant une préférence pour des images de résolution spatiale inférieure à 100m.

2. Perspectives

La méthodologie développée est très bien adaptée pour le suivi temporel du bilan radiatif urbain, et par suite pour le suivi temporel du bilan d'énergie urbain. Plusieurs voies d'amélioration et d'utilisations futures des méthodes développées ont été observées. Les principales sont décrites dans ce paragraphe :

- La méthode d'inversion des propriétés des matériaux dans le domaine thermique n'a pas pu être exploitée au maximum de son potentiel, du fait d'un manque de données initiales lors de son développement. Il serait judicieux d'effectuer des tests de fonctionnement supplémentaires en utilisant plus de bandes spectrales dans les grandes longueurs d'onde pour une inversion plus précise de l'émissivité et de sa dépendance spectrale. La mission TRISHNA sera très intéressante sur ce point (haute résolution spatiale de 50m, 4 bandes thermiques).

- La création de séries temporelles efficace pour le bilan radiatif thermique doit être étudiée en tenant compte du fait que l'on ne peut pas toujours disposer d'images satellites thermiques avec une très haute revisite. Ainsi, l'approche pourrait utiliser une estimation pragmatique de la variation des températures urbaines par exemple à partir de données de la variation de la température de l'air.

- L'utilisation d'images obliques pour l'inversion des propriétés des éléments, est théoriquement possible sans changement à apporter à l'algorithme d'inversion ou au modèle DART. Cette approche permettrait d'avoir une observation directe des murs, ce qui devrait permettre de calculer directement leurs propriétés, de la même manière que les autres éléments urbains dans le cas d'images satellites au nadir.

- L'utilisation de DARTEB, le module de bilan d'énergie en développement couplé au modèle DART. Ce module calcule le bilan d'énergie de paysages urbains. Pour cela, il utilise bilan radiatif simulé par DART, et bénéficie donc directement de toutes les méthodes développées pour calculer ce bilan. Des améliorations au modèle DARTEB ont déjà été implémentées pour considérer non plus des représentations de la ville sous forme de canyons urbains uniques, mais en prenant explicitement en compte plusieurs canyons issus de la représentation 3D de la ville. Des résultats ont été obtenus pour des parties du paysage urbain à l'échelle de quelques canyons. Etendre la méthodologie à la canopée entière permettrait à terme de modéliser à la fois le bilan radiatif à l'aide de DART, avec des propriétés radiatives réalistes, et le reste du bilan d'énergie à partir de ce bilan radiatif à l'échelle de la ville.

La méthodologie développée durant cette thèse est en cours d'implémentation dans la version du modèle DART distribuée sous forme de licences (http://www.cesbio.ups-tlse.fr/dart/) par l'Université Paul Sabatier. Cette méthodologie est déjà demandée par des scientifiques. Son emploi dans des contextes similaires et différents de ce travail de thèse ne pourra que contribuer à son amélioration.

D'un point de vue personnel, ce travail de thèse m'a permis de découvrir le monde de la recherche dans le domaine du spatial, domaine vers lequel mes études académiques me prédestinaient. J'ai beaucoup apprécié cette recherche continuelle à la fois de la connaissance et de la perfection des résultats. J'ai aussi beaucoup apprécié l'ambiance de travail au sein de l'équipe DART, et en particulier l'esprit de collaboration entre les membres de l'équipe. Finalement, cette thèse m'a permis d'être recruté au Centre National d'Etudes Spatiales pour un travail qui je n'en doute pas sera aussi très captivant.

Bibliographie

Al Bitar A., *et al*., "Assessing Urban canopies 3D radiative and Energy Budgets with remote sensing and DART model," *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, Dubai, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/JURSE.2017.7924595

Ando, T. and Ueyama, M. Surface energy exchange in a dense urban built-up area based on two-year eddy covariance measurements in Sakai, Japan. Urban Climate 19, 155-169 (2017).

Allen, L., Lindberg, F. and Grimmond C.S.B., 2011. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.2210.

Arnfield AJ (2003) Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int J Climatol 23: 1–26

Arnfield AJ, Grimmond CSB (1998) An urban energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. Energy and Build 27: 61–68

Arnfield AJ (1982) An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. Phys Geog 3: 97–122

Atkinson BW (2003) Numerical modelling of urban heatisland intensity. Bound-Layer Meteorol 109(3): 285–310

Banskota, A.; Wynne, R.H.; Thomas, V.A.; Serbin, S.P.; Kayastha, N.; Gastellu-Etchegorry, J.P.; Townsend, P.A. Investigating the utility of wavelet transforms for inverting a 3-D radiative transfer model using hyperspectral data to retrieve forest LAI. Remote Sens. 2013, 5, 2639–2659.

Barbier, N.; Couteron, P.; Proisy, C.; Malhi, Y.; Gastellu-Etchegorry, J.P. The variation of apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests. Glob. Ecol. Biogeogr. 2010, 19, 72–84.

Barbier, N.; Couteron, P.; Gastelly-Etchegorry, J.-P.; Proisy, C. Linking canopy images to forest structural parameters: Potential of a modeling framework. Ann. Forest Sci. 2012, 69, 305–311.

Barsi, J.A.; Lee, K.; Kvaran, G.; Markham, B.L.; Pedelty, J.A. The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. Remote *Sens.* 2014, *6*, 10232-10251. doi:10.3390/rs61010232

Berk, A. MODTRAN Band Model Transmittance. Available online: www.spectral.com/pdf/ MODTRAN4_Multiple_Scattering.pdf (accessed on 16 November 2014).

Berk, A., Bernstein, L. S., Robertson, D. C., 1987. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN. Tech. rep., DTIC Document. 4, 22

Borel, C. C., Gerstl, S. A., Powers, B. J., 1991. The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces. Remote Sensing of Environment 36 (1), 13–44. 4, 16, 23

Bottema M (1997) Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. Atmos Environ 31(18): 3059–3075

Bruniquel-Pinel, V.; Gastellu-Etchegorry, J. Sensitivity of texture of high resolution images of forest to biophysical and acquisition parameters. Remote Sens. Environ. 1998, 65, 61–85.

Chen, S. and Hu, D. Parameterizing Anthropogenic Heat Flux with an Energy-Consumption Inventory and Multi-Source Remote Sensing Data. Remote Sens. 9, 1165 (2017).

Chen, J. M., Leblanc, S. G., 2001. Multiple-scattering scheme useful for geometric optical modeling. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 39 (5), 1061–1071. 3, 22

Chen, J. M., Leblanc, S. G., 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 35 (5), 1316–1337. 3, 22

Chrysoulakis N.; Heldens W., Gastellu-Etchegorry J-P, Grimmond S.; Feigenwinter C., Lindberg F., DelFrate F., Klostermann, J., Mitraka Z., Esch T., Al Bitar A., Gabey A., Parlow E., Olofson F., Urban Energy Budget Estimation from Sentinels: The URBANFLUXES Project, MUAS 2015.

Chrysoulakis, N. Estimation of the all-wave Net Radiation Balance in Urban Environment with the combined use of Terra/ASTER multispectral imagery and in-situ spatial data. J. Geophys. Res 108, D18, 4582 (2003).

Crawford, B., Grimmond, C. S. B., Ward, H. C., et al. Spatial and temporal patterns of surface–atmosphere energy exchange in a dense urban environment using scintillometry. Q. J. R. Meteorol. Soc. 143, 817-833 (2017).

Dawson, T. P., Curran, P. J., Plummer, S. E., 1998. LIBERTY—Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. Remote Sensing of Environment 65 (1), 50–60. 4, 22

Disney, M., Lewis, P., North, P., 2000. Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling. Remote Sensing Reviews 18 (2-4), 163–196. 4, 9, 17, 23, 105

Duan, M., Min, Q., Lü, D., 2010. A polarized radiative transfer model based on successive order of scattering. Advances in Atmospheric Sciences 27 (4), 891–900. 4, 17, 23

Durrieu, S.; Cherchali, S.; Costeraste, J.; Mondin, L.; Debise, H.; Chazette, P.; Dauzat, J.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Baghdadi, N.; Pélissier, R. Preliminary Studies for a Vegetation Ladar/Lidar Space Mission in France. In Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), , Melbourne, Australia, 21–26 July 2013.

