



**HAL**  
open science

# Réalité Terrain Étendue : une nouvelle approche pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques à l'échelle des individus.

Antoine Gademer

► **To cite this version:**

Antoine Gademer. Réalité Terrain Étendue : une nouvelle approche pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques à l'échelle des individus.. Automatique / Robotique. Université de Marne la Vallée, 2010. Français. NNT : . tel-00583243v1

**HAL Id: tel-00583243**

**<https://theses.hal.science/tel-00583243v1>**

Submitted on 5 Apr 2011 (v1), last revised 1 Jun 2011 (v2)

**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.

# THÈSE

pour obtenir le grade de  
**Docteur de l'École Doctorale Mathématique et STIC**  
Spécialité "Sciences de l'Information Géographique"

présentée et soutenue publiquement par  
**Antoine GADEMER**  
le 21 Décembre 2010

---

Réalité Terrain Étendue : une nouvelle approche pour  
l'extraction de paramètres de surface biophysiques et  
géophysiques à l'échelle des individus.

---

Extended Ground Truth : a new methodology for biophysical  
and geophysical surface parameters extraction at subject scale.

---

Laboratoires d'accueil :

Équipe GTMC - Université Paris-Est Marne-la-Vallée,

Équipe ATIS - École Supérieure d'Informatique Électronique Automatique

*Directeur de thèse : J.P. Rudant, Pr. de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée*

*Co-encadrant : L. Beaudoin, Enseignant-chercheur ESIEA*

Jury de soutenance composé de :

M. Kasser, Pr., ENSG

T. J. Tanzi, Pr., Institut TELECOM - Telecom-ParisTech

B. Riera, Pr., CNRS/MNHN

J.P. Rudant, Pr., Univ. Paris-Est MLV

L. Beaudoin, Dr., ESIEA

R. Erra, Dr., ESIEA

H. Trebossen, Pr., OSS

Président de jury

Rapporteur

Rapporteur

Directeur de thèse

Co-encadrant de thèse

Examineur

Examineur



# Résumé

L'observation de notre planète et de ses paramètres de surface est une activité essentielle des Sciences de la vie et de la Terre. Ce mémoire propose une nouvelle approche pour l'analyse des paramètres biophysiques et géophysiques, appelée Réalité Terrain Étendue, et qui mêle les avantages des relevés terrain et de la télédétection. Nous nous sommes en particulier attachés aux avantages de la télédétection basse altitude et d'un système micro-drone multi-caméras pour la cartographie de la dynamique de la végétation à l'échelle des individus. Cette problématique pose de nombreuses contraintes sur notre système notamment sur l'acquisition des données et a nécessité le développement de capteurs innovants et la capacité de s'adapter aux cycles phénologiques pour améliorer leur capacité de discrimination. La télédétection basse altitude à partir de micro-drones civils est une solution intéressante en terme de résolution spatiale et de souplesse opérationnelle. Nous avons donc mis en place un système complet de drone avec une charge utile spécifique emportant simultanément trois appareils photographiques pour l'acquisition à la demande d'images obliques, stéréoscopiques ou multispectrales et permettant le développement de nouvelles méthodes d'identification de la végétation. Enfin, en participant à un relevé terrain du Muséum national d'Histoire naturelle, nous avons validé l'intérêt de notre système pour la cartographie de la dynamique de la végétation. Ce travail s'ouvre sur de nombreuses applications et perspectives de recherche, comme l'extraction de paramètres biophysiques par stéréorestoration et l'agriculture de précision.

*Mots clefs* : Télédétection basse altitude, micro-drones, cartographie de la végétation, paramètres de surface biophysiques, paramètres de surface géophysiques, rugosité, discrimination d'espèces végétales, relevés terrain, Réalité Terrain Étendue, stéréorestoration, photogrammétrie, images très haute résolution (THR), images multispectrales.



# Abstract

Retrieval of land surface parameters is an essential part of life and Earth sciences activities, as they are the key to understand the complex phenomena that take place in the biosphere. This thesis proposes a new methodology for biophysical and geophysical surface parameters analysis, that we call Extended Ground Truth, and that mix the advantages of the field operations and those of remote sensing. We have especially focused our work on the benefits of low altitude remote sensing with a multi-cameras Unmanned Aerial System for vegetation dynamics mapping at subject scale. This problematic raises strong constraints on the system, as the identification of small bushes implies new type of sensors and the adaptation to the phenological cycles to improve the discrimination capacity of the sensors. Low altitude remote sensing seems a good solution in terms of resolution and operational flexibility and the technical revolution behind the spreading of civilian micro-UAV allows all the more capable and reliable tools for field operations. We therefore developed an Unmanned Aerial System with a specific payload that can lift up three digital cameras at once, allowing on demand oblique, stereoscopic or multispectral synchronous acquisitions and thus the development of new identification methods of the vegetation. Finally, we have participated in a field operation on a test site of the National Natural History Museum and confirmed the interest of our tool for vegetation dynamics mapping. This work leads to many other researches, per example in the field of biophysical parameters extraction from stereoscopic images, and other application fields like precision farming.

*Keywords* : Low altitude remote sensing, micro-UAV, vegetation mapping, biophysical surface parameters, geophysical surface parameters, rugosity, plant species discrimination, field operation, Extended Ground Truth, stereo restitution, photogrammetry, very high resolution, multispectral imagery.



# Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier tous les membres de mon jury de thèse : Michel Kasser, Tullio Tanzi, Bernard Riera, Jean-Paul Rudant, Laurent Beaudoin, Robert Erra et Hervé Trebossen de m'avoir fait l'honneur d'assister à ma soutenance.

Un merci particulier à Jean-Paul Rudant et Laurent Beaudoin pour m'avoir accompagné et soutenu tout au long de cette thèse. Ce travail est un point d'orgue de leur longue collaboration et un exemple de leur conception commune de la pluridisciplinarité et de leur vision pragmatique des projets de recherche.

Merci à l'École Doctorale Mathématique et STIC, qui a cru à ce sujet en m'allouant une allocation de thèse de 2007 à 2009 et pour avoir financé plusieurs missions terrains et déplacements. Merci particulièrement à Robert Aymar, son président, et à Sylvie Cach qui accompagne tous les doctorants avec une remarquable gentillesse et efficacité.

Merci à l'École Supérieure d'Informatique Électronique et Automatique (ESIEA)\* pour m'avoir fourni, dans sa collaboration avec l'Université Paris-Est, un formidable espace de liberté professionnelle et financé la réalisation matérielle de notre système. Merci à Gérard Sanpité, président du Groupe ESIEA et à Éric Filiol, directeur de la Recherche et du Développement Industriel, dont le soutien à notre équipe et au pôle ATIS fut indispensable.

Merci à la Direction Générale de l'Armement (DGA)\* et à l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA)\* pour avoir subventionné le projet Faucon Noir lors de l'édition 2007-2009 du Challenge Minidrones.

Merci à Tullio Tanzi pour son expertise sur la gestion des risques et ses conseils avisés et amicaux.

Merci à Bernard Riera et Samira Mobaied pour leurs explications patientes sur mes nombreuses questions en botaniques.

Merci à Didier Boldo, Nicolas Paparoditis et Renaud Binet pour avoir accompagné mes premiers pas et permis la cristallisation de mon sujet.

Merci à Michel Kasser pour ses conseils d'expert et son soutien tout au long de cette thèse.

Merci à tous les étudiants de l'ESIEA qui ont travaillé avec moi sur le projet Faucon Noir et particulièrement Corentin Chéron, Sébastien Monat, Benoit Petitpas, Florent Mainfroy, Loïca Avanthey, Vincent Germain et Vincent Vittori. Leur énergie débordante et leur soif de connaissances est responsable de nombreuses avancées techniques et pour certains d'une solide amitié.



Merci à Robert Thérissette pour sa gentillesse et son désir de partager sa riche expérience avec la jeune génération.

Merci à mes collègues d'ESIEA Recherche pour leur esprit de corps et leur soutien.

Merci à Sylvain Van Wassenove et à Nicolas Boussaingault, de l'Association Française contre les Myopathies pour n'avoir pas compté leur temps pour nous aider dans la réalisation de notre capteur.

Merci à mon père et à ma mère pour leur soutien fidèle.

Merci à mes proches, amis, famille et à tous les autres qui ont suivi cette aventure.

Last, but not least, un immense merci à Ludmila pour sa patience et son esprit toujours affuté. Sans elle rien de tout cela n'aurait été possible.



# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Remerciements</b>	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>ix</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xix</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Cartographie de la végétation à l'échelle des individus : utilisation de la Réalité Terrain Étendue</b>	<b>5</b>
1.1 Enjeux de la cartographie de la végétation . . . . .	5
1.1.1 Contexte de la biodiversité . . . . .	5
1.1.2 Étude et protection des ressources naturelles . . . . .	7
1.1.3 Cartographie de la dynamique de la végétation . . . . .	8
1.2 Concept de Réalité Terrain Étendue . . . . .	10
1.2.1 Méthodes actuellement utilisées . . . . .	11
1.2.2 Formalisation du concept . . . . .	15
1.3 Contraintes posées par la cartographie de la végétation à l'échelle des individus	16
1.3.1 Discrimination des espèces . . . . .	17
1.3.1.1 Signature spectrale . . . . .	17
1.3.1.2 Aspect morphologique et textural . . . . .	21
1.3.1.3 Approche 3D . . . . .	22

1.3.2	Contraintes opérationnelles . . . . .	22
1.3.3	Résolution et identification de la végétation . . . . .	24
1.3.3.1	Échelle, résolution des capteurs et taille de l'échantillon au sol . . . . .	24
1.3.3.2	Interprétabilité des images . . . . .	28
1.3.4	Synthèse . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Quels outils de télédétection pour la Réalité Terrain Étendue ?</b>	<b>31</b>
2.1	Un problème de média . . . . .	31
2.1.1	Télédétection spatiale . . . . .	31
2.1.2	Télédétection aéroportée . . . . .	34
2.1.2.1	Caméras petit format . . . . .	35
2.1.2.2	Caméras moyen format . . . . .	36
2.1.2.3	Caméras grand format . . . . .	37
2.1.2.4	Limites opérationnelles . . . . .	38
2.1.3	Télédétection basse altitude . . . . .	40
2.2	Arrivée des microdrones civils . . . . .	43
2.2.1	Brève histoire des drones . . . . .	43
2.2.2	Classification . . . . .	44
2.2.3	Aspects règlementaires . . . . .	47
2.2.4	Évolutions technologiques récentes . . . . .	48
2.2.5	Avantages opérationnels . . . . .	51
2.2.6	Limites des systèmes actuels . . . . .	51
2.3	Contraintes sur l'instrumentation . . . . .	54
2.3.1	Notion de charge utile . . . . .	55
2.3.2	Caméras pour les micro-drones . . . . .	55
2.3.3	Systèmes multi-caméras . . . . .	59
2.3.3.1	Systèmes directionnels . . . . .	59
2.3.3.2	Systèmes stéréoscopiques . . . . .	63
2.3.3.3	Systèmes multi-spectraux . . . . .	63
2.3.3.4	Synthèse . . . . .	65
2.3.4	Géolocalisation des images . . . . .	65
2.3.4.1	Principe et enjeux de la géolocalisation . . . . .	65
2.3.4.2	Capteurs pour le géoréférencement direct . . . . .	66

2.3.5	Contraintes sur le système . . . . .	77
2.4	Contraintes tirées du modèle image . . . . .	77
2.4.1	Calcul de la vitesse de déplacement en fonction du recouvrement désiré	78
2.4.2	Calcul de la vitesse de déplacement en fonction du flou de filé . . . .	80
2.4.3	Choix de la distance focale . . . . .	85
2.4.4	Influence de l'inclinaison sur la taille de l'échantillon au sol . . . . .	86
2.4.5	Synthèse générale . . . . .	88
<b>3</b>	<b>Système micro-drone multi-cameras développé durant la thèse</b>	<b>91</b>
3.1	Présentation du système utilisé . . . . .	91
3.1.1	Choix du quadri-rotors . . . . .	91
3.1.2	Principe de vol . . . . .	92
3.1.3	Architecture du système . . . . .	97
3.1.3.1	Assistant bas niveau . . . . .	97
3.1.3.2	Assistant pilotage . . . . .	99
3.1.3.3	Cartes filles : altimètre et charge utile . . . . .	99
3.1.3.4	La station sol . . . . .	99
3.1.4	Caractéristiques du porteur . . . . .	100
3.2	Capteur multi-caméras . . . . .	102
3.2.1	Avantages attendus du système . . . . .	102
3.2.2	Support tri-caméras . . . . .	102
3.2.3	Réalisation mécanique . . . . .	107
3.2.4	Choix du modèle d'appareil photographique numérique . . . . .	107
3.2.5	Électronique de contrôle et station sol . . . . .	112
3.2.5.1	Contrôle électronique d'un appareil du commerce . . . . .	113
3.2.5.2	Analyse des signaux . . . . .	115
3.2.5.3	Réalisation de la carte . . . . .	119
3.2.6	Autres systèmes de vision . . . . .	125
3.2.6.1	Système de visée et de pilotage embarqué . . . . .	125
3.2.6.2	Acquisition de flux vidéos . . . . .	126
3.2.6.3	Afficheur tête haute . . . . .	126
3.3	Avancées logicielles . . . . .	129
3.3.1	Station sol . . . . .	129
3.3.2	Plan de vol . . . . .	132

3.3.3	Projection des empreintes au sol des images . . . . .	135
3.3.4	Recherche topologique dans une base d'images . . . . .	138
3.4	Bilan des travaux . . . . .	142
3.4.1	Sorties terrain . . . . .	142
3.4.2	Avancement . . . . .	148
<b>4</b>	<b>Mise en œuvre du système et premiers résultats</b>	<b>151</b>
4.1	Mission terrain . . . . .	151
4.1.1	Présentation de la zone d'étude . . . . .	151
4.1.2	Déroulement de la mission terrain . . . . .	154
4.1.3	Bilan de la mission . . . . .	159
4.1.4	Exemples d'images acquises et interprétation manuelle . . . . .	160
4.2	Premier travaux sur les images . . . . .	167
4.2.1	Classification automatique . . . . .	169
4.2.2	Stéréorestitution . . . . .	169
4.3	Perspectives pour de nouvelles missions . . . . .	170
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>173</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>191</b>
	<b>Bibliographie thématique</b>	<b>193</b>
	<b>Bibliographie alphabétique</b>	<b>209</b>
	<b>Annexes</b>	<b>225</b>
	Annexe n°1 : Complément Floristique . . . . .	225
	Annexe n°2 : Registres d'échange de la carte dédiée au capteur . . . . .	229
	Annexe n°3 : Licence Creative Commons . . . . .	233
	Annexe n°4 : Productions personnelles . . . . .	235

# Table des figures

1.1	Distinctions d'échelle entre les plantes . . . . .	9
1.2	Mesure ponctuelle . . . . .	12
1.3	Mesure linéaire . . . . .	13
1.4	Mesure surfacique par segmentation manuelle . . . . .	14
1.5	Mesure surfacique par interpolation : exemple de la rugosité des sols . . . . .	14
1.6	Données raster acquises par photogrammétrie . . . . .	15
1.7	Signatures spectrales de l'eau, du sol nu et de la végétation . . . . .	18
1.8	Image infrarouge utilisée pour la cartographie de la végétation . . . . .	19
1.9	Signatures spectrales de différentes plantes . . . . .	19
1.10	Différentes signatures spectrales naturelles . . . . .	20
1.11	Indice NDVI calculé sur des images satellites . . . . .	20
1.12	Rapport entre la hauteur sol, les caractéristique de l'appareil photographique et la fauchée. . . . .	25
1.13	Illustration de la variation de la taille de l'échantillon au sol . . . . .	27
1.14	Comparatif des tailles respectives de la callune et de la bruyère cendrée . . . . .	28
1.15	Illustration de la callune à différentes tailles d'échantillon au sol . . . . .	29
2.1	Caméra aéroportée petit format . . . . .	36
2.2	Caméra IGN . . . . .	37
2.3	Caméra Ultracam-X . . . . .	38
2.4	Coût des images en fonction de la taille de l'échantillon au sol. . . . .	39
2.5	Drone de reconnaissance américain . . . . .	46
2.6	Mini-drones militaires . . . . .	46
2.7	Appontage d'un drone hélicoptère . . . . .	47
2.8	Comparaison de taille entre les gyroscopes mécaniques et les gyroscopes MEMS . . . . .	50

