HAL open science

Télédétection par drones : procédures d'acquisition et de traitement d'images RVB

Loïc Valéry

To cite this version:

Loïc Valéry. Télédétection par drones : procédures d'acquisition et de traitement d'images RVB. Sciences de l'environnement. 2020. dumas-03383086

HAL Id: dumas-03383086

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03383086

Submitted on 18 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Télédétection par drone

Procédures d'acquisition et de traitement d'images RVB

Loïc Valéry

MANAGER
DE
PROJETS
GEOMATIQUES

Directeur du projet : Isabelle Delacourte (LittoMatique)
Tuteur SILAT : Éric Larmanou (INRAE)
Rapporteurs : Sébastien Pinel (CEFREM)
Xavier Sabau (CIRAD)

Septembre 2020

Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon
500, rue Jean-François Breton
F- 34093 MONTPELLIER CEDEX
Tel +33(0)4 67 54 87 60

MASTERE SPECIALISE DE LA CONFERENCE DES GRANDES ECOLES

AgroParisTech

L'établissement AgroParisTech diffuse ce mémoire et se dégage de toute responsabilité sur le contenu proposé.

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition.
L'obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document doit être respectée selon la licence Creative Commons apposée

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation "Paternité – Pas d'utilisation commerciale – Pas de modification 4.0 France disponible en ligne : https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION **5**

- Justification du choix de l'entreprise 5
- Présentation de l'entreprise 5
- Définition du besoin 6
- Enjeux 6
- Objectif 6
- Contexte 6

2. DÉMARCHE GÉNÉRALE **7**

2.1. RÉFLEXION SUR LE FLUX DE TRAVAIL 7

- Phase d'acquisition et de correction des images 7
- Phase de traitement des images 7

2.2. RESSOURCES MOBILISÉES 9

- Ressources matérielles 9
- Ressources logicielles 9
- Ressources bibliographiques 10
- Ressources Internet 10
- Ressources humaines 10

3. SOURCES DE DISTORSIONS RADIOMÉTRIQUES ET PROCÉDURES CORRECTIVES **11**

4. LA CHAÎNE DE TRAITEMENTS SOUS R **17**

4.1. LA CHAÎNE EN QUELQUES CHIFFRES 17

4.2. LES PRINCIPALES FONCTIONS 17

- Sur le plan de la gestion informatique 17
- Sur le plan de la chaîne de traitements *stricto sensu* 18

5. CONCLUSION **23**

5.1. APPORTS DU STAGE 23

5.2. Principaux obstacles levés 24

5.3. Pistes d'amélioration 25

- Robustesse/fiabilité 25
- Ajouts de fonctions 25
- Interactivité 26

6. Remerciements 27

7. Bibliographie 28

8. Annexes 34

8.1. Planches d'illustrations du tableau 1 34

8.2. Segmentations en série 39

8.3. Tableau synthétisant les durées d'exécution de la chaîne de traitements 43

8.4. Test de la chaîne de traitements en situation de production 44

9. Résumé/Abstract 47

Note au lecteur : le présent rapport a été optimisé pour une lecture à l'écran. En cas d'impression au format A4, les pages 13 à 15 et 40 à 42 seront peu, voire pas, lisibles.

1. INTRODUCTION

- *Justification du choix de l'entreprise*

Le vif intérêt que je porte à l'écologie et, plus généralement, aux problématiques environnementales, a toujours guidé mon cursus, de mes études universitaires à mes dernières expériences professionnelles. C'est donc tout naturellement cette passion qui m'a conduit à choisir une entreprise dont la vocation était, pour moi, porteuse de sens.

Par ailleurs, dans le cadre des travaux menés dans ma spécialité première, j'ai été amené à réaliser – avec le recul, de manière artisanale ! – des cartes d'habitats naturels et c'est la raison pour laquelle je souhaitais, d'abord et avant tout, acquérir dans un cadre professionnel, une première expérience dans ce domaine précis de la géomatique.

A cet égard, l'entreprise LittoMatique répondait parfaitement à cette double aspiration.

- *Présentation de l'entreprise*

Fondée en 2018, LittoMatique est une jeune start-up bretonne dont le cœur de métier est d'accompagner dans leurs missions les gestionnaires d'espaces naturels littoraux en proposant des services :

- de suivis d'espèces et d'écosystèmes (e.g. suivis ornithologiques, cartographies de milieux) ;
- de suivis de fréquentation humaine de sites naturels remarquables – à l'aide de capteurs – accompagnés de préconisations en matière d'aménagements ;
- de levés topographiques et photogrammétriques pour la réalisation de plans et l'élaboration de modèles numériques de surface et/ou de terrain.

Du fait de son domaine de compétence, l'entreprise assure, pour l'essentiel, des prestations pour le compte de la sphère publique.

L'acquisition des données de terrain est principalement effectuée par drone. Si besoin est, elle peut être complétée par des levés au sol à l'aide d'une station totale.

L'entreprise est actuellement composée de ses deux fondateurs, Madame Isabelle DELACOURTE, ingénieure de l'École Nationale des Sciences Géographiques (IGN) et titulaire d'un master *Sciences pour l'environnement - Géographie appliquée à la gestion des littoraux*, et Monsieur Émeric MERCIER, ingénieur Géomètre-Topographe.

- *Définition du besoin*

  Dans le cadre de ses activités de suivi d'espaces naturels, l'entreprise LittoMatique souhaitait mettre en place une chaîne de traitements assurant la production (semi-)automatisée de cartes d'habitats à partir d'images RVB à très haute résolution spatiale (≈1-4 cm/pixel) acquises par drone.

- *Enjeux*

  L'intérêt d'une telle évolution dans l'organisation de l'entreprise est double :

  - Qualitatif : standardiser la production de cartes
  - Économique : optimiser le temps alloué à cette tâche

- *Objectif*

  L'objectif principal du stage comportait deux volets :

  - d'une part, la conception, l'élaboration et le test d'une chaîne de traitements dédiée en utilisant exclusivement des logiciels open-source. À la différence des logiciels propriétaires, ces derniers offrent une transparence totale vis-à-vis des traitements effectués et permettent de conserver la maîtrise (i.e. pas de clientèle captive).
  - d'autre part, la mise en œuvre d'une démarche de conduite et gestion de projet tout au long de la mission professionnelle.

- *Contexte*

  Le travail confié s'est inscrit dans le cadre des activités de développement de l'entreprise, sans aucun enjeu de production. Il était donc, à cet égard, pleinement adapté à un stage de formation.

  Il convient, enfin, de préciser que cette mission professionnelle s'est déroulée pendant la crise sanitaire liée au COVID-19, ce qui a conduit à effectuer la majeure partie du stage en télétravail.

2. DÉMARCHE GÉNÉRALE

2.1. RÉFLEXION SUR LE FLUX DE TRAVAIL

Le stage s'est articulé autour de deux principaux axes de réflexion, l'un portant sur la phase d'acquisition des images, le second concernant le traitement des images.

- *Phase d'acquisition et de correction des images*

  La bonne qualité radiométrique des mosaïques produites est essentielle à l'optimisation des performances des algorithmes de segmentation et de classification.
  C'est la raison pour laquelle la première partie du stage a consisté à mener une étude bibliographique approfondie visant à identifier les différentes sources de distorsions radiométriques et à recenser les solutions possibles de correction ou d'atténuation. D'une durée d'environ sept semaines, ce travail a débouché sur l'élaboration d'un tableau de synthèse (cf. pp. 13-15) qui s'appuie sur une centaine de références et qui peut tenir lieu de guide pour adapter les procédures aux exigences du cahier des charges de chaque étude.

- *Phase de traitement des images*

  D'une durée d'environ 11 semaines, le second volet du projet a porté sur la conception, puis l'élaboration, de la chaîne de traitements *stricto sensu*.

  La phase de réflexion/conception s'est avérée essentielle pour :

  - retenir l'approche la mieux adaptée aux caractéristiques des images à traiter – i.e. images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) – et effectuer les choix méthodologiques les plus appropriés à toutes les étapes de la chaîne de traitements ;

  - acquérir une vue d'ensemble des tâches à effectuer permettant d'évaluer la faisabilité du travail dans le temps imparti.

  Notre raisonnement a abouti à l'élaboration d'un diagramme qui présente l'ensemble de la chaîne de traitements et justifie les principales options méthodologiques retenues (Figure 1).

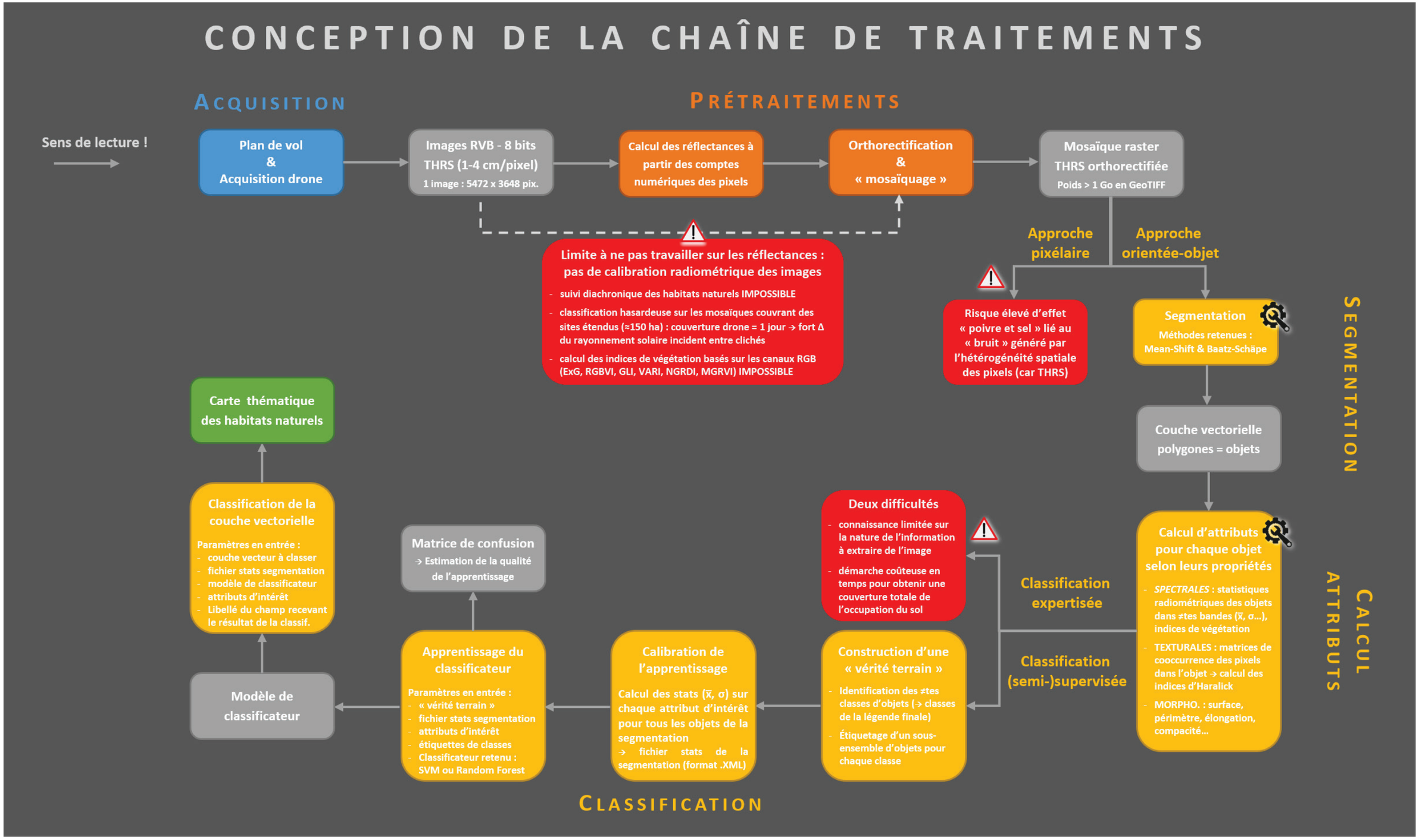


Figure 1. Chaîne de traitements obtenue à l'issue de la phase de conception

Le droit à l'erreur était relativement limité du fait de la durée contrainte du stage et de la complexité des techniques à mettre en œuvre. Aussi, nous a-t-il paru opportun de faire valider, régulièrement, par quelques spécialistes en télédétection, la démarche générale et les procédures envisagées lors de cette phase.

2.2. Ressources mobilisées

Pour valider les raisonnements, élaborer la chaîne de traitements, pallier les difficultés informatiques et résoudre les problèmes de codage en langage R, de nombreuses ressources ont été mobilisées (Figure 2) :

- *Ressources matérielles*

  Le travail a été réalisé sous Windows 8.1 à l'aide d'un PC équipé d'un processeur 3 GHz, d'une mémoire vive de 6 Go et d'une carte graphique dotée d'une mémoire de 2 Go.

- *Ressources logicielles*

  Le logiciel R a été retenu pour réaliser la chaîne de traitements car il offre plusieurs atouts :

  - Flexible et adaptable, il permet de faire appel à de nombreuses librairies d'outils de traitements d'images et de manipulations d'objets spatiaux (raster et vecteur), comme GDAL, PROJ, GRASS, SAGA ou OTB.

  - Très utilisé dans le monde de la recherche en télédétection, il est évolutif et permet, ainsi, de bénéficier rapidement des derniers développements techniques et méthodologiques, soit par la mise à jour et/ou l'enrichissement de packages existants, soit par la création de nouveaux packages spécifiques.

  - La communauté des utilisateurs de R dans le domaine de la télédétection est bien organisée et particulièrement dynamique, ce qui permet de disposer d'une aide rapide et efficiente quelle que soit la nature du problème. Il m'a été donné de le constater et d'en bénéficier.

  Les logiciels OTB 7.0.0, GRASS 7.8.3 et SAGA 2.3.2 ont été interfacés afin de bénéficier de l'ensemble des fonctions nécessaires au bon fonctionnement de la chaîne de traitements.

- *Ressources bibliographiques* :

  De nombreux articles scientifiques et ouvrages spécialisés de référence (e.g. Blaschke et al. 2008, Kuhn et Johnson 2013) ont été consultés pour essayer de prendre les meilleures options à chaque étape de la chaîne de traitements.

- *Ressources Internet* :

  - Forums de discussions : collecte d'informations de manière passive ou, le plus souvent, active sur les forums *Community R studio*, *Github*, *GitLab*, *Stack Overflow*, *GIS Stack Exchange*, *Forum OTB*

  - Liste de discussions spécialisée (i.e. "mailing-list") :

    - *R-sig-Geo* : groupe des utilisateurs du logiciel R qui portent un intérêt particulier à l'utilisation des données géographiques et à la cartographie.

    - *grass-stats* : liste de discussions dédiée au logiciel GRASS et à son interfaçage avec des logiciels de statistiques comme R, S ou gstat.

- *Ressources humaines :*

  - *En interne* : échanges nombreux et réguliers avec Isabelle DELACOURTE. Une réunion hebdomadaire était organisée afin de faire le point sur l'état d'avancement du travail et sur les orientations à prendre dans la poursuite de la mission professionnelle.

  - *En externe* : recherche des personnes-ressource idoines selon la nature de la demande. Un peu plus d'une quinzaine de chercheurs ont été contactés, certains étant eux-mêmes concepteurs de packages : Raffaele GAETANO (CIRAD), Samuel ALLEAUME (INRAE), Rémi CRESSON (INRAE), Valentine LEBOURGEOIS (CIRAD), Chris REUDENBACH (Univ. Marburg, Allemagne), Fabrice VINATIER (INRAE), Frédéric GRELOT (INRAE), Alain CLOPES (CIRAD), Luigi RANGHETTI (CNR-IREA, Italie), Jannes MUENCHOW (Univ. Iena, Allemagne), Roger BIVAND (NHH, Bergen, Norvège), Veronica ANDREO (CONICET-CONAE, Argentine), Micha SILVER (Univ. Ben-Gurion, Israël), Loïc DUTRIEUX (CIRAD), Antoine REGIMBEAU (Univ. Nantes), Pierre LASSALLE (CNES), Lorenzo BUSETTO (CNR-IREA, Italie)

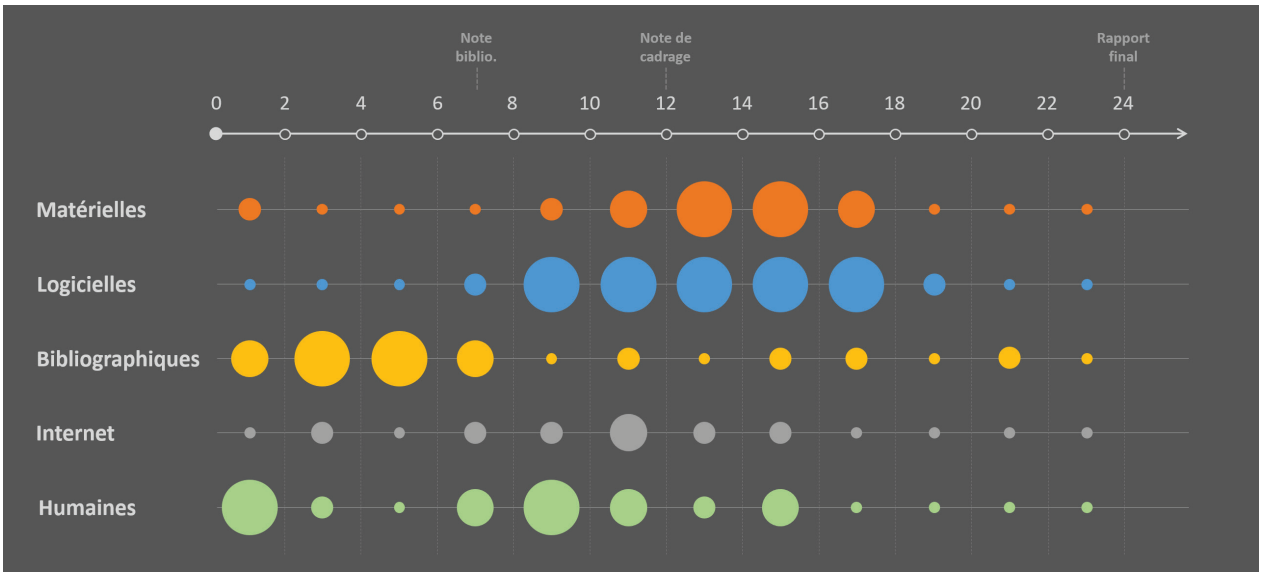


Figure 2. Ressources mobilisées au cours du stage. La frise chronologique indique le nombre de semaines écoulées depuis le début de la mission professionnelle.

3. Sources de distorsions radiométriques et procédures correctives

L'usage des drones pour étudier, suivre et/ou gérer les espaces naturels connait un véritable essor depuis près d'une décennie. Cet engouement tient principalement (i) au fait qu'ils offrent une polyvalence, une adaptabilité et une flexibilité que n'ont ni les systèmes aéroportés habités ni les satellites, et (ii) au fait qu'ils peuvent être déployés rapidement et de manière répétée pour obtenir, à moindre coût, des données à très haute résolution spatiale et temporelle (Von Bueren et al. 2015, Singh et Frazier 2018, Manfreda et al. 2018, Yao et al. 2019).

Discipline à la fois dynamique et prometteuse, la télédétection par drones semble, toutefois, victime de son propre succès : le foisonnement d'initiatives et d'applications révèle la grande disparité des pratiques mises en œuvre et le caractère quelque peu désordonné des développements techniques et méthodologiques. Face à ce mouvement brownien, quelques voix se sont élevées pour affirmer le besoin de normalisation des procédures de collecte et de traitement des images (Singh et Frazier 2018, Yao et al. 2019).

Cet appel n'est pas superflu lorsque l'on constate, par exemple, que seuls 25% des études par drones contiennent des corrections radiométriques (Singh et Frazier 2018) alors que le choix des procédures de correction conditionne la qualité radiométrique des images produites. L'absence, l'insuffisance ou l'inadaptation des mesures correctives appliquées peut, en effet, avoir des répercussions importantes sur l'exploitation ultérieure des images. Ainsi, de nombreux auteurs soulignent-ils que l'atténuation des distorsions radiométriques des prises de vues est un prérequis indispensable à l'extraction de paramètres (bio-)physiques (e.g. réflectance, LAI, biomasse), à l'analyse de séries temporelles (e.g. détection de

changements), à l'élaboration de mosaïques, ou à la mise en œuvre d'algorithmes de segmentation et de classification à des fins cartographiques (e.g. Zheng et al. 2009, Laliberte et al. 2011, Wang et Myint 2015, Berra et al. 2017, Yao et al. 2019).

Compte tenu de l'importance que revêt la prise en compte des distorsions radiométriques des images à l'amont de cette chaîne, il nous a paru opportun de présenter une synthèse des différentes causes d'altération de la radiométrie des images et des principales méthodes de correction possibles, en listant, pour chacune d'elles, ses avantages et ses limites.

La grande diversité des sources de distorsions et le nombre élevé de procédures correctives envisageables nous ont conduits, par souci de clarté, à restituer les résultats de nos recherches bibliographiques sous la forme d'un tableau (cf. Tableau 1). Ce dernier est constitué de deux lignes principales en entrée, correspondant aux deux grandes causes d'altération de la radiométrie des images (cf. Figure 3) :

- *les effets liés à l'appareil de prise de vues* : vignettage, sensibilité inter-pixel du capteur, courant d'obscurité, signal de biais, et distorsions liés au stockage des données – i.e. correction gamma, dématriçage, compression de fichiers ;
- *les effets liés aux conditions de prise de vues* : position du soleil, couverture nuageuse, type d'occupation du sol, topographie, atmosphère, et réglage des paramètres d'exposition.

Certaines procédures correctives sont également appliquées aux autres vecteurs (i.e. avion, satellite) et/ou à d'autres types de capteurs (e.g. appareil photo modifié pour le red-edge et/ou l'infrarouge, caméra hyper-spectrale) mais le présent tableau se concentre, lui, sur les méthodes les plus couramment mises en œuvre dans le cadre d'études menées avec des drones embarquant des appareils photos RVB grand-public. Son objectif principal est de servir de support à la réflexion et aux échanges en vue d'identifier les orientations techniques et méthodologiques qui pourraient être intégrées au flux de travail de l'entreprise. Idéalement, il débouchera, dans les prochaines semaines, sur un « guide de bonnes pratiques » et/ou une chaîne de traitements à ajuster suivant les exigences du cahier des charges de chaque étude.
Bien entendu, l'ensemble des éléments de ce tableau n'a pas vocation à être repris de manière systématique : l'utilisateur adaptera le niveau de traitement radiométrique aux objectifs fixés par le commanditaire. Enfin, ce tableau se borne à évoquer les différentes solutions qu'il est actuellement possible de mettre en œuvre : le lecteur intéressé pourra donc utilement se reporter aux références indiquées dans la dernière colonne, en regard de chaque méthode.

Tableau 1 (cf. page ci-après). Principales sources de distorsions radiométriques et types de corrections couramment mises en œuvre pour étalonner les comptes numériques entre les pixels d'une image – et/ou d'une mosaïque et/ou série temporelle d'images – lors d'acquisitions par drones équipés d'appareils photos numériques RVB intégrant un capteur CCD (Charge-Coupled Device) ou CMOS (Complementary Metal Oxyde Semi-Conductor).