Engelsen, O., Pinty, B., Verstraete, M., Martonchik, J., 1996. Parametric bidirectional reflectance factor models: Evaluation, improvements and applications. EC Joint Research Centre. Tech. rep., Technical Report No. EUR 16426 EN. 2, 20

Feigenwinter, C., Parlow, E., Vogt, R., et al. Spatial Distribution of Sensible and Latent Heat Flux in the URBANFLUXES case study city Basel (Switzerland). In Proceeding of Joint Urban Remote Sensing Event JURSE 2017, held in Dubai, UAE, March 30 - April 1, 2017.

Feret, J.-B., François, C., Asner, G. P., Gitelson, A. A., Martin, R. E., Bidel, L. P., Ustin, S. L., le Maire, G., Jacquemoud, S., 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. Remote Sensing of Environment 112 (6), 3030–3043. 4, 22

Fontanilles G. Caractérisation des propriétés optiques infrarouges et de la température par désagrégation de mesures directionnelles et spectrales, PhD Thesis, Paul Sabatier University, Toulouse (2009).

Fontanilles G., Briottet X., Fabre S. and Trémas T., « *Thermal infrared radiance simulation with aggregation modeling (TITAN) : an infrared radiative transfer model for heterogeneous 3-D surface – application over urban areas »* Applied Optics, vol. 47, n° 31, pp. 5799-5810 (2008).

Gascon, F.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Lefevre-Fonollosa, M.-J.; Dufrene, E. Retrieval of forest biophysical variables by inverting a 3-D radiative transfer model and using high and very high resolution imagery. Int. J. Remote Sens. 2004, 25, 5601–5616.

Gascon, F.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Lefèvre, M.-J. Radiative transfer model for simulating high-resolution satellite images. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001, 39, 1922–1926.

Gastellu-Etchegorry J.P., DART User Manual v2018, http://www.cesbio.ups-tlse.fr/dart/#/ (2018)

Gastellu-Etchegorry J.P., T. Yin, N. Lauret et al., "Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes", Remote Sensing, 7:2, 1667-1701, 2015.

Gastellu-Etchegorry J.P., Malenovsky Z., Lauret N., Yin T., Guilleux J., Chavanon E., Medjoub G., Robert B., Verhoef W., van der Tol C., Cook B., Morton D., Middleton E., 2017, Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART) modelling of chlorophyll fluorescence in three-dimensional structurally explicit plant canopies, ESA Conference, Frascatti January 17-19, 2017.

Gastellu-Etchegorry, J.; Guillevic, P.; Zagolski, F.; Demarez, V.; Trichon, V.; Deering, D.; Leroy, M. Modeling BRF and radiation regime of boreal and tropical forests: I. BRF. Remote Sens. Environ. 1999, 68, 281–316.

Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Demarez, V.; Pinel, V.; Zagolski, F. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3D vegetation canopies. Remote Sens. Environ. 1996, 58, 131–156.

Govaerts, Y. M., Verstraete, M. M., 1998. Raytran: A Monte Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 36 (2), 493–505. 5, 23

Grau, E.; Gastellu-Etchegorry, J.-P. Radiative transfer modeling in the Earth-Atmosphere system with DART model. Remote Sens. Environ. 2013, 139, 149–170.

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Beringer, J., Bohnenstengel, S. I., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M. L., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E. S., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Ooka, R., Pigeon, R., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Steeneveld, G. J., Tombrou, M., Voogt, J. A., Young, D. T., and Zhang, N.: Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison, Int. J. Climatol., 31, 244–272, doi:10.1002/joc.2227, 2011.

Grimmond, C.S.B., Roth, M., Oke, T. R., et al. Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). Procedia Environ. Sci. 1, 247-274 (2010).

Grimmond CSB & Oke TR (2002) Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS) J. Appl. Meteorol. 41, 792-810.

Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R., 1999a. Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. J. Appl. Meteorol. 38, 922 - 940.

Grimmond CSB, Oke TR (1999b) Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. J Appl Meteor 38: 1262–1292

Grimmond CSB, King TS, Roth M, Oke TR (1998) Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. Bound-Layer Meteor 89: 1–24

Grimmond CSB 1992: The suburban energy-balance – methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions International Journal of Climatology, 12, 481–497

Grimmond CSB, Cleugh HA & Oke TR (1991) An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. Atmos. Env. 25B, 311-174.

Grimmond CSB & Oke TR (1991) An Evaporation-Interception Model for Urban Areas. Water Resour. Res. 27, 1739-1755.

Grimmond CSB, Oke TR and Steyn DG (1986) Urban water-balance 1. A model for daily totals. Water Resour Res 22: 1397-1403.

Groleau D., Fragnaud F., and Rosant J. M., "Simulation of the radiative behaviour of an urban quarter of Marseille with the Solene model", *Fifth International Conference on Urban Climate, L dz,Pologne,* pp. 1-5, 2003

Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 86 (B4), 3039–3054. 4, 22

Hapke B. W., R.M. Nelson, and W.D. Smythe. The opposition effect of the Moon - the contribution of coherent backscatter. Science, 260(5107) :509–511, APR 23 1993. ISSN 0036-8075. doi : {10.1126/ science.260.5107.509}. 29

Hénon A., « *Températures mesurées, modélisées, et observées par télédétection infrarouge, dans la canopée urbaine: modélisation aero-thermo-radiative des flux de chaleur urbains* », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes. 230 pp (2008).

Iamarino, M., Beevers, S. and Grimmong C.S.B., 2011. High-resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970 - 2025. Int. J. Climatol., DOI: 10.1002/joc.2390.

Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K (1999) Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. Atmos Environ 33: 3897–3909

Jung I.-K., Lacroix S., (2003), High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery, Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2003) 2-Volume Set 0-7695-1950-4/03

Jacquemoud S. and Baret F.. Prospect - A model of leaf optical-properties spectra. Remote Sensing of Environment, 34(2) :75–91, NOV 1990. ISSN 0034-4257. 14, 27, 31

Jacquemoud S., Baret F., and Hanocq J. F. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance. Remote Sensing of Environment, 41(2-3) :123–132, AUG-SEP 1992. ISSN 0034-4257. doi : {10.1016/0034-4257(92)90072-R}. 5TH International colloquium on physical measuremens and signatures in remote sensing, COUrchevel, france, JAN 14-18. 29

Järvi L., Grimmond C.S.B., Christen A., The Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): evaluation in Los Angeles and Vancouver, J. Hydrol., 411 (2011), pp. 219-237

Järvi, L., Grimmond, C. S. B., Taka, M., Nordbo, A., Setälä, H. and Strachan, I. B.(2014) Development of the Surface Urban Energy and Water balance Scheme (SUEWS) for cold climate cities. Geoscientific Model Development, 7. pp. 1691-1711. ISSN 1991-9603

Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Moriwaki, R. and Sugawara, H., 2007. Roughness Lengths for Momentum and Heat Derived from Outdoor Urban Scale Models. J. Appl. Meteor. Climatol., 46, 1067 - 1079.

Kato, S. and Yamaguchi, Y. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. Remote Sens. Environ. 110, 1-17 (2007).

Kato, S. and Yamaguchi, Y., 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat from sensible heat flux. Remote Sens. Environ., 99, 44 - 54.

Kimes, D., Kirchner, J., 1982. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. Appl. Opt. 21, 4119–4129. 3, 21, 61

Krayenhoff, E., and James Voogt. 2016. “Daytime Thermal Anisotropy of Urban Neighbourhoods: Morphological Causation.” Remote Sensing 8 (2): 108. doi:10.3390/rs8020108.

Lagouarde, J. -P., A. Hénon, B. Kurz, P. Moreau, M. Irvine, J. Voogt, and P. Mestayer. 2010. “Modelling Daytime Thermal Infrared Directional Anisotropy over Toulouse City Centre.” Remote Sensing of Environment 114 (1): 87–105. doi:10.1016/j.rse.2009.08.012.

Lagouarde, J. -P., P. Moreau, M. Irvine, J. -M. Bonnefond, J. Voogt, and F. Solliec, 2004. “Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France).” Remote Sensing of Environment 93 (4): 443–462. doi:10.1016/j.rse.2003.12.011.

Lagouarde, J. -P., M. Irvine, 2008. “Directional anisotropy in thermal infrared measurements over Toulouse city centre during the CAPITOUL measurement campaigns: first results.” Meteorol Atmos Phys 102: 173. https://doi.org/10.1007/s00703-008-0325-4

Leblanc, S. G., Chen, J. M., 2000. A windows graphic user interface (GUI) for the five-scale model for fast BRDF simulations. Remote Sensing Reviews 19 (1-4), 293–305. 3, 22

Lemonsu, A., V. Masson, L. Shashua-Bar, E.Erellet, D.Pearlmutter. 2012, «Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas», Geosci. Model Dev., vol.5, p. 1377–1393.