2.9	Comparaison de gyroscopes MEMS . . . . .	50
2.10	Principaux micro-drones récents. . . . .	53
2.11	Support amorti par piston pour appareil photographique numérique . . . . .	54
2.12	Exemple d'image acquises par des micro-drones . . . . .	54
2.13	Microcaméra . . . . .	55
2.14	Caméra industrielle . . . . .	56
2.15	Caméscopes HD . . . . .	57
2.16	Appareils photographiques compacts . . . . .	58
2.17	Empreinte au sol des systèmes multi-caméras . . . . .	60
2.18	Empreinte au sol "Croix de Malte" . . . . .	60
2.19	Exemple d'images "en éventail" . . . . .	62
2.20	Exemple d'images "en bloc" . . . . .	62
2.21	Exemple d'images "croix de malte" . . . . .	62
2.22	Système multi-caméras multispectral . . . . .	64
2.23	Géolocalisation . . . . .	65
2.24	Les angles d'Euler . . . . .	67
2.25	Plan local tangent . . . . .	67
2.26	Relation altitude pression . . . . .	70
2.27	Mesure de l'accélération verticale . . . . .	71
2.28	Télémètre ultrason . . . . .	72
2.29	Erreurs de mesure ultrason liées au terrain . . . . .	72
2.30	Différence entre hauteur sol et altitude . . . . .	74
2.31	Coordonnées géocentriques . . . . .	74
2.32	Triangulation GPS . . . . .	76
2.33	Dilution of Precision . . . . .	76
2.34	Rapport entre la base, la fauchée et le recouvrement . . . . .	79
2.35	Flou de filé . . . . .	80
2.36	Ouverture du diaphragme . . . . .	81
2.37	Influence de l'ouverture sur la profondeur de champ . . . . .	81
2.38	Influence de la sensibilité . . . . .	82
2.39	Stabilisation . . . . .	84
2.40	Influence du choix de la focale sur la fauchée ou la hauteur sol . . . . .	84
2.41	Effet de la distance focale sur l'appréciation des objets . . . . .	84

2.42	Variation de la taille de l'échantillon au sol lors d'une prise de vue nadir . . .	86
2.43	Calcul de la taille de l'échantillon au sol lors d'une prise de vue oblique . . .	87
2.44	Variation de la taille de l'échantillon au sol en fonction de l'angle de visée . .	88
2.45	Variation de la taille de l'échantillon au sol lors d'une prise de vue oblique . .	89
3.1	Déroulement du Challenge Minidrones 2007-2008 . . . . .	93
3.2	Déroulement du Challenge Minidrones 2008-2009 . . . . .	94
3.3	Déroulement du Challenge Minidrones 2009 . . . . .	95
3.4	Principe de vol des quadri-rotors . . . . .	96
3.5	Compensation du couple . . . . .	96
3.6	Organisation générale du système . . . . .	98
3.7	Station sol . . . . .	100
3.8	Le micro-drone Faucon noir . . . . .	101
3.9	Simulation d'un système en « croix de malte » par deux passages successifs. .	103
3.10	Différentes configurations tri-cameras . . . . .	104
3.11	Système tri-cameras alignées . . . . .	105
3.12	Schéma du support tri-cameras . . . . .	106
3.13	Compensation de l'inclinaison en tangage de l'appareil . . . . .	106
3.14	Évolution du support . . . . .	107
3.15	Pentax Optio A40 . . . . .	112
3.16	Systèmes de déclenchement courants . . . . .	114
3.17	Démontage de l'Optio A40 . . . . .	116
3.18	Fonctionnement d'un activateur électromécanique . . . . .	117
3.19	Schéma électronique de l'Optio A40 . . . . .	118
3.20	Signal de maintenance de l'Optio A40 . . . . .	120
3.21	Réalisation de la carte charge utile . . . . .	121
3.22	Circuits électroniques de la carte « Télécommande » . . . . .	122
3.23	Différentes liaisons entre la charge utile et les autres sous-systèmes . . . . .	123
3.24	Station sol . . . . .	124
3.25	Caméra aéromodeliste sur le drone . . . . .	125
3.26	Conditionnement du Camileo P10 . . . . .	127
3.27	Trois vidéos prises simultanément . . . . .	127
3.28	Rolling shutter . . . . .	128
3.29	Head-Up Display . . . . .	129



3.30	Deux exemples de station sol commerciales . . . . .	130
3.31	Phase de vérification du protocole de mise en route, grâce à la station sol. . .	130
3.32	Interface graphique de la station sol . . . . .	131
3.33	Contrôle de la charge utile depuis la station sol . . . . .	131
3.34	Trajectoire simulée à partir des points clef et des points de passage . . . . .	133
3.35	Programmation du plan de vol . . . . .	134
3.36	Préparateur de mission . . . . .	135
3.37	Changement de référentiel . . . . .	136
3.38	Projection de l’empreinte au sol . . . . .	138
3.39	Empreinte au sol d’une image . . . . .	139
3.40	Azimut et élévation . . . . .	139
3.41	Différentes classes d’images . . . . .	140
3.42	Liens topologique entre les images . . . . .	140
3.43	Exemple de confusion liée au choix de la topologie . . . . .	141
3.44	Navigation dans les données . . . . .	142
3.45	Vol de test dans la cour de l’ESIEA . . . . .	143
3.46	Sortie terrain en Bretagne en Juillet 2008 . . . . .	144
3.47	Sortie terrain à Vitry-sur-Seine en Juin 2009 . . . . .	145
3.48	Démonstrations publiques . . . . .	146
3.49	Démonstration lors du salon Eurosatory 2010 . . . . .	146
3.50	Mission à Las Vegas . . . . .	147
4.1	Emplacement de la zone d’étude . . . . .	152
4.2	Terrain d’étude de la Mare aux joncs . . . . .	153
4.3	Déroulement de la mission . . . . .	154
4.4	Trajectoires des différents vols . . . . .	155
4.5	Différentes échelles de prises de vues . . . . .	156
4.6	Vol à altitude constante . . . . .	156
4.7	Géoréférencement relatif . . . . .	157
4.8	Panorama de la zone d’étude . . . . .	158
4.9	Drone après une chute . . . . .	158
4.10	Rolling shutter sur les vidéos de la mission . . . . .	159
4.11	Flou de filé dans les images . . . . .	160
4.12	Couverture de la zone d’étude . . . . .	161

---

4.13	Image utilisable pour l'identification des arbres . . . . .	161
4.14	Image utilisable pour l'identification des arbrisseaux . . . . .	162
4.15	Image utilisable pour la discrimination floristique . . . . .	162
4.16	Vue d'ensemble . . . . .	163
4.17	Image oblique . . . . .	163
4.18	Cartographie réalisée lors du relevé terrain . . . . .	165
4.19	Cartographie réalisée par photo-interprétation . . . . .	166
4.20	Classification non supervisée . . . . .	168
4.21	Classification supervisée . . . . .	168
4.22	Couple d'images acquises lors du vol n°5 . . . . .	169
4.23	Nuage de points 3D . . . . .	170
4.24	Nouvelles acquisitions simultanées pour des applications de stéréorestitution .	174
4.25	Exemple d'acquisition de nuage de points 3D effectuée avec un LiDAR . . .	176
4.26	Autres champs d'application possibles pour notre système . . . . .	177
4.27	Mesures de rugosité . . . . .	178
4.28	Mesures dendrométriques . . . . .	179



# Liste des tableaux

1.1	Comparaison des propriétés des relevés terrain et de la télédétection . . . . .	16
2.1	Caractéristique des satellites optiques civils (1) . . . . .	32
2.2	Caractéristique des satellites optiques civils (2) . . . . .	33
2.3	Comparaison des coûts des différents outils de télédétection . . . . .	39
2.4	Comparaison des différentes plateformes de télédétection basse altitude . . . . .	41
2.5	Classification par performances des drones . . . . .	45
2.6	Comparaison des capteurs estimant la hauteur sol . . . . .	73
3.1	Caractéristiques du micro-drone Faucon noir . . . . .	101
3.2	Comparatif des appareils photographiques compacts . . . . .	110



# Introduction Générale

*"Porque eu sou do tamanho do que vejo e não do tamanho da minha altura..."*  
(Car j'ai la taille de ce que je vois et non celle de ma simple hauteur)  
- Alberto Caeiro

## Contexte

### Approche multidisciplinaire

L'observation est un pilier essentiel de la méthode scientifique. Selon Louis Pasteur [1868], « les conceptions les plus hardies, les spéculations les plus légitimes, ne prennent un corps et une âme que le jour où elles sont consacrées par l'observation et l'expérience ».

Si l'on imagine souvent les expérimentations scientifiques comme isolées dans un laboratoire, la plupart des phénomènes naturels sont des systèmes complexes qui ne permettent cependant pas la séparation des nombreux paramètres en jeu. Seule l'observation directe, sur le terrain, permet alors d'essayer d'en retranscrire le fonctionnement.

Cette thèse s'attache à réfléchir sur des outils méthodologiques et techniques permettant d'identifier et de caractériser les paramètres de surface\*<sup>1</sup> sur le terrain. Cette démarche devrait ainsi contribuer à améliorer la compréhension de nombreux phénomènes.

Par paramètres de surface, on entend généralement l'ensemble des paramètres mesurables à la surface de la terre : comme l'occupation du sol, la quantité de biomasse dans un écosystème, la température à la surface des continents et des océans, ou encore l'érosion, la rugosité ou l'humidité des sols, et dont l'analyse permet de modéliser les phénomènes naturels.

Cette thématique de recherche étant extrêmement vaste, et après avoir envisagé plusieurs autres voies de recherche, telle la gestion des catastrophes naturelles ou l'aide à l'interprétation des images radar\*, nous avons choisi de nous focaliser sur les paramètres biophysiques et géophysiques en jeu dans la cartographie de la dynamique de la végétation. Les raisons de ce choix sont doubles : tout d'abord, une coopération avec le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)\* m'offrait la possibilité de définir une problématique exigeante qui semblait pouvoir a posteriori être généralisée à de nombreux autres domaines d'application<sup>2</sup> ;

---

1. La définition des noms marqués d'une étoile peut être trouvée dans le Glossaire, p. 191.

2. On retrouvera des exemples d'applications dans les Perspectives, p. 175.

mais elle me permettait aussi d'aller à la rencontre d'un domaine qui, s'il semblait éloigné de ma formation initiale, présentait pour moi de nombreux attraits. Cette thèse se place donc à l'intersection de domaines aussi différents que la botanique, la télédétection\* et l'ingénierie et puise d'avantage sa richesse des liens tissés entre eux que dans l'expertise approfondie d'un de ces domaines.

Formé aux sciences de la Terre, diplômé ingénieur de l'École Supérieure d'Informatique Électronique et Automatique (ESIEA)\* et détenteur d'un Master 2 Recherche en Sciences de l'Information Géographique décerné conjointement par l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée et par l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG)\*, nous avons vu dans ce sujet l'occasion de faire la synthèse des pratiques existantes dans chacun de ces domaines et d'en faire une approche multidisciplinaire originale.

Ce travail est donc le fruit de la coopération étroite du MNHN, qui nous a prêté son expertise botanique, de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée dont l'École Doctorale Mathématique et STIC a financé ce travail durant trois ans, et de l'ESIEA, qui a fourni son expertise technique et son support logistique et matériel.

## Cartographie de la végétation et télédétection

Depuis l'époque des grands naturalistes comme Linné et Buffon qui ont posé les bases de l'observation des espèces et de leur classification\*[[Jouet; McNeill et al., 2006](#)], les biologistes ont tenté, par une observation rigoureuse, de préciser ces classifications en se basant sur la forme des individus\* (classification populaire), sur leurs propriétés (classification phénotypique) ou plus récemment sur leur parenté génétique (classification phylogénique)[[Stuessy, 2009](#)].

Cette vision statique des espèces est complétée par une vision dynamique des individus au sein de leurs écosystèmes : les classifications intègrent alors des paramètres spatio-temporels généralement retranscrits à l'aide de cartes. L'évolution de la biodiversité\*<sup>3</sup> au sein d'un environnement est ainsi étudiée par l'élaboration répétée de cartes d'occupation des sols : l'emplacement et l'étendue de chaque groupe d'individus sont identifiés et annotés d'après l'observation sur le terrain. Ce type d'études, comme celles décrites par [Heller et Zavaleta \[2009\]](#), peuvent s'étendre sur de longues périodes allant jusqu'à plusieurs dizaines d'années.

Or, nous avons rapidement constaté au contact des botanistes du MNHN<sup>4</sup>, que cette cartographie dynamique du vivant nécessitait une logistique fastidieuse, souvent coûteuse, et l'immobilisation de nombreuses ressources humaines.

En effet, malgré l'utilisation de techniques statistiques et la définition d'un échantillon représentatif de sites à étudier, les cartographies sont effectuées dans la majorité des cas par

---

3. La biodiversité comprend trois échelles interdépendantes : la diversité des milieux de vie, celle des espèces\* et celle des individus au sein de chaque espèce. Elle peut être vue comme « l'ensemble des milieux naturels et des formes de vie (plantes, animaux, champignons, bactéries, virus...) ainsi que toutes les relations et interactions qui existent, d'une part, entre les organismes vivants eux-mêmes, d'autre part, entre ces organismes et leurs milieux de vie. »[[Biodiversité 2010](#)].

4. Écologie tropicale de l'UMR 7179 département Écologie et Gestion de la Biodiversité. CNRS - MNHN.

l'annotation manuelle de cartes papier par une équipe réduite de chercheurs et d'étudiants, faute d'une alternative technique permettant de saisir cette réalité terrain\*. On comprend alors que les coûts humain et financier de cette cartographie deviennent un facteur limitant la qualité et la quantité des observations et par conséquent la portée du travail d'analyse et d'interprétation.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes interrogés sur l'intérêt d'une nouvelle méthodologie intégrant potentiellement les avantages de l'imagerie, allant de l'analyse comparée ou l'extraction automatique de paramètres de surface, aux méthodes de relevés terrain\*, ces dernières conservant l'auto-certification de la réalité terrain, l'aspect quantitatif des paramètres biophysiques ou géophysiques mesurés ainsi que la souplesse d'adaptation aux conditions extérieures. Nous imaginions que cette méthodologie que nous nommons Réalité Terrain Étendue (RTE)\* allait permettre d'améliorer significativement l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques lors des missions terrain, offrant de nouvelles perspectives analytiques aux sciences de la Terre.

Cette réflexion était étayée par l'observation des bénéfices considérables obtenus par l'usage de la télédétection\* — vue comme l'ensemble des méthodes d'observation à distance des objets ou des phénomènes par le biais d'instruments de mesure n'ayant pas de contact avec ces derniers — dans de nombreux domaines scientifiques et particulièrement au sein des sciences de la Terre[Jensen, 2007] : météorologie, océanographie, écologie...

On peut voir plus particulièrement dans l'article de Lu [2006] le potentiel de la télédétection pour l'évaluation de la biomasse\* végétale au-dessus du sol — soit l'ensemble des ressources vivantes (arbres, buissons, plantes...) dans un espace donné<sup>5</sup>. Les travaux décrits, comme ceux plus récents de Houghton *et al.* [2007] et Muukkonen et Heiskanen [2007] sur les images satellites, cherchent à établir une relation entre les mesures locales obtenues lors des relevés terrain et les caractéristiques (de signature spectrale\*, de texture\* ou de volume) des données acquises par les satellites afin d'extrapoler cette relation à l'étude des territoires beaucoup plus vaste.

L'échelle\* d'observation étant différente, il semble raisonnable de se demander si ces mêmes outils peuvent permettre l'extraction des paramètres de surface biophysiques et géophysiques à l'échelle des individus, et ainsi répondre aux besoins de la cartographie de la dynamique de la végétation, ou si un besoin d'innovation est nécessaire pour répondre à cette problématique.

## Organisation du mémoire et contribution

La cartographie de la dynamique du vivant est une composante majeure de l'étude de la biodiversité. Le premier chapitre de ce mémoire est consacré aux enjeux et aux problématiques posés par la cartographie de la dynamique du vivant. Nous tenterons par la suite d'explicitier les contraintes posées par le suivi précis de l'occupation concurrentielle des sols par la végétation à différentes échelles ; allant d'une vaste forêt à une lande colonisée par

---

5. La biomasse est généralement calculée en volume ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) ou en masse ( $t \cdot ha^{-1}$ ).



des arbrisseaux\* et des herbacées\* dont la discrimination est beaucoup plus difficile. Afin de cerner cette problématique, nous ferons la synthèse des pratiques des relevés terrain et de la télédétection en définissant le concept de RTE et en posant les contraintes méthodologiques de son utilisation. Nous concluons ce chapitre parcourant les techniques utilisées en agriculture de précision pour définir un premier cahier des charges des outils de télédétection transposables à la cartographie des milieux naturels.