Sources de distorsion radiométrique		Types de distorsion	Effets sur l'image, la mosaïque et/ou la série temporelle d'images et causes sous-jacentes	Méthodes de correction	Avantages / Limites	Remarques /précautions à prendre	Références
Appareil de prise de vues	Lentilles de l'objectif	Vignettage naturel	Assombrissement progressif de l'image selon un gradient radial, depuis le centre de l'image vers sa périphérie (i.e. la *loi* de décroissance de la luminosité suit le cos^4 de l'angle par rapport à l'axe optique). Ce phénomène physique, principalement lié au parcours de la lumière dans certaines parties de l'optique, conduit à une diminution moyenne de la valeur des comptes numériques d'environ 20% (5 à 35% selon les études et les objectifs).	1. Acquisition d'une image de champ plat, ou PLU - Plage de Lumière Uniforme (i.e. prise de vue qui couvre une scène uniformément éclairée et à faible réflexion spéculaire – e.g. une feuille de papier blanc, de telle sorte que les variations de luminosité ne puissent être attribuées qu'au vignettage), qui est ensuite inversée pour être appliquée aux images à traiter.	**Avantage :** mesure de l'effet de vignettage la plus précise. **Limites :** - Mesure complexe (et coûteuse…) à faire effectuer par un laboratoire spécialisé disposant d'une sphère d'intégration (e.g. Département Optique et Techniques Associées de l'ONERA). - la mesure du vignettage n'est valide que pour un réglage donné (ouverture, vitesse, ISO) et un appareil donné.	- Méthode la plus fréquemment employée (dénommée parfois « méthode LUT » – Look-Up Table). - Effectuer la mesure de cet effet pour chaque bande spectrale/canal. - Lors de l'application de l'image de champ plat inversée aux images à traiter, préférer la multiplication ou la division à l'addition afin de conserver la « dynamique » de l'image. - L'image de champ plat doit être réacquise périodiquement, l'intervalle entre deux calibrations étant fonction de l'intensité d'utilisation de l'appareil photo numérique et du vieillissement « naturel » du capteur.	Yu (2004), Lebourgeois et al. (2008), Lelong et al. (2008), Zheng et al. (2009), Kelcey and Lucieer (2012), Del Pozo et al. (2014), Berra et al. (2017)
				2. Caractérisation empirique du vignettage à l'aide d'un profil d'éclairement radial. Ce dernier est obtenu à partir d'une image « moyenne » découpée en une 100aine d'anneaux concentriques espacés de manière régulière au sein desquels la valeur médiane est calculée. Le profil résultant (i.e. courbe des valeurs médianes d'intensité en fonction de la distance au centre de l'image) est alors interpolé/lissé par une fonction de degré 2 (pour le visible) ou plus (pour le RedEdge et l'IR). Une image du vignettage est produite à partir de cette fonction, puis inversée avant d'être appliquée aux images à traiter (cf. annexe 8.1, Fig. A1).	**Avantages :** - procédure réalisable en régie - procédure pouvant être mise en œuvre sur un jeu d'images même si le modèle d'appareil numérique à l'origine de l'acquisition est inconnu ou que ses caractéristiques techniques ne sont pas communiquées par le constructeur. **Limites :** - procédure assez lourde et chronophage - cette méthode nécessite une grande série d'images prises dans conditions d'éclairement variées et avec différents angles d'acquisition de la scène - cette procédure bande à bande induit une modification des couleurs dans les angles des images traitées. Un ajustement empirique *a posteriori* doit donc être effectué en transformant les images RVB dans le système TLS afin de modifier la luminosité. Une fois corrigées, les images sont alors converties dans le système RGB - le vignettage peut ne pas être concentrique ni parfaitement centré dans l'image.	- Méthode couramment employée en astronomie - L'image moyenne est calculée sur un ensemble d'images acquises avec un niveau de réglage de l'exposition strictement identique (ouverture, vitesse, ISO). - L'effet de vignettage est déterminé pour chaque bande (i.e. calcul d'une image moyenne par bande). - Lors de l'application de l'image de champ plat inversée aux images à traiter, préférer la multiplication ou la division à l'addition afin de conserver la « dynamique » de l'image.	Labbé et al. (2007), Lebourgeois et al. (2008), Lelong et al. (2008), Goldman (2010), Hakala et al. (2010), Lopez-Fuentes et al. (2015), Kordecki et al. (2016), Holman et al. (2019)
		Vignettage optique	Atténuation radiale de la luminosité due à l'obstruction du trajet d'une partie des rayons incidents à l'intérieur du corps de l'objectif par le diaphragme. Ce phénomène peut être facilement observé par le changement de forme apparent de l'ouverture de l'objectif selon l'angle de visée (cf. annexe 8.1, Fig. A2), qui réduit la quantité de lumière atteignant le plan de l'image.	3. Fermeture du diaphragme de l'appareil photo d'un cran ou deux (par rapport à l'ouverture max.).	**Avantage :** procédure simple et rapide qui, en principe, rend cet effet imperceptible. **Limite :** la correction n'est pas contrôlée/quantifiée précisément.	- Le vignettage optique est particulièrement prononcé sur les objectifs grand-angle (très utilisés sur les drones) et s'observe surtout à pleine ouverture du diaphragme. - Cette procédure applique la même correction à toutes les bandes.	Yu (2004), Goldman and Chen (2005), Goldman (2010)
	Capteur : photodétecteurs	Vignettage pixélaire	Atténuation radiale de la luminosité due à la sensibilité angulaire des pixels. Les pixels ont une certaine tolérance sur l'angle d'incidence des rayons lumineux : au-delà d'une certaine valeur d'angle, ils ne détectent plus les photons.	NB : les procédures 1 et 2 corrigent, *a posteriori*, l'ensemble des types de distorsion radiométrique liés au vignettage. La mise en œuvre de la solution 3 peut venir compléter utilement ces procédures en limitant le niveau de correction à apporter *a posteriori*.	**Avantages :** cf. ci-dessus **Limites :** cf. ci-dessus	- Le vignettage pixélaire accentue l'effet du vignettage naturel. Il est particulièrement prononcé sur les objectifs grand-angle, très utilisés sur les drones. - Cet effet n'affecte que les appareils numériques	Goldman and Chen (2005), Goldman (2010)
		Sensibilité pixel à pixel ou Non-Uniformité de la Photo-Réponse (PRNU)	Chaque pixel du capteur répond différemment à un même signal lumineux (du fait de l'inhomogénéité des couches de silicium et des imperfections liées au processus de fabrication du capteur), ce qui créé un bruit dans l'image : pour une même quantité de photons reçue, le signal électrique obtenu varie de pixel à pixel. Des poussières peuvent également plus ou moins absorber le signal lumineux. Enfin, le capteur peut comporter des pixels défectueux qui ne détectent plus les niveaux de lumière.	Acquisition d'une dizaine d'« images de champ plat » (flat field), ou PLU - Plages de Lumière Uniforme (i.e. prises de vue qui couvrent une scène uniformément éclairée et à faible réflexion spéculaire). L'image moyenne calculée à partir de ces 10 clichés (i.e. dénommée « master flat frame » = matrice de champ plat maître ou matrice de sensibilité inter-pixel) sert de diviseur aux images à traiter (cf. annexe 8.1, Figs. A3 et A4). Cette correction, effectuée sur chaque bande spectrale/canal des images brutes .RAW, permet d'éliminer simultanément les effets causés par : - l'hétérogénéité de la sensibilité inter-pixel (principale cause du PRNU), - les poussières, - les différents types de vignettage (cf. ci-dessus)	**Avantage :** correction du PNRU et de l'ensemble des types de vignettage en une seule procédure. **Limites :** - mesure complexe (et coûteuse…) à faire effectuer par un laboratoire spécialisé disposant d'une sphère d'intégration (e.g. Département Optique et Techniques Associées de l'ONERA). - la matrice de champ plat maître obtenue n'est valide que pour un réglage donné (ouverture, vitesse, ISO) et un appareil donné.	- si une correction de l'effet du courant d'obscurité et du signal de biais est envisagée, la présente correction ne doit être effectuée qu'après. En d'autres termes, les images à traiter ici correspondent aux images brutes .RAW initiales desquelles a été retranchée la matrice d'obscurité maître (cf. lignes ci-dessous). - Cette correction peut être effectuée avec le programme DCraw (ou le logiciel gratuit IRIS basé sur ce programme). - Il n'est généralement pas possible d'effectuer convenablement cette correction sur des images TIFF/JPEG - L'image de champ plat doit être réacquise périodiquement, l'intervalle entre deux calibrations étant fonction de l'intensité d'utilisation de l'appareil photo numérique et du vieillissement « naturel » du capteur.	Buil (2005), Déliot et al. (2006), Lukas et al. (2006), Verhoeven et al. (2009), Puech and Bessou (2010), Kelcey and Lucieer (2012), Berra et al. (2015 and 2017), Coffin (2018), Hakala et al. (2018)
		Courant d'obscurité (dark current)	La variation du courant d'obscurité créé un bruit dans l'image (i.e. diminution du rapport signal/bruit). Son effet peut être assez important. Il dépend de la température au moment de la prise de vues, de la sensibilité (ISO) et des paramètres d'exposition (ouverture du diaphragme et vitesse d'obturation).	Acquisition d'une dizaine d'« images noires » (dark frame) prises dans l'obscurité totale (dans une pièce à T° constante) et avec un temps de pose relativement long (env. 5s). L'image moyenne calculée à partir de ces 10 clichés (i.e. appelée « master dark frame » = matrice d'obscurité maître) est alors retranchée aux images à traiter (cf. annexe 8.1, Fig. A5). Cette correction, effectuée sur les images brutes .RAW, permet d'éliminer à la fois l'effet du courant d'obscurité et le signal de biais.	**Avantage :** permet de corriger le plus finement possible les images de ces deux effets. **Limites :** - mesure complexe (et coûteuse…) à faire effectuer par un laboratoire spécialisé disposant d'une sphère d'intégration (e.g. Département Optique et Techniques Associées de l'ONERA). - la matrice d'obscurité maître obtenue n'est valide que pour un réglage donné (ouverture, vitesse, ISO) et un appareil donné.	Pour limiter l'effet du courant d'obscurité, il est recommandé d'abaisser la sensibilité de l'appareil photo à un niveau bas (autour de 100 ISO) et d'accroître le temps d'exposition (i.e. temps d'intégration) afin d'augmenter le rapport Signal/Bruit lors de la prise de vues (cf. annexe 8.1, Fig. A6).	Lukas et al. (2006), Verhoeven et al. (2009), Puech and Bessou (2010), Widenhorn et al. (2010), Kelcey and Lucieer (2012), Del Pozo et al. (2014), Berra et al. (2015 and 2017), Hakala et al. (2018), Holman et al. (2019)
	Capteur : amplificateur	Signal de biais ou offset	Il s'agit d'un décalage du signal dû au fait que le niveau zéro du signal physique (i.e. détection des photons) et le niveau zéro de sa traduction en signal électrique ne coïncident pas. Ce décalage, généralement faible et stable, se produit même en l'absence totale d'éclairage. Il est dû aux effets de la charge électrique appliquée au détecteur avant l'exposition.			- Le signal de biais étant stable, il entache les comptes numériques des pixels avec la même erreur sur l'ensemble des images : il n'empêche donc pas d'obtenir des clichés comparables du point de vue de leur radiométrie, ni de produire une mosaïque homogène sur laquelle il est possible de mettre en œuvre une classification automatisée pour créer des cartes d'habitats. -En revanche, la correction du signal de biais apparait nécessaire lorsque les valeurs de réflectance absolues sont souhaitées (e.g. pour le calcul d'indices de végétation).	
	Logiciel interne au boîtier	Correction Gamma	Correction du signal effectuée par le logiciel pour répondre au « comportement » non linéaire de la perception de la luminosité par l'œil humain (i.e. relation logarithmique). Elle permet de produire un rendu plus agréable en améliorant l'esthétique des photos par une augmentation du contraste.	Enregistrer et travailler sur le fichier brut .RAW ou .DNG (i.e. le « négatif numérique ») produit en sortie du convertisseur analogique-numérique et non sur un fichier en format .TIFF ou .JPEG sur lequel cette correction a été appliquée.	**Avantage :** le fichier .RAW ou .DNG est le plus proche de l'image originale (i.e. sans compression ni traitements *a posteriori*) : les valeurs des comptes numériques des pixels représentent fidèlement la luminance dans chaque bande (i.e. relation linéaire). **Limite :** les fichiers bruts .RAW ou .DNG sont environ 3x plus lourds que les fichiers .JPG	- La correction Gamma empêche la mesure directe de la luminance car elle masque l'une des propriétés principales des capteurs CCD ou CMOS, le caractère linéaire de leurs photodiodes (i.e. lorsqu'un pixel reçoit 2x plus de photons, sa valeur en sortie est 2x plus élevée) (cf. annexe 8.1, Fig. A10). - Préférer le format standard .DNG au .RAW car ce dernier est un format propriétaire (i.e. chaque constructeur développe un type de .RAW différent).	Labbé et al. (2007), Lebourgeois et al. (2008), Verhoeven et al. (2009), Verhoeven (2010), Gehrke and Greiwe (2014), Wang and Myint (2015)
		Dématriçage ou Débayerisation ou CFA (Color Filter Array) interpolation	La plupart des appareils numériques sont équipés d'une matrice de filtres couleurs (le plus souvent, une matrice de Bayer) qui ne permettent d'enregistrer qu'une couleur par pixel (R, V, ou B, parfois Cyan). Le dématriçage consiste à estimer pour chaque pixel les valeurs des couleurs manquantes afin de construire l'image couleur finale. Cette procédure d'interpolation est assurée par un algorithme propriétaire - intégré à l'appareil photo - dont le fonctionnement est totalement opaque à l'utilisateur et qui peut être à l'origine de distorsion radiométrique de l'image.	Enregistrer et travailler sur le fichier brut .RAW ou .DNG (i.e. le « négatif numérique ») produit en sortie du convertisseur analogique-numérique. Trois solutions de dématriçage *a posteriori* sont alors possibles : 1. Développer un logiciel spécifique pour le dématriçage afin de conserver des pixels « spectralement purs » à partir du fichier brut .RAW ou .DNG 2. Utiliser le programme open-source DCRaw spécialisé dans le dématriçage (ou des logiciels gratuits basés sur ce programme comme IRIS ou UFRaw). 3. Utiliser des logiciels « prêts à l'emploi » comme Lightroom, Camera Raw, CaptureOne ou DxO qui permettent de mieux maîtriser l'étape de dématriçage par rapport au logiciel intégré à l'appareil photo.	**Avantages :** **-** dans les cas 1 et 2, maîtrise complète de l'opération de dématriçage et contrôle de la distorsion et de la résolution radiométrique. - Les solutions 1 et 2 permettent un dématriçage des images sans qu'une correction Gamma ne soit appliquée. **Limite :** le cas 1 nécessite de développer ou faire développer le logiciel *ad hoc*, ce qui peut être long et/ou coûteux…	- L'opération de dématriçage avec l'algorithme propriétaire intégré à l'appareil conduit souvent à une diminution de la résolution radiométrique de l'image (généralement de 12 à 8 bits). - DCRaw fonctionne sur n'importe quel système d'exploitation et est capable d'écrire des fichiers TIFF 16 bits reconstruits sans appliquer de courbe de correction gamma ou de balance des blancs. Ce logiciel permet ainsi de mettre en œuvre un flux de travail complet au format .RAW permettant de « développer » des fichiers de manière totalement linéaire, dans lesquels les comptes numériques sont toujours égaux à ceux générés initialement par le capteur, et contenant les trois canaux RVB intégralement reconstruits.	Buil (2005), Labbé et al. (2007), Lebourgeois et al. (2008), Verhoeven et al. (2009), Verhoeven (2010), Gehrke and Greiwe (2014), Pré (2014), Rabatel et al. (2014), Berra et al. (2015 and 2017), Coffin (2018), Holman et al. (2019)
				Utiliser un appareil photo numérique équipé du capteur FOVEON x3. Ce capteur permet d'enregistrer, pour chaque pixel, les trois couleurs RVB, grâce aux trois couches de silicium recouvertes de photosites et filtrées chacune par un filtre bleu, vert ou rouge.	**Avantage :** le dématriçage est inutile puisque chaque cliché de l'appareil photo est une image vue intégralement en couleurs par le capteur. Il en résulte une restitution des couleurs plus naturelle et sans artefacts (moirage) **Limites :** - contraint de rester à des niveaux de sensibilité faibles (≤ 100 ISO) sinon problème de gestion du bruit dans l'image - le capteur présente une faible séparation des couleurs. Bien que ce défaut soit bien corrigé grâce aux algorithmes propriétaires du logiciel interne, le caractère linéaire du capteur est détruit par la correction gamma et la balance des blancs (cf. ci-dessus, correction gamma). Les logiciels de dématriçage open-source (e.g. DCRaw) peuvent traiter les données issues du boitier Sigma en préservant ce caractère linéaire, mais l'image souffre alors de la faible séparation spectrale du capteur.	Le constructeur d'appareils photo numériques SIGMA a actuellement l'exclusivité de l'exploitation de ce capteur.	Gilblom et al. (2003), Lukas et al. (2006), Verhoeven et al. (2009), Verhoeven (2010), Gehrke and Greiwe (2014), Roué (2016)
		Compression	La compression du fichier brut (format .RAW ou .DNG) au format JPEG est une « compression avec pertes » qui modifie la radiométrie de l'image de manière irréversible : l'algorithme convertit l'image d'origine depuis son modèle colorimétrique initial RVB vers le modèle luminance/chrominance (YCrCb).	Travailler sur le fichier brut .RAW ou .DNG (i.e. le « négatif numérique ») produit en sortie du convertisseur analogique-numérique et non sur un fichier en format .JPEG sur lequel cette compression a été appliquée.	**Avantage :** la radiométrie de l'image est préservée. **Limite :** le poids élevé du fichier brut .RAW par rapport au .JPEG (qui est généralement 3 à 5 fois moins lourd)	La compression TIFF proposée par certains appareils photo a l'avantage sur le format JPEG d'être sans perte mais a l'inconvénient de produire des fichiers particulièrement lourds.	Bony (2000), Labbé et al. (2007) Lebourgeois et al. (2008), Verhoeven (2010), Matthews (2015)