Lemonsu A, Grimmond CSB, Masson V (2004) Modelling the surface energy balance of an old Mediterranean city core. J Appl Meteor 43: 312–327

Lemonsu, A. and Masson, V., 2002. Simulation of a summer urban breeze over paris. Boundary-Layer Meteorol., 104 :463–490.

Lewis, P., 1999. Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System. Agronomie 19 (3-4), 185–210. 5, 23

Li, X., Strahler, A. H., 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 30 (2), 276–292. 3, 22

Lindberg F, Grimmond CSB, Nithiandamdan Y, Kotthaus S, Allen L (2013) Impact of city changes and weather on anthropogenic heat flux in Europe 1995–2015, Urban Climate,4,1-13

Lindberg, F. and Grimmond, C. (2011) Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. Urban Ecosystems 14:4, 617-634.

Liu, S., Liu, Q., Liu, Q., Wen, J., Li, X., 2010. The angular and spectral kernel model for BRDF and albedo retrieval. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of 3 (3), 241–256. 2, 20

Loridan T, CSB Grimmond, BD Offerle, DT Young, T Smith, L Järvi, F Lindberg (2011) Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS): longwave radiation parameterization & seasonality related developments. Journal of Applied Meteorology & Climatology 50, 185-202, doi: 10.1175/2010JAMC2474.1

Malenovský, Z.; Martin, E.; Homolová, L.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Zurita-Milla, R.; Schaepman, M.E.; Pokorný, R.; Clevers, J.G.; Cudlín, P. Influence of woody elements of a Norway spruce canopy on nadir reflectance simulated by the DART model at very high spatial resolution. Remote Sens. Environ. 2008, 112, 1–18.

Malenovský, Z.; Homolová, L.; Zurita-Milla, R.; Lukeš, P.; Kaplan, V.; Hanuš, J.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Schaepman, M.E. Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. Remote Sens. Environ. 2013, 131, 85–102.

Martilli A, Clappier A, Rotach M (2002) An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. Bound-Layer Meteor 104: 261–304

Martonchik, J. V., 1997. Determination of aerosol optical depth and land surface directional reflectances using multiangle imagery. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 102 (D14), 17015–17022. 2, 20

Masson, V. 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. Theoretical and Applied Climatology, 84(1), 35–45.

Masson V, Grimmond CSB, Oke TR (2002) Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. J Appl Meteor 41: 1011–1026

Masson V (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound-Layer Meteor 94: 357–397

Meganem I., Déliot P., Briottet X., Deville Y., Hosseini S., Linear–Quadratic Mixing Model for Reflectances in Urban Environments, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 52, NO. 1, JANUARY 2014

Meyn, S. K. and Oke, T.R., 2009. Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage. Energy and Buildings, 41, 745 - 752.

Miguet F, Groleau D (2002) A daylight simulation tool for urban and architectural spaces – application to transmitted direct and diffuse light through glazing. Build Environ 37:833–843 6

Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., Doxani, G., Del Frate, F., & Berger, M. (2015). Urban Surface Temperature Time Series Estimation at the Local Scale by Spatial-Spectral Unmixing of Satellite Observations. Remote Sensing, 7(4), 4139–4156. doi:10.3390/rs70404139

Mitraka, Z., Berger, M., Ruescas, A., Sobrino, J. A., Jiménez-muñoz, J. C., Brockmann, C. and Chrysoulakis, N., 2013. Estimation of Land Surface emissivity and temperature based on spatial-spectral unmixing analysis. In 3rd MERIS/(A)ATSR & OCLI-SLSTR Preparatory Workshop, Frascati, Italy, 15-19 October 2013.

Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., Kamarianakis, Y., Partsinevelos, P. and Tsouchlaraki, A., 2012. Improving the estimation of urban surface emissivity based on sub-pixel classification of high resolution satellite imagery. Remote Sens. Environ.: Special Issue Remote Sensing of Urban Environments, 117, 125 - 134.

Moriwaki, R., Kanda, M., 2004, Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, waper vapor, and carbo dioxide over a suburban area. Journal of Applied Meteorology, 43, 1700-1710.

Myneni, R., Marshak, A., Knyazikhin, Y., G., A., Aug 1991. Discrete ordinate method for photon transport in leaf canopies, Photon-vegetation Interactions. Photon-vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology, 45–109. 3, 21, 61

Nilson, T.; Kuusk, A. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. Remote Sens. Environ. 1989, 27, 157–167.

North, P., 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 34 (4), 946–956. 5, 9, 23, 105

Nunez, M. and Oke, T. R., 1977. The energy balance of an urban canyon. J. Appl. Meteorol. 16, 11 - 19.

Offerle, B., C. S. B. Grimmond, K. Fortuniak, and W. Pawlak (2006), Intraurban differences of surface energy fluxes in a central European city, J. Appl. Meteorol. Clim., 45, 125e136.

Offerle, B., Grimmond, C.S.B. and Fortuniak, K., 2005. Heat Storage and Anthropogenic Heat Flux in Relation to the Energy Balance of a Central European City Centre. Int. J. Climatol., 25, 1405 - 1419.

Offerle, B. D., 2003a. The energy balance of an urban area: examining temporal and spatial variability through measurements, remote sensing and modeling Ph.D, Indiana University, Bloomington USA.

Offerle B, Grimmond CSB & Oke TR (2003b) Parameterization of Net All-Wave Radiation for Urban Areas. J. Appl. Meteorol. 42, 1157-1173.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J. A. Urban Climates. Cambridge University Press (2017).

Oke, T. R., 1987. Boundary layer climates. Routledge.

Oke TR (1982) The energic basis of the urban heat island. Quart J Roy Meteor Soc 108: 1–24

Oke, T., 1979. Advectively-assissted evapotranspiration from irrigated urban vegetation. Boundary-Layer Meteorology, 17, 167-173.

Peddle, D., Franklin, S., Johnson, R., Lavigne, M., Wulder, M., 2003. Structural change detection in a disturbed conifer forest using a geometric optical reflectance model in multiple-forward mode. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41 (1), 163–166. 3, 22

Péneau J.-P., « *SOLENE : un outil au service de l'architecture et de l'urbanisme* », Bâtiment et Énergie n°57, pp. 30-32 (1989).

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P. and Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). Int. J. of Climat., 27, 1969 - 1981.

Pigeon, G., A. Lemonsu, V. Masson, and P. Durand, 2003: Sea–town interactions over Marseille— Part II: Consequences on atmospheric structure near the surface. Proc. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate, O30.3, Łódz´, Poland, International Association for Urban Climate, 4 pp.

Pinty, B.; Gobron, N.; Widlowski, J.L.; Gerstl, S.A.; Verstraete, M.M.; Antunes, M.; Bacour, C.; Gascon, F.; Gastellu, J.P.; Goel, N. Radiation transfer model intercomparison (RAMI) exercise. J. Geophys. Res.: Atmos. 2001, 106, 11937–11956.

Pinty, B.; Widlowski, J.L.; Taberner, M.; Gobron, N.; Verstraete, M.; Disney, M.; Gascon, F.; Gastellu, J.P.; Jiang, L.; Kuusk, A. Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase. J. Geophys. Res.: Atmos. 2004, 109, doi:10.1029/2003JD004252.

Proisy, C.; Barbier, N.; Guéroult, M.; Pélissier, R.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Grau, E.; Couteron, P. Biomass Prediction in Tropical Forests: The Canopy Grain Approach. Available online: http://hal.ird.fr/ird-00658600/document (accessed on 16 November 2014).

Rahman, H., Pinty, B., Verstraete, M. M., 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model: 2. Semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 98 (D11), 20791–20801. 2, 20

Richter R. and Schläpfer D. (2015): ATCOR-2/3 User Guide. Version 9.0.0. DLR & ReSe Applications.

Richter, R. and Schläpfer, D. (2002): Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: Atmospheric/topographic correction. In: Int. J. Remote Sens. 23 (13), S. 2631–2649. DOI: 10.1080/01431160110115834.

Richter, R. (1998): Correction of satellite imagery over mountainous terrain. In: Appl. Opt. 37 (18), S. 4004–4015. DOI: 10.1364/AO.37.004004.