Une fois les contraintes établies, le chapitre 2 interroge les outils et méthodes de télédétection classiques, cherchant la meilleure correspondance entre les techniques existantes et les besoins que nous avons définis. Partant de la télédétection spatiale\*, nous descendrons jusqu'aux outils de télédétection basse altitude\* et les possibilités offertes par l'arrivée des micro-drones\* civils. Le choix du porteur établi, nous en expliciterons les conséquences sur les possibilités d'instrumentation et les formules théoriques qui les sous-tendent.

Le chapitre 3 présentera le système que nous avons réalisé durant la thèse, avec l'aide de plusieurs étudiants de cycle ingénieur, afin d'étayer le concept de RTE. Basé sur la combinaison d'un micro-drone et d'un système multi-caméras\* innovant, nous expliciterons les avancées matérielles et logicielles qui permettent l'extraction des paramètres de surface biophysiques et géophysiques à basse altitude à l'échelle des individus et donc une meilleure cartographie des espèces végétales.

Enfin, dans le chapitre 4, nous présenterons la mission terrain qui nous a servi à tester notre système, ainsi que les premiers résultats prometteurs obtenus en terme d'identification des espèces d'arbrisseaux et d'extraction de leurs paramètres biophysiques par des traitements de photogrammétrie\*.

Nous concluons ce mémoire par la présentation des perspectives offertes par notre travail pour l'extraction de paramètre de surface biophysiques et géophysiques comme la rugosité\* ou les mesures dendrométriques, ainsi que par celles des domaines industriels ou de recherche qui pourraient aussi profiter de notre système.



# Chapitre 1

## Cartographie de la végétation à l'échelle des individus : utilisation de la Réalité Terrain Étendue

### 1.1 Enjeux de la cartographie de la végétation

La cartographie de la végétation et de sa dynamique est un enjeu majeur aussi bien en agriculture que pour l'étude des écosystèmes. Dans ce mémoire, nous nous plaçons dans le contexte de l'étude de la biodiversité\* où cette cartographie est nécessaire pour comprendre les interactions complexes que l'on observe chez les espèces\* végétales entre elles, avec leur milieu et les espèces animales dont elles forment l'habitat.

Après avoir explicité ce contexte et soulevé les enjeux de cette cartographie, nous montrons comment les facteurs d'échelles\* conduisent à une cartographie confinée à l'observation manuelle et les problèmes que cette limitation engendre.

#### 1.1.1 Contexte de la biodiversité

L'année 2010 a été déclarée « Année internationale de la biodiversité » par l'assemblée des Nations Unies afin d'alerter l'opinion publique sur l'état et les conséquences du déclin de la biodiversité dans le monde[Biodiversité 2010]. Cette préoccupation politique et la médiation qui l'accompagne met plus que jamais en avant l'importance du travail des chercheurs qui désirent comprendre et à protéger les nombreuses richesses naturelles de notre planète.

Défini pour la première fois au Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992, le mot *biodiversité* est un terme récent qui décrit pourtant un phénomène aussi ancien que la vie elle-même.

La biodiversité est une notion complexe car elle comprend trois échelles interdépendantes : la diversité des milieux de vie, celle des espèces et celle des individus\* au sein de chaque espèce.

Elle peut être vue comme « l'ensemble des milieux naturels et des formes de vie (plantes, animaux, champignons, bactéries, virus. . .) ainsi que toutes les relations et interactions qui existent, d'une part, entre les organismes vivants eux-mêmes, d'autre part, entre ces organismes et leurs milieux de vie. »[[Biodiversité 2010](#)].

La diversité des milieux de vie se perçoit aussi bien dans la disparité spatiale que dans la multitude d'échelles d'analyses possibles du concept d'environnement. Si les différences de climat et de composition des sols et des océans, mêlées à l'influence anthropique ou à l'histoire biologique et géologique des lieux génèrent des milliers de paysages différents, il faut y rajouter une variété exponentielle à toutes les échelles : « une petite mare temporaire de quelques mètres carrés est un écosystème\* au même titre qu'une forêt de quelques centaines ou de quelques milliers d'hectares »[[Aguesse, 1971](#)].

Au sein de ces écosystèmes — qui regroupent l'ensemble du vivant et de la matière morte dans une unité fonctionnelle — on retrouve une profusion d'espèces végétales, animales ou bactériennes qui interagissent entre elles selon des processus complexes de prédation, de coopération ou de symbiose, mais qui modifient aussi leur environnement (et sont influencées par lui en retour) dans une dynamique sans fin <sup>1</sup>.

Enfin, au sein de chaque espèce — groupe d'êtres vivants inter-féconds possédant des caractères anatomiques, morphologiques et physiologiques communs — on retrouve encore une grande diversité, génétique et phénotypique <sup>2</sup>, au niveau des individus ; à la fois proche des autres membres de sa population, chaque individu est unique dans ses capacités et dans le potentiel transmissible dont il est porteur. La relation entre le génotype et le phénotype est souvent si complexe que même lorsque les biologistes sont d'accord sur la valeur délétère d'un phénotype (maladie génétique mortelle), les gènes incriminés ne peuvent pour autant pas être catégorisés comme néfastes pour l'espèce. [Jacquard \[1969\]](#) montre dans son livre sur la génétique des populations que la persistance des allèles récessifs porteurs de maladie dans les populations est probablement expliquée par une résistance accrue des porteurs hétérozygotes sains : la richesse d'une population est liée à sa diversité, bien plus qu'à la présence de gènes favorables.

L'étude et la préservation de la biodiversité forment par conséquent des champs de recherche aussi vastes que nécessaires et l'ampleur de la tâche semble montrer qu'aucun traitement exhaustif n'est envisageable. Si l'on sait aujourd'hui identifier environ 1,8 millions d'espèces, on estime qu'il en existe probablement dix fois plus[[Thomas, 2010](#)] et il en est de même des milieux de vie : il reste encore de nombreuses choses à découvrir et les moyens actuels, en terme de temps, de ressources ou de techniques, limitent fortement l'ambition des biologistes.

---

1. Le Dr. Damien Schoëvaert-Brossault (comm. pers.), biologiste et morphologiste à l'Université d'Orsay m'a un jour expliqué que « la vie est un état instable dynamiquement stabilisé ». L'aspect stable ou cyclique de la nature ne serait qu'une apparence, le mécanisme sous-jacent étant plus proche d'une lutte perpétuelle entre l'entropie et le vivant. Les structures et les répétitions perçues par notre sens commun serait alors une construction de notre cerveau, qui ne sait fonctionner que par généralisation.

2. En biologie, le phénotype est l'ensemble des caractères apparents, ceux-ci dépendant des facteurs héréditaires (génétiques) et de l'environnement[[CNRTL](#)].

### 1.1.2 Étude et protection des ressources naturelles

Les études menées par les biologistes peuvent être effectuées dans le cadre de plusieurs missions : leur mission de recherche afin d'approfondir nos connaissances du domaine ou leur mission sociale qui consiste à conseiller les acteurs sociaux sur la valeur d'un territoire en matière de patrimoine écologique.

En effet, dès le Sommet de la Terre en 1992 et la prise de conscience du fait que la dégradation des écosystèmes de part le monde était une atteinte irréversible au patrimoine mondial de l'humanité, une volonté nationale et internationale est apparue pour préserver une partie significative des territoires des États. Par exemple, la directive européenne [Natura 2000](#) incite les États membres à protéger au moins 10% de leur territoire autour de deux axes : la préservation de la biodiversité et la valorisation des patrimoines naturels.

Mais de l'identification de l'intérêt biologique d'un territoire (de part sa spécificité, sa richesse ou son impact favorable sur les autres territoires) au classement de ce territoire, le chemin est long où les biologistes ont la tâche ardue de fournir des données objectives dans des débats mêlant intérêt écologique, économique et politique.

L'identification des zones d'intérêt biologique provient souvent de l'immense accumulation d'observations léguées par les générations précédentes. On trouve en effet dans ces travaux séculaires la définition de grandes zones biogéographiques — découpage géographique selon la répartition des espèces — dont les espèces caractéristiques ont largement été documentées (collections, herbier) ainsi que la description de micro-habitats au sein de ces espaces dont les paramètres de surface\* (types de sol, humidité, exposition. . .) ont conduit à l'apparition d'espèces particulières, dites espèces endémiques, car on ne les trouve qu'à cet endroit.

Généralement, la frontière entre ces zones biogéographiques est très riche et diversifiée et l'on définit souvent des zones préservées à ces endroits afin d'essayer de protéger les deux milieux à la fois. Cependant, de par la nature intrinsèquement dynamique de ces frontières la notion de conservation (à l'identique) n'y est pas forcément facilitée.

Les zones d'intérêt biologique sont aussi proposées par les associations locales ou la Direction Régionale de l'ENVironnement (DIREN)\* qui fait alors appel aux biologistes qui cherchent à en identifier la valeur biologique. Comme on l'a vu précédemment, les recherches exhaustives ne sont pas envisageables et c'est par des repérages et des observations ponctuelles — basées sur une connaissance a priori des modèles biogéographiques et des techniques d'échantillonnage statistiques — que les scientifiques essayent d'identifier les caractéristiques de la zone. À nouveau, ce sont les ressources humaines et temporelles qui déterminent l'étendue de l'étude et la précision des résultats.

Une fois le débat entre les différents acteurs associatifs, économiques et politiques mené, la zone peut être classée selon de nombreux statuts : Réserve biologique, Forêt de protection de l'Office National des Forêts (ONF)\*, Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF)\*, Zone d'Intérêt Communautaire (Status [Natura 2000](#) de la Communauté Européenne) ou encore acquérir le titre prestigieux de Réserve de la biosphère décerné par l'UNESCO [[Davoust, 2010](#)].

Ces statuts définissent les contraintes de préservation qui pèsent sur les lieux. Par exemple, la convention [Natura 2000](#) exige une conservation de la biodiversité des espèces avec des bilans effectués tous les six ans [[Eionet](#)]. Ces exigences posent parfois des problèmes aux biologistes en charge de cette protection lorsque la dynamique naturelle de la zone est en contradiction avec la notion de préservation en l'état. En effet, si l'on cherche à observer et à préserver les plantes autochtones, généralement stables en opposition aux plantes envahissantes, il n'est pas toujours évident de distinguer ce qui est de l'ordre des cycles naturels (disparition cyclique de certaines plantes) de ce qui est lié à des changements « linéaires » : modifications de l'environnement dues au changement climatique ou simplement au changement d'usage lors du passage d'un usage agricole favorisant les milieux ouverts à celui d'abandon à l'état de nature.

Il faut alors étudier de près l'évolution dynamique des plantes pour comprendre les mécanismes complexes qui sont à l'œuvre et surveiller l'éventuelle disparition des espèces sous protection. C'est une des tâches de l'équipe Écologie et Gestion de la Biodiversité du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)\* avec qui nous avons étroitement collaboré et c'est pourquoi nous nous concentrerons par la suite sur les problématiques de la biodiversité végétale et du suivi de l'évolution dynamique des espèces et de leur milieu.

### 1.1.3 Cartographie de la dynamique de la végétation

La biologie recouvre un immense champ de recherche : de l'écologie qui prend en compte l'ensemble de la biosphère à la biochimie au cœur des cellules en passant, entre autres, par la taxinomie — la classification\* des êtres vivants —, l'anatomie ou la physiologie... On trouve parmi les attributions des biologistes sur le terrain : l'identification de nouvelles espèces, l'amélioration de la taxinomie, la conservation d'une espèce menacée ou encore la gestion d'un écosystème entier. L'étude de la dynamique des milieux naturels quant à elle, cherche à comprendre les interactions des espèces entre elles et avec leur milieu, ainsi que l'évolution dans le temps de ces interactions. Cela nécessite de s'appuyer aussi bien sur des connaissances en taxinomie et en physiologie qu'en climatologie, géologie ou pédologie...

Les besoins de cette discipline sont donc particuliers puisqu'elle exige à la fois un suivi spatial précis et une série d'acquisitions temporelles adaptées au rythme de vie des individus. L'identification et le suivi des paramètres de surface biophysiques (espèce, âge et état de santé des plantes...) et géophysiques (type de sol, humidité, exposition...) se traduisent généralement sous forme de cartes qui sont autant de représentations de l'état de la zone d'étude au moment de sa réalisation. Nous parlerons donc par la suite de la cartographie de la dynamique de la végétation et de ses contraintes logistiques et analytiques.

En botanique, où les espèces ont des espérances de vie relativement longues (environ 50 ans pour la callune\*, une centaine d'années pour un bouleau), la périodicité des cartes dynamiques est de l'ordre de trois à dix ans. La directive européenne [Natura 2000](#) exige un bilan tous les six ans, mais pour les zones hors de cette juridiction, la périodicité dépend surtout des moyens. Du point de vue des botanistes du MNHN, une périodicité de trois ans — qui n'est pas atteinte aujourd'hui — leur permettrait d'affiner leurs connaissances sur la dynamique de population et suscite un fort intérêt de leur part.

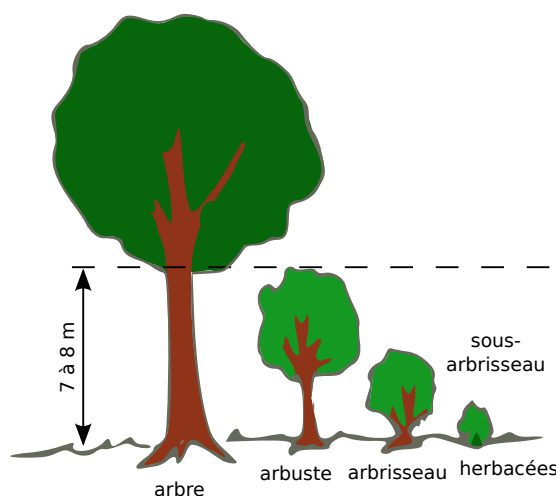



FIGURE 1.1 – Distinctions d'échelle entre les plantes. Source : Gademer 

Un autre point critique concerne la précision de cette cartographie. En effet, si les cartographies forestières peuvent s'appuyer en partie sur l'imagerie aérienne ou satellite [Houghton *et al.*, 2007; Muukkonen et Heiskanen, 2007], la cartographie des arbrisseaux\* et des herbacées\* ne pouvait être effectuée que par l'annotation manuelle lors des relevés terrain\*. On parle d'arbrisseau pour les plantes vivaces<sup>3</sup> ramifiées dès la base et de petite hauteur. Ces derniers ne possèdent pas de tronc principal distinct — ce qui les distingue des arbustes — leurs troncs multiples font généralement moins de cinq centimètres. Les herbacées, quant à elles, se définissent en opposition aux plantes ligneuses comme les arbres ou arbrisseaux qui produisent du bois. On retrouve ces distinctions sur la figure 1.1 p. 9. On comprend que la petite taille de ces plantes — entre 20 centimètres et 1 mètre —, ainsi que leur forte densité et degré d'intrication, ne permettent pas les approches classiques, basées sur l'interprétation des images de télédétection\*, qui sont utilisées pour dénombrer les arbres.

Cette cartographie manuelle a plusieurs conséquences : d'abord en termes de superficie couverte, car une cartographie submétrique sur quelques hectares peut durer plusieurs mois. À titre d'exemple, l'équipe du MNHN met environ cinq semaines à raison de deux botanistes pour couvrir les deux hectares de leur zone d'étude. Dans ces conditions, la moindre limitation de ressources se traduit alors très vite par une réduction de la zone cartographiée, pénalisant de ce fait la qualité statistique de l'étude finale.

Ensuite en termes de précision : le temps nécessaire à la description de chacun des individus étant prohibitif, les botanistes définissent alors des groupes phytogéographiques — relativement homogènes — qu'ils caractérisent spatialement avec une précision de l'ordre de 20 centimètres. Ces groupes sont des approximations des caractéristiques floristiques\* des individus : les plants de callune inférieurs ou supérieurs à 40 centimètres par exemple. Ils ne prennent cependant pas en compte l'éventuel mélange des espèces au sein d'un groupe, la

3. Une plante vivace possède un cycle de vie qui dépasse deux ans, en opposition aux plantes annuelles et bisannuelles.

densité des individus, leur âge précis ou leur état de santé.