Sources de distorsion radiométrique		Types de distorsion	Effets sur l'image, la mosaïque et/ou la série temporelle d'images et causes sous-jacentes	Méthodes de correction			Avantages / Limites	Remarques /précautions à prendre	Références
Conditions de prise de vues	Liées aux facteurs environnementaux (i.e. variation de l'éclairement solaire)	Effet de la position du soleil	Selon la date (saison) et/ou l'heure de la journée, les angles solaires zénithal et azimutal ainsi que la distance terre-soleil fluctuent, entraînant des variations d'éclairement. En raison de ces fluctuations d'illumination, le flux lumineux réfléchi, depuis le sol, par chaque objet (e.g. types d'occupation du sol) varie lui aussi : pour un même objet, les valeurs des comptes numériques des pixels enregistrées par le capteur peuvent donc fluctuer entre clichés. Cette inconstance des valeurs des comptes numériques entre les prises de vue nuit à l'homogénéité radiométrique des mosaïques et rend hasardeuse toute comparaison diachronique. Ces difficultés nécessitent donc de normaliser le flux lumineux réfléchi enregistré par le capteur (i.e. luminance) en le rapportant au flux solaire incident. C'est la raison pour laquelle les méthodes de correction visent à déterminer la réflectance des objets, propriété physique intrinsèque à ces derniers et constante dans le temps. Il existe deux grandes familles de méthodes : - celles basées sur l'irradiation incidente, déterminée de manière théorique ou empirique (**I**), - celles basées sur l'étalonnage radiométrique des prises de vues en plaçant au sol des cibles de calibration dont la réflectance est connue (**II**).	**I**	L'approche théorique consiste à estimer l'irradiation incidente à partir de modèles atmosphériques de transfert radiatif (ARTM) (e.g. SMARTS, MODTRAN). Les paramètres d'entrée de ces modèles sont la date, l'heure, le lieu, l'activité solaire, la T°, l'humidité et la teneur en gaz et en aérosols de l'atmosphère.		**Avantage :** cette approche permet de déterminer les valeurs de réflectance sans effectuer de mesures supplémentaires sur le terrain**.** **Limites :** - les paramètres requis en entrée des ARTMs sont extrêmement difficiles à obtenir pour chaque image prise par le capteur embarqué depuis le drone (à la différence des images satellitaires pour lesquelles ces informations sont facilement accessibles depuis le fichier de métadonnées). - cette méthode est peu adaptée aux missions couvrant de vastes étendues car elle ne tient pas compte des fluctuations de luminosité liées aux nuages et à l'hétérogénéité éventuelle de l'atmosphère. - la réflectance est un rapport de luminance. Or, le capteur ne mesure pas directement la luminance. Pour convertir les valeurs des comptes numériques en luminance, il est nécessaire de faire calibrer de manière absolue le capteur dans un laboratoire spécialisé afin de déterminer le gain et le signal de biais.	- Cette méthode de correction, « classique » pour le traitement des images satellitaires, est très rarement appliquée aux images prises par drone. La raison tient à la fois (i) à la difficulté de rassembler les informations nécessaires au calcul de l'irradiation incidente au moment précis de la prise de chaque cliché et (ii) à la procédure de calibration absolue à mettre en œuvre. - Les paramètres atmosphériques ne sont généralement pas nécessaires pour les études effectuées par drone du fait de leur faible hauteur de vol (cf. ci-dessous « Effet de l'atmosphère »).	Gueymard (1995), Berk et al. (2005), Zarco-Tejada et al. (2012), Wang and Myint (2015), Aasen et al. (2018)
					L'approche empirique consiste à mesurer le flux lumineux incident sur le terrain, à l'aide d'un spectromètre supplémentaire (i.e. en plus du capteur de l'appareil photo qui, lui, mesure le flux lumineux réfléchi). Elle est dénommée « méthode du double spectromètre » (i.e. dual-spectrometer method). Deux variantes existent selon que le second spectromètre est fixe, au sol, ou mobile (i.e. embarqué sur le drone).	Fixe	**Avantages :** **-** cette approche simple à mettre en œuvre permet de calculer *a posteriori* les valeurs de réflectance. - elle tient compte des variations d'illumination au moment de la prise des clichés (le spectromètre au sol mesurant l'irradiation solaire de manière continue pendant le vol du drone). **Limite :** cette approche n'est valide que si les conditions d'illumination enregistrées par le spectromètre au sol sont représentatives de celles rencontrées par le drone au même instant à l'endroit précis de la prise de vue.	- Cette approche est à éviter dans le cas de conditions météorologiques changeantes (e.g. nuages éparses), en particulier lorsque la zone d'étude à couvrir est vaste. - Les deux spectromètres doivent faire l'objet d'une calibration croisée (réalisée, le plus souvent, de manière simultanée à l'aide d'un troisième spectromètre déjà calibré). - Toujours effectuer les acquisitions dans le même créneau horaire, préférentiellement autour de 12h00 (heure solaire) pour limiter les ombres.	Miura and Huete (2009), Hakala et al. (2013), Burkart et al. (2014), Holman et al. (2019)
						Mobile	**Avantages :** **-** cette approche simple à mettre en œuvre permet de mesurer directement la réflectance. - elle tient compte des variations d'illumination au moment et à l'endroit de la prise de chaque cliché, ce qui est intéressant lorsque les conditions météorologiques sont changeantes. **Limites :** - il faut que l'élévation du soleil soit suffisamment importante pour permettre au capteur d'acquérir correctement l'irradiation incidente. - en cas d'éclairement solaire oblique, le sol peut recevoir une quantité d'énergie lumineuse très différente de celle reçue par le capteur mesurant l'irradiation incidente (e.g. ombres portées des nuages). - il faut que le capteur enregistrant le flux lumineux incident soit fixé au drone par un dispositif gyrostabilisé ou bien que le capteur enregistre son inclinaison lors de chaque cliché et corrige, si nécessaire, la valeur mesurée (e.g. capteur FGI AIRS développé par l'Institut Finlandais de Géodésie) : seuls quelques degrés d'inclinaison du drone suffisent, en effet, à altérer très fortement la mesure de l'irradiation incidente.	- Capteurs « orientés recherche » : Ocean Optics STS-VIS, TriOS RAMSES ACC2-VIS. - Capteurs commerciaux : Parrot Sequoia+ (env. 3000 € HT), MicaSense RedEdge-MX/DLS2 (env. 5000 € HT), MAIA S2/ILS (env. 18 000 € HT) - Les mesures effectuées par le capteur Parrot sequoia présentent de fortes divergences entre bandes. Ce résultat a été obtenu en comparant les valeurs obtenues aux mesures de référence prises simultanément par un spectromètre de terrain situé au sol. - Les deux spectromètres (i.e. celui mesurant l'irradiation incidente et celui mesurant l'irradiation réfléchie) doivent faire l'objet d'une calibration croisée (réalisée, le plus souvent, de manière simultanée à l'aide d'un troisième spectromètre déjà calibré). - Toujours effectuer les acquisitions dans le même créneau horaire, préférentiellement autour de 12h00 (heure solaire) pour limiter les ombres.	Hakala et al. (2013), Burkhart et al. (2017), Aasen et al. (2018), Hakala et al. (2018), Suomalainen et al. (2018), Holman et al. (2019), Stow et al. (2019), MAIA (2020), MicaSense (2020), Parrot (2020)
				II	La méthode de la droite empirique – Empirical Line Method (ELM) – consiste à déterminer, pour chaque bande, les paramètres de l'équation linéaire (pente et ordonnée à l'origine) qui relie les comptes numériques enregistrés par le capteur aux valeurs de réflectance de cibles de calibration placées au sol. Les équations obtenues pour chaque bande sont ensuite appliquées à l'ensemble des clichés afin de produire les images en réflectance. Compte tenu du prix élevé des cibles en Spectralon (cible lambertienne dont la valeur de réflectance est constante pour l'ensemble des longueurs d'ondes, depuis l'ultra-violet jusqu'au proche-infrarouge), les cibles de calibration sont, généralement, fabriquées de manière artisanale (panneau de bois – e.g. Isorel – recouvert d'une peinture mate). Il est recommandé de préparer une dizaine de cibles de teintes dégradées, allant du gris foncé au gris clair, qui permettront de s'assurer de la linéarité de la relation entre les comptes numériques et les valeurs de réflectance mesurées (la relation est parfois exponentielle, en particulier, pour certains appareils photo grand-public ; dans ce cas, la relation est linéarisée en prenant le log népérien). Il est nécessaire de vérifier la propriété lambertienne (ou à tout le moins, pseudo-lambertienne) des cibles et de mesurer précisément leur réflectance dans toutes les gammes de longueurs d'ondes correspondant aux spectres enregistrés par les canaux RVB du capteur (à la différence des cibles en Spectralon, leur réflectance n'est généralement pas constante sur tout le spectre). La mesure des valeurs de réflectance des cibles est effectuée à l'aide d'un spectromètre (ou spectroradiomètre) de terrain et d'une cible de calibration en Spectralon dont la réflectance est voisine de 100% : l'opération consiste à mesurer quasi simultanément la cible en Spectralon puis l'une des cibles « *fait maison* » à calibrer ; le rapport de luminance des deux mesures permet ainsi de déterminer la réflectance de la cible pour chaque longueur d'onde.		**Avantage :** - approche simple et facile de normalisation radiométrique. **Limites :** - nécessite des conditions d'éclairement constantes pendant la durée du vol (ou de la campagne de vols au cours d'une même mission). -difficile à mettre en œuvre dans les études forestières car les panneaux de référence doivent être déployés dans des trouées à l'intérieur de la forêt : les conditions d'éclairement des panneaux au sol ne correspondent pas aux conditions au sommet de la canopée en raison de la diffusion et de l'absorption du rayonnement par les arbres environnants.	- Méthode d'étalonnage radiométrique actuellement la plus employée dans les études de télédétection utilisant des capteurs RVB « grand-public » embarqués sur des drones. - Cette méthode implique de « caractériser » préalablement l'appareil photographique, c'est-à-dire, de mesurer la réponse/sensibilité spectrale de son capteur dans chacun de ses trois canaux RVB (cette mesure n'est valide que pour une combinaison précise des paramètres d'exposition – ISO, ouverture et vitesse d'obturation). Cette caractérisation est généralement effectuée par un laboratoire spécialisé disposant d'une sphère d'intégration et d'un monochromateur permettant de faire varier la longueur d'onde de la lumière émise par pas successifs de quelques nanomètres (cf. annexe 8.1, Figs. A7, A8 et A9 / Voir en particulier Berra et al. 2015 et Verhoeven et al. 2009). - Toujours vérifier la propriété lambertienne des cibles. - Prévoir des cibles suffisamment grandes de sorte que leur représentation sur l'image corresponde à un nombre de pixels relativement important. Cette précaution permettra ainsi d'extraire un grand nombre de comptes numériques pour chaque cible, ce qui réduira le bruit du capteur et l'hétérogénéité éventuelle des valeurs de réflectance de la cible. - Ne jamais retenir les pixels à proximité de la bordure des cibles : il s'agit de pixels « mixtes » contenant à la fois la cible de calibration et la surface adjacente (car la « fonction d'étalement du point » d'un capteur est plus grande que la taille du pixel). - Choisir les teintes extrêmes des cibles de calibration (i.e., la plus claire et la plus foncée), de sorte que la gamme de réflectance couverte par les cibles encadre bien l'étendue des valeurs de réflectance attendues lors de l'acquisition sur le terrain. Il est en effet recommandé de rester dans la gamme de réflectances prédites par les modèles (i.e. l'interpolation est toujours préférable à l'extrapolation !) - Il est recommandé de déterminer la réflectance de cibles naturelles (e.g. divers types d'occupation du sol) sur le terrain avec un spectromètre : elles serviront, *in fine*, de cibles de validation après que l'image en réflectance aura été produite. - Pour tenter de pallier le problème lié à la variabilité de l'éclairement de la scène pendant la durée d'un vol et/ou entre plusieurs vols, il est possible de placer un grand nombre de cibles sur la zone d'étude à couvrir (à cet égard, les GCP peuvent être utilisés en complément des cibles radiométriques dédiées). Cette procédure alourdit néanmoins fortement le travail de terrain et n'est pas toujours possible à mettre en œuvre (e.g. problème d'accessibilité). L'autre possibilité est de procéder à un lissage « statistique » des clichés (cf. ci-dessous « effet de la couverture au sol »). - Cible Spectralon 99% 30x30cm env. 2000 € - Spectromètre le plus fréquemment utilisé dans les études : ASD FieldSpec® 4 - Toujours effectuer les acquisitions dans le même créneau horaire, préférentiellement autour de 12h00 (heure solaire) pour limiter les ombres.	Smith and Milton (1999), Baugh and Groeneveld (2008), Lelong et al. (2008), Miura and Huete (2009), Laliberte et al. (2011), Del Pozo et al. (2014), Von Bueren et al. (2015), Mathews (2015), Berra et al. (2017), Nevalainen et al. 2017, Holman et al. (2019), Stow et al. (2019), Edmund Optics (2020), Malvern PAnalytical (2020)
		Effet de la couverture nuageuse	La fluctuation de la couverture nuageuse pendant et/ou entre les différents vols du drone lors d'une même campagne conduit à une variation de l'éclairement solaire qui se traduit par une hétérogénéité radiométrique au sein et/ou entre les images.	Les méthodes de correction et les précautions à prendre sont indiquées dans les lignes ci-dessus (cf. drone équipé d'un spectromètre mesurant l'irradiation incidente) et ci-dessous (cf. méthodes de lissage LRM ou d'ajustement radiométrique par bloc).				- Éviter, autant que faire se peut, les acquisitions lors de journées où la couverture nuageuse n'est pas homogène (e.g. ciel voilé, nuages éparses).	Cf. ci-dessus et ci-dessous

		Effet de la couverture du sol	La couverture du sol présente généralement une certaine « rugosité », à l'origine de son comportement non-lambertien. L'anisotropie de sa réflectance peut entraîner des variations radiométriques importantes à l'intérieur d'une même image et entre images voisines, et ainsi affecter la signature spectrale des objets. Visuellement, cet effet se traduit par une luminosité répartie de manière inégale au sein de la scène (i.e. ombres et « hot-spots »). La réflectance de la couverture du sol varie en fonction des angles d'incidence du soleil et des angles d'observation. Bien connu avec les images prises d'avions, cet effet est accentué avec les drones du fait de leur faible hauteur de vol et de leur champ d'observation particulièrement large (i.e. objectif grand-angle) : les angles de vue des différents objets au sein d'une même image sont alors augmentés. Cet effet d'anisotropie peut être plus ou moins marqué selon la longueur d'onde considérée et le type d'occupation du sol.	1. Élaborer un modèle de réflectance bidirectionnelle (i.e. BRDF = Bidirectional Reflectance Distribution Function). Ce modèle décrit, pour chaque type d'occupation du sol, la manière dont la réflectance varie en fonction des angles d'observation et d'incidence solaire. Il permet ainsi de compenser les effets de l'anisotropie de sorte que les valeurs de réflectance de chaque pixel de l'image correspondent aux valeurs de réflectance dans la direction du nadir. Il existe des modèles physiques, empiriques et semi-empiriques. Généralement, la correction BRDF est effectuée au moyen de modèles empiriques : le modèle est construit à partir de l'acquisition de valeurs de réflectance de l'objet d'intérêt sous divers angles de vue et divers angles d'incidence du soleil. Il permet alors de calculer un facteur de correction multiplicatif qui est appliqué aux images.	**Avantage :** permet de normaliser les valeurs de réflectance d'une image, ou d'une mosaïque d'images, lorsque la couverture du sol présente une forte anisotropie. **Limite :** la mesure de cet effet sur le terrain, en vue de construire un modèle BRDF, est particulièrement compliquée, très chronophage et peu réaliste dans la mesure où (i) une cible de calibration doit se trouver sur chaque image et être photographiée sous un grand nombre d'angles de prises de vues et, ce, pour un grand nombre d'angles d'incidence solaire, (ii) chaque type d'occupation du sol sur la zone d'étude doit faire l'objet de cette mesure, chacun présentant des propriétés anisotropiques différentes.	*Commentaires généraux* : - A ce jour, dans la plupart des études menées avec des drones équipés de caméras grand public, la correction des effets liés à l'anisotropie de la couverture du sol n'est pas effectuée – cela est principalement dû à la complexité et à la lourdeur des procédures à mettre en œuvre… ou de l'inaccessibilité de méthodes « clef en main ». - Pour limiter l'effet d'anisotropie, il est préférable d'acquérir les images avec un fort recouvrement (70-80%) et dans un laps de temps bref (<15 min). Lors de la création de l'orthomosaïque, les algorithmes de traitement peuvent ainsi sélectionner les pixels les plus proches du nadir pour chaque image : ces derniers sont supposés présenter des effets bidirectionnels similaires (tout au moins en plaine). - Les méthodes de lissage (e.g. LRM, ajustement radiométrique par bloc) servent également à corriger les effets liés aux variations des conditions d'éclairement (i.e. position du soleil, couverture nuageuse). - D'autres méthodes de lissage existent mais n'ont, semble-t-il, pas été reprises dans les études menées par drone à ce jour (e.g. Li et al. 2004, Liu et al. 2014, Li et al. 2016).	Sandmeier and Itten (1999), Susaki et al. (2004), Hakala et al. (2010), Laliberte et al. (2011), Schläpfer et al. (2015), Burkart et al. (2015), Rasmussen et al. (2016), Roosjen et al. (2017), Aasen et al. (2018)
				2. Méthode de lissage par l'algorithme « Local Range Modification (LRM) ». Il s'agit d'une méthode d'homogénéisation de la luminosité et du contraste basée sur la partition de l'image (ou de la mosaïque d'images) en blocs de pixels adjacents. Elle nécessite la détection des valeurs maximales et minimales de luminosité des pixels dans chaque bloc. Ces valeurs sont utilisées comme poids dans les paramètres d'une interpolation bilinéaire, qui permet d'ajuster les comptes numériques des pixels d'un bloc en fonction des blocs de pixels voisins (cf. articles ci-contre pour plus de détails, et cf. annexe 8.1, Figs. A11- A13 pour illustration). Cette méthode doit être appliquée à chaque bande de l'image. Des méthodes « sœurs » ont été mises au point [e.g. Lelong et al. (2008) ou Liu et al. (2014)]. Certaines d'entre elles sont implémentées actuellement dans certains logiciels propriétaires.	**Avantages :** - permet de normaliser les valeurs de réflectance d'une image, ou d'une mosaïque d'images, lorsque la couverture du sol présente une forte anisotropie - cette méthode de correction ne se base que sur des informations issues des images elles-mêmes. **Limite :** la taille des blocs est déterminée de manière empirique, en fonction de la « structure » de l'image (ou mosaïque d'images) à traiter. Or, ce choix n'est pas neutre : une trop grande taille entraîne des écarts entre les valeurs de luminosité min et max, ce qui complique le lissage, tandis que le choix de blocs de petite taille conduit, certes, à un meilleur lissage, en particulier pour la détection et l'atténuation des hot spots et des ombres, mais entraîne un coût élevé en temps de calcul.		Fahnestock and Schowengerdt (1983), Nobrega and Quintnilha (2004), Lelong et al. (2008)
				3. La méthode d'ajustement radiométrique par bloc ou « Radiometric Block Adjustment » est une procédure analogue à celle mise en œuvre pour la correction géométrique des images (i.e. Geometric Block Adjustment). Elle consiste à modifier la radiométrie de chaque image d'un bloc afin de minimiser les différences entre images et créer une mosaïque sans couture apparente. Pour ce faire, elle s'appuie sur des points de rattachement (tie-points) et des points de contrôle (control-points) radiométriques. Elle ne peut être mise en œuvre que pour un bloc d'images qui présentent un recouvrement important (i.e. >40%) et pour lesquelles le vignettage a été préalablement corrigé. Il existe des approches variées qui peuvent être soit basées sur des modèles physiques, soit basées sur des méthodes de correction empiriques (approche statistique basée sur l'égalisation des histogrammes) ou semi-empiriques (prenant en compte seulement les effets radiométriques les plus importants, comme le modèle BRDF ou le modèle atmosphérique). Le recouvrement multiple des images offre également la possibilité d'estimer la BRDF pour chaque type d'occupation du sol et de l'utiliser pour contribuer à la normalisation des données.	**Avantages :** - permet de normaliser les valeurs de réflectance d'une mosaïque d'images, lorsque la couverture du sol présente une forte anisotropie. - cette méthode de correction ne se base que sur des informations issues des images elles-mêmes (approche empirique). - cette méthode d'égalisation relative de la radiométrie entre les images permet de conserver leur contraste d'origine et les informations de couleur. - c'est une méthode très performante car elle peut produire des mosaïques uniformes à partir d'un jeu d'images acquis avec plusieurs vols, sous des angles solaires zénithaux et azimutaux variés. **Limite :** aucun logiciel open-source mettant en œuvre cette méthode d'ajustement radiométrique ne semble actuellement disponible ou accessible librement. Seuls, les algorithmes développés par l'Institut Finlandais de Recherches Géospatiales (logiciel en C++) et par l'IGN (logiciel Pepita) pourraient constituer une première piste… Sur le plan des logiciels propriétaires, des algorithmes effectuant ce type de correction semblent toutefois être implémentés : - Leica Geosystems XPro - Intergraph ImageStation® PixelQue - OrthoVista sous Trimble Inpho®office software - BAE System SOCET SET®		Falala et al. 2008, Chandelier and Martinoty (2009), Honkavaara et al. (2009, 2012 and 2013), Hernandez-Lopez et al. (2011), Hakala et al. (2013), Pros et al. (2013), Weyermann et al. (2014), Gehrke and Beshah (2016), Miyoshi et al. (2018), Honkavaara and Khoramshahi (2018), Singh and Frazier (2018), Aasen et al. (2018)
		Effet de la topographie	La topographie influe sur l'éclairement local au sein d'une image ou d'une mosaïque d'images, en particulier dans le cas de reliefs marqués où elle conduit alors à une très forte hétérogénéité radiométrique des pixels constitutifs d'un même type de couvert au sein de la scène étudiée. La réflectance d'un même objet varie en fonction de la pente du terrain et de l'orientation de cette dernière par rapport au rayonnement incident du soleil (e.g. pour un même couvert, l'ubac et l'adret apparaîtront respectivement plus sombre ou plus lumineux par rapport à une surface horizontale).	La correction (ou, le plus souvent, la limitation) des effets topographiques repose sur l'utilisation d'un modèle numérique de surface (MNS) – pour extraire, pour chaque pixel, l'angle d'élévation $\boldsymbol{\theta_n}$ et l'azimut de la pente $\boldsymbol{\phi_n}$– ainsi que sur les angles solaires zénithal $\boldsymbol{\theta_s}$ et azimutal $\boldsymbol{\phi_s}$ au moment de l'acquisition. Ces paramètres permettent de calculer, pour chaque pixel, l'angle « local » d'éclairement solaire $\boldsymbol{\beta}$, également nommé « angle d'incidence solaire » : $\cos \boldsymbol{\beta} = \cos \boldsymbol{\theta_s} \cos \boldsymbol{\theta_n} + \sin \boldsymbol{\theta_s} \sin \boldsymbol{\theta_n} \cos [\boldsymbol{\phi_s} - \boldsymbol{\phi_n}]$ Différents modèles de correction existent. Ils sont classés en deux catégories : les modèles lambertiens et non-lambertiens selon que l'on considère la réflectance de la surface comme isotrope ou anisotrope. Tous déterminent, pour chaque pixel, la réflectance de la surface ramenée à l'horizontale. Les plus courants sont : - Modèle Lambertien $\rho_H = \rho_T (\cos \boldsymbol{\theta_s} / \cos \boldsymbol{\beta})$ - Mod. de Minnaert $\rho_H = \rho_T (\cos \boldsymbol{\theta_s} / \cos \boldsymbol{\beta})^K$ - Mod. c-factor $\rho_H = \rho_T (\cos \boldsymbol{\theta_s} + c_k / \cos \boldsymbol{\beta} + c_k)$ - Mod. stat. empir. $\rho_H = \rho_T - (a.\cos \boldsymbol{\beta} + b) + \mu_{\rho T}$ (pour plus de détails sur la nature et le calcul des constantes, cf. articles ci-contre).	**Avantage :** permet de normaliser les valeurs de réflectance d'une image, ou d'une mosaïque d'images, lorsque le relief est accidenté. **Limites :** - il n'existe pas de consensus sur les méthodes à appliquer en fonction des cas. Il est donc souvent nécessaire d'adopter une approche empirique, en testant plusieurs modèles, ce qui alourdit les traitements. - ce type de correction peut altérer les caractéristiques spectrales globales de l'image ou de la mosaïque d'images.	- La plupart des modèles effectuent cette correction par bande spectrale. - Il existe des adaptations pour pallier les défauts de certains modèles. Par exemple, le modèle « lambertien pondéré » vient pallier le risque de « sur-correction » du modèle originel lorsque l'angle d'incidence solaire est faible (i.e. zones faiblement éclairées). On peut citer également le modèle de Minnaert modifié ou le modèle c-factor adouci. - L'angle d'observation du capteur peut être pris en compte dans certains modèles. C'est le cas du modèle Gamma : $\rho_H = \rho_T \gamma$ avec $\gamma = (\cos \boldsymbol{\theta_s} + \cos \boldsymbol{\theta_v}) / (\cos \boldsymbol{\beta} + \cos \boldsymbol{\beta_v})$ où $\boldsymbol{\theta_v}$ et $\boldsymbol{\beta_v}$ sont respectivement les angles d'observation par rapport à un terrain plat ou incliné. - La méthode de limitation des effets topographiques qui consiste à diviser les valeurs de réflectance par le cosinus de l'angle zénithal solaire n'est pas recommandée, car elle augmente la variance associée à chaque type de couvert perçu comme uniforme. - Les résultats les plus satisfaisants semblent généralement obtenus avec les modèles de Minnaert et c-factor. Toutefois, il n'existe actuellement aucune méthode meilleure que les autres dans toutes les situations. - A noter que certaines études tiennent compte des effets topographiques de manière indirecte (i.e. sans appliquer de modèles) en (i) effectuant un rapport de bandes spectrales [cf. Holben and Justice (1981)] ou (ii) en intégrant les/certains paramètres topographiques issus du MNS comme attributs dans une classification orientée objet.	Minnaert (1941), Holben and Justice (1980 and 1981), Teillet et al. (1982), Teillet (1986), Civco (1989), Franklin and Giles (1995), Shepherd and Dymond (2003), Riano et al. (2003), Matsushita et al. (2007), Wei et al. (2008), Richter et al. (2009), Jakob et al. (2017)
		Effet de l'atmosphère	L'atmosphère modifie l'éclairement et, donc, la luminance/réflectance mesurée, en raison de la présence de gaz (02, 03, H2O…) et d'aérosols (poussières, pollens…) qui peuvent absorber et/ou diffuser certaines longueurs d'ondes, modifiant ainsi les propriétés spectrales du rayonnement.	Cet effet est particulièrement saillant pour les images prises par satellite ou par avion et impose qu'une correction soit effectuée. En revanche, il est supposé être moins important pour les clichés pris depuis des drones qui volent à plus faible hauteur (<150 m en France) : en effet, l'interaction entre le rayonnement réfléchi par la couverture au sol et l'atmosphère est très limitée. C'est la raison pour laquelle l'influence de l'atmosphère sur les mesures de luminance/réflectance effectuées par des capteurs embarqués sur des drones est généralement considérée comme négligeable et que, en conséquence, aucune correction n'est effectuée sur les images.		Il est intéressant de noter que l''utilisation de cibles de référence radiométrique placées au sol dans le cadre de l'utilisation de la méthode de la droite empirique (ELM) permet de normaliser l'effet de l'atmosphère entre les clichés.	Smith and Milton (1999), Herrero-Huerta et al. (2014), Rasmussen et al. (2016), Berra et al. (2017), Stow et al. (2019)
	Liées au réglage de l'appareil photographique	Exposition variable	La modification automatique de la sensibilité, de l'ouverture et/ou du temps d'intégration du capteur pendant la durée d'un vol entraînent une hétérogénéité radiométrique entre clichés. Le problème survient également si l'on change manuellement les paramètres d'exposition du capteur entre les vols d'une même mission (e.g. mosaïques) ou entre deux missions (e.g. séries temporelles).	Désactiver les programmes de réglage automatique de l'exposition et fixer <u>définitivement</u> les paramètres de l'appareil photo pour toutes les missions : - Ouverture - Vitesse d'obturation - Sensibilité (ISO)	**Avantages :** - le contrôle de l'exposition permet de ne relier les variations de luminosité qu'aux seuls facteurs environnementaux, ce qui permet la mise en œuvre de l'ELM pour étalonner les images entre elles. - la correction du vignettage et du courant d'obscurité reste valide pour toutes les images (cf. ci-dessus). **Limite :** risques de sous- ou surexposition lors de certaines missions non-standard.	- La distorsion radiométrique liée à l'atmosphère est généralement négligée compte tenu de la très faible hauteur de prises de vues (≤ 150 m). - Lors de missions non standard, prévoir des tests pour régler (puis fixer) les paramètres d'exposition afin d'éviter la sous- ou surexposition. Il est, dans cas, recommandé d'acquérir les images de champ plat et d'obscurité maîtres pour ce nouveau réglage (cf. ci-dessus).	Herrero-Huerta et al. (2014), Mathews (2015), Von Bueren et al. (2015), Berra et al. (2017), Yu et al. (2017)
				Dans le cas où les paramètres d'exposition ont été modifiés entre deux vols/missions (mais que ces paramètres étaient fixes au cours de chaque vol/mission), les valeurs de luminance enregistrées lors de ces deux campagnes peuvent être ajustées. La normalisation de la luminance est, en effet, possible à partir (i) des paramètres d'exposition lors des prises de vues sur le terrain, et (ii) de la luminance et des paramètres d'exposition lors de la calibration du capteur.	**Avantage :** cette méthode permet de « récupérer » des séries d'images qui ont pu être prises avec des paramètres d'exposition inhabituels, soit par mégarde, soit parce que des conditions particulières d'éclairement de la scène imposaient de les adapter. **Limite :** nécessite une calibration préalable (entre la luminance et les comptes numériques pour une exposition donnée) à faire effectuer par un laboratoire spécialisé disposant d'une sphère d'intégration.	- Cette procédure, mise en œuvre pour la mesure de la luminance, reste valide pour la réflectance dès lors que la relation entre la luminance et la réflectance est linéaire ; dans le cas contraire, il conviendrait de faire effectuer la calibration par rapport aux valeurs de réflectance.	Wüller and Gabele (2007)
				Caractériser l'appareil photographique en déterminant la relation entre les comptes numériques et les paramètres d'exposition. Pour ce faire, des séries de photos d'un panneau en Spectralon (i.e. réflectance lambertienne) sont réalisées avec un niveau d'éclairement constant. Pour chaque paramètre d'exposition (i.e. ouverture, sensibilité, vitesse d'obturation), une série de photos est effectuée en faisant varier le paramètre testé sur l'ensemble de sa plage de valeurs possibles (e.g. ISO100-ISO1000), les deux autres paramètres restant fixes. Effectuée à éclairage constant, chacune des trois séries d'images produites modélise ainsi l'effet de chaque paramètre d'exposition sur les comptes numériques de l'image. Les relations linéaires qui existent entre, d'une part, les comptes numériques et, d'autre part, l'ouverture et la sensibilité permettent de calculer des facteurs de correction qui sont, alors, appliqués à l'image pour corriger les comptes numériques.	**Avantage :** cette méthode permet d'éviter le risque de sous- ou surexposition des images. **Limite :** cette méthode alourdit le post-traitement des images car elle nécessite de corriger individuellement chaque image en récupérant les informations d'exposition dans les fichiers EXIF.	- Cette caractérisation est effectuée en enregistrant les photographies au format .RAW et en les convertissant en Tiff avec un logiciel comme DCraw (cf. ci-dessus « dématriçage ») afin de préserver le caractère linéaire entre le niveau d'exposition et les comptes numériques. - Cette méthode permet de fixer la vitesse d'obturation de l'appareil photographique (ce qui permet d'éviter les flous de bougé lié au déplacement et/ou aux vibrations du drone), tout en laissant les réglages de l'ouverture et de la sensibilité en mode automatique.	Hiscocks (2014), Holman et al. (2019)