Ross, I., 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. No. 3. Springer Science & Business Media. 3, 10, 21

Roujean, J.-L., Leroy, M., Deschamps, P.-Y., 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 97 (D18), 20455–20468. 2, 20

Smolander, S., et al., 2006. Radiative transfer, interception and scattering in coniferous forests: models and applications for production ecology and remote sensing. Dissertationes Forestales. 3, 21

Sun T, Wang ZH, Oechel W & Grimmond CSB (2017) The Analytical Objective Hysteresis Model (AnOHM v1.0): Methodology to Determine Bulk Storage Heat Flux Coefficients. Geosci. Model Dev. Discuss. doi: 10.5194/gmd-2016-300.

Taha H (1999) Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: a bulk parameterization approach. J Appl Meteor 38: 466–473

Thompson, R.; Goel, N.S. Two models for rapidly calculating bidirectional reflectance: Photon spread (PS) model and statistical photon spread (SPS) model. Remote Sens. Rev. 1998, 16, 157–207.

Van der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, a., & Su, Z., 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. Biogeosciences, 6(12), 3109–3129.

Verhoef et al. (2007) Unified Optical-Thermal Four-Stream Radiative Transfer Theory for Homogeneous Vegetation Canopies, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 45, no. 6, june 2007.

Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : The SAIL model. Remote Sensing of Environment 16, 125–141. 4, 16, 22

Voogt, J., and E. Krayenhoff, 2005. "Modeling urban thermal anisotropy." 5th International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas. March 14–16, 2005, Phoenix, AZ.

Voogt, J.A., and Oke, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sens. Environ. 86, 370 - 384 (2003).

Voogt, James A., and T. R. Oke. 1998. "Effects of Urban Surface Geometry on Remotely-Sensed Surface Temperature." International Journal of Remote Sensing 19 (5): 895–920.

Wanner, W., Li, X., Strahler, A., 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) 100 (D10), 21077– 21089. 2, 20

Ward H.C., L. Järvi, S. Onomura, F. Lindberg, A. Gabey, C.S.B. Grimmond. SUEWS Manual: V2016a, http://urban-climate.net/umep/SUEWS (2016a)

Ward, H. C., Kotthaus, S., Järvi, L. and Grimmond, C.S.B. Surface Urban Energy and Water Balance (SUEWS): development and evaluation at two UK sites. Urban Climate 18, 1-32 (2016b).

Weng, Q., Hu, X., Quattrochi, D. and Liu, H. Assessing intra-urban surface energy fluxes using remotely sensed aster imagery and routine meteorological data: A case study in Indianapolis, USA. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 7, 4046-4057 (2014).

Weng, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. ISPRS J. Photogramm. Remore Sens. 64, 335-344 (2009).

Widlowski, J.L.; Taberner, M.; Pinty, B.; Bruniquel-Pinel, V.; Disney, M.; Fernandes, R.; Gastellu-Etchegorry, J.P.; Gobron, N.; Kuusk, A; Lavergne, T. Third Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Documenting progress in canopy reflectance models. J. Geophys. Res.: Atmos. 2007, 112, doi:10.1029/2006JD007821

Widlowski, J.-L.; Robustelli, M.; Disney, M.; Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Lavergne, T.; Lewis, P.; North, P.; Pinty, B.; Thompson, R.;Verstraete, M. The RAMI On-line Model Checker (ROMC): A web-based benchmarking facility for canopy reflectance models. Remote Sens. Environ. 2008, 112, 1144–1150.

Widlowski, J.L.; Pinty, B.; Lopatka, M.; Atzberger, C.; Buzica, D.; Chelle, M.; Disney, M.; Gastellu-Etchegorry, J.P.; Gerboles, M.; Gobron, N. The fourth radiation transfer model intercomparison (RAMI-IV): Proficiency testing of canopy reflectance models with ISO-13528. J. Geophys. Res.: Atmos. 2013, 118, 6869–6890.

Willmott C. J., Ackleson S. G., Davis R. E., Feddema J. J., Klink K. M., Legates D. R., O'Donnell J., and Rowe C. M., "Statistics for the Evaluation and Comparison of Models", *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, no. C5, pp. 8995-9005, 1985.

Willmott C. J., "On the Validation of Model", *Physical Geography*, 2, 2, pp. 184-194, 1981.

Willmott C.J., Robeson S. M., Matsuura K., "A Refined Index of Model Performance", *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2419, 1981

Xu, W., Wooster, M.J. and Grimmond, C.S.B., 2008. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. Remote Sens. Environ., 112, 3493 - 3510.

Yin, T., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Lauret, N., Grau, E., Rubio, J., 2013. A new approach of direction discretization and oversampling for 3D anisotropic radiative transfer modeling. Remote Sensing of Environment 135, 213–223. 4, 8, 16, 23

You, D., Wen, J., Liu, Q., Tang, Y., 2014. The Angular and Spectral Kernel-Driven Model: Assessment and Application. 2, 20

Zhu Z., Wang S., Woodcock C. E., Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. Remote Sensing of Environment, Volume 159, 2015, Pages 269-277, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.014.

Annexes

Annexe A – Convert a raster DEM to OBJ format

Step 1. Convert the DEM to OBJ format.

If the DEM is originally an image, this can be done with the script **convertDEMtoOBJ.py**

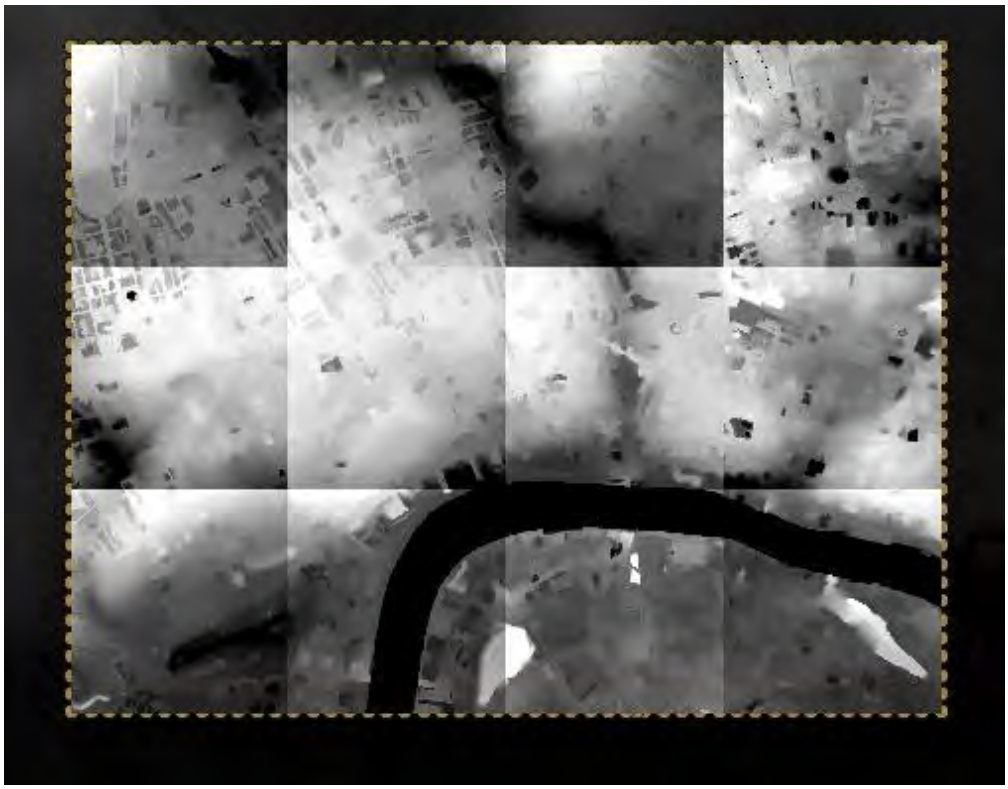
- Import the DEM to ILWIS, or convert it to ILWIS format (table of doubles).
- Run the script on the DEM using the following command line:

python convertDEMtoOBJ.py 'path/to/DEM.mp#' 'data_type' sizeX sizeY resX resY isRepetitive output

- Please check the help of the script for detailed information An OBJ is obtained.

  Note: be careful of the repetitive_scene argument. If put to 1, the last altitude will be equal to the first one, in order to assure the continuity of the repetition in DART. In the case of a non-repetitive scene but a scene segmented into several sub-scene (e.g. if the original DEM is too big for blender), each segment should overlap the next by one pixel, in order to keep the continuity. This way, the last altitude of the DEM for the first section will correspond to the first altitude of the next section. Be careful of the wanted size versus the obtained size of the DEM. If the image input's size is XxY and the repetitive option is off, the obtained DEM's size will be (X-1)x(Y-1), hence the need to overlap scenes over 1 pixel.