On notera aussi que, faute d'une visibilité statistique suffisante, les espèces peu représentées et/ou à durée de vie courte, comme la petite oseille\* ne peuvent pas intégrer la cartographie, au détriment de l'analyse de la biodiversité. Les jeunes pousses arborescentes ne sont souvent détectées qu'une fois l'arbre ayant atteint un stade avancé de maturité, ce qui limite l'analyse de la dynamique de reboisement. Concernant les paramètres de surface géophysiques, le problème est identique. Si les cartes géologiques donnent une idée de la qualité des sols et que des mesures de pente locales permettent de calculer les conditions d'enseulement, de nombreuses informations comme l'humidité ou la rugosité\* des sols ne peuvent pas être acquises faute de temps.

Enfin, le risque de mauvaise classification doit être considéré car la discrimination fiable des espèces reste une problématique importante : certaines espèces ont des phénotypes proches, ce qui les rend difficiles à distinguer sans une observation minutieuse, qui ne peut être effectuée, faute de temps. Pour améliorer la discrimination, les botanistes s'appuient fortement sur les caractéristiques phénologiques des plantes, c'est-à-dire l'influence des variations climatiques sur les phénomènes cycliques de la plante, comme la germination ou la floraison : certaines plantes annuelles ou bisannuelles ne sont visibles que pendant une partie de l'année et chez les plantes vivaces, les espèces d'apparence proche se distinguent beaucoup plus clairement durant leur floraison. Comme elles ne fleurissent pas au même moment, le risque de confusion diminue. À l'inverse, ce risque est aggravé par l'étalement de la cartographie dans le temps : sur un mois de travail, les mêmes phénomènes phénologiques peuvent modifier l'apparence des plantes et perturber l'observateur. Ajoutons à cela que la cartographie manuelle est sujette à un fort biais subjectif qui augmente le degré d'incertitude sur les données lors de la comparaison de cartes de la même zone d'étude mais réalisées sans concertation par des observateurs différents.

La phénologie\* c'est-à-dire la compréhension des interactions entre le climat, les saisons et la dynamique des espèces n'est aujourd'hui qu'à ses débuts. [Morissette et al. \[2008\]](#) précisent le besoin fondamental de diversifier les travaux de recherche dans ce domaine à des échelles différentes : si la télédétection spatiale\* permet des observations sur de grandes échelles spatiales et temporelles, elle manque généralement de précision pour comprendre les phénomènes complexes en jeu, et on observe un fort intérêt pour des outils permettant une observation locale non intrusive.

On retiendra que la cartographie manuelle des groupes phytogéographiques est un travail minutieux qui doit s'adapter aux cycles naturels des espèces que l'on cherche à identifier et que si une approche floristique, basée sur les individus serait beaucoup plus riche et plus intéressante pour les botanistes, elle reste souvent inaccessible avec les moyens actuels à leur disposition.

## 1.2 Concept de Réalité Terrain Étendue

Nous venons de voir que la cartographie des espèces végétales à l'échelle des individus de petites tailles, comme les arbrisseaux et les herbacées, nécessitait une observation minutieuse

incompatible avec les méthodes de télédétection classiques.

On peut cependant espérer que l'évolution des technologies permette bientôt d'intégrer les techniques d'imagerie aux méthodes de relevés terrain et ainsi d'étendre les capacités d'acquisition des données de réalité terrain.

Afin de comprendre l'apport de la télédétection pour l'extraction de paramètres de surface à l'échelle des individus, nous commencerons par présenter les méthodes manuelles couramment utilisées lors des relevés terrain, ainsi que leurs limites, puis nous formaliserons ce que recouvre le concept de Réalité Terrain Étendue (RTE)\*. Nous finirons en examinant quelques travaux actuels qui tendent à confirmer la faisabilité de notre démarche.

### 1.2.1 Méthodes actuellement utilisées

Nous avons vu que la pratique du relevé terrain est un pilier de la recherche scientifique, mais son importance s'est encore accrue avec l'accès aux méthodes de télédétection qui permettent d'observer une zone d'étude située à des milliers de kilomètres sans se déplacer et à un coût réduit<sup>4</sup>. Le principal problème posé par la télédétection est que chacune des mesures est la synthèse de milliers d'informations — un pixel du capteur du satellite météorologique Météosat Seconde Génération (MSG)\* couvre une surface de 9 kilomètres carrés — et l'interprétation des données aux échelles les plus vastes sont fortement spéculatives.

Pour étayer ces théories, les chercheurs ont donc eu besoin de valider ponctuellement l'adéquation entre l'image et le monde réel : c'est alors que le relevé terrain est devenu l'occasion de définir une réalité terrain\* qui validait par l'observation et l'expertise les propriétés des paramètres de surface prévues par les systèmes de télédétection.

Pour autant, la mesure et l'identification de ces paramètres de surface sur le terrain n'en est pas moins difficile, coûteuse et fastidieuse. Les ressources humaines, temporelles et financières consacrées limitent en conséquence l'étendue de cette réalité terrain

Les chercheurs sur le terrain sont armés d'une panoplie d'instruments : calepin de notes, appareils photo numériques, inclinomètre — pour la mesure des pentes —, rugosimètre — pour la mesure d'un profil\* —, radiosimètre — pour la mesure de la signature spectrale\* — mais aussi règles et autres appareils de mesures divers selon les spécialités.

Toutes ces mesures sont géolocalisées, c'est-à-dire placées sur une carte, soit par un quadrillage — la zone d'étude est quadrillée avec des cordes selon un espacement régulier, charge au cartographe de se repérer relativement aux intersections — soit avec des outils technologiques comme les récepteurs GPS\* qui fournissent les coordonnées géographiques\* ponctuelles de l'endroit de la mesure par trilatération grâce à une constellation de satellites. Lorsque la précision nécessaire est millimétrique, la topométrie fournit des méthodes de localisation mais celles-ci sont très longues et fastidieuses malgré les outils récents.

On distingue donc trois types de mesures :

- les mesures ponctuelles,

---

4. On parle évidemment du coût d'accès à l'image, le coût d'investissement pour développer et maintenir la technologie étant principalement supporté par les États.





**FIGURE 1.2** – *Mesure ponctuelle.* — (a) Un écologiste forestier mesure le diamètre des arbres près du Smithsonian Environmental Research Center. Source : ©K. Bauer/SERC — (b) Carottage des sols par les membres du MNHN Source : ©B. Riera/CNRS-MNHN

- les mesures linéaires, selon un profil,
- les mesures surfaciques.

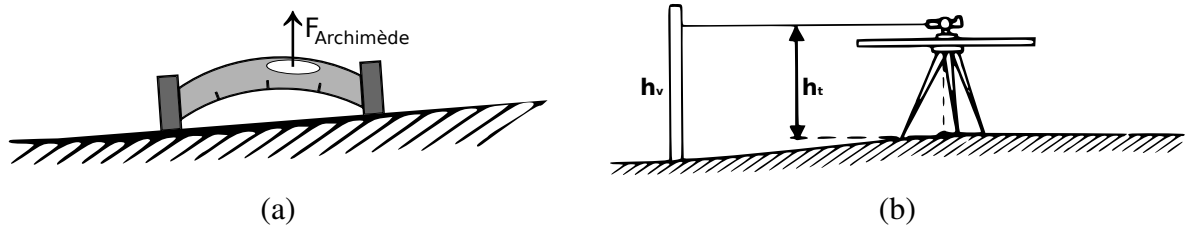
Les mesures ponctuelles sont généralement utilisées pour caractériser les propriétés d'individus ou d'objets dont la répartition spatiale peut-être assimilée à un point à l'échelle de la carte : arbres isolés, prélèvements... Elles fournissent alors une synthèse des propriétés valables pour l'ensemble de l'individu (comme l'espèce de l'arbre par exemple). On voit sur la figure 1.2 p. 12 des exemples de mesures ponctuelles lors d'un relevé terrain : mesure du diamètre d'un arbre (a) ou prélèvement d'une carotte pédologique pour l'analyse de la composition des sols (b).


Les mesures linéaires sont utilisées pour caractériser les propriétés d'éléments assimilables à des portions de droites, comme les réseaux : rivières, routes ou réseaux électriques. Les mesures linéaires s'appuient généralement sur un ensemble de points alignés, mais elles ne cherchent pas tant à caractériser les points que la variation entre ces points. Pour prendre un exemple : si une mesure ponctuelle sur la route peut concerner le type de revêtement, une mesure linéaire essaiera de rendre compte de la pente.

Certaines mesures linéaires sont obtenues en interpolant l'information obtenue entre deux mesures ponctuelles : on peut caractériser la pente soit directement avec un inclinomètre — qui mesure l'inclinaison —, soit par l'interpolation de la différence des hauteurs, obtenues de manière ponctuelle, comme l'illustre la figure 1.3 p. 13.

Enfin, un grand nombre de phénomènes ne présentent pas de géométrie particulière et varient de manière continue dans l'espace : comme la rugosité des sols, la quantité de biomasse dans une forêt ou l'extension d'une espèce donnée au sein d'un écosystème.

Pour caractériser de tels phénomènes, on utilise généralement une combinaison des deux méthodes de mesures précédentes : soit l'on assimile des surfaces homogènes en individus — par exemple en définissant des groupes phytogéographiques — et on effectue des mesures



**FIGURE 1.3** – Mesure linéaire — (a) Mesure directe de la pente avec un inclinomètre. Source : Gademmer , basé sur Wikimedia/Ttrung — (b) Interpolation de la mesure de pente par différence des hauteurs avec un goniographe. Source : [aftopo.org](http://aftopo.org)

ponctuelles pour chaque groupe pour déterminer ses caractéristiques moyennes, soit l'on cherche à interpoler l'information surfacique à partir de mesures linéaires ou ponctuelles réparties régulièrement.

La figure 1.4 p. 14 illustre cette mesure surfacique par segmentation : on voit que chaque groupe phytogéographique est déterminé par la surface d'un polygone. Les caractéristiques de ces groupes sont ensuite déterminées par observations ponctuelles.

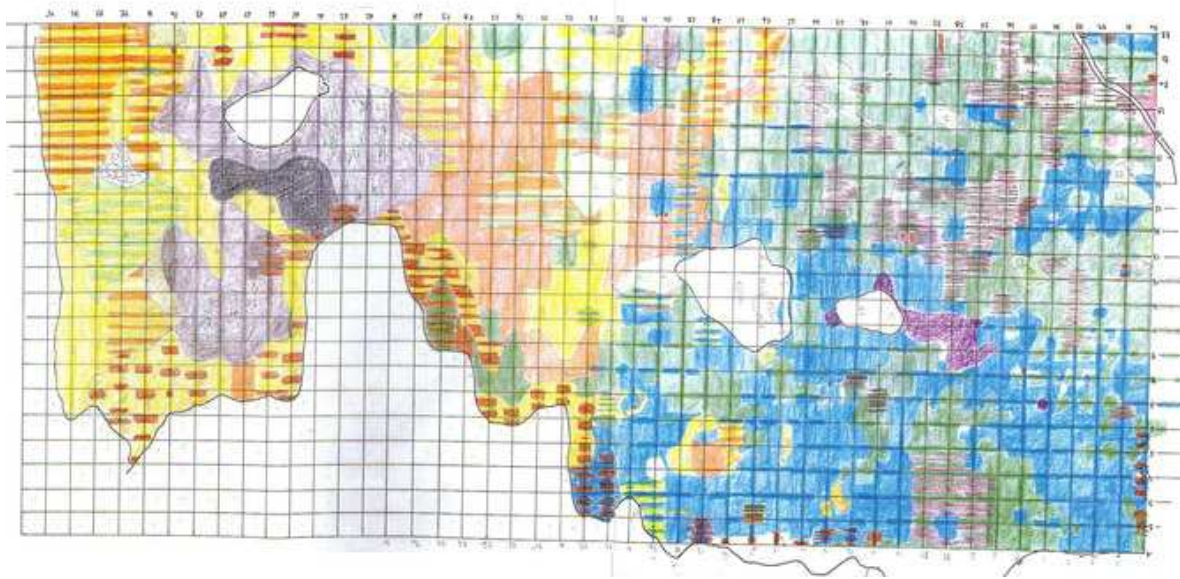
Une autre méthode consiste à échantillonner la surface avec des mesures ponctuelles ou linéaires et à interpoler les données pour obtenir une information surfacique. L'exemple de la rugosité des sols, illustré par la figure 1.5 p. 14 est caractéristique. La rugosité des sols peut être vue comme le caractère non-lisse ou non-rectiligne de la surface et donc être partiellement caractérisée par la variation locale de pente selon un profil. On mesure classiquement ce profil de hauteur avec un rugosimètre. Le rugosimètre à aiguille, illustré par la figure 1.5 (a), utilise un processus mécanique pour déterminer les hauteurs relatives et donc le profil de pente. La version laser (b) p. 14 mesure la variation des distances par rapport à un rail horizontal afin d'avoir la même information. Pour obtenir une information surfacique, on répète la mesure linéaire régulièrement et on applique une deuxième interpolation entre les profils.

Nous venons de voir que les mesures de réalité terrain surfaciques nécessitent de fortes approximations. La multiplication des mesures ponctuelles et linéaires rend leur acquisition extrêmement longue et coûteuse. On peut cependant imaginer une alternative : la photogrammétrie, technique qui cherche à retrouver les notions de distance et de volume à partir de plusieurs images montrant les perspectives de ces objets, a depuis longtemps démontré sa capacité à extraire le volume d'objets bidimensionnels.

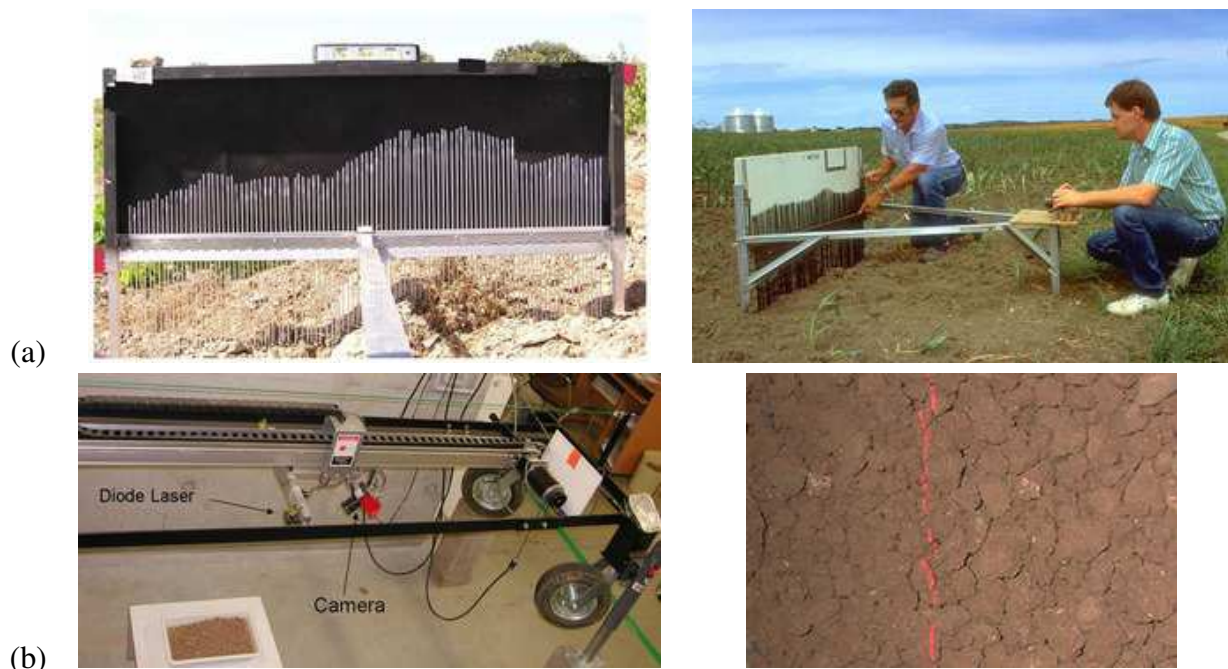
Son usage permet la caractérisation de phénomènes surfaciques continus sans introduire la notion de profils. Elle permet en effet de générer directement des données raster, c'est-à-dire sous la forme d'une grille de mesures bidirectionnelles. Si une interpolation entre les mailles de la grille est toujours nécessaire, la donnée raster — dont on peut voir une illustration sur la figure 1.6 p. 15 — est plus proche de l'objet réel que l'accumulation de profils.