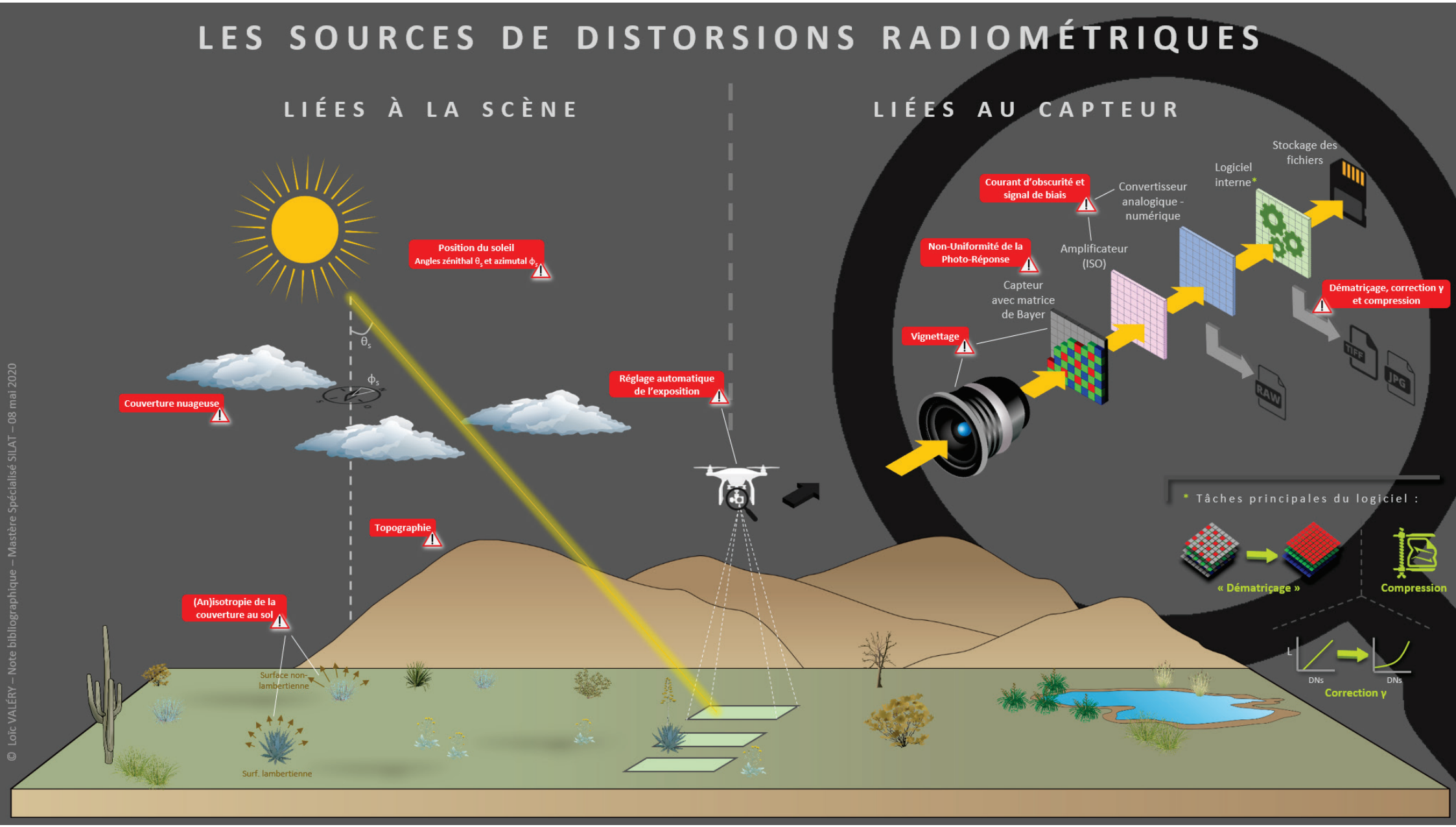


Figure 3. Les principales sources de distorsions radiométriques

4. La chaîne de traitements sous R

L'importance de l'investissement consenti dans l'analyse approfondie de la bibliographie traitant de la phase d'acquisition des images répondait à un besoin majeur identifié par l'entreprise. Toutefois, compte tenu du temps imparti, ce choix délibéré, et partagé, de mettre l'accent sur ce sujet, préalable indispensable à la phase de traitement des images, s'est fait au détriment de cette dernière. Le présent rapport comporte donc un déséquilibre inévitable du nombre de références citées entre ces deux parties.

4.1. La chaîne en quelques chiffres

Le script qui assure l'exécution de la chaîne de traitements totalise un peu plus de 2400 lignes (sans les commentaires), s'appuie sur une quarantaine de packages R et assure l'interfaçage avec trois logiciels de géo-traitements open-source (i.e. OTB, GRASS et SAGA).

4.2. Les principales fonctions

Le programme met à disposition de l'utilisateur un certain nombre de fonctions tant sur le plan de la gestion informatique, afin de faciliter son usage, que sur le plan des géo-traitements pour optimiser la fluidité et la fiabilité de la chaîne.

- *Sur le plan de la gestion informatique*

    - *Déploiement sur d'autres ordinateurs*. Le script détecte automatiquement les packages préexistants et installe ceux qui font défaut au bon fonctionnement de la chaîne de traitements.

    - *Gestion des dossiers et fichiers temporaires*. Le programme crée automatiquement les dossiers temporaires qui sont nécessaires à sa bonne exécution. Il permet également, à la demande, de supprimer ou de conserver ces derniers à la fin des traitements.

    - *Création automatique d'un fichier "log"*. Il s'agit d'un "journal" qui enregistre les événements importants qui se produisent au cours de l'exécution du script afin de permettre à l'utilisateur de s'assurer, à l'issue des traitements, de la bonne exécution du programme à toutes les étapes de la chaîne.

- *Initialisation des packages et des logiciels*. Le script assure le chargement des librairies et l'interfaçage des différents logiciels (sous réserve qu'ils aient été préalablement installés !) de manière automatisée et "sous conditions" afin d'éviter les problèmes de conflits entre packages et/ou logiciels.

- *Émission de signaux sonores*. Le programme avertit l'utilisateur soit à l'issue de traitements qui impliquent une intervention humaine, soit lorsqu'une erreur se produit. Dans ce dernier cas, si le problème est sérieux (e.g. erreurs de topologie), la chaîne s'arrête automatiquement.

- *Sur le plan de la chaîne de traitements* stricto sensu

  - *Généralités*

    - **Format des objets.** R permet la programmation orientée-objet, c'est-à-dire qu'il permet de manipuler des objets, ou briques logicielles, qui possèdent une structure interne et un comportement propres. Plusieurs types d'objets existent pour traiter des images ou des couches vectorielles.
      Pour les objets « images », nous avons eu recours aux formats *stack*, *brick* et *stars*.
      Pour les objets « vecteurs », seul le format *sf* a été utilisé car le format *sp*, qui était la norme jusqu'à très récemment, est voué à disparaître à moyen terme (Brunsdon et Comber 2019).

    - **Images prises en charge.** Quoique, à l'origine, prévu uniquement pour le traitement des images RVB, le script a été adapté pour gérer également les images à n bandes. La prise en charge d'images satellite est donc possible. A cet égard, un point d'entrée pour les images satellite SENTINEL a déjà été intégré à la chaîne de traitements.

  - *Segmentation*

    - **Algorithme.** Le programme met en œuvre l'algorithme de Baatz-Schäpe (Baatz et Schäpe 2000), *via* le logiciel OTB, pour assurer l'étape

de segmentation. Cet algorithme appartient aux méthodes dites de "Segmentation multi-échelle basée sur les régions (i.e. pixels ou groupes de pixels)" (Schiewe 2002) qui comptent aujourd'hui parmi les approches les plus utilisées (Nikfar et al. 2012, Huang 2015). La raison de ce succès tient au fait que ces méthodes sont relativement peu sensibles au bruit dans l'image et qu'elles permettent d'intégrer de l'information basée sur des représentations à un plus haut niveau d'abstraction – comme, par exemple, l'agencement spatial des régions ou des considérations géométriques liées à leur forme – ce qui les rend particulièrement adaptées à la segmentation d'images à très haute résolution spatiale (Lassalle 2015).

Plus spécifiquement, l'algorithme de Baatz-Schäpe procède par fusion itérative de régions (pixels) tant que le degré de similitude/d'homogénéité entre ces dernières est supérieur au seuil défini par l'utilisateur (un paramètre de seuil/d'échelle permet de fixer cette valeur limite). La mesure du niveau de similitude entre régions combine information spectrale et information spatiale (les critères d'homogénéité spectrale et d'homogénéité spatiale sont des paramètres dont les valeurs sont définies par l'utilisateur), ce qui permet à l'algorithme de produire des régions homogènes en adaptant la dimension des régions aux tailles, variables, des différents objets d'intérêt au sein de l'image (Schiewe 2002, Lassalle 2015). A cet égard, l'excellente performance de cet algorithme, également implémenté dans le logiciel propriétaire *eCognition*, a été confirmée par une étude comparative testant six autres algorithmes concurrents (Meinel et Neubert 2004).

- **Segmentations en série.** La sélection d'une combinaison satisfaisante de valeurs pour paramétrer l'algorithme s'avérant à la fois essentielle et délicate, le script propose à l'utilisateur d'exécuter des segmentations en série pour guider son choix (à accomplir de préférence sur une portion représentative de l'image pour abréger les temps de calcul !). Par défaut, 75 segmentations sont effectuées. Les résultats sont affichés directement dans R puis exportés dans un fichier PDF pour en faciliter le partage entre les membres de l'entreprise et, ainsi, permettre une sélection concertée de la meilleure combinaison de valeurs possible.

Pour simplifier cette étape de sélection, chaque segmentation obtenue est titrée de manière automatique en reprenant la combinaison de paramètres qui en est à l'origine (cf. annexe 8.2).

- **Segmentation unique.** Après avoir réglé les paramètres de l'algorithme, le script permet d'étendre la segmentation sur l'ensemble de l'image à analyser.

- **Lissage du contour des polygones.** La couche segmentée est le produit de la vectorisation d'un raster. La délimitation des polygones suit donc nécessairement les contours des pixels de l'image conférant un aspect crénelé à leur pourtour. Afin de supprimer les aspérités dans le tracé des contours, la chaîne de traitements inclut une étape de lissage assurée par le logiciel GRASS.

- **Vérification, correction et validation de la topologie** de la couche segmentée et lissée. L'étape de lissage des contours produit fréquemment des erreurs de topologie au sein de la couche. La chaîne de traitements intègre donc une étape de détection et correction qui s'achève par une phase de validation de la topologie.

- **Exportation.** A l'issue de la segmentation, le programme propose l'exportation de la couche au format SHP qui contient un champ "Identifiant" dans sa table attributaire.

o *Calcul d'attributs pour chaque objet (i.e. polygone) de la couche*

Pour chaque objet, trois grands types d'informations sont extraits de l'image puis intégrés à la table attributaire de manière automatisée afin de permettre le traitement ultérieur par les algorithmes de classification :

- **Informations spectrales**, basées sur les valeurs des pixels dans chaque bande de l'image ;

- **Informations texturales**, basées sur le calcul de huit indices d'Haralick pour chacune des bandes de l'image *via* un module spécifique du logiciel OTB ;

- **Informations morphologiques**, basées sur le calcul de huit indices de forme *via* un module spécifique du logiciel SAGA.

Pour chaque type d'information et chaque objet sont calculés les six paramètres statistiques suivants : moyenne, écart-type, mode, minorité (i.e. valeur la moins représentée au sein d'un polygone donné), maximum, minimum.

Pour une image RVB, 170 champs sont ainsi intégrés automatiquement dans la table attributaire – informations spectrales (3 bandes x 6 statistiques) + informations texturales (3 bandes x 8 indices x 6 statistiques) + informations morphologiques (8 indices).

Le script génère également le nom des champs de manière automatisée en compilant le numéro de bande, le nom abrégé du paramètre statistique et, le cas échéant, le nom abrégé de l'indice.

Le programme prévoit, enfin, l'exportation au format SHP de la couche segmentée et renseignée du calcul des attributs. Un champ "classes" est ajouté automatiquement à la table attributaire avant l'exportation de la couche pour permettre à l'utilisateur de renseigner la "vérité terrain" sous QGIS.

- *Classification*

  - **Importation et visualisation de la "vérité terrain".** Afin de s'assurer de la validité de la "vérité terrain" concernant le système de projection, le script affiche automatiquement, sur l'image à traiter, les polygones qui ont été préalablement renseignés sous QGIS.

  - **Échantillon d'apprentissage et échantillon-test.** Le programme sépare automatiquement la vérité terrain en deux lots : 80% des polygones sont réservés au lot d'apprentissage, les 20% restants au lot test qui servira à l'évaluation des modèles. Ce ratio est ajustable ; il se situe néanmoins dans la norme 70-80% vs. 30-20% (Kuhn et Johnson 2013, Wegmann et al. 2016). L'affectation des polygones à l'un des deux lots est effectuée de manière aléatoire mais tient compte de la

distribution des classes au sein de la “vérité terrain” (i.e. échantillonnage aléatoire stratifié).

- **Visualisation du lot d’apprentissage.** Avant de procéder à l’apprentissage des modèles, le script propose à l’utilisateur d’explorer la structure du jeu de données en effectuant des représentations graphiques : graphes de densité de probabilité, box-plots, matrice de corrélations.

- **Apprentissage des modèles.** La chaîne de traitements met en œuvre l’entraînement de deux algorithmes de classification : le modèle *radial-basis Support Vector Machine* et le modèle *Random Forest*. Ces deux modèles ont pour qualités d’être flexibles et de présenter une forte probabilité de produire des résultats optimaux (i.e. les plus précis) dans un grand nombre de situations (Kuhn et Johnson 2013).
  La méthode d’apprentissage implémentée est la méthode de validation croisée *repeated k-fold cross-validation* qui permet d’optimiser l’apprentissage (i.e. l’ajustement des paramètres du modèle), de contrôler le risque d’over-fitting (i.e. sur-apprentissage) et, *in fine*, de sélectionner la meilleure valeur (ou meilleure combinaison de valeurs) de paramètre(s) pour l’ajustement du modèle. Par défaut, la valeur de k a été fixée à 10 car elle constitue un bon compromis entre le temps de calcul et la minimisation du biais (i.e. différence entre les valeurs de performance estimée et réelle) (Molinaro et al. 2005, Kuhn et Johnson 2013). Enfin, le choix d’une méthode itérative (cf. *repeated*) permet de limiter l’incertitude sur l’estimation de la performance du modèle (i.e. variance), en particulier lorsque le nombre de données du jeu d’apprentissage est faible.

- **Évaluation des modèles.** Le script procède automatiquement à l’évaluation de la performance de chaque modèle ajusté à partir de l’échantillon-test. Le résultat de cette évaluation se présente sous la forme d’une matrice de confusion accompagnée de statistiques décrivant le niveau de performance : précision globale, statistique de Kappa (qui tient compte du déséquilibre éventuel entre classes), rappel (i.e.

sensibilité), précision (i.e. valeur prédictive positive), score F1 (i.e. moyenne harmonique de la précision et du rappel).

- **Comparaison de la performance des modèles.** Le programme permet de visualiser (à l'aide de boîtes à moustache) et de tester statistiquement (par le biais de tests-t appariés) la performance relative des différents modèles. L'intérêt est de pouvoir optimiser le temps de traitement du script en décidant d'appliquer, ou non, tel ou tel algorithme de classification à l'ensemble de l'image sur la base de ses performances.

- **Classification *stricto sensu*.** Le script exécute automatiquement le (ou les) modèle(s) à l'ensemble de l'image afin de produire la carte thématique. Une fois la classification achevée, le programme affiche la carte directement sous R afin que l'utilisateur puisse la visualiser et procéder à un premier examen rapide de sa qualité.

- **Exportation.** A l'issue de la classification, le programme propose l'exportation de la couche au format SHP.

o *Durées d'exécution*

Avant de s'achever, le script procède au calcul automatique des durées d'exécution de chaque étape de la chaîne et produit un tableau récapitulatif (cf. annexe 8.3) afin d'identifier les points d'amélioration du code sur le plan du temps de traitement.

5. Conclusion

5.1. Apports du stage

La synthèse bibliographique effectuée au début de la mission professionnelle constitue un socle d'informations utiles pour, le cas échéant, permettre à l'entreprise de faire évoluer ses procédures afin d'améliorer la qualité radiométrique des images lors de la phase d'acquisition, gage d'optimisation des traitements ultérieurs par les algorithmes de segmentation et de classification.

Par ailleurs, la chaîne de traitements conçue au lancement du projet a pu être développée dans son intégralité et, sous réserve de tests complémentaires (cf. ci-après 5.2), semble pleinement opérationnelle. Elle devrait permettre de réduire d'environ un facteur au moins égal à 5 le temps nécessaire à la réalisation d'une carte thématique d'habitats naturels.

Les objectifs s'avèrent donc atteints dans le temps imparti.

Enfin, sur le plan personnel, ce travail m'aura permis de monter en compétences dans des domaines variés :

- enrichissement de mes connaissances sur les sources de distorsion lors des prises de vues et sur les spécificités de leur acquisition par drone.
- initiation à la programmation sous R et à l'utilisation de librairies spécialisées (e.g. OTB, GRASS, SAGA, GDAL).
- approfondissement de notions de télédétection et de procédures de traitement d'images.
- connaissance de la communauté scientifique travaillant sur les sujets précités.
- acquisition d'une première expérience du travail en entreprise.

5.2. Principaux obstacles levés

Pour mener à bien ce projet, quelques écueils ont dû être surmontés, au premier rang desquels il nous paraît utile de mentionner :

- les difficultés d'installation de certains packages et celles liées à l'interfaçage avec OTB et GRASS du fait de la configuration de l'environnement informatique (windows 8.1).
- la capacité de calcul limitée du PC qui a conduit à limiter les tests de la chaîne de traitements et qui explique l'absence de résultats concrets à la date de rendu du rapport. Un test « grandeur nature » sur un ordinateur plus puissant est néanmoins prévu fin septembre/début octobre ; si tout fonctionne convenablement, il permettra de présenter, lors de la soutenance, la cartographie d'un site pilote générée automatiquement par le programme[1].

[1] Le test de la chaîne de traitements a bien été effectué après la remise du présent rapport. Pour ce faire, l'entreprise LittoMatique a mis à ma disposition un ordinateur équipé d'un processeur cadencé à 3,6 GHz, d'une mémoire vive de 32 Go (RAM) et d'une carte graphique dotée d'une mémoire de 8 Go. Les marais salés de l'Abbaye de Beauport (Paimpol, Département 22) ont été retenus comme site pilote. Les diapositives qui ont servi de support pour la présentation des résultats lors de la soutenance du 20 octobre 2020 sont consultables en annexe 8.4, pages 44 et 45.

- les conflits entre certains packages qui ont imposé le chargement, sous condition, des librairies impliquées.
- les divergences d'interprétation de la topologie entre logiciels (notamment, entre R et SAGA) qui ont nécessité l'implémentation de patchs correctifs avant l'utilisation de la couche vectorielle par tel ou tel logiciel.

5.3. Pistes d'amélioration

L'objectif imparti dans le cadre du stage a abouti à la conception et la mise au point d'un produit qui ne demande, bien entendu, qu'à être complété et enrichi sur plusieurs plans :

- *Robustesse/fiabilité*

  La chaîne de traitements fait appel à plusieurs formats d'objet « images ». Il conviendrait d'adapter le script pour que seul le format *stars* soit utilisé, les formats *stack* et *brick* risquant de ne plus être mis à jour dans quelques années.