For London, we cut the DEM into 12 sub-zones, each 1200x1175m²:



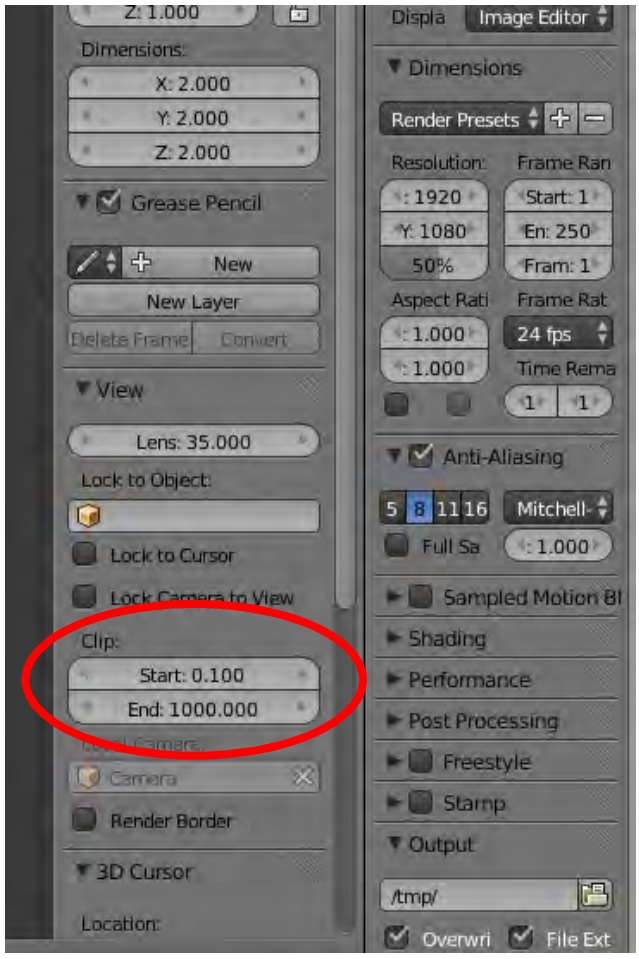
Step 2. Arrange the OBJ.

The obtained OBJ is really heavy because contains an unnecessary number of faces. Before reducing this number however, some information must be added to the OBJ.

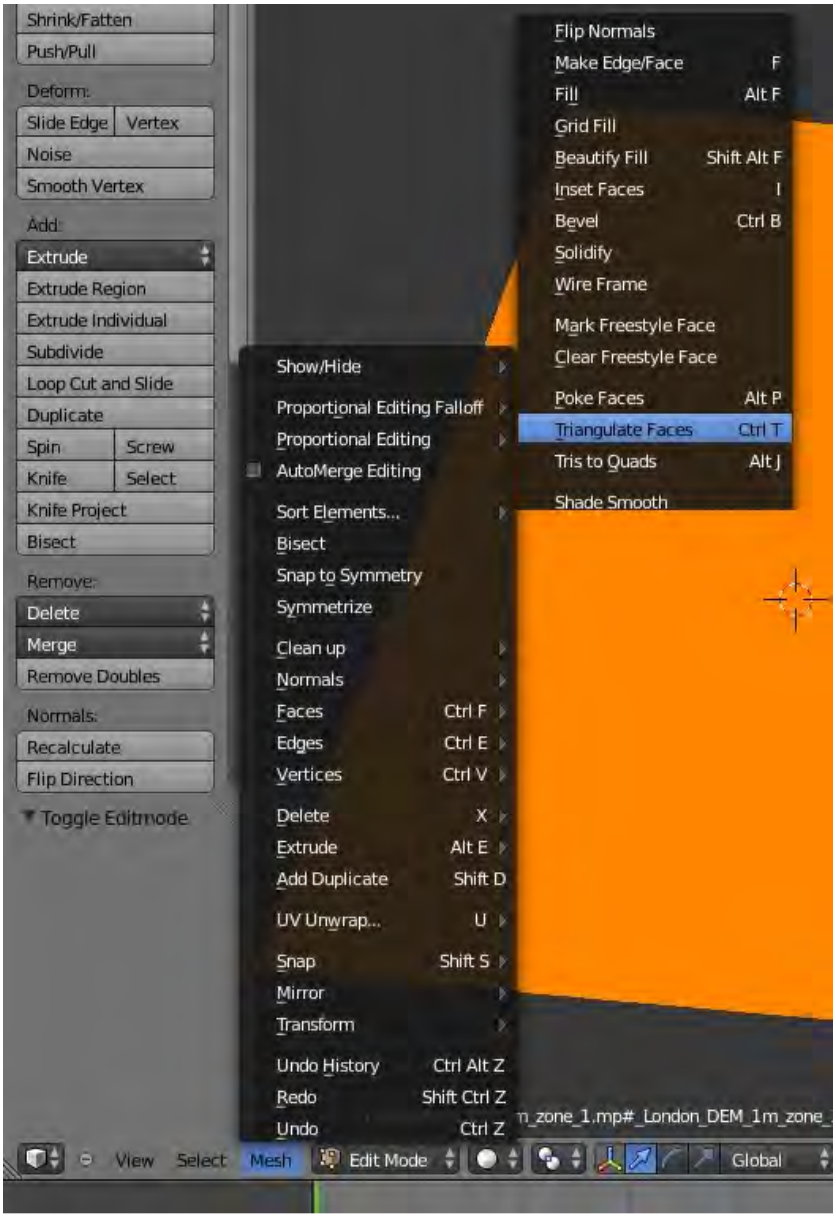
The OBJ, as a direct output of the script, is missing some information, such as material and object groups. Here are the steps to fix that:

- Import the OBJ to blender (file>import>Wavefront (.obj))

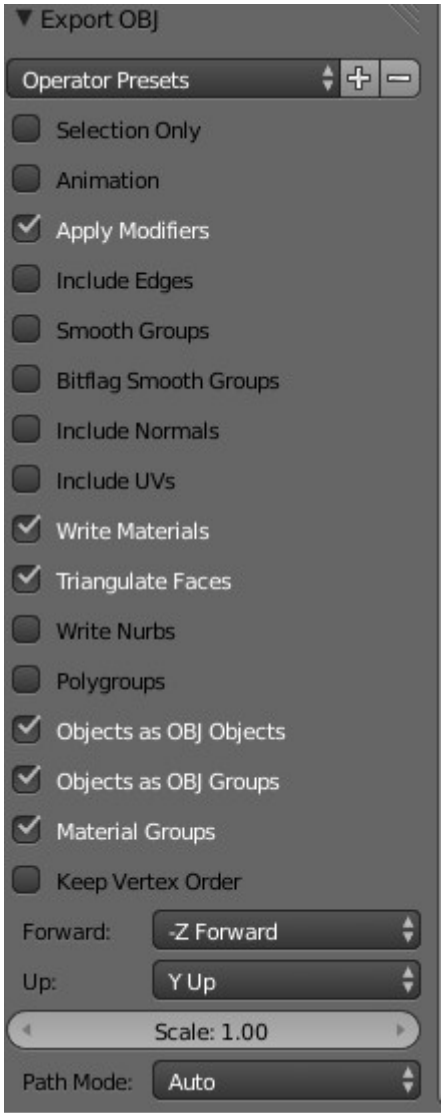
In order to see the full obj, you might have to adapt the view clip of blender (initialized at 1000m). For that, press N to make the option panel appear on the right, then modify the end of the clip to an adequate value (e.g. 10,000)



- Triangulate the faces: right click on the object, TAB for edit mode, CTRL+F to select the faces, CTRL+T to triangulate. This might take some time depending on the size of the obj.