Par l'acquisition d'images à la verticale, la télédétection est l'outil privilégié de la photogrammétrie et permet un gain de temps considérable par rapport aux mesures ponctuelles.

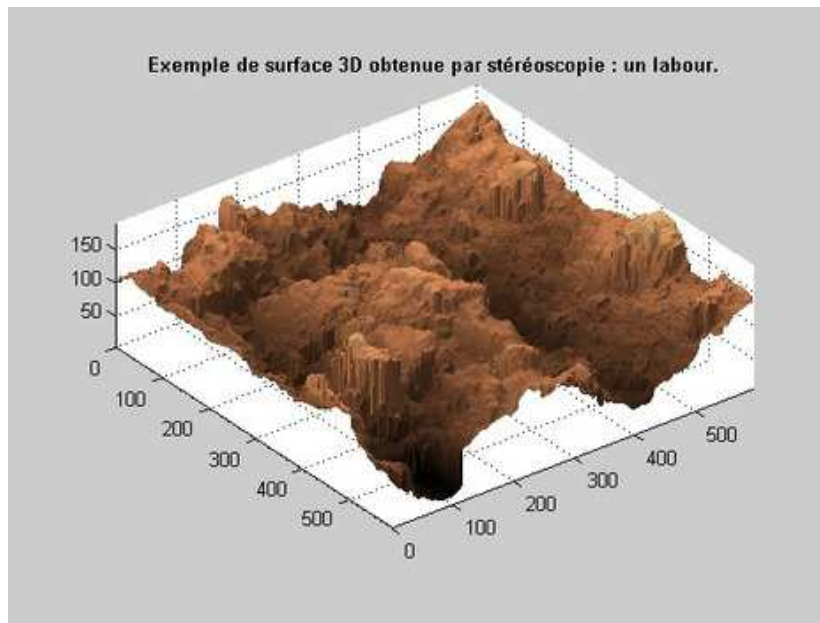
On a vu cependant que la télédétection classique posait le problème de l'adéquation au réel, notre problématique revient alors à obtenir des images de télédétection suffisamment



**FIGURE 1.4** – *Mesure surfacique par segmentation manuelle. Chaque groupe phytogéographique est déterminé par la surface d'un polygone et un ensemble de caractéristiques obtenues par des observations ponctuelles. Source : ONF [2000]*



**FIGURE 1.5** – *Mesure surfacique par interpolation : exemple de la rugosité des sols — (a) Rugosimètre à aiguilles qui permet de déterminer un profil linéaire de hauteur. L'information surfacique est obtenue par la multiplication des profils. Source : [weru.ksu.edu](http://weru.ksu.edu) — (b) Rugosimètre laser. Basé sur le même principe que le rugosimètre à aiguilles mais le balayage des profils est automatisé. Source : ©F. Darboux/INRIA*



**FIGURE 1.6** – Données raster acquises par photogrammétrie. Représentation 3D de la hauteur du sol sur un échantillon de sol labouré. Source : [Gademer \[2005\]](#); [Ciarletti et al. \[2006\]](#) -CETP

précises pour pouvoir être analysées à l’œil sans ambiguïté par les spécialistes, comme s’ils étaient sur le terrain, et permettre ainsi de faire des mesures de Réalité Terrain Étendue (RTE).

## 1.2.2 Formalisation du concept

Le concept de Réalité Terrain Étendue (RTE) peut donc être énoncé comme *une méthodologie permettant l’acquisition de données de réalité terrain, comme les paramètres biophysiques et géophysiques à l’échelle des individus, en utilisant les techniques avancées d’imagerie.*

Pour ce faire, elle mêle les avantages des pratiques de relevés terrain et de télédétection, synthétisés dans le tableau 1.1 p. 16. Des relevés terrain, on cherche à conserver l’absence de doute lors de l’analyse des données, l’aspect quantitatif des paramètres biophysiques et géophysiques observés ainsi que la souplesse d’adaptation aux conditions extérieures. On souhaiterait y ajouter dès lors les capacités de la télédétection à capturer un instantané de la scène au moment de l’acquisition — permettant une analyse différée ou comparée — ainsi que les possibilités qu’elle offre par l’automatisation des traitements photogrammétriques et la simplification des processus autorisant une réduction des coûts humains et une augmentation des surfaces étudiés.

L’idée d’utiliser des images acquises à une échelle plus petite pour servir de réalité terrain n’est pas nouvelle, [Böhm et Siegert \[1999\]](#) montrent dans leur article l’intérêt de photographies prises à la main à partir d’un petit avion pour l’interprétation d’images optiques et radar\* acquises par satellites. Ces images obliques, si elles autorisent la confirmation des hypothèses de travail, ne permettent cependant pas d’extraire des paramètres de surface. No-

Critère	Relevés terrain	Télédétection
Certitude	<b>Réalité terrain</b>	Interprétation d'un signal
Mesures	<b>Mesures directes</b> (taille, couleur...)	Estimées en fonction des propriétés du capteur
Horaires	<b>Adaptés à la phénologie des espèces</b>	Fixés par les contraintes orbitales ou administratives
Source de l'analyse	Instantanée et volatile	<b>Images pérennes</b>
Méthode de mesure	Manuelle	<b>Automatisable</b>
Répétabilité	Biais subjectifs	<b>Systématisation possible</b>
Durée de mission	Limitée par le facteur humain	<b>Prolongée par la possibilité d'analyse différée</b>

TABLE 1.1 – Comparaison des propriétés des relevés terrain et de la télédétection. En gras, les caractéristiques que l'on souhaite garder dans la RTE.

[gami et al. \[2002\]](#) utilisent quant à eux des outils de télédétection basse altitude\* comme les deltaplanes et les ballons à hélium avec le même objectif mais, là encore, les images ne peuvent être utilisées au-delà de l'interprétation visuelle. [Minekawa et al. \[2007\]](#) proposent cependant le développement d'un outil permettant l'acquisition des réponses spectrales de la végétation pour servir de réalité terrain aux images satellites. Néanmoins, cet outil est emporté par un camion-grue et ne répond pas au critère de souplesse opérationnelle désiré.

Comme nous le verrons au chapitre 2, les outils de télédétection basse altitude tendent à se généraliser et à se professionnaliser. Mais ils sont peu à peu vus comme des moyens classiques de télédétection et la question de la réalité terrain est cantonnée à celle mesurée lors des relevés terrain réalisés pour la validation des données.

Par ailleurs, mis à part les travaux en agriculture de précision [[Gée et Assémat, 2007](#); [Paoli et al., 2007](#)], il est exceptionnel de considérer les végétaux plus petits que les arbres à l'échelle des individus et de prendre en compte leurs caractéristiques biophysiques. C'est pourquoi nous proposons le concept de Réalité Terrain Étendue (RTE) qui nous semble être une piste de recherche prometteuse concernant l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques en général et pour la cartographie de la végétation à l'échelle des individus en particulier.

### 1.3 Contraintes posées par la cartographie de la végétation à l'échelle des individus

Partant du constat précédent, nous nous sommes d'abord employés à identifier les contraintes posées par cette cartographie et par l'extraction des paramètres de surface biophysiques et géophysiques qui en découlent.

### 1.3.1 Discrimination des espèces

L'action cartographique est intrinsèquement liée à la notion de classification ; les cartes sont une représentation symbolique du monde. Celui-ci est vu à travers une ontologie\*, un filtre qui simplifie et synthétise l'information que l'on cherche à représenter et analyser. Les cartographes déterminent des groupes symboliques que l'on nomme « classes » et cherchent à faire rentrer leurs observations dans l'une ou l'autre de ces classes : ce qui ne rentre pas dans les classes prédéfinies, et ne mérite pas l'adjonction d'une nouvelle classe, disparaît de la représentation.

La classification peut être effectuée à la main, de manière automatique avec des exemples prédéfinis — on parle alors de classification supervisée\* — ou de manière automatique sans a priori — on parle alors de classification non supervisée — mais quelle que soit la méthode de classification, elle repose sur la capacité à discriminer l'appartenance des observations aux différentes classes, c'est-à-dire à identifier de manière catégorique les critères spécifiques associés aux différents groupes symboliques ; dans notre cas, les différentes espèces de plantes.

#### 1.3.1.1 Signature spectrale

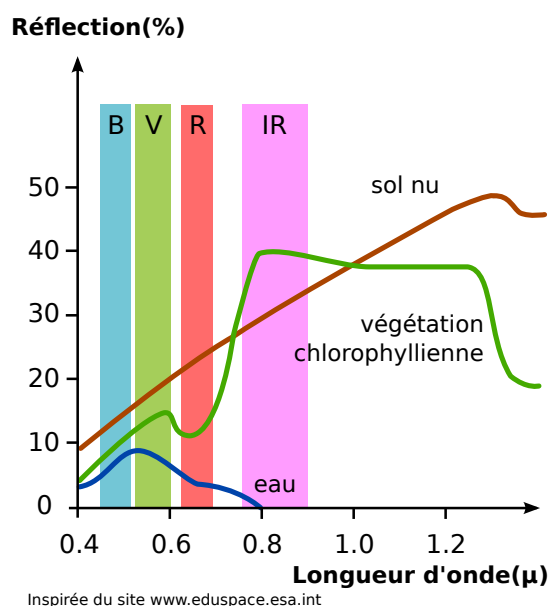
Le premier critère de discrimination en imagerie, lorsque l'on cherche à cartographier la végétation, est la réponse spectrale des différentes classes.

Rappelons que la signature spectrale correspond au spectre électromagnétique émis (ou réfléchi) par un objet et que celle-ci dépend majoritairement de la composition chimique et structurale de l'objet ainsi que du type et de l'orientation de la source d'éclairément. La figure 1.7 p. 18 montre des exemples de signatures spectrales courantes. On constate rapidement l'étendue des possibilités pour distinguer les différents éléments d'une scène et effectuer de ce fait une classification automatique.

Si l'opérateur humain perçoit uniquement les variations dans le spectre visible — la couleur de la plante et de ses fleurs —, l'invention de capteurs percevant plus largement les longueurs d'ondes émises ouvre d'autres possibilités de discrimination : on perçoit distinctement sur la figure 1.7 que c'est autour de la différence d'émission entre la lumière rouge — absorbée par la chlorophylle — et la lumière proche-infrarouge — rejetée massivement par la feuille — que la distinction entre le sol et la végétation va être maximale.

Cette caractéristique est en effet utilisée dans de très nombreux exemples de classifications qui comparent le canal rouge des images visibles aux images prises dans le proche infra-rouge pour en tirer un indice quantitatif, le plus courant étant l'indice de végétation normalisé (NDVI). En fonction de l'échelle d'observation, les applications sont diverses : distinction végétation / sol nu pour les pulvérisateurs d'engrais en agriculture de précision[Gée et Assémat, 2007], séparation végétation / bâtis sur les images aériennes[Sohn et Dowman, 2007] ou encore, à l'échelle du satellite, estimation de la production agricole à l'échelle du sous-continent indien[Milesi *et al.*, 2010].

Si la différence de signatures spectrales entre le sol, l'eau et la végétation est flagrante, des études plus récentes ont cherché à déterminer si l'on pouvait séparer les signatures des différentes espèces végétales. Les travaux de l'Inventaire Forestier National (IFN)\*[IFN, 2010a]



**FIGURE 1.7** – Signatures spectrales de l'eau, du sol nu et de la végétation chlorophyllienne. Ces réponses caractéristiques permettent la distinction de ces différentes classes depuis l'espace.

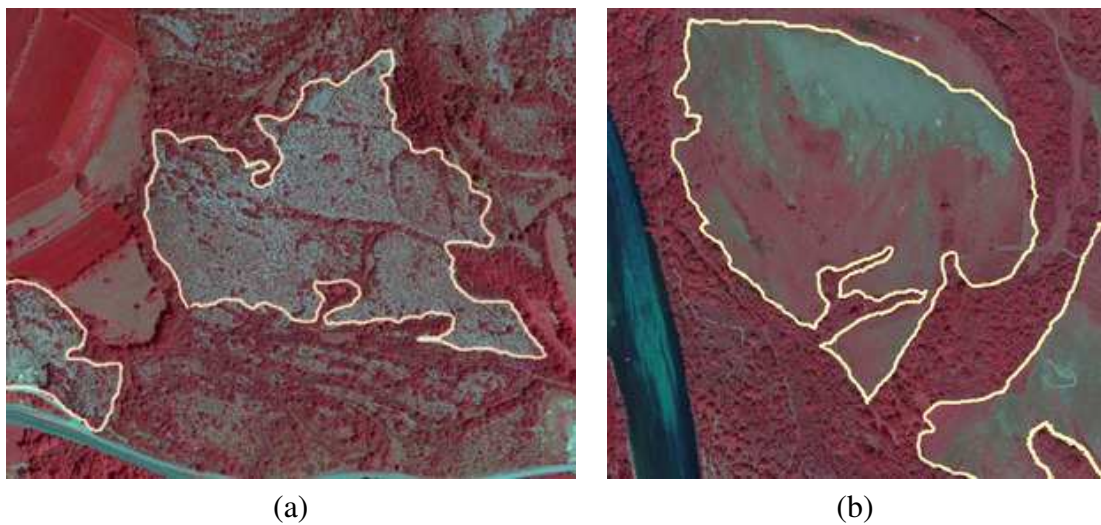
Source : Gademer , inspiré par [eduspace.esa.int](http://eduspace.esa.int)

montrent que la photo-interprétation d'images prises dans l'infrarouge proche permet effectivement une distinction significative entre les grandes familles de plantes : les feuillus, les conifères, les arbrisseaux ligneux et les herbacées, bien que celle-ci soit généralement insuffisante pour déterminer, à elle seule, les espèces au sein de ces catégories [IFN, 2010b].

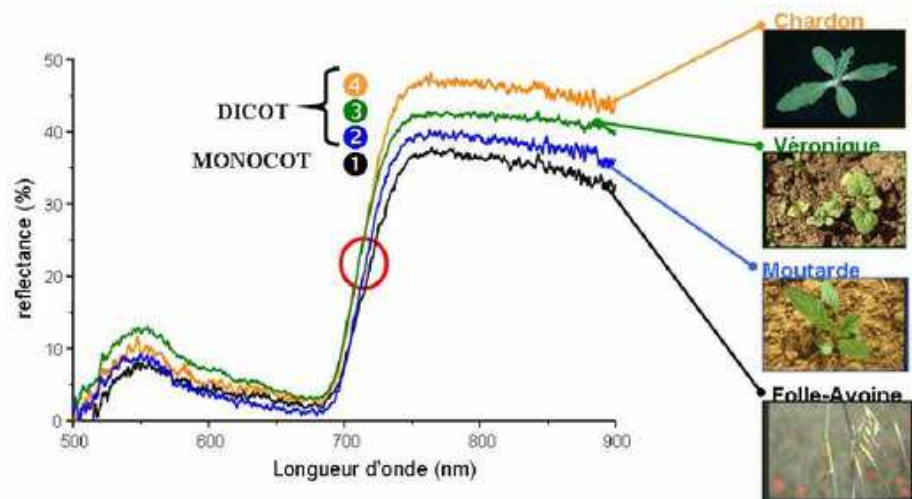
Quackenbush *et al.* [2006] notent cependant que la classification spectrale est d'autant plus difficile que la taille de l'échantillon au sol\* des images augmente ; en effet cette taille, correspondant à la projection au sol de la scène vue par un unique pixel, augmente à la fois la variabilité de la scène et celle de l'illumination d'un même objet lorsqu'elle diminue. Un pixel présentant une taille de l'échantillon au sol de 20 mètres correspond à la moyenne des radiations émises et tend à avoir la signature caractéristique de l'élément majoritaire (végétation ou sol) tandis qu'un pixel submétrique, voir centimétrique, présente de nombreuses nuances — liées à l'illumination différente sur les feuilles, l'ombre projetée ou la présence du sol visible entre les branches — qui sont autant de signatures spectrales différentes pour le capteur, rendant difficile la généralisation et la classification spectrale.