- *Ajouts de fonctions*

  - Implémenter un algorithme génétique permettant d'optimiser le paramétrage de l'algorithme de segmentation de Baatz-Schäpe (Costa et al. 2008, Nikfar et al. 2012). A cet égard, le package *SegOptim* récemment développé par Gonçalves et al. (2019) pourrait constituer une première solution et permettre d'abandonner l'approche par « essais-erreurs » peu satisfaisante, car subjective pour le choix des paramètres et pénalisante en temps de traitement.
  - Permettre à l'utilisateur d'effectuer les calculs d'indices de texture pour différents paramètres de voisinage afin de pouvoir tenir compte dans les traitements, le cas échéant, de textures différentes qui se manifestent à des échelles distinctes au sein de l'image (Wegmann et al. 2016).
  - Proposer l'exportation des couches au format GPKG en complément du format SHP.
  - Améliorer l'apprentissage des modèles en remplaçant la méthode *repeated k-fold cross validation* par la méthode *repeated stratified k-fold cross validation*

afin de mieux prendre en compte le déséquilibre éventuel entre les classes (Kuhn et Johnson 2013).

- Ajouter une méthode d'élimination de variables du type *Recursive Feature Elimination* pour réduire le temps de calcul des algorithmes de classification.
- Ajouter la production de « cartes d'incertitudes » basées sur l'entropie (Wegmann et al. 2016) pour apporter au lecteur une information sur la fiabilité des cartes thématiques produites.

- *Interactivité*
  - Améliorer la présentation du fichier "log" (i.e. journal des événements).
  - Augmenter l'interactivité du programme par le biais de questions soumises à l'utilisateur.
  - Réaliser une interface graphique à l'aide de R shiny pour passer du script "brut" à une véritable application qui faciliterait l'utilisation du programme et éviterait d'altérer le code par inadvertance.

6. REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde reconnaissance à Madame Isabelle DELACOURTE qui m'a accordé toute sa confiance en m'offrant l'opportunité d'effectuer ce stage très enrichissant au sein de son entreprise. J'ai particulièrement apprécié sa grande disponibilité, son écoute attentive et bienveillante et ses remarques toujours constructives dont j'ai pu bénéficier tout au long de ce travail.

Je remercie Monsieur Éric LARMANOU de son implication dans son rôle de tuteur pédagogique et de son extrême obligeance à mon égard.

Je tiens, enfin, à adresser mes remerciements à l'ensemble des chercheurs de la MTD, notamment Raffaele GAETANO, Samuel ALLEAUME et Alain CLOPES, …ou d'ailleurs ! (cf. p. 10) qui ont bien voulu prendre de leur temps pour répondre à mes (nombreuses !) sollicitations. Sans eux, ce projet n'aurait probablement pas pu être mené à bien.

7. BIBLIOGRAPHIE

AASEN, H., HONKAVAARA, E., LUCIEER, A. & ZARCO-TEJADA, P. J. 2018. Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: a review of sensor technology, measurement procedures and data correction workflows. *Remote Sensing,* 10**,** 1091.

BAATZ, M. & SCHÄPE, A. 2000. Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *In:* STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESBNER, G. (eds.) *Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung.* Karlsruhe: Wichmann Verlag.

BAUGH, W. M. & GROENEVELD, D. P. 2008. Empirical proof of the empirical line. *International Journal of Remote Sensing,* 29**,** 665-672.

BERK, A., ANDERSON, G. P., ACHARYA, P. K., BERNSTEIN, L. S., MURATOV, L., LEE, J. A., FOX, M. G., ADLER-GOLDEN, S. M., CHETWYND, J. H., HOKE, M. L., LOCKWOOD, R. B., GARDNER, J. A., COOLEY, T. W., BOREL, C. C. & LEWIS, P. E. 2005. MODTRAN™ 5, a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering option: update. *In:* SHEN, S. S. & LEWIS, P. E. (eds.) *Defense and Security.* Orlando, Florida: SPIE.

BERRA, E. F., GAULTON, R. & BARR, S. 2017. Commercial 'off the shelf' digital cameras on unmanned aerial vehicles for multitemporal monitoring of vegetation reflectance and NDVI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 55**,** 4878-4886.

BERRA, E. F., GIBSON-POOLE, S., MACARTHUR, A., GAULTON, R. & HAMILTON, A. 2015. Estimation of the spectral sensitivity functions of un-modified and modified commercial off-the-shelf digital cameras to enable their use as a multispectral imaging system for UAVs. *International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics.* Toronto, Canada.

BLASCHKE, T., LANG, S. & HAY, G. J. 2008. *Object-based image analysis - Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications,* Berlin, Springer.

BONY, S. 2000. *La compression de données - Le format JPEG* [Online]. Marne-la-Vallée: Université de Marne-la-Vallée. Available: http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/La_compression_de_donnees/jpeg.html [Accessed 20/04/2020].

BRUNSDON, C. & COMBER, L. 2019. *An introduction to R for spatial analysis and mapping - 2nd Edition,* Glasgow, U.K., SAGE Publications Ltd.

BUIL, C. 2005. *Liste des commandes Iris v 5.10* [Online]. Available: http://www.astrosurf.com/buil/iris-software.html [Accessed 27/04/2020].

BURKART, A., AASEN, H., ALONSO, L., MENZ, G., BARETH, G. & RASCHER, U. 2015. Angular dependency of hyperspectral measurements over wheat characterized by a novel UAV based goniometer. *Remote Sensing,* 7**,** 725-746.

BURKART, A., COGLIATI, S., SCHICKLING, A. & RASCHER, U. 2014. A novel UAV-based ultra-light weight spectrometer for field spectroscopy. *IEEE Sensors Journal,* 14**,** 62-67.

BURKHART, J. F., KYLLING, A., SCHAAF, C. B., WANG, Z., BOGREN, W., STORVOLD, R., SOLBO, S., PEDERSEN, C. A. & GERLAND, S. 2017. Unmanned aerial system nadir reflectance and modis nadir BRDF-aadjusted surface reflectances intercompared over Greenland. *The Cryosphere,* 11**,** 1575-1589.

CHANDELIER, L. & MARTINOTY, G. 2009. A radiometric aerial triangulation for the equalization of digital aerial images and orthoimages. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 75**,** 193-200.

CIVCO, D. L. 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 55**,** 1303-1309.

COFFIN, D. C. 2018. *DCRaw program v. 9.28* [Online]. Available: https://www.dechifro.org/dcraw/ [Accessed 27/04/2020].

COSTA, G. A. O. P., FEITOSA, R. Q., CAZES, T. B. & FEIJO, B. 2008. Genetic adaptation of segmentation parameters. *In:* BLASCHKE, T., LANG, S. & HAY, G. J. (eds.) *Object-based image analysis - Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications.* Berlin: Springer.

DEL POZO, S., RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P., HERNANDEZ-LOPEZ, D. & FELIPE-GARCIA, B. 2014. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. *Remote Sensing,* 6**,** 1918-1937.

DÉLIOT, P., DUFFAUT, J. & LACAN, A. 2006. Characterization and calibration of a high-resolution multi-spectral airborne digital camera. *In:* JIANG, J., NOSACH, O. Y. & WANG, J. (eds.) *ICO20: Remote Sensing and Infrared Devices and Systems.* Changcun, China.

EDMUNDOPTICS. 2020. *Mires de balances des blancs et de réflectance diffuse Spectralon*[R] [Online]. Available: https://www.edmundoptics.fr/f/white-balance-reflectance-targets/13169/ [Accessed 15/04/2020].

FAHNESTOCK, J. D. & SCHOWENGERDT, R. A. 1983. Spatially variant contrast enhancement using local range modification. *Optical Engineering,* 22**,** 378-381.

FALALA, L., GACHET, R. & CUNIN, L. 2008. Radiometric block-adjustment of satellite images reference3D production line improvement. *In:* JUN, C., JIE, J. & NAYAK, S. (eds.) *XXIst ISPRS Congress.* Beijing, China: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

FRANKLIN, S. E. & GILES, P. T. 1995. Radiometric processing of aerial and satellite remote-sensing imagery. *Computers and Geosciences,* 21**,** 413-423.

GEHRKE, R. & GREIWE, A. RGBI images with UAV and off-the-shelf compact cameras - an investigation of linear sensor characteristics. *In:* ZAGAJEWSKI, B. & REUTER, R., eds. 34th EARSel Symposium, 2014 Warsaw, Poland. European Association of Remote Sensing Laboratories, 53-58.

GEHRKE, S. & BESHAH, B. T. 2016. Radiometric normalization of large airborne image data sets acquired by different sensor types. *In:* HALOUNOVA, L., ŠAFÁŘ, V., JIANG, J., OLEŠOVSKÁ, H., DVOŘÁČEK, P., HOLLAND, D., SEREDOVICH, V. A., MULLER, J.-P., PATTABHI RAMA RAO, E., VEENENDAAL, B., MU, L., ZLATANOVA, S., OBERST, J., YANG, C. P., BAN, Y., STYLIANIDIS, S., VOŽENÍLEK, V., VONDRÁKOVÁ, A., GARTNER, G., REMONDINO, F., DOYTSHER, Y., PERCIVALL, G., SCHREIER, G., DOWMAN, I., STREILEIN, A. & ERNST, J. (eds.) *XXIII ISPRS Congress, Commission IV.* Prague, Czech Republic: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

GILBLOM, D. L., YOO, S. K. & VENTURA, P. 2003. Operation and performance of a color image sensor with layered photodiodes. *In:* ANDRESEN, B. F. & FULOP, G. F. (eds.) *AeroSense 2003.* Orlando, Florida, U.S.A.: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.

GOLDMAN, D. B. 2010. Vignette and exposure calibration and compensation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 32**,** 2276-2288.

GOLDMAN, D. B. & CHEN, J. H. 2005. Vignette and exposure calibration and compensation. *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05).* Beijing, China: IEEE Computer Society.

GONÇALVES, J., PÔÇAS, I., MARCOS, B., MÜCHER, C. A. & HONRADO, J. P. 2019. *SegOptim* - A new R package for optimizing object-based image analyses of high-spatial resolution remotely-sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 76**,** 218-230.

GUEYMARD, C. 1995. SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine - algorithms and performance assessment. Cocoa, Florida: Florida Solar Energy Center/University of Central Florida.

HAKALA, T., HONKAVAARA, E., SAARI, H., MÄKYNEN, J., KAIVOSOJA, J., PESONEN, L. & PÖLÖNEN, I. 2013. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Rostock, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

HAKALA, T., MARKELIN, L., HONKAVAARA, E., SCOTT, B., THEOCHAROUS, T., NEVALAINEN, O., NÄSI, R., SUOMALAINEN, J., VILJANEN, N., GREENWELL, C. & FOX, N. 2018. Direct reflectance measurements from drones-sensor absolute radiometric calibration and system tests for forest reflectance characterization. *Sensors,* 18**,** 1417.

HAKALA, T., SUOMALAINEN, J. & PELTONIEMI, J. I. 2010. Acquisition of bidirectional reflectance factor dataset using a micro unmanned aerial vehicle and a consumer camera. *Remote Sensing,* 2**,** 819-832.

HERNANDEZ-LOPEZ, D., GARCIA, B. F., PIQUERAS, J. G. & ALCAZAR, G. V. 2011. An approach to the radiometric aerotriangulation of photogrammetric images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 66**,** 883-893.

HERRERO-HUERTA, M., HERNANDEZ-LOPEZ, D., RODRIGUEZ-GONZALVEZ, P., GONZALEZ-AGUILERA, D. & GONZALES-PIQUERAS, J. 2014. Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture,* 108**,** 28-38.

HISCOCKS, P. D. 2014. Measuring luminance with a digital camera. Canada: Syscomp Electronic Design Limited.

HOLBEN, B. N. 1981. An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing,* 2**,** 115-133.

HOLBEN, B. N. & JUSTICE, C. O. 1980. The topographic effect on spectral response from nadir pointing sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 46**,** 1191-1200.

HOLMAN, F. H., RICHE, A. B., CASTLE, M., WOOSTER, M. J. & HAWKESFORD, M. J. 2019. Radiometric calibration of 'commercial off the shelf' cameras for UAV-based high-resolution temporal crop phenotyping of reflectance and NDVI. *Remote Sensing,* 11**,** 1657.

HONKAVAARA, E., ARBIOL, R., MARKELIN, L., MARTINEZ, L., CRAMER, M., BOVET, S., CHANDELIER, L., ILVES, R., KLONUS, S., MARSHAL, P., SCHLÄPFER, D., TABOR, M., THOM, C. & VEJE, N. 2009. Digital airborne photogrammetry - A new tool for quantitative remote sensing? - A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. *Remote Sensing,* 1**,** 577-605.

HONKAVAARA, E., HAKALA, T., MARKELIN, L., ROSNELL, T., SAARI, H. & MÄKINEN, J. 2012. A process for radiometric correction of UAV image blocks. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation,* 2**,** 115-127.

HONKAVAARA, E. & KHORAMSHAHI, E. 2018. Radiometric correction of close-range spectral image blocks captured using an UAV with a radiometric block adjustment. *Remote Sensing,* 10**,** 256.

HONKAVAARA, E., MARKELIN, L., ARBIOL, R. & MARTINEZ, L. 2013. Radiometric aspects of digital photogrammetric images. *European Spatial Data Research (EuroSDR).* Amsterdam, The Netherlands: Remote Sensing and Photogrammetry – Finnish Geodetic Institute, Masala & Institut Cartogràfic de Catalunya, Catalonia.

HUANG, W. 2015. Parameters optimization of region-growing segmentation based on differential evolution algorithm. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015).* Zhengzhou, Henan, China: Atlantis Press.

JAKOB, S., ZIMMERMANN, R. & GLOAGUEN, R. 2017. The need for accurate geometric and radiometric corrections of drone-borne hyperspectral data for mineral exploration: MEPHySTo- a toolbox for pre-processing drone-borne hyperspectral data. *Remote Sensing,* 9**,** 88.

KELCEY, J. & LUCIEER, A. 2012. Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *Remote Sensing,* 4**,** 1462-1493.

KORDECKI, A., PALUS, H. & BAL, A. 2016. Practical vignetting correction method for digital camera with measurement of surface luminance distribution. *Signal, Image and Video Processing,* 10**,** 1417-1424.

KUHN, M. & JOHNSON, K. 2013. *Applied Predictive Modeling,* New-York, Springer.

LABBÉ, S., ROUX, B., BÉGUÉ, A., LEBOURGEOIS, V. & MALLAVAN, B. An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras-characterization and acquisition guidelines. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Workshop, 2007 Newcastle, United-Kingdom. TS10:1-TS10:6.

LALIBERTE, A. S., GOFORTH, M. A., STEELE, C. M. & RANGO, A. 2011. Multispectral remote sensing from unmanned aircraft-image processing workflows and applications for rangeland environments. *Remote Sensing,* 3**,** 2529-2551.

LASSALLE, P. 2015. *Étude du passage à l'échelle des algorithmes de segmentation et de classification en télédétection pour le traitement de volumes massifs de données.* Ph.D. Thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III.

LEBOURGEOIS, V., BÉGUÉ, A., LABBÉ, S., MALLAVAN, B., PRÉVOT, L. & ROUX, B. 2008. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. *Sensors,* 8**,** 7300-7322.

LELONG, C. C. D., BURGER, P., JUBELIN, G., ROUX, B., LABBÉ, S. & BARET, F. 2008. Assessment of unmanned aerial vehicle imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors,* 8**,** 3557-3585.

LI, W., SUN, K., LI, D. & BAI, T. 2016. Algorithm for automatic image dodging of unmanned aerial vehicle images using two-dimensional radiometric spatial attributes. *Journal of Applied Remote Sensing,* 10**,** 036023.

LI, Z. J., ZHANG, Z. X. & ZHANG, J. Q. 2004. Dodging in photogrammetry and remote sensing. *XIX ISPRS Congress.* Istanbul, Turkey: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

LIU, J., WANG, X., CHEN, M., LIU, S., SHAO, Z., ZHOU, X. & LIU, P. 2014. Illumination and contrast balancing for remote sensing images. *Remote Sensing,* 6**,** 1102-1123.

LOPEZ-FUENTES, L., OLIVER, G. & MASSANET, S. 2015. Revisiting image vignetting correction by constrained minimization of log-intensity entropy. *In:* ROJAS, I., JOYA, G. & CATALA, A. (eds.) *International Work-Conference on Artificial Neural Networks 2015 : Advances in Computational Intelligence.* Palma de Mallorca, Spain: Springer International Publishing.

LUKAS, J., FRIDRICH, J. & GOLJAN, M. 2006. Digital camera identification from sensor pattern noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security,* 1**,** 205-214.

MAIA. 2020. *Les capteurs MAIA S2 et ILS* [Online]. SAL Engineering. Available: https://www.spectralcam.com/ils-irradiant-light-sensor/ [Accessed 25/04/2020].

MALVERN_PANALYTICAL. 2020. *ASD FieldSpec^{R} 4* [Online]. Malvern, Worcestershire, United Kigndom: Malvern PAnalytical. Available: https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range [Accessed 15/04/2020].

MANFREDA, S., MCCABE, M. F., MILLER, P. E., LUCAS, R., MADRIGAL, V. P. M., MALLINIS, G., DOR, E. B., HELMAN, D., ESTES, L., CIRAOLO, G., MÜLLEROVA, J., TAURO, F., DE LIMA, M. I., DE LIMA, J. L. M. P., MALTESE, A., FRANCES, F., CAYLOR, K., KOHV, M., PERKS, M., RUIZ-PÉREZ, G., SU, Z., VICO, G. & TOTH, B. 2018. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote Sensing,* 10**,** 641.

MATHEWS, A. J. 2015. A practical UAV remote sensing methodology to generate multispectral orthophotos for vineyards: estimation of spectral reflectance using compact digital cameras. *International Journal of Applied Geospatial Research,* 6**,** 65-87.

MATSUSHITA, B., YANG, W., CHEN, J. H., ONDA, Y. & QIU, G. 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index and NDVI to topographic effects-a case study in high-density cypress forest. *Sensors,* 7**,** 2636-2651.

MEINEL, G. & NEUBERT, M. 2004. A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,* 35**,** 1097-1105.

MICASENSE. 2020. *Les capteurs RedEdge-MX et DLS2* [Online]. MicaSense, Inc. Available: https://micasense.com/rededge-mx/?utm_term=micasense%20rededge&utm_campaign=English+Ads&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=9637016913&hsa_cam=9860513963&hsa_grp=104198666150&hsa_ad=431319795569&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-306152389412&hsa_kw=micasense%20rededge&hsa_mt=b&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=EAIaIQobChMIo83jvuCn6QIVmLp3Ch2zxAUXEAAYAiAAEgKl8vD_BwE [Accessed 25/04/2020].

MINNAERT, M. 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal,* 93**,** 403-410.

MIURA, T. & HUETE, A. R. 2009. Performance of three reflectance calibration methods for airborne hyperspectral spectrometer data. *Sensors,* 9**,** 794-813.

MIYOSHI, G. T., IMAI, N. N., TOMMASELLI, A. M. G., HONKAVAARA, E., NÄSI, R. & MORIYA, E. A. S. 2018. Radiometric block adjustment of hyperspectral image blocks in the Brazilian environment. *International Journal of Remote Sensing,* 39**,** 4910-4930.

MOLINARO, A. M., SIMON, R. & PFEIFFER, R. M. 2005. Prediction error estimation: a comparison of resampling methods. *Bioinformatics,* 21**,** 3301-3307.

NEVALAINEN, O., HONKAVAARA, E., TUOMINEN, S., VILJANEN, N., HAKALA, T., YU, X., HYYPPÄ, J., SAARI, H., PÖLÖNEN, I., IMAI, N. N. & TOMMASELLI, A. M. G. 2017. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote Sensing,* 9**,** 185.

NIKFAR, M., ZOEJ, M. J. V., MOHAMMADZADEH, A., MOKHTARZADE, M. & NAVABI, A. 2012. Optimization of multiresolution segmentation by using a genetic algorithm. *Journal of Applied Remote Sensing,* 6**,** 063592.

NOBREGA, R. A. & QUINTANILHA, J. A. 2004. Comparative analysis of automatic digital image balancing and standard histogram enhancement techniques in remote sensing imagery. *Revista Brasileira de Cartografia,* 56**,** 55-64.

PARROT. 2020. *Le capteur Sequoia+* [Online]. Parrot Drone SAS. Available: https://www.parrot.com/solutions-business/parrot-professional/parrot-sequoia [Accessed 25/04/2020].

PRÉ, A. 2014. *Tutoriel : la dérawtisation - Les logiciels de dérawtisation (ou dématriçage)* [Online]. Available: http://alainpre.free.fr/tutoriels/photo-general/derawtisation/derawtisation-50.php [Accessed 24/04/2020].

PROS, A., COLOMINA, I., NAVARRO, J. A., ANTEQUERA, R. & ANDRINAL, P. 2013. Radiometric block adjustment and digital radiometric model generation. *ISPRS Hannover Workshop 2013.* Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

PUECH, M. & BESSOU, G. 2010. *Image numérique - Données scientifiques - Identifier le signal du bruit* [Online]. Lille: Université des Sciences en Ligne & Observatoire de Paris. Available: https://media4.obspm.fr/ECU/pages_traitement-donnees/offset.html [Accessed 20/04/2020].

RABATEL, G., GORRETTA, N. & LABBÉ, S. 2014. Getting simultaneous red and near-infrared band datra from a single digital camera for plant monitoring applications-theoretical and proactical study. *Biosystems engineering,* 117**,** 2-14.

RASMUSSEN, J. 2016. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy,* 74**,** 75-92.

RIANO, D., CHUVIECO, E., SALAS, J. & AGUADO, I. 2003. Assessment of different topographic corrections in landsat-TM data for mapping vegetation types (2003) *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 41**,** 1056-1061.

RICHTER, R., KELLENBERGER, T. & KAUFMANN, H. 2009. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing,* 1**,** 184-196.

ROOSJEN, P. P. J., SUOMALAINEN, J., BARTHOLOMEUS, H. M., KOOISTRA, L. & CLEVERS, J. G. P. W. 2017. Mapping reflectance anisotropy of a potato canopy using aerial images acquired with an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing,* 9**,** 417.

ROUÉ, D. 2016. *Le capteur Foveon, cet ovni méconnu de la photographie numérique* [Online]. Phototrend. Available: https://phototrend.fr/2016/02/capteurs-foveon-ovni-photo/ [Accessed 24/04/2020].

SANDMEIER, S. R. & ITTEN, K. I. 1999. A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 37**,** 978-986.

SCHIEWE, J. 2002. Segmentation of high-resolution remotely sensed data - concepts, applications and problems. *In:* ARMENAKIS, C. & LEE, Y. C. (eds.) *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications.* Ottawa, Canada: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

SCHLÄPFER, D., RICHTER, R. & FEINGERSH, T. 2015. Operational BRDF effects correction for wide-field-of-view optical scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 53**,** 1855-1864.

SHEN, X., LI, Q., TIAN, Y. & SHEN, L. 2015. An uneven illumination correction algorithm for optical remote sensing images covered with thin clouds. *Remote Sensing,* 7**,** 11848-11862.

SHEPHERD, J. D. & DYMOND, J. R. 2003. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illuminatino with topography. *International Journal of Remote Sensing,* 24**,** 3503-3514.