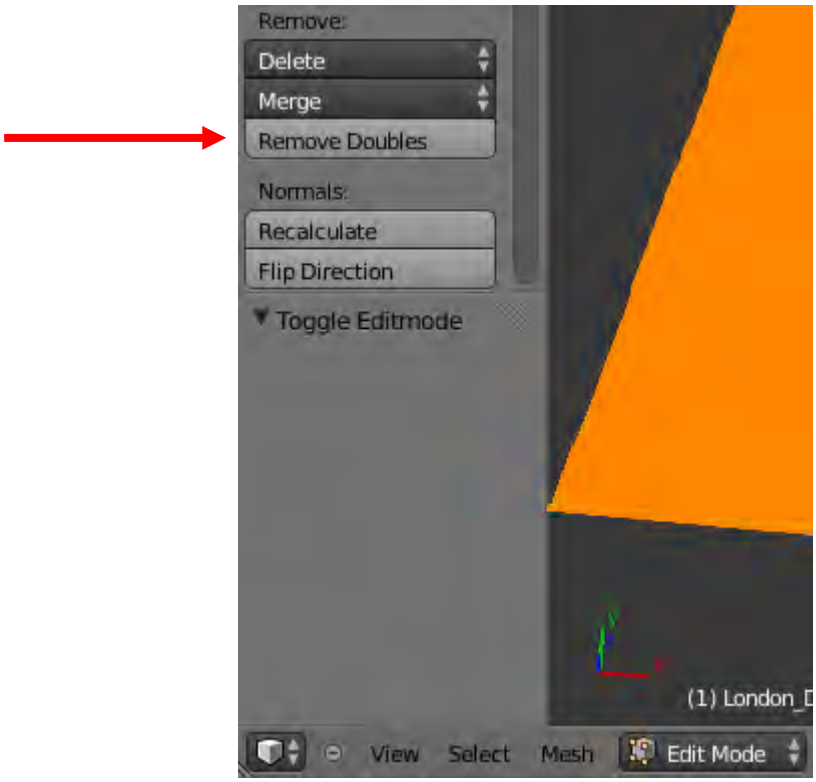
- Re-export the OBJ (file>export> Wavefront (.obj)): check the following options: “Apply Modifiers”, “Write Materials”, “Triangulate Faces”, “Objects as OBJ Objects”, “Objects as OBJ Groups”, and “Material Groups”.



Now that the OBJ is properly defined, we can simplify it.

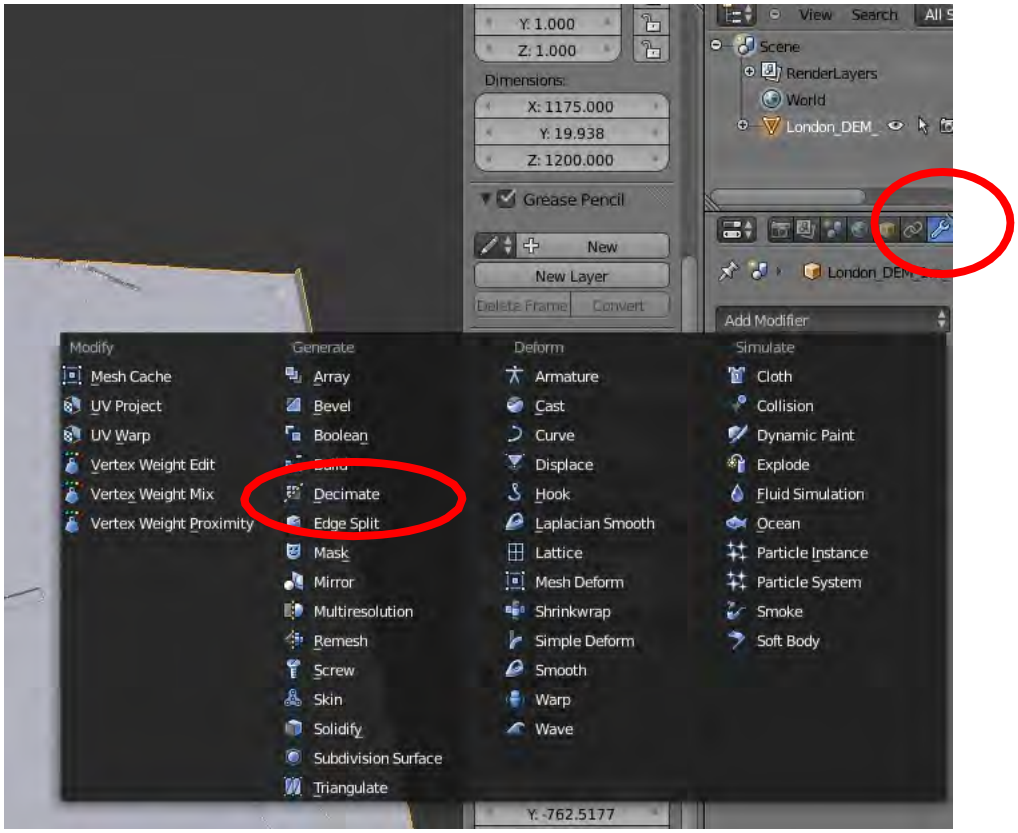
Step 3. Simplify the OBJ

- Re-import your arranged OBJ in blender
- Switch to edit mode (TAB)
- Remove Doubles (might take some time depending on the size of the OBJ)



- Switch back to object mode (TAB) and select your OBJ (right click)

- Add Modifier>Decimate



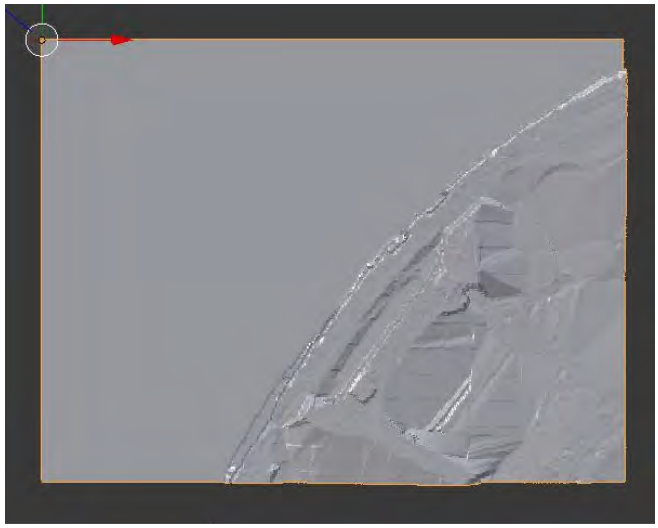
- Use the “collapse” option and a reasonable ratio, until you get a simple enough OBJ without losing too much precision. Do not forget to apply. This also takes some minutes, depending on the size of the OBJ



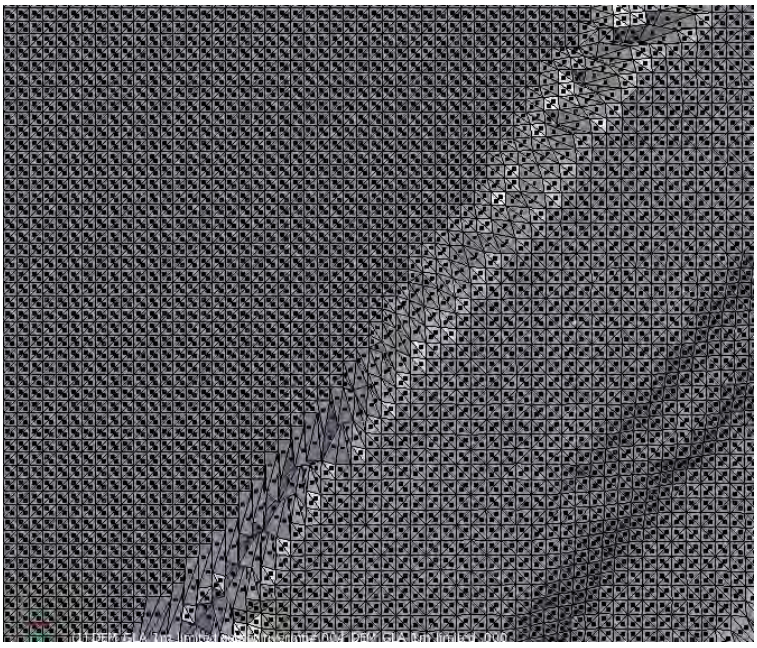
- Re-export the OBJ.

Note: The ratio can be taken really small in most cases, because the original number of triangles is really high. A good aim for the final DEM is something around 200Mb, **including the buildings**.