À l'échelle des jeunes pousses, Vrindts [2000] a montré que l'utilisation d'au moins trois bandes spectrales, choisies préalablement, permettait dans des conditions de laboratoire de distinguer les espèces monocotylédones des espèces dicotylédones<sup>5</sup>. À partir de ces travaux,

5. Les monocotylédones et les dicotylédones sont les deux grands sous-ensembles des angiospermes (plantes à fruit). La distinction se fait sur le nombre de cotylédons dont est composé leur embryon mais a de nombreuses répercussions sur les processus biologiques. De manière approximative, on notera que les monocotylédones ont des tiges avec une structure de fibres éparées contrairement aux dicotylédones qui ont des zones concentriques et un canal médullaire.

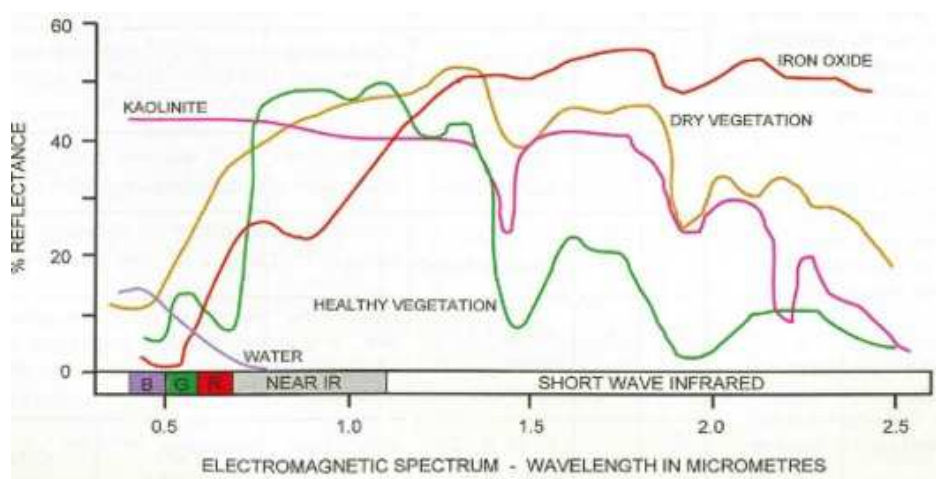


**FIGURE 1.8** – Image fausse couleur (Vert,Rouge,Proche IR) utilisée par l'Inventaire Forestier National pour faire leur cartographie de la végétation à l'échelle 1/20000 — (a) Délimitation d'une zone de lande (contenant une majorité d'arbrisseaux ligneux) — (b) Délimitation d'une formation herbacée (contenant une majorité d'herbacée). Source : IFN [2010a]

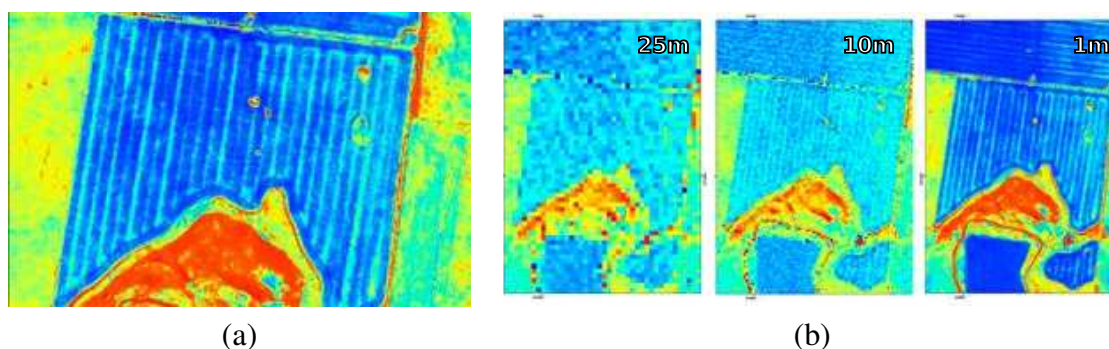


**FIGURE 1.9** – Signatures spectrales obtenues pour quatre types de plantes. Malgré des réponses extrêmement proche, certains auteurs estiment pouvoir distinguer les espèces à partir de leur signature spectrale. Source : Paoli et al. [2007]





**FIGURE 1.10** – Signatures spectrales de sources naturelles entre 400 et 2500 nanomètres. On remarquera la différence de signature entre la végétation chlorophyllienne active et la végétation sèche. Source : Geoimage, [geoimage.com.au](http://geoimage.com.au)



**FIGURE 1.11** – Indice NDVI calculé sur des images satellites. — (a) Évaluation de la qualité de l'épandage. En bleu foncé les plants de blé vigoureux, en bleu ciel/jaune les plants ayant moins reçu d'engrais. — (b) Ce type de calcul nécessite visiblement des images de très haute résolution pour être significatif. Source : Geoimage, [geoimage.com.au](http://geoimage.com.au)

Paoli *et al.* [2007] ont fait des essais en champ dont les résultats peuvent être vus sur la figure 1.9 p. 19. La difficulté majeure de ce procédé est liée à l'influence de l'orientation de la source lumineuse sur la mesure des signatures spectrales. Si les essais en laboratoire posent l'hypothèse d'une source de lumière parallèle à l'instrument de mesure, celle-ci n'est évidemment pas remplie en situation réelle où l'orientation de lumière solaire et la disposition des feuilles varient fortement.

Un dernier aspect de l'analyse spectrale de la végétation concerne l'état de santé des plantes observées. En effet, la signature spectrale principale des plantes étant liée à celle de l'absorption chlorophyllienne, les plantes déshydratées ou affaiblies par les parasites présentent généralement des signatures remarquables. La figure 1.10 p. 20 montre la signature spectrale de différents matériaux et l'on peut clairement visualiser la différence de signature entre les deux types de végétation (saine et sèche). La figure 1.11 montre une application de

cette méthode pour l'analyse des champs de culture ; en fonction de la quantité d'engrais reçue, les plants sur la gauche semblent plus vigoureux que ceux de droite. On notera que pour profiter d'une information significative il faut que la résolution de l'image soit sensiblement inférieure à la variation que l'on désire observer, ce qui privilégie la très haute résolution.

### 1.3.1.2 Aspect morphologique et textural

La notion de signature spectrale ne tient pas compte de l'arrangement spatial des informations radiométriques entre elles. À l'inverse, l'approche morphologique se base sur la reconnaissance des différents objets en fonction de leur forme.

Au départ, l'approche morphologique cherche à reprendre les techniques d'observation manuelles des botanistes sur le terrain : différencier les espèces en se basant sur le port de la plante, l'orientation, la taille et la forme de ses feuilles, de ses branches et de ses fleurs, ainsi que les points d'insertion de ces différents constituants.<sup>6</sup>

L'aspect le plus simple, décrit par [Bossu \[2007\]](#), consiste à utiliser des hypothèses sur la taille ou la disposition spatiale des éléments que l'on cherche à détecter, comme la linéarité des plantations par rapport à l'aspect désorganisé des adventices<sup>7</sup>. L'extraction de primitives spatiales dans les images — contours ou régions segmentées — permet aussi d'identifier des formes connues et de différencier des espèces caractéristiques. [De Mezzo et al.](#) proposent une reconnaissance de la forme et de la disposition de feuilles par l'appariement d'un modèle de contour de feuille déformable sur les primitives observées. Ces techniques, si elles utilisent parfois un pré-traitement radiométrique — comme un filtre végétation/sol — n'utilisent généralement pas l'information spectrale en tant que telle et sont par conséquent extrêmement sensibles aux recouvrements entre les végétaux ou aux formes inhabituelles, ce qui les rend difficiles à utiliser au-delà des champs de plantations.

En combinant l'information spectrale et spatiale, l'approche texturale tente de combiner les avantages des deux techniques précédentes. En cherchant à déterminer les motifs radiométriques caractéristiques de chaque espèce, les chercheurs espèrent pouvoir améliorer leur capacité de détection. [Burks et al. \[2005\]](#) annoncent dans leurs travaux une classification par réseaux neuronaux efficace à 90% pour un test avec cinq espèces d'adventices, en se basant sur différents paramètres de co-occurrence dans le domaine visible<sup>8</sup>.

[Lu et al. \[2008\]](#) utilisent des images satellites et montrent l'avantage d'utiliser des critères de texture en plus des critères multispectraux pour la classification forestière. [Nelson et al. \[2009\]](#) utilisent une approche similaire pour l'interprétation d'images radar. Cependant, [Quackenbush et al. \[2006\]](#) relativisent l'utilisation du satellite en précisant que les classifications basées sur ces images ne sont valables que pour des régions de forêts où les zones sont fortement homogènes.

---

6. L'étude des points d'insertion des feuilles sur la tige est appelée phyllotaxie et est très importante pour la reconnaissance des espèces en taxonomie.

7. Les adventices sont les plantes qui poussent dans les champs sans y avoir été plantées. On les appelle communément les "mauvaises herbes".

8. À partir d'images visibles Rouge, Vert, Bleu, [Burks et al. \[2005\]](#) projettent les images dans le modèle Teinte, Saturation, Intensité avant de calculer ses statistiques spatiales. Il est intéressant de noter qu'il n'utilise pas d'informations proche-infrarouges dans son modèle.

Cette approche semble donc être prometteuse mais on notera deux contraintes fortes : la nécessité d'acquérir des images de très haute résolution pour pouvoir percevoir une information de détail sur les individus observés, tout en ayant conscience de l'impact de cette résolution sur les conditions d'éclairage des individus, car comme tous les modèles utilisant l'information spectrale, ceux-ci sont sensibles à l'orientation de la source lumineuse.

### 1.3.1.3 Approche 3D

En botanique, un dessin permet généralement d'identifier une plante plus efficacement qu'une photographie. En effet, l'artiste rehausse l'effet de relief de son dessin — élément essentiel pour l'observation — alors que la projection de l'image sur le fond de chambre tend à écraser les reliefs.

On identifie plusieurs méthodes pour retrouver l'information de volume :

[Quackenbush et al. \[2006\]](#) et [Bergen et al. \[2009\]](#) précisent les avantages de capteurs actifs comme le radar et le LiDAR\* pour l'analyse forestière ; par leur capacité à pénétrer la canopée et à donner des informations sur la structure verticale de la végétation, ces capteurs permettent d'identifier avec plus de précision le type de forêt et sa composition.

D'un autre côté, [Rovira-Más et al. \[2005\]](#) utilisent les techniques de stéréorestitution\* sur des images aériennes pour calculer la hauteur des différents éléments de la scène et en déduire un modèle 3D. Appliquée à des champs de blé, la stéréorestitution permettrait selon eux une meilleure identification de la biomasse et de la santé des cultures.

Au niveau du sol, [Piron et al. \[2008\]](#) cherchent à utiliser la stéréoscopie pour distinguer les adventices des cultures. Selon eux, la classification basée sur la notion usuelle de distance à la caméra est très insuffisante et ils proposent de considérer à la place la notion de hauteur réelle par rapport au sol. Par une mesure précise des paramètres géophysiques et biophysiques, ils atteignent un taux de classification prometteur de 83%.

De manière générale, les chercheurs du MNHN semblent extrêmement intéressés par l'idée de pouvoir extraire en même temps des paramètres géophysiques — rugosité, distance au sol — et biophysiques — hauteur des plantes, meilleure détection des contours des individus, de leur port — par l'acquisition d'images stéréoscopiques, mais cette voie de recherche est encore, à notre connaissance, extrêmement neuve car l'acquisition de ces images à la résolution désirée est encore très rare.

## 1.3.2 Contraintes opérationnelles

On a vu dans la section précédente qu'il existait de nombreuses méthodes d'identification manuelles ou automatiques des différentes espèces végétales à des fins de classification et de cartographie, et l'on a aussi vu que les résultats de celles-ci dépendaient fortement de la qualité des images fournies en termes de résolution spatiale mais aussi de disponibilité des informations spectrales. Dans leurs travaux, [Quackenbush et al. \[2006\]](#) mettent en garde contre une course à la résolution sans réflexion sur les conditions opérationnelles au moment de la prise de vue.

Vioix [2004] et l'IFN [2010b] montrent dans leurs recherches que le choix du moment de prise de vue est aussi essentiel pour améliorer les capacités d'identification des différentes espèces. En effet, selon la période d'acquisition, certaines disparités s'accroissent à cause de la différence dans les rythmes biologiques des différentes espèces : on appelle cela la phénologie.

Si l'observation du caractère cyclique des phénomènes naturels comme la floraison, la chute des feuilles ou la migration des animaux est très ancienne, son étude à grande échelle n'a été rendue possible que par l'apparition de la télédétection dans les années 1970. Reed *et al.* [2009] explicitent les capacités des satellites pour détecter l'influence du climat sur la phénologie des plantes et en particulier à déceler la croissance végétale accompagnant l'arrivée du printemps. Ils notent cependant des critères pénalisant une identification fiable comme les perturbations atmosphériques ou la fonte de neiges par exemple qui se contentent de découvrir une végétation existante. Delbart *et al.* [2006] précisent par ailleurs comment distinguer la croissance végétale de la fonte des neiges par l'utilisation de certains canaux multispectraux.

Inversement, la phénologie permet aussi de définir le moment le plus adéquat pour lancer les traitements phytosanitaires et planifier les dates des récoltes [Sivadon, 2008].

À l'autre bout de la chaîne, l'observation locale reste encore la seule à pouvoir fournir des informations précises sur la phénologie des espèces, même si, comme le montrent Morissette *et al.* [2008], il existe de nombreux systèmes de mesure non intrusifs au niveau du sol ou à basse altitude\* qui permettent une fréquence temporelle de données beaucoup plus importante que les mesures manuelles ou satellites. Par exemple, Richardson *et al.* [2009] ont développé un système d'observation du couvert forestier basé sur un réseau de webcams et disposent ainsi de données mesurables et comparables sur de longues séries temporelles ce qui leur permet d'estimer l'influence des conditions climatiques sur de nombreux phénomènes phénologiques comme la pousse, la coloration et la chute des feuilles.

De nouvelles pistes semblent montrer que la phénologie pourrait, en contrepartie, aider la télédétection dans sa tâche de cartographie. Zimmermann *et al.* [2007] utilisent les différences de début et de fin de couverture foliaire pour distinguer une vingtaine d'espèces d'arbres différents avec des résultats prometteurs : les modèles prédictifs développés gagnent en fiabilité avec l'usage des données de télédétection. Par ailleurs, Wilfong *et al.* [2009] montrent que la différence phénologique entre les deux espèces d'arbres — quatre semaines de décalage entre la défoliation des deux types d'arbres — leur a permis de cartographier l'avancée de l'espèce envahissante par rapport à l'espèce locale. Boureau [2008] explique quant à lui que si la majorité des photographies aériennes sont prises en été, lorsque le soleil est le plus haut par rapport à l'horizon, pour éviter de trop grandes ombres portées et parce que, l'activité chlorophyllienne battant son plein, c'est la période la plus propice à la distinction du sol et de la végétation ; c'est bien au début du printemps ou en automne, lorsque les espèces sont en période de débourrage — lors de la sortie du bourgeon —, de floraison ou de sénescence des feuilles que l'identification des espèces entre elles est maximale. Il indique aussi que l'influence du soleil sur les ombres étant moins grande en terrain plat ou en versant sud, c'est dans ces zones que l'identification des espèces basée sur la phénologie est envisageable. En conclusion, pour tous les cas où les espèces à cartographier ont des

caractéristiques morphologiques ou spectrales proches, l'utilisation de la phénologie devrait permettre d'améliorer de manière significative la distinction entre les espèces et permettre une cartographie entre les individus.

Cela implique de pouvoir adapter précisément l'acquisition d'images aux cycles biologiques des phénomènes observés : certaines fleurs ne s'ouvrent qu'à une certaine heure du matin, de l'après-midi ou du soir et l'orientation des feuilles peut aussi suivre le cycle du soleil ce qui influencera fortement la manière dont elles seront perçues dans les images. De la même manière, les floraisons successives dépendront fortement de la période de l'année, nécessitant à la fois une précision temporelle mais aussi la possibilité de faire plusieurs acquisitions répétées pour fournir les informations suffisantes à la réalisation d'une même carte d'occupation des sols.

Enfin, les aléas météorologiques influençant aussi les cycles phénologiques, la possibilité de maintenir des conditions d'acquisitions similaires et de s'adapter à l'imprévisible sans augmenter de manière significative le coût des opérations serait un atout majeur.

### **1.3.3 Résolution et identification de la végétation**

En observant le cas d'étude proposé par le MNHN décrit au chapitre 4, on observe plusieurs contraintes fortes qui sont caractéristiques de la cartographie de la végétation à l'échelle des arbrisseaux comme ceux que nous cherchons à étudier.