SINGH, K. K. & FRAZIER, A. E. 2018. A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing,* 39**,** 5078-5098.

SMITH, G. M. & MILTON, E. J. 1999. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing,* 20**,** 2653-2662.

STOW, D., NICHOL, C. J., WADE, T., ASSMANN, J. J., SIMPSON, G. & HELFTER, C. 2019. Illumination geometry and flying height influence surface reflectance and NDVI derived from multispectral UAS imagery. *Drones,* 3**,** 55.

SUOMALAINEN, J., HAKALA, T., ALVES DE OLIVEIRA, R., MARKELIN, L., VILJANEN, N., NÄSI, R. & HONKAVAARA, E. 2018. A novel tilt correction technique for irradiance sensors and spectrometers on-board unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing,* 10**,** 2068.

SUSAKI, J., HARA, K., KAJIWARA, K. & HONDA, Y. 2004. Robust estimation of BRDF model parameters. *Remote Sensing of Environment,* 89**,** 63-71.

TEILLET, P. M. 1986. Image correction for radiometric effects in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing,* 7**,** 1637-1651.

TEILLET, P. M., GUINDON, B. & GOODENOUGH, D. G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing,* 8**,** 84-106.

VERHOEVEN, G. J. 2010. It's all about the format - unleashing the power of RAW aerial photography. *International Journal of Remote Sensing,* 31**,** 2009-2042.

VERHOEVEN, G. J., SMET, P. F., POELMAN, D. & VERMEULEN, F. 2009. Spectral characterization of a digital still camera's NIR modification to enhance archaeological observation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 47**,** 3456-3468.

VON BUEREN, S. K., BURKART, A., HUENI, A., RASCHER, U., TUOHY, M. P. & YULE, I. J. 2015. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. *Biogeosciences,* 12**,** 163-175.

WANG, C. & MYINT, S. W. 2015. A simplified empirical line method of radiometric calibration for small unmanned aircraft system-based remote sensing. *EEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,* 8**,** 1876-1885.

WEGMANN, M., LEUTNER, B. & DECH, S. 2016. *Remote sensing and GIS for ecologists using open source software,* Exeter, U.K., Pelagic Publishing.

WEI, C., QINGJIU, T. & LIMING, W. 2008. A model of topographic correction and reflectance retrieval for optical satellite data in forested areas. *In:* JUN, C. (ed.) *ISPRS 2008 - Silk Road for Information from Imagery.* Beijing 2008: Internation Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

WEYERMANN, J., DAMM, A., KNEUBÜHLER, M. & SCHAEPMAN, M. E. 2014. Correction of reflectance anisotropy effects of vegetation on airborne spectroscopy data and derived products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 52**,** 616-627.

WIDENHORN, R., DUNLAP, J. C. & BODEGOM, E. 2010. Exposure time dependence of dark current in CCD imagers. *IEEE Transactions on Electron Devices,* 57**,** 581-587.

WÜLLER, D. & GABELE, H. 2007. The usage of digital cameras as luminance meters. *In:* (SPIE), S. O. P.-O. I. E. (ed.) *Electronic Imaging.* San Jose, CA, United States.

YAO, H., QIN, R. & CHEN, X. 2019. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications - A review. *Remote Sensing,* 11**,** 1443.

YU, W. 2004. Practical anti-vignetting methods for digital cameras. *IEEE Transactions on Consumer Electronics,* 50**,** 975-983.

YU, X., LIU, Q., LIU, X., LIU, X. & WANG, Y. 2017. A physical-based atmospheric correction algorithm of unmanned aerial vehicles images and its utility analysis. *International Journal of Remote Sensing,* 38**,** 3101-3112.

ZARCO-TEJADA, P. J., GONZALEZ-DUGO, V. & BERNI, J. A. J. 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment,* 117**,** 322-337.

ZHENG, Y., LIN, S. & KANG, S. B. 2009. Single-image vignetting correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 31**,** 2243 - 2256.

8. ANNEXES

8.1. PLANCHES D'ILLUSTRATIONS DU TABLEAU 1

- **Vignettage**

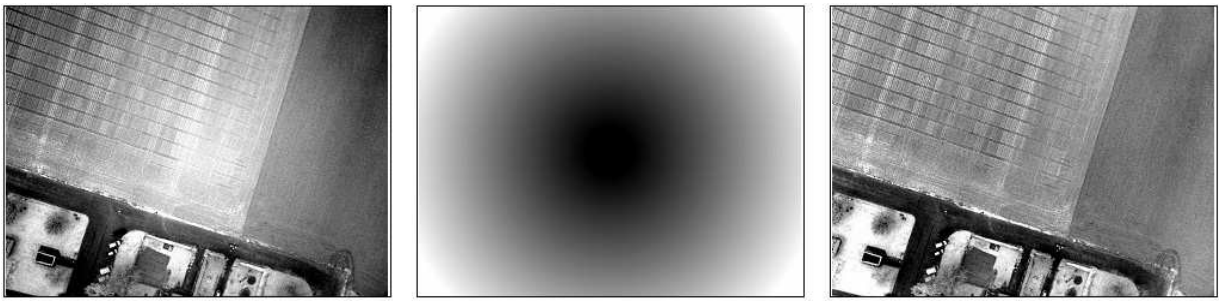


Figure A1. Correction du vignettage selon la méthode 2 (cf. Tableau 1) : image originale (gauche), filtre anti-vignettage (milieu) et image corrigée (droite) (Lelong et al. 2008).

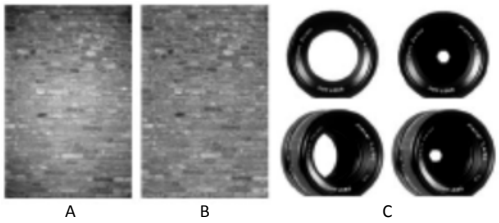


Figure A2. Correction du vignettage selon la méthode 3 (cf. Tableau 1) : A – Image d'un mur à focale 1.4 ; B – Le même mur à focale 5.6, montrant que le vignettage optique diminue avec la taille de l'ouverture ; C – La forme de la pupille d'entrée varie à la fois en fonction de l'ouverture et de l'angle de vue (Photo Paul van Walree, Goldman 2010).

- **Images de champ plat (flat field)**

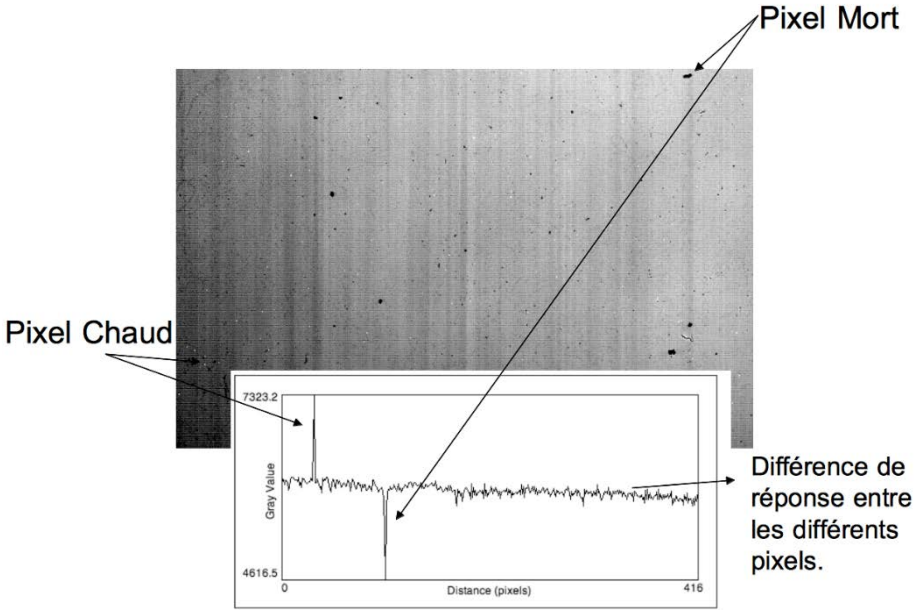
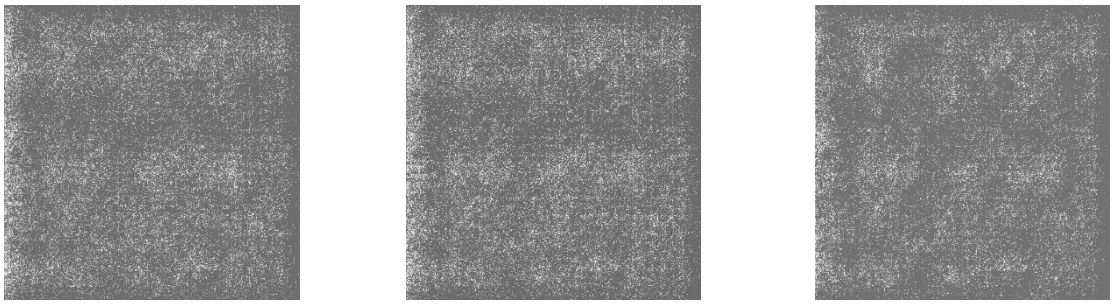


Figure A3. Image de champ plat mettant en évidence la sensibilité différente des pixels d'un capteur CCD (prises de vues effectuées à l'aide d'une sphère d'intégration (Puech et Bessou 2010).



R V B

Figure A4. Non-Uniformité de la Photo-Réponse (PRNU) du Nikon D5 pour chaque canal RVB (https://blog.kasson.com/the-last-word/nikon-d5-prnu/).

- ## Images de courant d'obscurité (dark current)

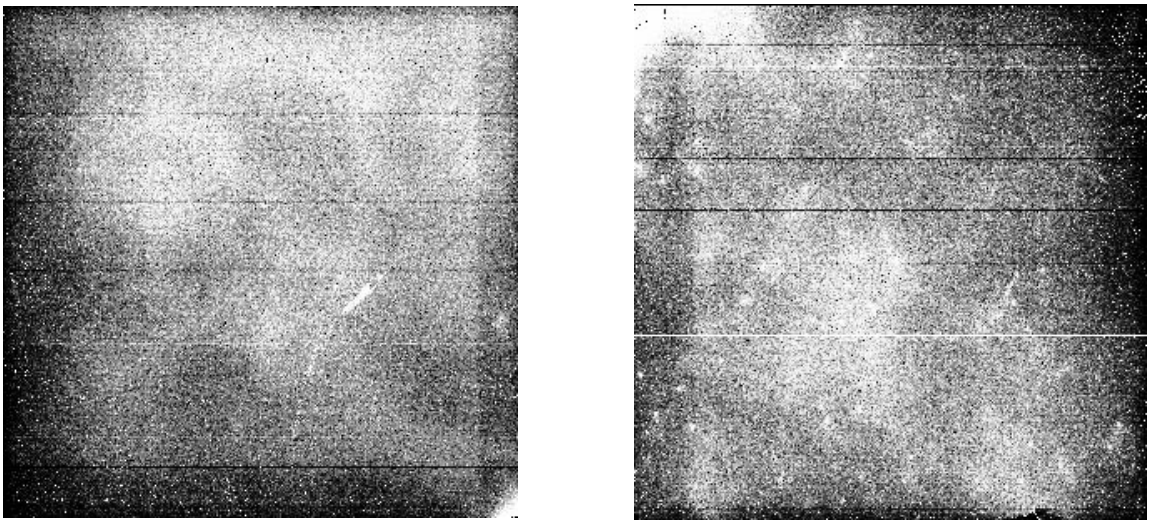


Figure A5. Exemples d'images de courant d'obscurité ou « dark current » (i.e. prises de vues effectuées dans l'obscurité totale) (Puech et Bessou 2010).

- ## Effet du rapport Signal/Bruit

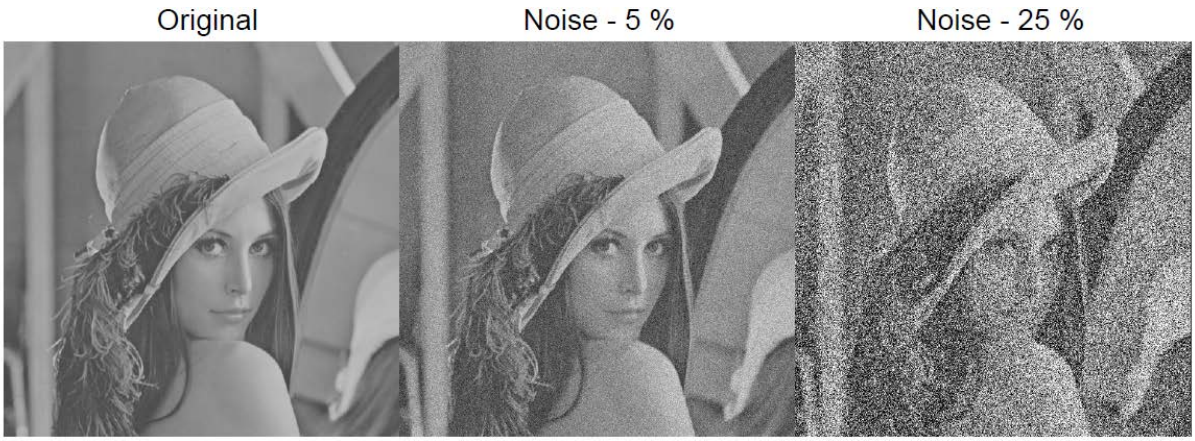
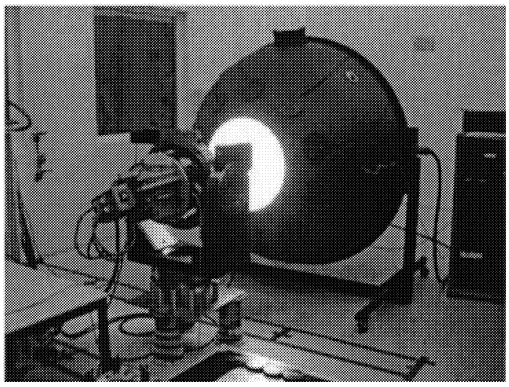
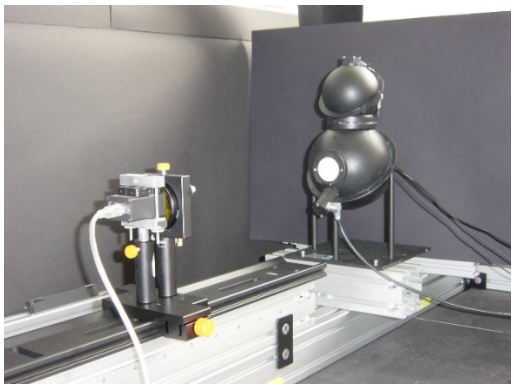


Figure A6. Illustration des effets de l'augmentation de la proportion de bruit dans les images : image originale, 5% de bruit, 25% de bruit (Kelcey et Lucieer 2012).

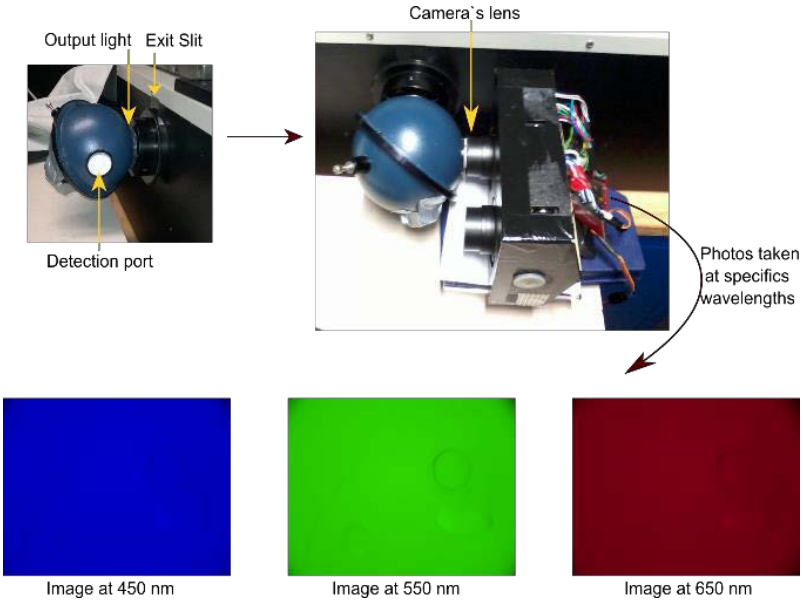
- **Quelques sphères d'intégration**



(CNES/ASTRIUM in Déliot et al. 2006)



(Dierks 2004)



Berra et al. (2015)

Figure A7. Quelques sphères intégrantes utilisées avec un monochromateur pour calibrer les capteurs et mesurer leur réponse spectrale. La lumière monochromatique émise par le monochromateur est réfléchie à l'intérieur de la sphère intégrante puis est mesurée par le capteur.

- **Caractérisation du capteur : sensibilité spectrale**

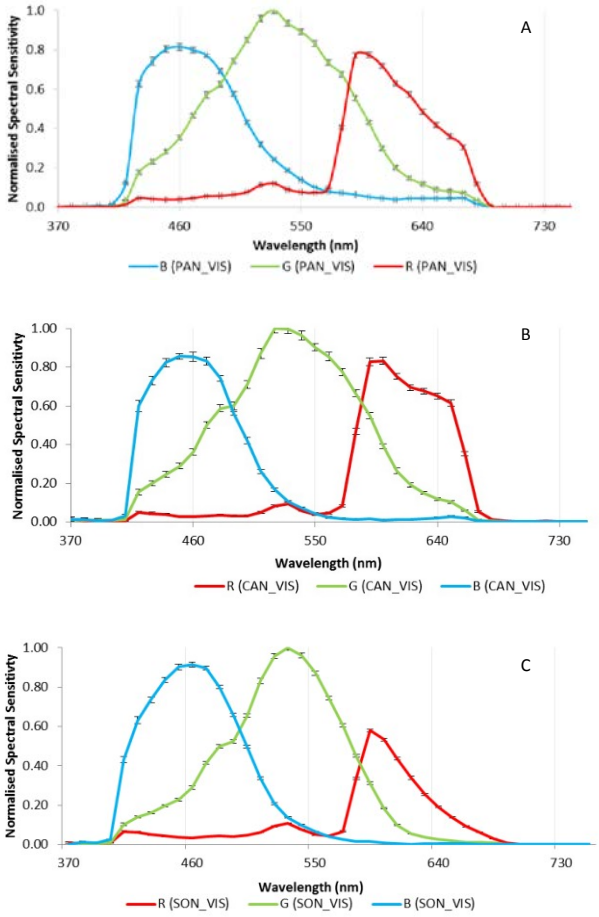


Figure A8. Réponses spectrales de trois appareils photographiques grand-public non modifiés : A. Panasonic DMCLX5, B. Canon A2200, C. Sony Nex7. Les réponses ont été normalisées par rapport au pic de sensibilité maximale obtenu dans le canal vert (Berra et al. 2015).

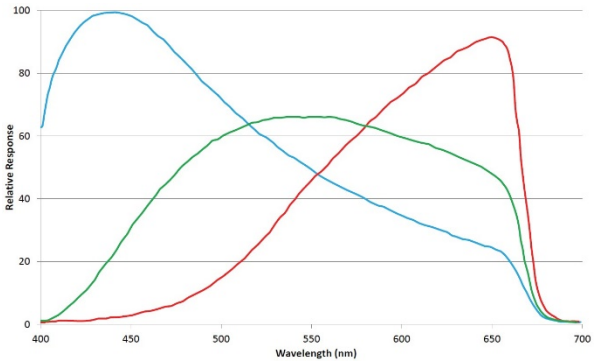


Figure A9. Réponse spectrale des canaux RVB du capteur FOVEON. La réponse a été normalisée par rapport au pic de sensibilité maximale obtenu dans le canal bleu (Gehrke and Greiwe 2014).

- **Effet des logiciels propriétaires sur les comptes numériques de l'image**

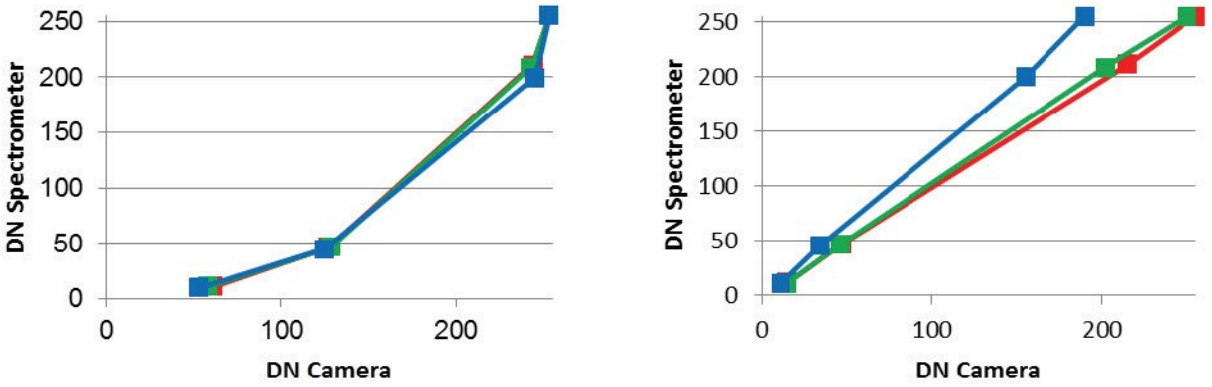


Figure A10. Comparaison de la relation entre les comptes numériques de l'appareil photo numérique (ici, Sigma DP2) et ceux du spectromètre lors de mesures effectuées sur quatre cibles de calibration radiométrique (noir, grise, blanche + Spectralon® 99%) : à gauche, les données brutes (.RAW) de l'appareil photo ont été traitées avec le logiciel propriétaire Sigma PhotoPro, à droite avec le logiciel DCraw. La courbe générée par le logiciel Sigma PhotoPro montre clairement l'effet des corrections photographiques (notamment, la correction Gamma), tandis que DCraw préserve le caractère linéaire des photodiodes du capteur (Gehrke and Greiwe 2014).

- **Exemples de correction des effets d'anisotropie de la couverture au sol**

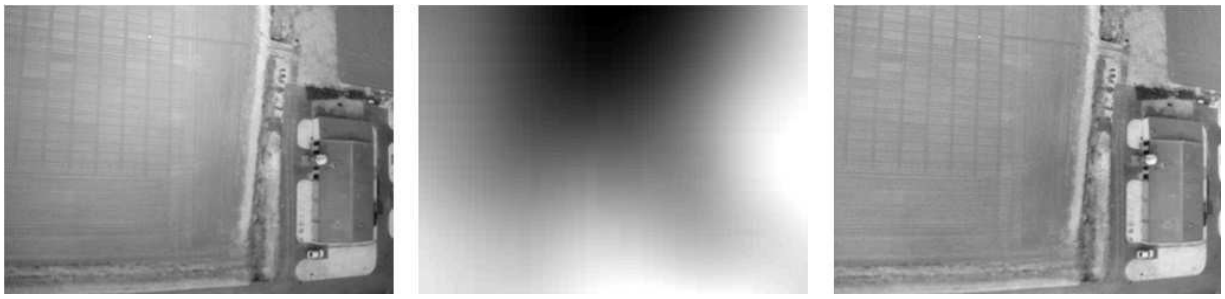


Figure A11. Lissage des effets bidirectionnels par la méthode LRM (cf. Tableau 1) : image d'origine (à gauche), filtre de lissage (au centre) et image corrigée (à droite) (Lelong et al. 2008).