As an example, here is a part of the London DEM simplification: The original OBJ, in object mode (size 15.3Mo):

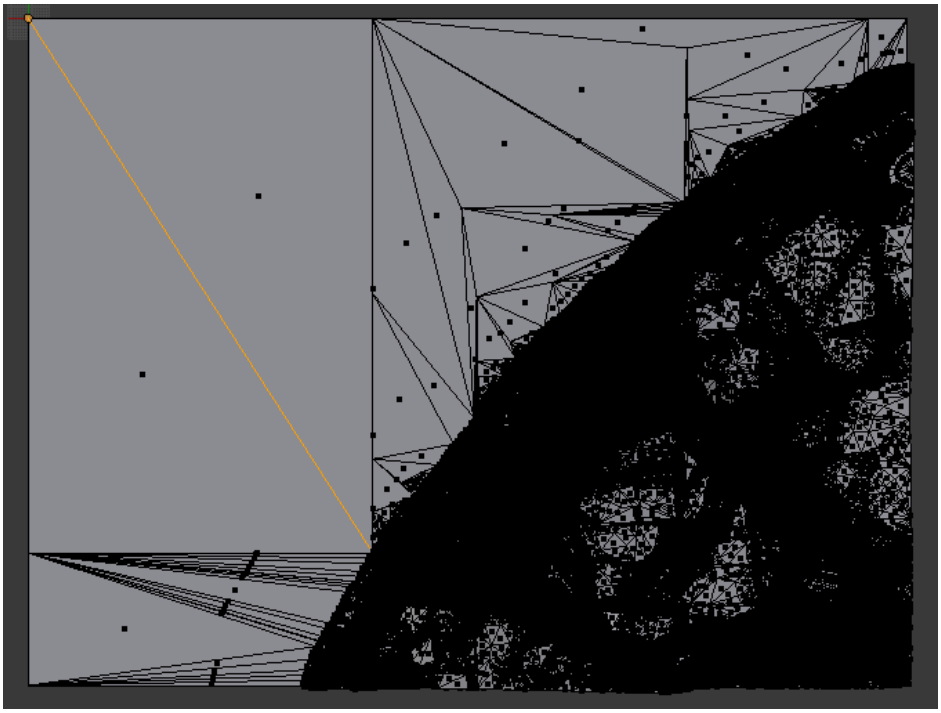


In Edit mode, with a close-up of the faces (already arranged and triangulated):

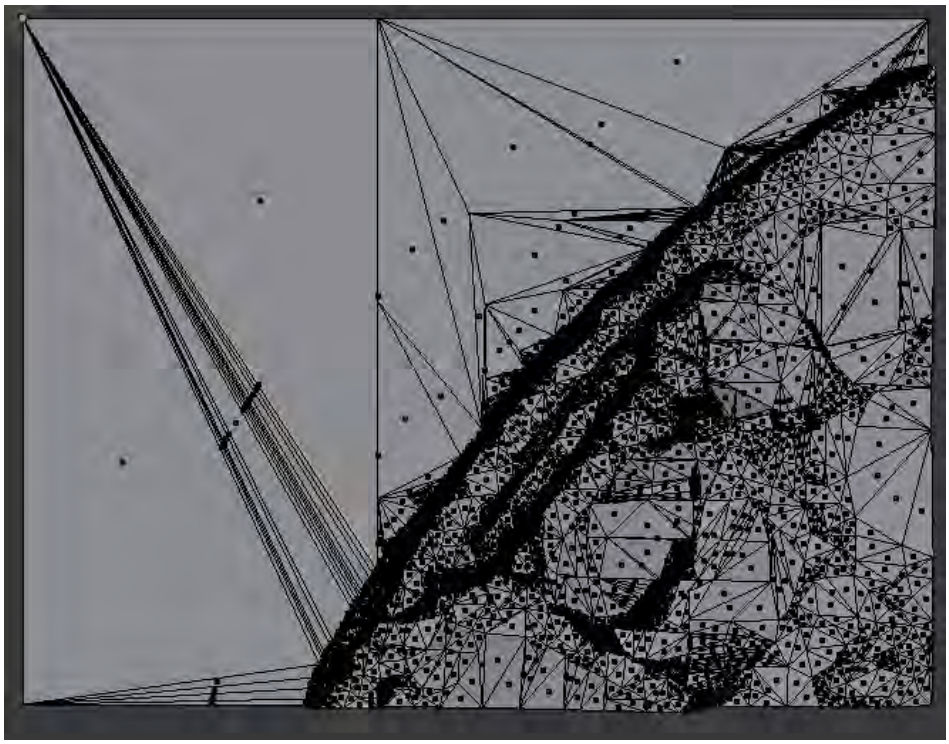


(Note: This is a small part of the OBJ, in order to see the number of triangles and not only a black cloud)

After using the decimate/collapse modifier, with a ratio of 15%:



And with a ratio of 3.75%:



With this ratio (which might be a bit excessive), the final size of the OBJ is 212.5Ko (from 15.3Mo).

Annexe B – Script convertDEMtoOBJ.py

```
#-*-coding: utf8 -*-

import argparse
import numpy as np

""" Script that convert a raster DEM (Digital Elevation Model) image in 3D
   object in OBJ format.
   python convertDEMtoOBJ.py 'DEM_GLA_1m_limited_subset.mp#' 'double' 424 619 1 1
   python convertDEMtoOBJ.py 'sub_zones_12/London_DEM_1m_zone_1.mp#' 'double' 1200 1175 1
1 0
"""

def main(args):
   """ Main function"""
   ## Get raster file name
   fname = args.raster

   ## Get output file name
   if args.output is not None:
      output = args.output
   else:
      output = fname + ".obj"

   ## Get if the scene is repetitive or not. If yes, the last coordinates will be equal to the first ones
   repetitive_scene = args.repetitive
   repetitive_scene = args.repetitive
   ## Get number of points in the DEM
   X = args.x
   Y = args.y

   ## Read the DEM and reshape it
   dtype = {'float': 'f4', 'double': 'f8', 'int':'i4'}
   print ">> Reading DEM..."
   dem = np.fromfile(fname, dtype=dtype[args.dtype])
   dem = dem.reshape((X, Y))
   print "   Done"

   ## Estimate the X, Y resolution
   resX = args.resX
```

```
resY = args.resY

## Init
nb_vertices = 1
verticesList = []
facesList = []

if repetitive_scene:
   range_y = xrange(0,Y)
   range_x = xrange(0,X)
else:
   range_y = xrange(0,Y-1)
   range_x = xrange(0,X-1)

print ">> Creating OBJ (vertices and faces)..."
## Loop over the whole grid
for y in range_y:
   if y%100 == 0:
      print "Treating line ", y
   for x in range_x:
      ## Create the vertices list for the pixel (x, y) in OBJ coordinate (y, z, x)
      if x == X-1 and repetitive_scene:
         xx = 0
      else:
         xx = x + 1
      if y == Y-1 and repetitive_scene:
         yy = 0
      else:
         yy = y + 1
      vertices = [[ y * resY, dem[x, y], x * resX ],
                  [ (y + 1) * resY, dem[x, yy], x * resX ],
                  [ (y + 1) * resY, dem[xx, yy], (x + 1) * resX ],
                  [ y * resY, dem[xx, y], (x + 1) * resX ]
                 ]

      ## Create the faces list from the vertices index
      faces = [[ _ + nb_vertices for _ in xrange(len(vertices)) ]]

      ## Increment the total number of vertices
      nb_vertices += len(vertices)
```

```
            ## Append the current vertices and faces to the total list of vertices and faces
            verticesList += vertices
            facesList.append(faces)
        print "   # of vertices: ", len(verticesList)
        print "   # of faces:", len(facesList)
        print "   Done"

        ## Write OBJ file
        print ">> Writing to file: '%s'" % output
        with open(output, 'w') as fstream:
            ## Write some comment
            fstream.write("# DEM generated from file: '%s'\n" % fname)

            ## Write all vertices
            fstream.write("\n".join([ "v " + " ".join([ str(coord)
                                        for coord in point
                                       ]
                                      )
                              for point in verticesList
                             ]
                            )
                    )

            ## Add empty line between vertices and faces list
            fstream.write("\n\n")

            ## Write all faces
            fstream.write("\n".join([ "f " + " ".join([ str(coord)
                                        for coord in point
                                       ]
                                      )
                              for fcs in facesList
                              for point in fcs
                             ]
                            )
                    )
        print "   Done"

    if __name__ == "__main__":
        ## Get argument parser
        parser = argparse.ArgumentParser(description="Convert raster DEM to 3D OBJ")
```

```
## Add argument
parser.add_argument("raster", action="store", type=str,
                    help="Raster DEM image"
                   )
parser.add_argument("dtype", choices=["float", "double", "int"],
                    help="Data type: int, float or double respectively for\
                         bytes size of 2, 4 or 8 bytes."
                   )
parser.add_argument("x", action="store", type=int,
                    help="Image size on x axis <=> number of rows"
                   )
parser.add_argument("y", action="store", type=int,
                    help="Image size on y axis <=> number of columns"
                   )
parser.add_argument("resX", action="store", type=int,
                    help="Pixel size in meter on x axis"
                   )
parser.add_argument("resY", action="store", type=int,
                    help="Pixel size in meter on y axis"
                   )

parser.add_argument('repetitive', action='store', type=int,
                    help='Repetition of the scene (1 = yes, 0 = no)')

parser.add_argument("-o", "--output", action="store", type=str,
                    default=None,
                    help="OBJ output file (default: <raster file name>.obj)"
                   )

## Parse argument
args = parser.parse_args()

## Launch
main(args)
```