La question de la résolution minimale des images permettant une identification manuelle de ces espèces et celle, probablement plus fine, nécessaire à leur identification par des processus automatiques de traitement d'image n'est pas une question simple et mérite que nous éclaircissions tout d'abord quelques termes.

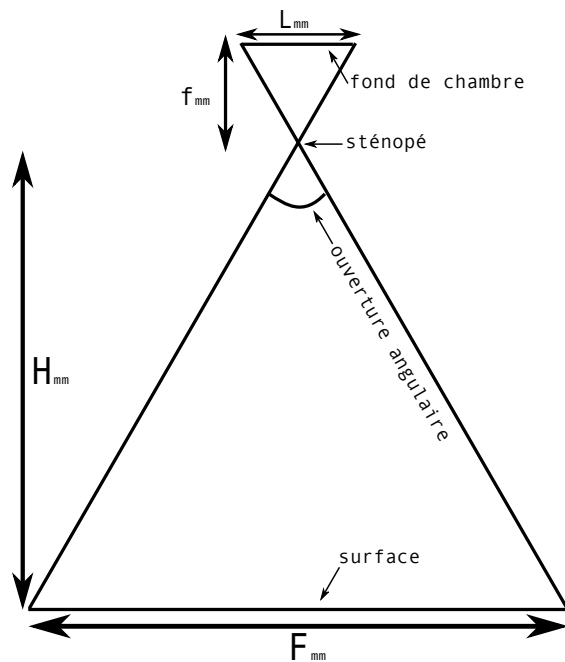
#### **1.3.3.1 Échelle, résolution des capteurs et taille de l'échantillon au sol**

Héritée de la cartographie, la notion d'échelle peut être définie comme le rapport entre la taille de l'objet réel et celle de sa représentation : sur une carte à l'échelle 1 :20000, un centimètre de distance mesuré correspond à 200 mètres sur le terrain. Considérant qu'on peut reconnaître un objet sur une carte jusqu'à 0,2 millimètre, on considère que le plus petit objet représentable sur une telle carte fait au moins 4 mètres.

Comme l'indique [Comer \*et al.\* \[1998\]](#), la notion d'échelle perd malheureusement énormément de son sens avec l'arrivée des données numériques, car l'échelle de représentation dépend alors du média (papier ou écran) sur lequel l'information est représentée et peut varier au moindre clic de la souris.

Pour parler de la précision des données numériques on s'appuie sur la notion de taille de l'échantillon au sol, ou Ground Sample Distance (GSD)\* en anglais.

Cette notion peut elle-même être sujette à l'ambiguïté et on distinguera la taille de l'échantillon au sol lors de l'acquisition et celle qui correspond à l'image fournie à l'utilisateur.



**FIGURE 1.12** – Rapport entre la hauteur sol, les caractéristiques de l'appareil photographique et la fauchée. Source : Gademer

Pour calculer la taille de l'échantillon au sol lors de l'acquisition on identifiera tout d'abord l'échelle de la caméra  $E_{cam}$ .

En effet, selon [Hartley et Zisserman \[2004\]](#), le modèle optique des caméras peut être décrit par le modèle du sténopé (appelé *pin-hole* dans la littérature anglo-saxonne et illustré sur la figure 1.12 p. 25), selon lequel une caméra à lentille peut être approximée par une ouverture ponctuelle (le sténopé) par laquelle l'ensemble des rayons lumineux passent. L'ouverture angulaire de la caméra forme alors un double triangle entre le fond de chambre de la caméra et la surface prise en photographie que l'on suppose parallèle. Dans le cadre de ces approximations, le théorème de Thalès nous donne alors un rapport géométrique constant, que l'on nomme l'échelle de la caméra et que l'on trouve par le rapport entre la hauteur sol\*  $H_{mm}$  et la focale\*  $f_{mm}$ , mais aussi entre la taille d'un photosite\*<sup>9</sup>  $p_{mm}$  et la taille de l'échantillon au sol  $GSD_{mm}$  ou encore entre la largeur du fond de chambre  $L_{mm}$  et la fauchée\*  $F_{mm}$ , c'est-à-dire la largeur totale de la surface vue sur une image.

On a donc :

$$E_{cam} = \frac{f_{mm}}{H_{mm}} = \frac{p_{mm}}{GSD_{mm}} = \frac{L_{mm}}{F_{mm}} \quad (1.1)$$

Pour un capteur numérique, la taille d'un photosite, notée  $p_{mm}$  peut aussi être estimée comme le rapport entre la résolution en pixel du capteur, notée  $R_{pix}$  et sa largeur, notée  $L_{mm}$ .

9. Un photosite est un capteur photosensible élémentaire dont l'assemblage forme le capteur numérique. En première approximation on peut considérer que chaque photosite correspondra à un pixel dans l'image.

Les valeurs courantes de taille de pixel varient entre six et huit microns selon la technologie employée.

$$p_{mm} = \frac{L_{mm}}{R_{pix}} \quad (1.2)$$

En intégrant les équations 1.1 et 1.2, on peut en déduire deux autres définitions de la taille de l'échantillon au sol :

$$GSD_{mm} = \frac{p_{mm}}{f_{mm}} \times H_{mm} = \frac{L_{mm}}{R_{pix} \times f_{mm}} \times H_{mm} \quad (1.3)$$

Notons aussi immédiatement le rapport entre la taille de l'échantillon au sol, la résolution en pixel du capteur et la fauchée  $F_{mm}$ , c'est-à-dire la largeur totale de la surface vue sur une image.

$$F_{mm} = \frac{L_{mm}}{p_{mm}} \times GSD_{mm} = R_{pix} \times GSD_{mm} \quad (1.4)$$

Un appareil photographique, comme l'Optio A40 de Pentax a un fond de chambre d'une longueur approximative de 5,7 millimètres par 7,6 millimètres et une focale réelle de 8,12 millimètres — équivalent à une focale équivalente\* de 37 millimètres sur une pellicule argentique<sup>10</sup> [Gademer, 2008]. Si l'on prend des photos  $3000 \times 4000$  (12 Mégapixels<sup>11</sup>) à 30 mètres du sol, on obtient :

$$GSD_{mm} = \frac{7,6}{4000 \times 8,12} \times 30 \cdot 10^3 \simeq 7mm$$

et une fauchée de 21 mètres ( $3000 \times 7 = 21000$  millimètres) de haut sur 28 mètres de large.

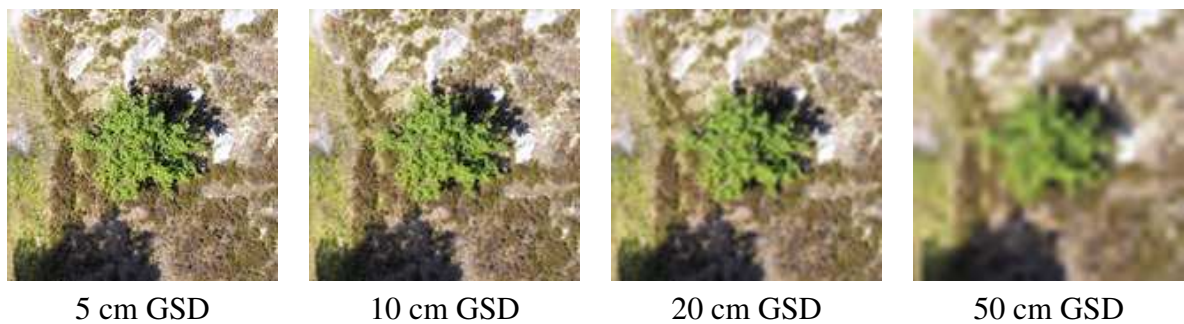
Mais les images ne sont que rarement affichées à l'échelle du capteur. Si l'on imprime cette photo avec une résolution de 300 dot per inch (dpi)\* — soit 300 pixels pour un pouce, la taille du pixel  $p_{mm}$  est donc de 0,085 millimètres — elle fera 34 centimètres de large, soit une échelle d'affichage, notée  $E_{aff}$ , de 1 : 80.

$$E_{aff} = \frac{p_{mm}}{GSD_{mm}} \quad (1.5)$$

Si l'on affiche cette image « à pleine résolution » sur un écran, la taille du pixel pour une dalle LCD moyenne étant aujourd'hui de 0,2 millimètres [PRISMO, 2010], on obtient une échelle d'affichage de 1 : 35.

10. L'information donnée par la focale sur le champ de vision de l'appareil n'ayant de sens que par rapport à la largeur du fond de chambre et celle-ci étant devenue variable depuis le passage au capteur numérique, on calcule la focale équivalente qui correspond à celle qu'on aurait eue avec une pellicule argentique standard de 35 millimètres. Pour donner un ordre de comparaison, un appareil photographique numérique avec une focale équivalente de 28 millimètres est considéré comme un grand angle, alors qu'une focale équivalente de 50 mm reprend approximativement la vision humaine.

11. 1 Mégapixel =  $1024^3 pixels \simeq 1$  million de pixels



**FIGURE 1.13** – Exemple d'images simulées. La taille de l'échantillon au sol varie bien qu'elle soit affichée à la même échelle. On voit que la taille de l'échantillon au sol, qui correspond à la zone au sol vue par un photosite, détermine la taille du plus petit objet identifiable dans l'image.

Il y a évidemment une différence notable entre la taille de l'échantillon au sol lors de l'acquisition et celle du produit final. Par interpolation, on peut tout à fait produire une image ayant un plus grand nombre de pixels que celui obtenu à l'acquisition, pour rendre deux images superposables par exemple. Bien que l'échelle d'affichage ne change pas, ce que l'on peut distinguer sur l'image est évidemment très différent, comme on peut le constater sur la figure 1.13. Si l'on cherche à mesurer le diamètre de la couronne du bouleau au centre, on trouvera à chaque fois approximativement 7 mètres mais plus on se déplace vers la droite et plus l'identification de l'espèce de l'arbre devient hasardeuse.

Malgré la différence notable que l'on vient d'explicitier entre la résolution du capteur et la taille de l'échantillon au sol, ces deux notions sont généralement confondues par la communauté de la télédétection et il convient de rester vigilant pour éviter tout malentendu .

On ajoutera que la taille de l'échantillon au sol du produit ne peut être prise en considération pour déterminer la qualité d'une image que si la taille de l'échantillon au sol lors de l'acquisition était meilleure ou identique à celle du produit. On notera aussi qu'une petite taille de l'échantillon au sol produit des images beaucoup plus lourdes en terme de stockage et que le choix de l'échantillonnage est souvent un compromis entre la résolution désirée et la facilité de manipulation.

On remarquera enfin qu'une taille de l'échantillon au sol de 5 centimètres ne signifie pas pouvoir voir des objets de 5 centimètres de diamètre. En effet, il est improbable que l'objet et le pixel se superposent, et la réponse spectrale de l'objet sera moyennée avec son entourage. On pourrait ajouter que l'identification d'un objet avec un seul pixel, même « pur », est une chose impossible pour un humain et que de nombreux paramètres baissent encore la qualité d'interprétation de l'image : les distorsions de la lentille, la qualité optique de celle-ci, les conditions atmosphériques (brouillard, ensoleillement...), le réglage du contraste, le flou de bougé, le rééchantillonnage de l'image et son format de compression ; malheureux format JPEG qui supprime des informations radiométriques, spatiales et fréquentielles et introduit des artefacts compromettants les algorithmes de traitements d'image automatiques.

De manière générale, [Comer et al. \[1998\]](#) considèrent que, dans des conditions optimales de prise de vue, 4 à 9 pixels minimum sont nécessaires à l'identification d'un objet par un humain ou un algorithme morphologique.



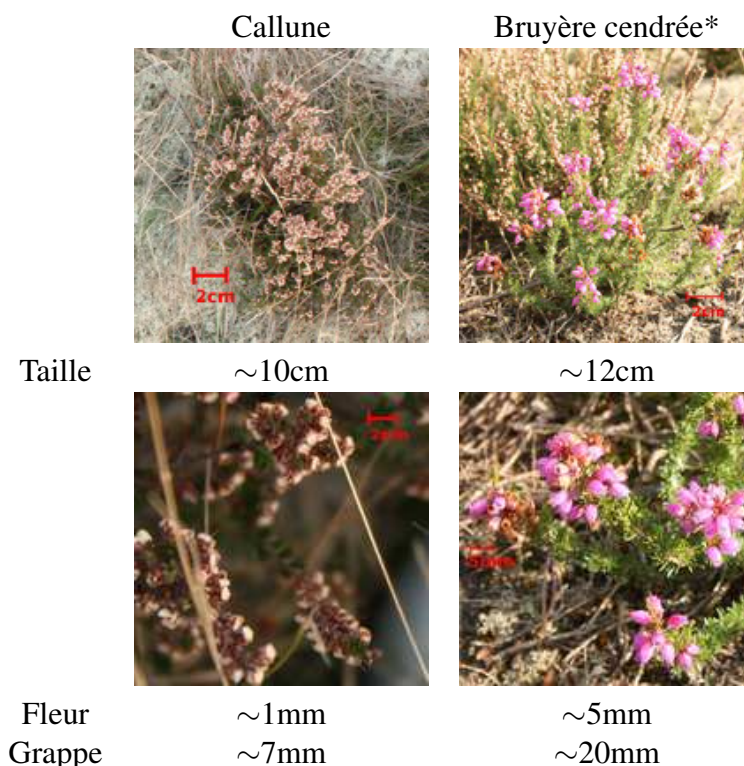


FIGURE 1.14 – Comparatif des tailles respectives de la callune et de la bruyère cendrée.

### 1.3.3.2 Interprétabilité des images

Or, que cherche-t-on à identifier dans nos images ? En regardant les données floristiques<sup>12</sup> des espèces étudiées, on peut faire un premier constat : les arbrisseaux, ou ligneux bas\*, que les botanistes du MNHN cherchent à observer font entre 20 et 80 centimètres de hauteur, et si des groupes d'individus peuvent former des buissons de 80 centimètres à 1 mètre de diamètre, les individus seuls couvrent une surface moyenne d'une quinzaine de centimètres de diamètre. La taille des feuilles est de l'ordre de 5 millimètres, bannissant toute approche purement morphologique, et la taille des fleurs varie entre 2 et 8 millimètres, celles-ci étant regroupées en grappe de quelques centimètres.

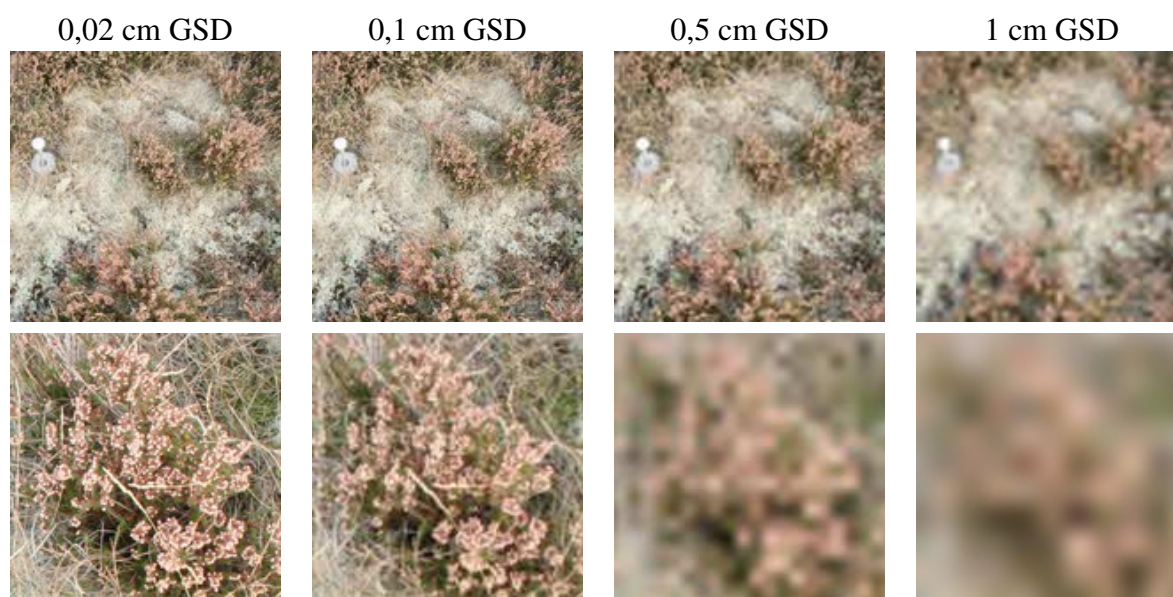
La figure 1.14 p. 28 montre deux arbrisseaux caractéristiques étudiés par l'équipe du MNHN et la taille caractéristique des individus et de leurs fleurs.