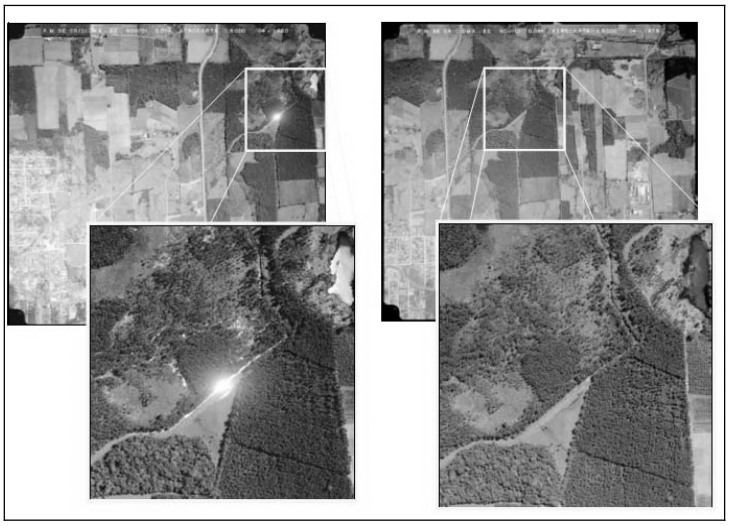


Figure A12. Efficacité de la méthode LRM pour « lisser » les hot spots : image d'origine (à gauche) et image corrigée (à droite) (Nobrega et Quintanilha 2004).

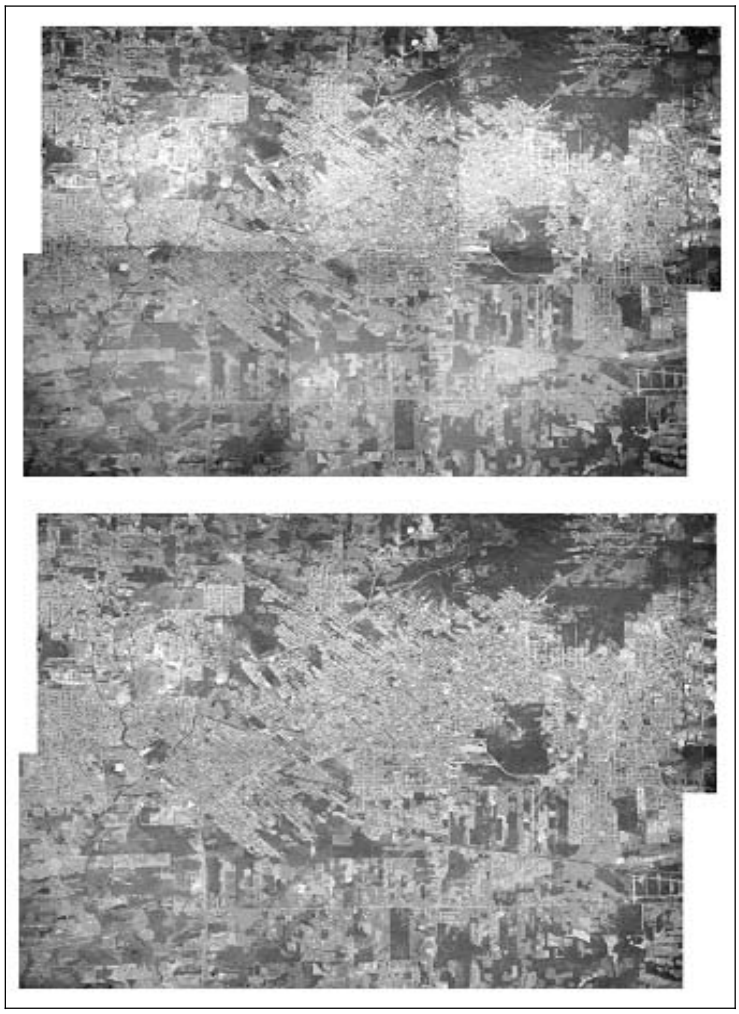
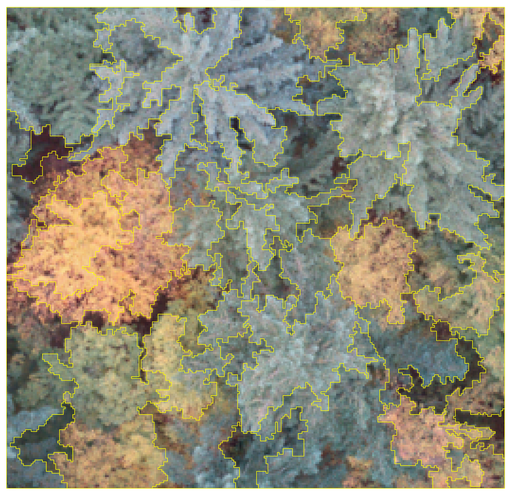


Figure A13. Exemple de mosaïques d'images non-équilibrées (en haut) et équilibrées par la méthode LRM (en bas) (Nobrega et Quintanilha 2004).

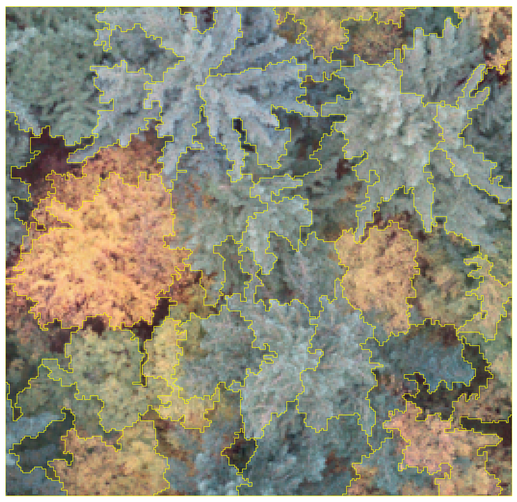
8.2. Segmentations en série

Cf. pages ci-après, 40 à 42.