Annexe C – Références de l'article 'Urban Energy Exchanges Monitoring from Space'

1. Seto, K.C., Dhakal, S., Bigio, A., et al. Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning, Cli- mate Change 2014: Mitigation of Climate Change. *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014).
2. Creutzig, F., Baiocchi, G., Bierkandt, R., et al. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112**, 6283-6288 (2015).
3. Seto, K. C. and Christensen, P. Remote sensing science to inform urban climate change mitigation strategies. *Urban Climate* **3**, 1-6 (2013).
4. Arnfield, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* **23**, 1-26 (2003).
5. Voogt, J.A., and Oke, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.* **86**, 370 - 384 (2003).
6. Offerle, B., Grimmond, C.S.B. and Fortuniak, K. Heat Storage and Anthropogenic Heat Flux in Relation to the Energy Balance of a Central European City Centre. *Int. J. Climatol.* **25**, 1405-1419 (2005).
7. Weng, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS J. Photogramm. Remore Sens.* **64**, 335-344 (2009).
8. Grimmond, C.S.B., Roth, M., Oke, T. R., et al. Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environ. Sci.* **1**, 247-274 (2010).
9. Gastellu-Etchegorry J.P., Yin, T., Lauret, N., et al. Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes. *Remote Sens.* **7**, 1667-1701 (2015).
10. Ward, H. C., Kotthaus, S., Järvi, L. and Grimmond, C.S.B. Surface Urban Energy and Water Balance (SUEWS): development and evaluation at two UK sites. *Urban Climate* **18**, 1-32 (2016).
11. Ando, T. and Ueyama, M. Surface energy exchange in a dense urban built-up area based on two-year eddy covariance measurements in Sakai, Japan. *Urban Climate* **19**, 155-169 (2017).

12. Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J. A. Urban Climates. Cambridge University Press (2017).
13. Chrysoulakis, N. Estimation of the all-wave Net Radiation Balance in Urban Environment with the combined use of Terra/ASTER multispectral imagery and in-situ spatial data. *J. Geophys. Res* **108**, D18, 4582 (2003).
14. Kato, S. and Yamaguchi, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat from sensible heat flux. *Remote Sens. Environ.* **99**, 44-54 (2005).
15. Kato, S. and Yamaguchi, Y. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. *Remote Sens. Environ.* **110**, 1-17 (2007).
16. Xu, W., Wooster, M.J. and Grimmond, C.S.B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. *Remote Sens. Environ.* **112**, 3493-3510. (2008).
17. Weng, Q., Hu, X., Quattrochi, D. and Liu, H. Assessing intra-urban surface energy fluxes using remotely sensed aster imagery and routine meteorological data: A case study in Indianapolis, USA. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **7**, 4046-4057 (2014).
18. Chen, S. and Hu, D. Parameterizing Anthropogenic Heat Flux with an Energy-Consumption Inventory and Multi-Source Remote Sensing Data. *Remote Sens.* **9**, 1165 (2017).
19. Feigenwinter, C., Parlow, E., Vogt, R., et al. Spatial Distribution of Sensible and Latent Heat Flux in the URBANFLUXES case study city Basel (Switzerland). In Proceeding of Joint Urban Remote Sensing Event JURSE 2017, held in Dubai, UAE, March 30 - April 1, 978-1-5090-5808-2/17/$31.00 ©2017 IEEE (2017).
20. Crawford, B., Grimmond, C. S. B., Ward, H. C., et al. Spatial and temporal patterns of surface–atmosphere energy exchange in a dense urban environment using scintillometry. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **143**, 817-833 (2017).
21. Marconcini, M., Heldens, W., Del Frate, F., et al. EO-based Products in Support of Urban Heat Fluxes Estimation. In Proceeding of Joint Urban Remote Sensing Event JURSE 2017, held in Dubai, UAE, March 30 - April 1, DOI: 10.1109/JURSE.2017.7924592 (2017).

22. Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Gabey, A., et al. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): an integrated tool for city-based climate services. *Environ. Modell. Softw.* **99**, 70-87 (2018).
23. Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., Doxani, G., et al. Urban Surface Temperature Time Series Estimation at the Local Scale by Spatial-Spectral Unmixing of Satellite Observations. *Remote Sens.* **7**, 4139-4156 (2015).
24. Mitraka, Z., Doxani, G., Del Frate, F. and Chrysoulakis, N. Uncertainty Estimation of Local-Scale Land Surface Temperature Products Over Urban Areas Using Monte Carlo Simulations. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **13**, 917-921. (2016a).
25. Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R. Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteorol.* **38**, 922-940 (1999).
26. Sun, T., Wang, Z. H., Oechel, W.C. and Grimmond, S. The Analytical Objective Hysteresis Model (AnOHM v1.0): methodology to determine bulk storage heat flux coefficients. *Geosci. Model Dev.* **10**, 2875-2890 (2017).
27. Kormann, R. and Meixner, F.X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Bound.-Layer Meteorol.* **99**, 207-224 (2001).
28. Iamarino, M., Beevers, S. and Grimmond C. S. B. High-resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970–2025. *Int. J. Climatol.* **33**, 1754-1767 (2012).
29. Russo, S., Sillmann, J. and Fischer, E. M. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ. Res. Lett.* **10**, 124003 (2015).
30. Founda, D. and Santamouris, M. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Sci. Rep.* **7**, 10973 (2017).
31. Kent, C. W., Grimmond, S., Barlow, J., Gatey, D., Kotthaus, S., Lindberg, F. and Halios, C. H. Evaluation of Urban Local-Scale Aerodynamic Parameters: Implications for the Vertical Profile of Wind Speed and for Source Areas. *Boundary-Layer Meteorol.* **164**, 183-213 (2017).
32. Mitraka, Z., Del Frate, F. and Carbone, F. Nonlinear Spectral Unmixing of Landsat Imagery for Urban Surface Cover Mapping. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **9**, 3340-3350 (2016b).

33. Kotthaus, S., Smith, T. E., Wooster, M. J. and Grimmond, C.S.B. Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. *ISPRS J. Photogramm. Remore Sens.* **94**, 194-212 (2014).
34. Wang, Q., Shi, W., Li, Z. and Atkinson, P. M. Fusion of Sentinel-2 images. *Remote Sens. Environ.* **187**, 241-252 (2016).
35. Gastellu-Etchegorry, J-P., Demarez, V., Pinel, V., Zagolski, F. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. Remote Sensing of Environment, 58:131-156 (1996).
36. Meyn, S. K. and Oke, T. R. Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage. *Energy and Build.* **41**, 745-752 (2009).
37. European Environment Agency. Urban Atlas (https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas/ (2012).
38. Voogt, J. A. and Grimmond, C. S. B. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area. *J. Appl. Meteor.* **39**, 1679-1699 (2000).
39. Kato, S., Yamaguchi, Y., Liu, C. C. and Sun C. Y. Surface Heat Balance Analysis of Tainan City on March 6, 2001 Using ASTER and Formosat-2 Data. *Sensors* **8**, 6026-6044 (2008).
40. Nishida, K. Nemani, R. R., Running, S. W. and Glassy, J. M. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. J. Geophys. Res. 108, 4720 (2003).
41. Kanda, M., Moriizumi, T. Momentum and heat transfer over urban-like surfaces. *Boundary- Layer Meteorol*. **131**, 385-401 (2009).
42. Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M. AND Raasch, S. A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. *Boundary- Layer Meteorol*. **148**, 357-377 (2013).
43. Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W. and Schmid, H. P. The simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Predictions FFP. *Geosci. Model Dev.* **8**, 3695-3713 (2015).
44. Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V. and Durand, P. Sea–town interactions over Marseille—Part II: Consequences on atmospheric structure near the surface. *Proc. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate*, O30.3, Łódz´, Poland, International Association for Urban Climate, 4 pp. (2003).

45. Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Yogeswaran, N., Kotthaus, S. and Allen, L. Impact of city changes and weather on anthropogenic heat flux in Europe 1995-2015. *Urban Climate* **4**, 1-15 (2013).
46. Gabey, A. M., Grimmond, C. S. B. and Capel-Timms, I. Anthropogenic Heat Flux: advisable spatial resolutions when input data are scarce *Theor. Appl. Climatol.* in press (2018).