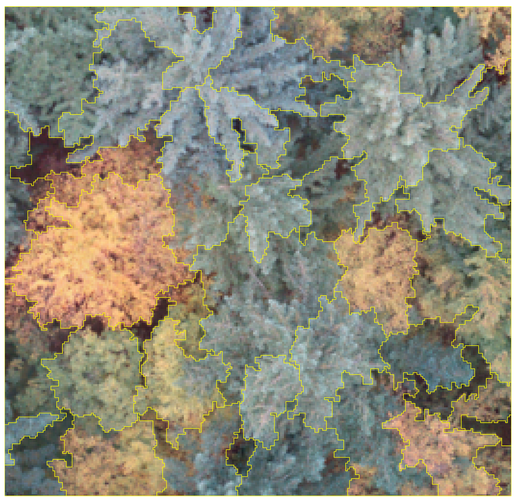
50_0.1_0.1



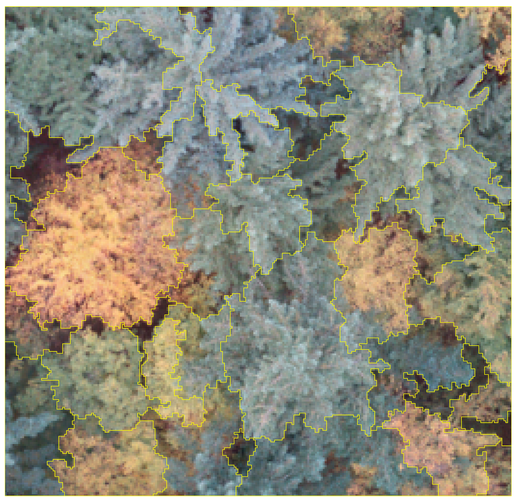
50_0.1_0.3



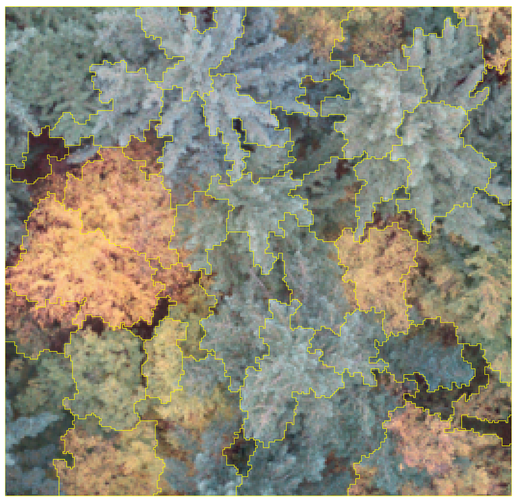
50_0.1_0.5



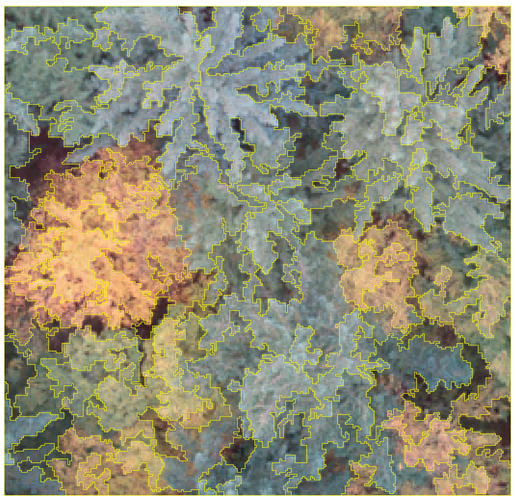
50_0.1_0.7



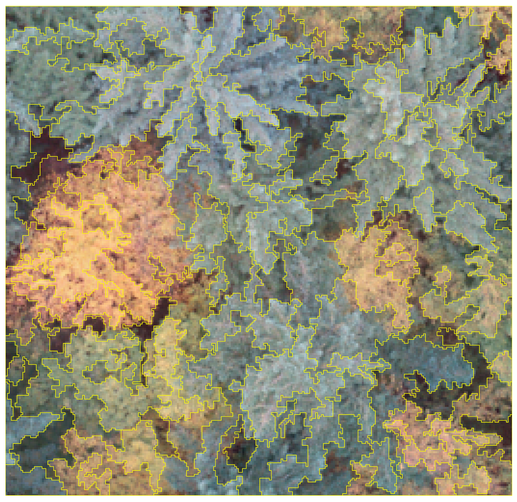
50_0.1_0.9



50_0.3_0.1

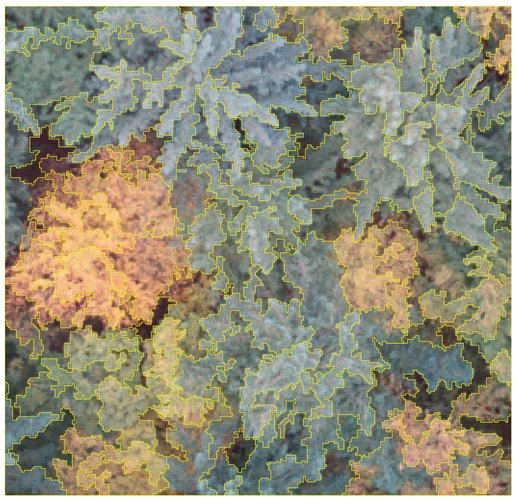


50_0.3_0.3

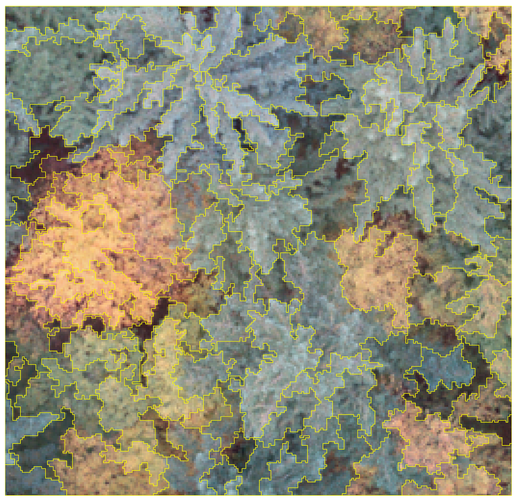


50_0.3_0.5

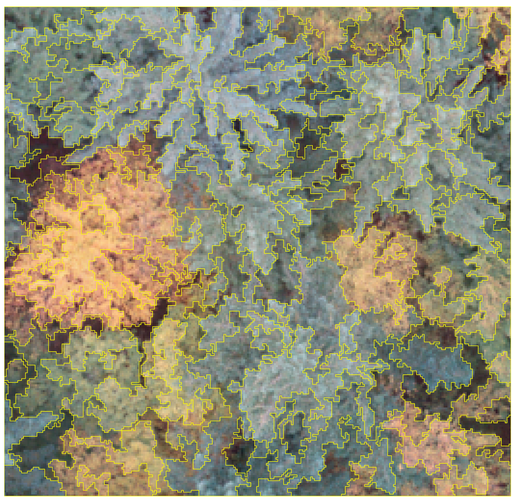
50_0.3_0.7



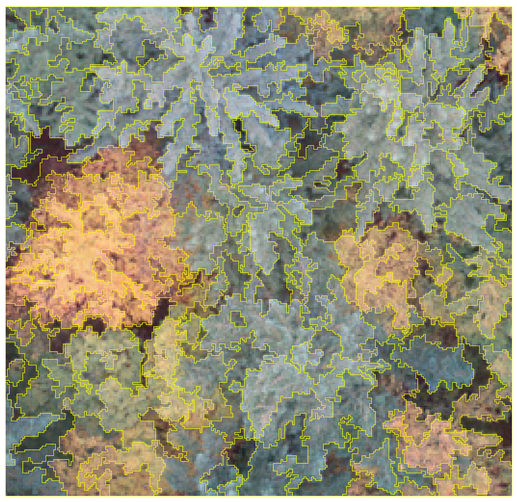
50_0.3_0.9



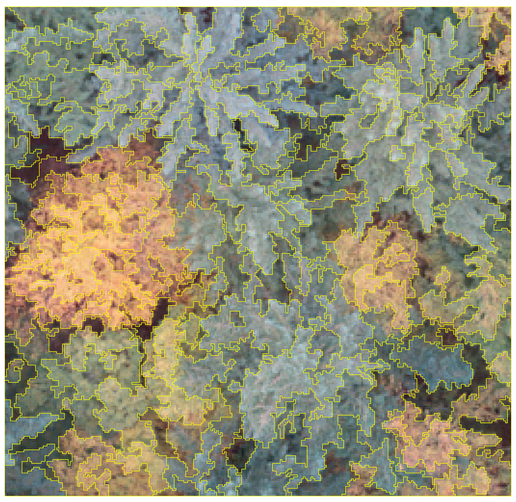
50_0.5_0.1



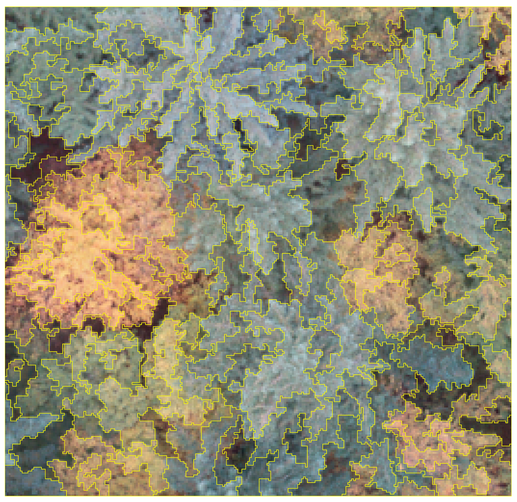
50_0.5_0.3



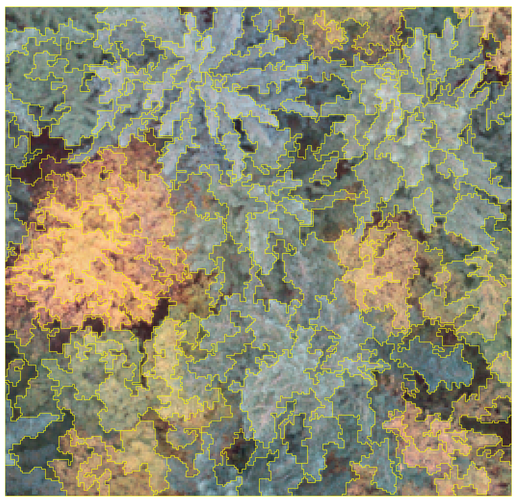
50_0.5_0.5



50_0.5_0.7



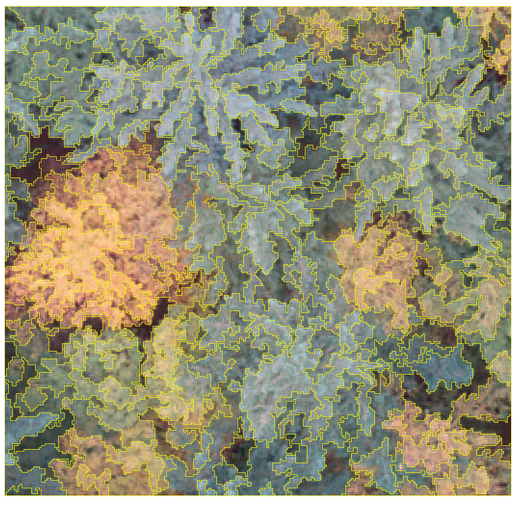
50_0.5_0.9



50_0.7_0.1

50_0.7_0.3

50_0.7_0.5



50_0.7_0.7

50_0.7_0.9

50_0.9_0.1

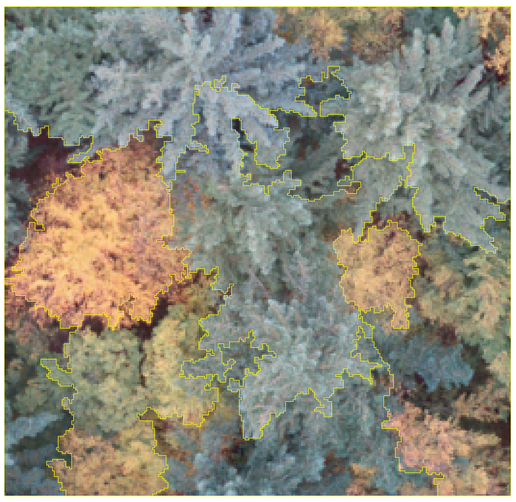
50_0.9_0.3

50_0.9_0.5

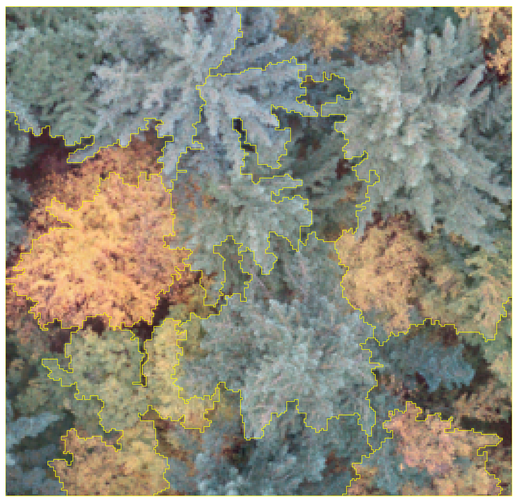
50_0.9_0.7

50_0.9_0.9

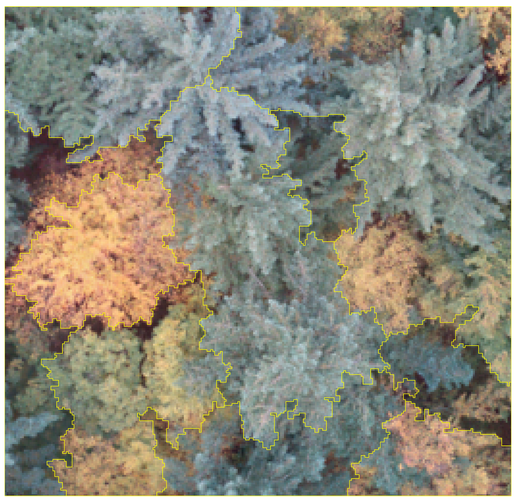
100_0.1_0.1



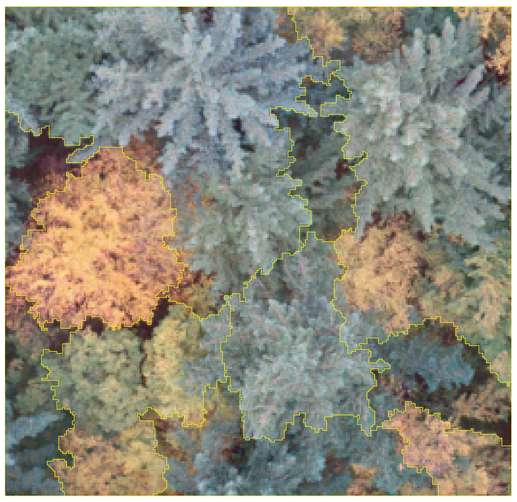
100_0.1_0.3



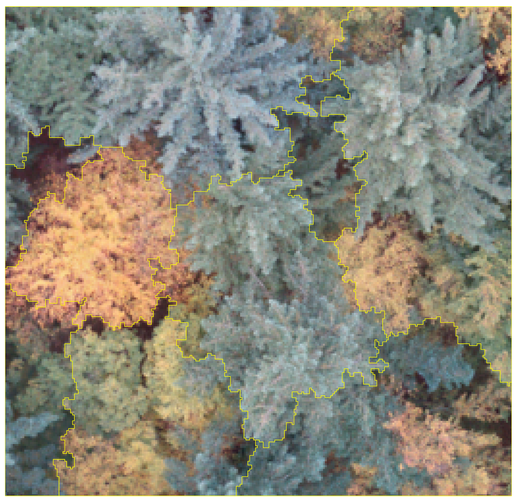
100_0.1_0.5



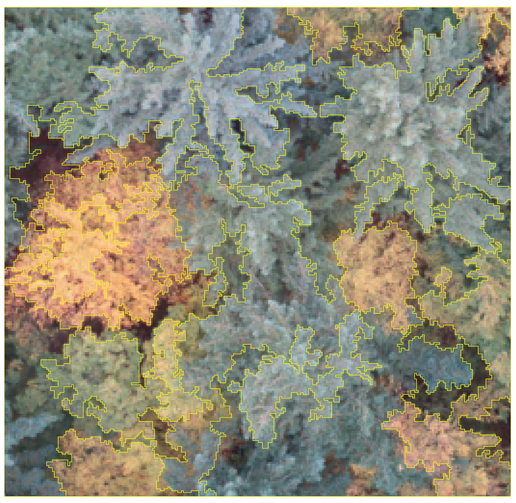
100_0.1_0.7



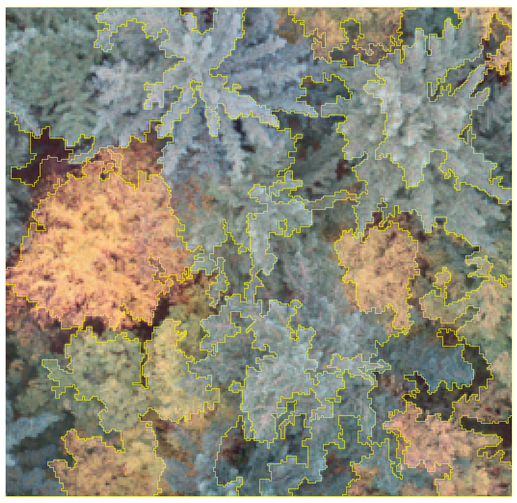
100_0.1_0.9



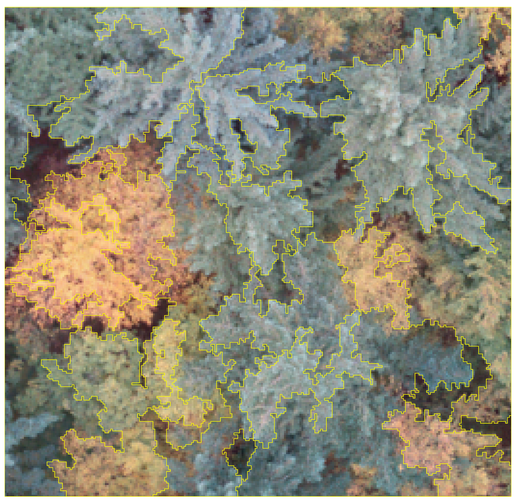
100_0.3_0.1



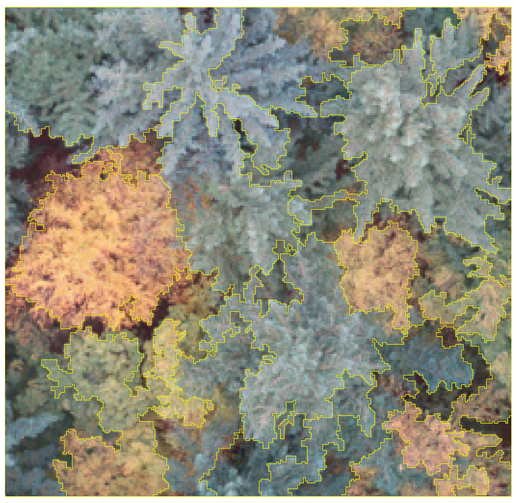
100_0.3_0.3



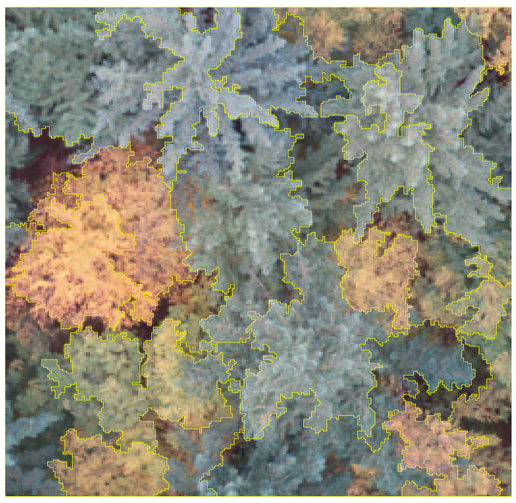
100_0.3_0.5



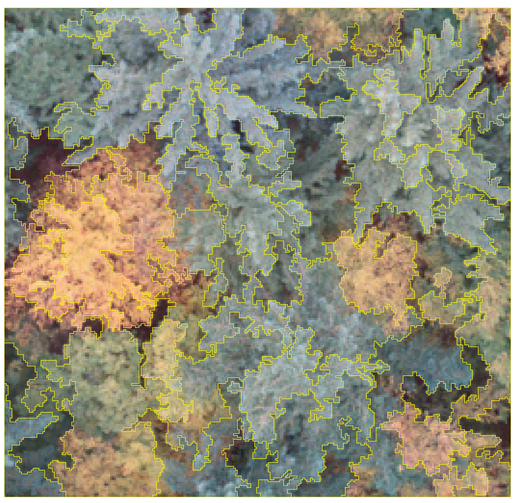
100_0.3_0.7



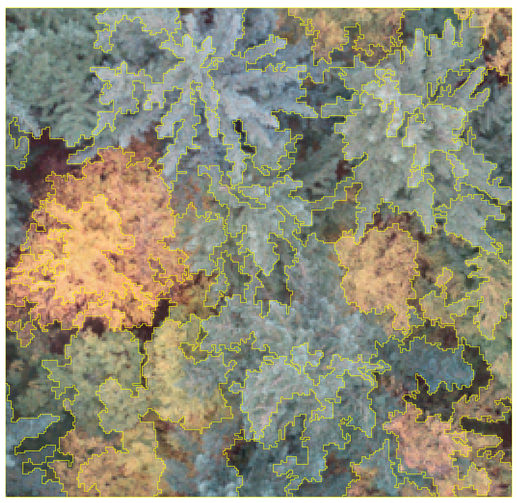
100_0.3_0.9



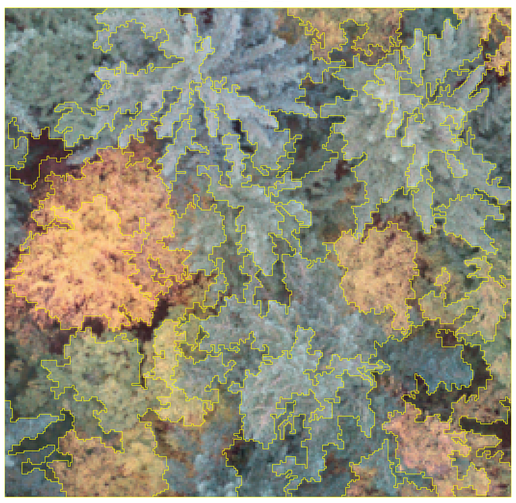
100_0.5_0.1



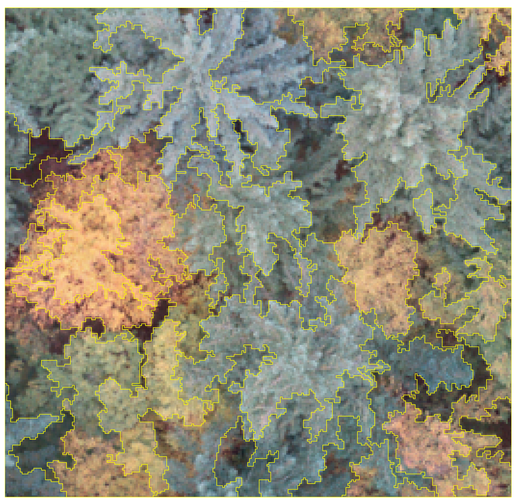
100_0.5_0.3



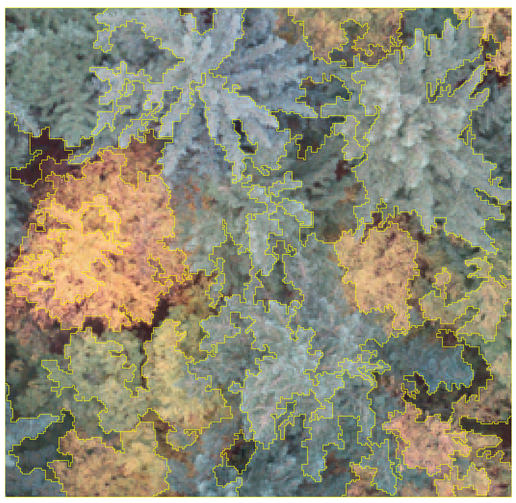
100_0.5_0.5



100_0.5_0.7

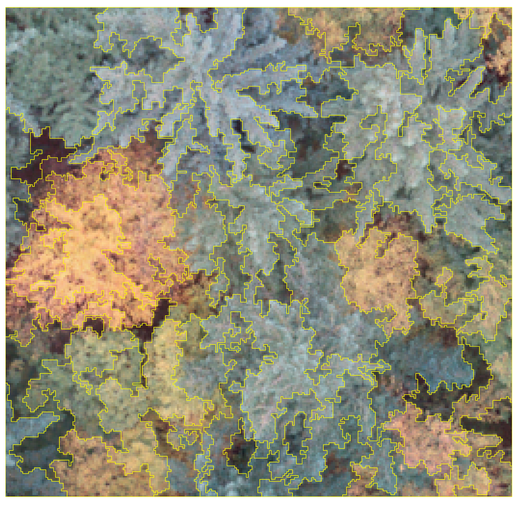


100_0.5_0.9



100_0.7_0.1

100_0.7_0.3



100_0.7_0.5

100_0.7_0.7

100_0.7_0.9

100_0.9_0.1

100_0.9_0.3

100_0.9_0.5

100_0.9_0.7

100_0.9_0.9

150_0.1_0.1

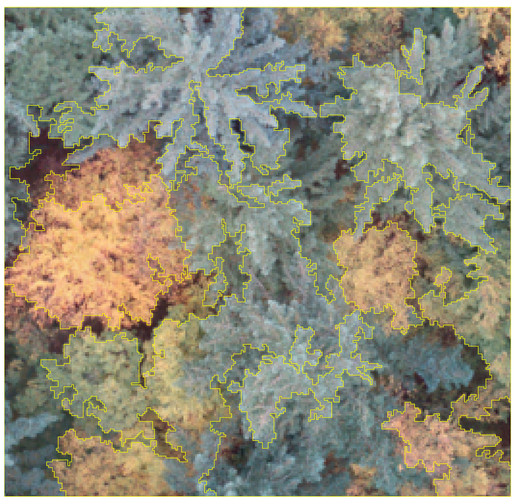
150_0.1_0.3

150_0.1_0.5

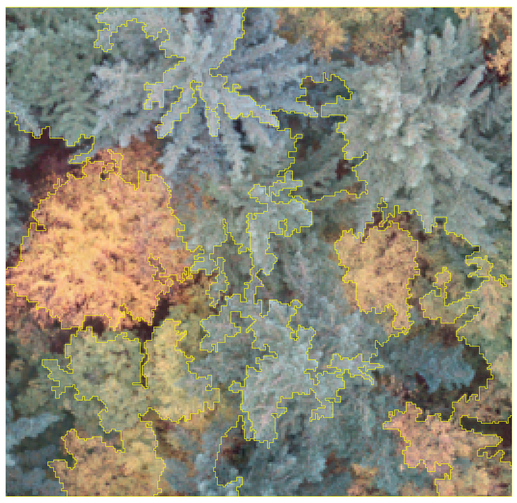
150_0.1_0.7

150_0.1_0.9

150_0.3_0.1

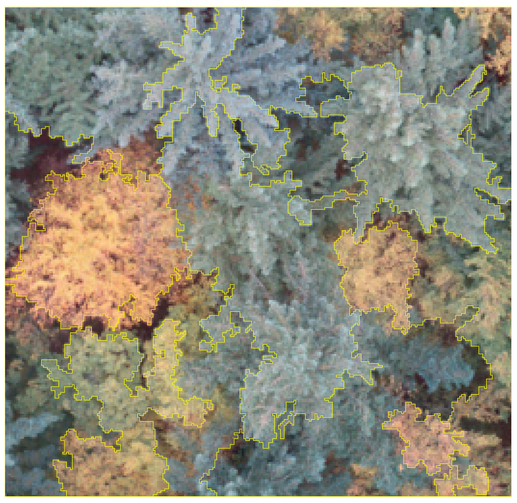


150_0.3_0.3

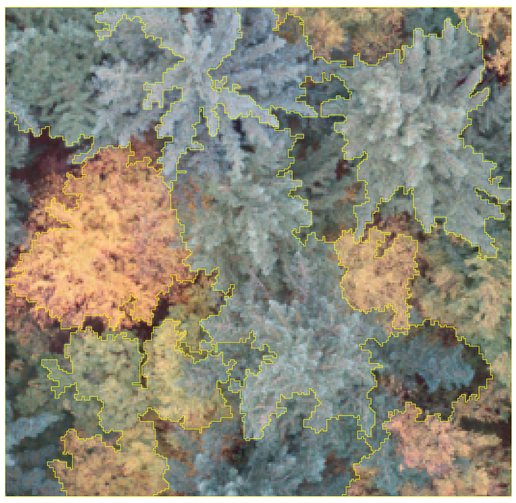


150_0.3_0.5

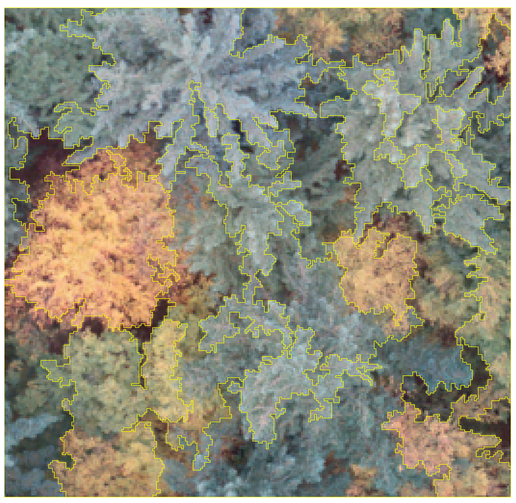
150_0.3_0.7



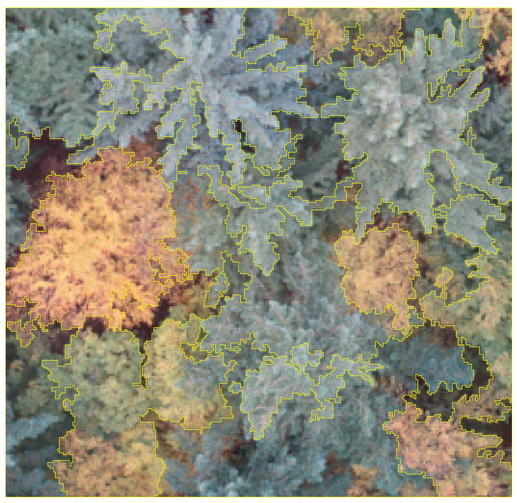
150_0.3_0.9



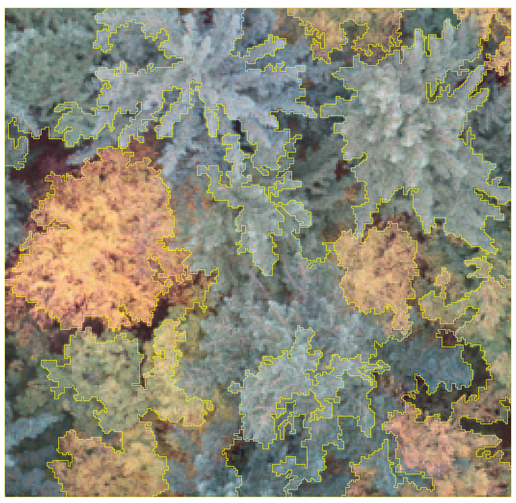
150_0.5_0.1



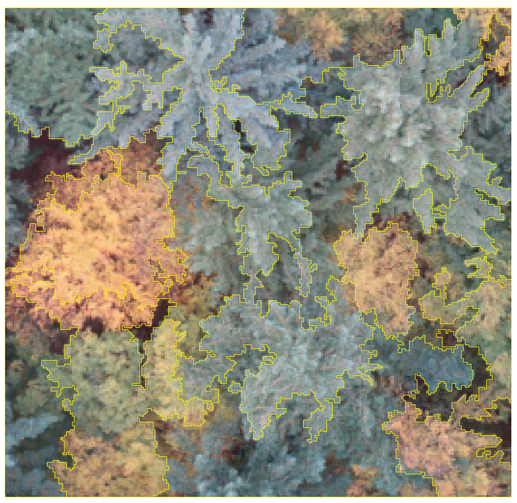
150_0.5_0.3



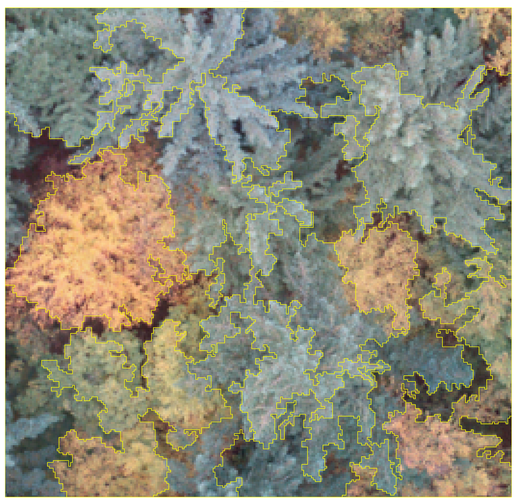
150_0.5_0.5



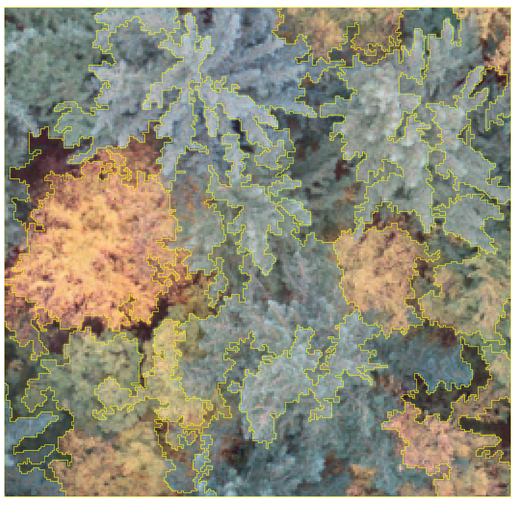
150_0.5_0.7



150_0.5_0.9



150_0.7_0.1



150_0.7_0.3

150_0.7_0.5

150_0.7_0.7

150_0.7_0.9

150_0.9_0.1

150_0.9_0.3

150_0.9_0.5

150_0.9_0.7

150_0.9_0.9

8.3. Tableau synthétisant les durées d'exécution de la chaîne de traitements

Durées d'exécution de la chaîne de traitements

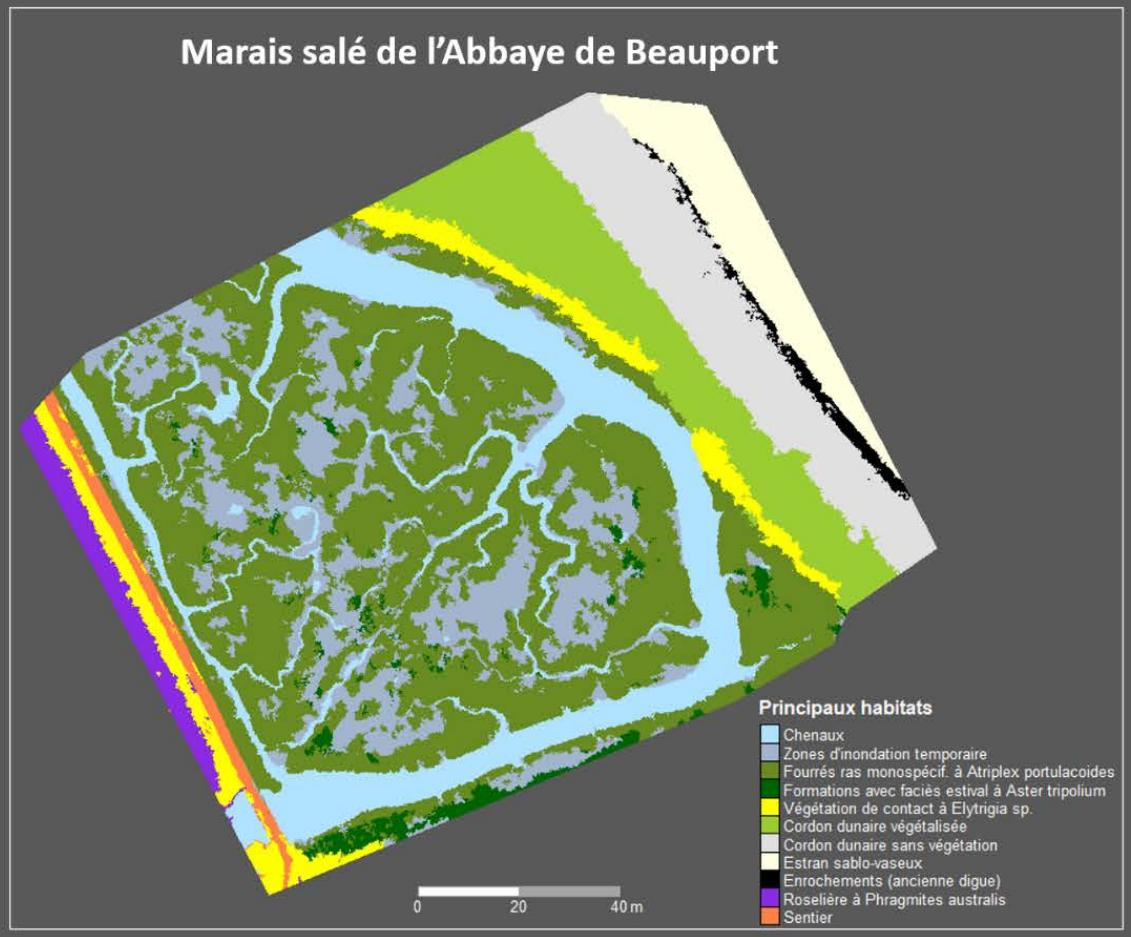
Étapes	Temps (sec)		
	utilisateur	système	écoulé
SEGMENTATION			
Seg. multiples	50	4	142
Seg. unique	6	2	27
TOTAL	**56**	**6**	**169**
CALC. ATTRIBUTS			
Stats spectrales	1	0	1
Stats texturales	20	2	34
Indices morpho	0	0	14
Synthèse/export	0	0	5
TOTAL	**21**	**2**	**55**
CLASSIFICATION			
Prépar. données	54	7	66
Entraînement	74	1	76
- modèle SVM	*39*	*0*	*41*
- modèle RF	*34*	*0*	*35*
Classification	43	4	50
- modèle SVM	*0*	*0*	*0*
- modèle RF	*0*	*0*	*0*
TOTAL	**172**	**12**	**192**

Test de la chaîne de traitements

Caractéristiques des prises de vues et de l'ortho-mosaïque

- Hauteur de prise de vues : 36 m
- Résolution : 1 cm / pixel
- Nb clichés : env. 150
- Superficie : env. 1,7 Ha
- Poids de l'ortho-mosaïque : env. 1 Go en .tif

Test de la chaîne de traitements



Statistiques sur le secteur « marais salé »

- Globales :

Precision = 0,94

Kappa = 0,92

- Par classe :

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Précision	1	0,92	0,94	0,82
Rappel	0,95	0,94	0,95	0,82

NB : Le secteur « marais salé » correspond à la zone délimitée par les quatre premiers items (i.e. classes) de la légende.

Marais salés de l'Abbaye de Beauport (Paimpol) – Crédit Photo : © LittoMatique, 2020. Site retenu pour effectuer un test « grandeur nature » de la chaîne de traitements (cf. 5.2).

RÉSUMÉ

Le présent rapport rend compte, à la fois, de la démarche de conduite de projet mise en œuvre et des principaux résultats obtenus dans le cadre d'un stage effectué au sein de l'entreprise LittoMatique, jeune start-up bretonne proposant aux gestionnaires d'espaces naturels littoraux des services de suivis d'habitats et d'espèces par drone. A cet égard, il s'efforce de répondre aux besoins identifiés d'amélioration et d'automatisation des procédures, respectivement lors des phases d'acquisition et de traitements des images.

MOTS-CLEFS : drone, capteur RVB, conditions d'éclairement, distorsions et corrections/étalonnages radiométriques, chaîne de traitements, langage de programmation R, logiciels open-source.

ABSTRACT

This report gives an overview of both the project management approach that was implemented and the main results obtained during an internship at LittoMatique, a young Brittany-based start-up company providing managers of coastal natural areas with habitats and species monitoring services using UAVs. In this respect, it strives to meet the identified needs for improvement and automation of procedures, respectively during the image acquisition and processing stages.

KEYWORDS: Unmanned-aerial vehicle, RGB sensor, illumination conditions, radiometric distortion and correction/calibration, processing chain, R programming language, open-source software.