Si l'on respecte la règle de Comer *et al.* [1998] d'une identification à partir de 4 à 9 pixels par objet, il faudrait une résolution des images millimétrique pour arriver à reconnaître les différences entre les grappes de fleurs des deux espèces.

Si l'on se place à l'échelle de l'individu, une résolution centimétrique devrait permettre aux méthodes texturales de distinguer les différentes espèces.

On peut voir sur la figure 1.15 page 29, différentes tailles d'échantillons au sol simulées. On observe effectivement qu'une vue submillimétrique (0,02 cm GSD) ou millimétrique

12. On retrouvera des informations complètes dans les annexes, dans la section Floristique, p. 225.



**FIGURE 1.15** – *Callune* vue à différentes tailles d'échantillons au sol simulées et affichée à la même échelle. En haut, une vue générale, en bas, une vue zoomée sur un individu.

(0,1 cm GSD) permettrait une analyse floristique et une reconnaissance immédiate des différentes espèces, mais impliquerait une plus grande difficulté par rapport au niveau de détail du reste de l'environnement et par rapport à la taille des images produites. Par ailleurs, les tailles d'échantillons au sol subcentimétriques (0,5 cm GSD) ou centimétriques (1cm GSD) ne permettent visiblement plus de reconnaître les fleurs, mais on voit sur les images du rang supérieur que la texture caractéristique de la callune semble pouvoir être reconnaissable. On note cependant que, dès la résolution centimétrique, les contours des individus sont plus difficiles à distinguer de l'environnement.

De leur côté, les botanistes du MNHN corroborent l'idée d'une résolution de l'ordre du demi-centimètre acceptable et c'est sur cette base que nous avons décidé de travailler par la suite.

### 1.3.4 Synthèse

Concluons ce chapitre en définissant ce que serait le cahier des charges du système de télédétection idéal pour la cartographie de la végétation à l'échelle des individus.

Un système cherchant à aider les botanistes dans leur cartographie doit pouvoir fournir des résultats au moins aussi bons, que l'observation manuelle :

- en étant effectuée à la demande, quand les conditions météorologiques et phénologiques sont réunies,
- selon les groupes phytogéographiques les plus visibles, cartographiés et géolocalisés avec une précision d'une vingtaine de centimètres,
- sur une zone de quelques hectares.

Mais nous pensons que nous pouvons espérer plusieurs innovations :

- l'objectivité des observations, associée à la répétabilité de la mesure et de l'analyse,
- l'unité de temps à l'échelle biologique pour éviter les variations au sein de la zone étudiée,
- une meilleure perception des espèces rares ou à cycle court que les botanistes n'ont généralement pas le temps de cartographier,
- une approche floristique avec la mesure de paramètres de surface biophysiques (espèce, classe d'âge et état de santé des plantes...) et géophysiques (type de sol, rugosité, humidité, exposition...) quantitatifs,
- une amélioration de la rapidité de la cartographie permettant d'augmenter sans coût la surface étudiée.

Afin d'améliorer la classification manuelle ou automatique des espèces à l'échelle des individus, nous avons vu qu'une résolution spatiale subcentimétrique, voire millimétrique était attendue. Concernant la résolution spectrale, les études de [Vioix \[2004\]](#) et [Slaughter \*et al.\* \[2008\]](#) montrent qu'une couverture optique tri-chromatique est un minimum nécessaire et soulignent fortement l'intérêt de l'ajout d'une couverture dans le proche infrarouge. Une couverture multispectrale pourrait être un avantage mais le surcoût est à prendre en compte. Enfin, [Rovira-Más \*et al.\* \[2005\]](#) et [Piron \*et al.\* \[2008\]](#) semblent montrer l'avantage significatif de la stéréoscopie qui devrait permettre d'améliorer de manière sensible la précision de détermination de nombreux paramètres biophysiques et géophysiques.

Nous finirons par faire observer, que plus le système aura un coût raisonnable, et plus les utilisateurs sur le terrain pourront multiplier les campagnes de mesure et améliorer leur connaissance de ces processus infiniment complexes que sont la dynamique d'évolution des populations et les interactions au sein des écosystèmes, clefs de voûte de la biodiversité.



## Chapitre 2

# Quels outils de télédétection pour la Réalité Terrain Étendue ?

### 2.1 Un problème de média

Le chapitre 1 précisait les tenants et les aboutissants de la cartographie de la dynamique de la végétation et définissait un cahier des charges exigeant, généralisation des besoins des botanistes du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)\*.

Mais quels sont les outils de la télédétection\* — spatiale, aéroportée ou basse altitude — qui répondent à ce cahier des charges et dans quelle mesure y a-t-il un besoin d'innovation ?

#### 2.1.1 Télédétection spatiale

On a vu au chapitre 1 que la télédétection spatiale\* était utilisée en botanique pour de nombreuses tâches comme l'estimation de la biomasse[Milesi *et al.*, 2010; Muukkonen et Heiskanen, 2007; Houghton *et al.*, 2007; Lu, 2006] mais aussi la cartographie de l'occupation forestière[Quackenbush *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2008; Nelson *et al.*, 2009; Bergen *et al.*, 2009].

En effet, celle-ci présente l'avantage d'une couverture potentielle sur l'ensemble du globe — les satellites s'affranchissant des frontières —, d'une large fauchée\* de plusieurs kilomètres — permettant l'acquisition instantanée d'un département ou d'une région — ainsi que de la capacité d'emporter plusieurs tonnes d'instruments, offrant la possibilité de concevoir des capteurs multispectraux ou hyperspectraux adaptés à une thématique précise comme par exemple le capteur VEGETATION du satellite Spot.

Une constellation de satellites actifs (radar\*, micro-ondes) complète l'offre avec une couverture régulière, de jour comme de nuit et faisant abstraction de la plupart des conditions atmosphériques.

Cependant, la télédétection spatiale présente quelques désavantages qui rendent son utilisation impossible pour effectuer une cartographie au moins aussi précise que la cartographie manuelle.

Satellite	Revisit (days)	Sensor/Band	Spectral range (micrometers)	Resolution (m)	Swath width (km)	Quantisation (bits)		
ASTER	16	VNIR		15	60	8		
		1	0.52-0.60					
		2	0.63-0.69					
				3	0.76-0.86	30	60	8
		SWIR						
		4	1.60-1.70					
		5	2.14-2.18					
		6	2.18-2.22					
		7	2.23-2.28					
		8	2.29-2.36					
		9	2.36-2.43	90	60	12		
		TIR						
		10	8.12-8.47					
		11	8.47-8.82					
12	8.92-9.27							
13	10.25-10.95							
14	10.95-11.65							
Ikonos	3.5-5	Panchromatic		1	11	11		
		1	0.45-0.90					
		Multispectral		4	11	11		
		1	0.45-0.53					
		2	0.52-0.61					
3	0.64-0.72							
4	0.77-0.88							
IRS	5	Panchromatic		5.4	63-70	6		
		1	0.50-0.75					
		LISS-III		23.5	141	7		
		2	0.52-0.59					
		3	0.62-0.68					
		4	0.77-0.86	70.5	148	7		
		5	1.55-1.70					
		WiFS		188	728-812	7		
		3	0.62-0.68					
4	0.77-0.85							
Landsat 1,2,3	18	MSS		80	183	8		
		4	0.50-0.60					
		5	0.60-0.70					
		6	0.70-0.80					
		7	0.80-1.10					

TABLE 2.1 – Caractéristiques des satellites optiques civils (1<sup>re</sup> partie). Source : Jensen [2008]

Satellite	Revisit (days)	Sensor/Band	Spectral range (micrometers)	Resolution (m)	Swath width (km)	Quantisation (bits)
<b>Landsat 4,5</b>	16	MSS (as above)				
		TM				
		1	0.45-0.52	30	183	8
		2	0.52-0.60			
		3	0.63-0.69			
		4	0.76-0.90			
		5	1.55-1.76	120	183	8
6	10.42-12.50					
7	2.08-2.35	30	183	8		
<b>Landsat 7</b>	16	TM (as above)				
		ETM+				
		6	as above	60	183	8
		8 (Pan)	0.52-0.90	15	183	8
<b>QuickBird</b>	1-3.5	Panchromatic				
		1	0.45-0.90	0.61	16.5	11
		Multispectral				
		1	0.45-0.52	2.44	16.5	11
		2	0.52-0.60			
3	0.63-0.69					
4	0.76-0.90					
<b>SPOT 1,2 &amp; 3</b>	1-4	Panchromatic				
		1	0.50-0.73	10	60	8
		Multispectral				
		1	0.50-0.59	20	60	8
		2	0.61-0.68			
3	0.78-0.89					
<b>SPOT 4</b>	1-4	Panchromatic				
		1	0.61-0.68	10	60	8
		Multispectral				
		1	0.50-0.59	20	60	8
		2	0.61-0.68			
3	0.78-0.89					
4	1.58-1.75					
<b>SPOT 5</b>	1-4	Panchromatic				
		1	0.48-0.71	5	60	8
		Multispectral				
		1	0.50-0.59	10	60	8
		2	0.61-0.68			
3	0.78-0.89					
4	1.58-1.75	20	60	8		

TABLE 2.2 – Caractéristiques des satellites optiques civils (2<sup>e</sup> partie). Source : Jensen [2008]

Tout d'abord, on peut noter que la course à la résolution\* qui animait les constructeurs de satellite s'est arrêtée sur un écueil législatif plus que technologique. La législation américaine interdit en effet la commercialisation civile d'images d'une taille de l'échantillon au sol\* inférieure à 50 centimètres<sup>1</sup> [Digital Globe, 2010], obligeant les fournisseurs à sous-échantillonner les images. L'imagerie militaire a, quant à elle, depuis longtemps dépassé cette limite mais elle reste malheureusement inaccessible pour les applications civiles que nous envisageons.

Pour les espèces\* où la taille de l'échantillon au sol de 50 centimètres est satisfaisante, comme dans le cas de la cartographie forestière où les arbres adultes ont un houppier\*<sup>2</sup> suffisamment fourni, d'autres contraintes, liées aux conditions de prise de vue, surgissent. En effet, le mouvement des satellites étant régit par la mécanique céleste, les opérateurs n'ont qu'un contrôle limité sur l'heure ou le jour de passage des données : la majorité des satellites sont héliosynchrones, c'est-à-dire qu'ils passent au-dessus d'un lieu à une heure fixe et si la capacité de dépointage des satellites récents leur permet un peu plus de flexibilité, le temps de revisite d'un site est une constante incontournable. On retrouvera les principales caractéristiques des satellites optiques civils citées par Jensen [2008] dans les figures 2.1 p. 32 et 2.2 page 33.

Par ailleurs, les conditions météorologiques peuvent rendre un survol inexploitable ; en effet, une couverture nuageuse (même en haute atmosphère) peut masquer la zone étudiée et compromettre l'analyse des paramètres de surface\*. La situation n'est pas rare, d'autant que certains phénomènes phénologiques\* doivent s'observer au début de l'automne ou au printemps, périodes de l'année particulièrement nuageuses. Dans des cas défavorables, l'écart entre la date désirée et la date effective de prise de vue s'accroît, augmentant encore la période possible entre deux prises de vues de quelques jours à quelques semaines, ce qui peut poser des problèmes lorsque l'on cherche à utiliser certaines particularités phénologiques.

Enfin, si le coût de développement de ces systèmes est extrêmement élevé, le coût d'accès à l'image est lui généralement raisonnable pour des images couvrant de grandes étendues. Pour des petites zones, le coût au kilomètre carré augmente fortement<sup>3</sup>, ce qui n'est pas forcément compatible avec les mesures locales effectuées sur le terrain. En effet, la période favorable de cartographie varie d'une espèce à une autre et donc entre deux zones d'études voisines.

### 2.1.2 Télédétection aéroportée

Les images acquises par la télédétection aéroportée\* sont similaires aux images satellites, mais leur mode d'acquisition permet de se libérer d'un certain nombre de contraintes — résolution, mécanique orbitale — mais en impose de nouvelles, comme une fauchée réduite et un coût de mise en œuvre important.

---

1. Michaud [2008] raconte même que cela aurait découragé le constructeur Digital Globe de concevoir un capteur permettant une taille de l'échantillon au sol de 20 centimètres, malgré la faisabilité technologique.

2. Le houppier est la partie visible d'un arbre lorsqu'on le regarde vu du ciel. L'ensemble des houppiers forme la voûte de la forêt.

3. On trouvera un comparatif des coûts d'accès à l'image à la table 2.3 p. 39

Si la hauteur de vol, plus basse que l'orbite des satellites, permet naturellement une taille de l'échantillon au sol plus fine mais une fauchée moins large, il est important de distinguer les différents capteurs emportés à bord de l'aéronef\*. En effet, ce sont les caractéristiques de ce dernier dont va dépendre une grande partie des propriétés des images acquises.

Les capteurs, embarqués sur des avions ou des hélicoptères légers, varient du simple appareil photographique réflex à des systèmes multispectraux dignes de leurs confrères satellites.

Petrie [2005] et Petrie et Walker [2007] décomposent les caméras utilisées pour l'imagerie aérienne en trois catégories selon la taille des images produites : les caméras petit format (moins de 16 Mégapixels<sup>4</sup>), moyen format (entre 16 et 50 Mégapixels) et grand format (au delà de 50 Mégapixels).

On parlera ici uniquement de la résolution en pixel  $R_{pix}$  des capteurs. En effet, les constructeurs ne s'intéressent qu'au rapport entre la taille de l'échantillon au sol  $GSD_{mm}$  et la fauchée  $F_{mm}$ , qui comme nous l'avons vu à l'équation 1.4 p. 26 est uniquement proportionnel à la résolution.

On rappelle :

$$F_{mm} = R_{pix} \times GSD_{mm}$$

La taille de l'échantillon au sol est considérée comme choisie par l'utilisateur, l'avion pouvant déterminer sa hauteur sol\* en fonction de celle-ci et des paramètres internes du capteur (distance focale\* et taille des photosites\*).

On peut noter que le terme caméra est ici utilisé dans son sens le plus large de système qui permet la transformation d'images optiques en images électroniques ; la distinction caméra vidéo et appareil photographique n'est donc pas prise en compte.

### 2.1.2.1 Caméras petit format

Les caméras petit format ont vu récemment de nombreux changements avec l'apparition de caméras seules, équipées de capteur CMOS\* de meilleure résolution.

Les caméras petit format sont généralement issues des appareils photographiques numériques reflex (comme le Kodak DCS Pro, le Nikon D2X ou le Canon EOS-1Ds Mk.II que l'on peut voir sur la figure 2.1 p. 36 et qui possèdent un capteur de 8 ou 10 Mégapixels auquel on adjoint une plateforme anti-vibration avec des amortisseurs, une électronique de contrôle — pour régler le déclenchement et l'orientation — ainsi qu'un récepteur GPS\* et parfois une centrale inertielle\* pour le positionnement des images. La plupart du temps c'est un ordinateur portable à bord de l'appareil qui sert de station de contrôle et de stockage des photographies.

Les autres caméras, conçues spécifiquement pour la photographie aéroportée, ont des caractéristiques assez diverses : alignement de capteurs CCD\* pour la New Metric Camera (NMC), financée par l'union européenne et qui produit des images 10 000 par 1 600 pixels,

4. 1 Mégapixel =  $1024^3 \text{ pixels} \simeq 1$  million de pixels





**FIGURE 2.1** – *Caméra aéroportée petit format : (a) Canon EOS 1Ds Mk II Source : Wikimedia/Rama — (b) Support et électronique de contrôle (ici pour dirigeable) Source : Aero Drum ltd, rc-zeppelin.com*

ou groupement de capteurs CCD monochromes chez GeoVantage ou ADS. Ces groupes possèdent trois ou quatre caméras, leurs axes optiques minutieusement alignés de manière parallèle et leurs déclenchements synchronisés pour photographier exactement la même scène. Un filtre chromatique détermine les composantes de l'image de sortie. Le grand avantage de cette méthode vient du fait que chaque composante est mesurée avec sa pleine résolution radiométrique et ne nécessite pas d'interpolation contrairement aux systèmes basés sur la matrice de Bayer<sup>5</sup>

Ces caméras petit format sont principalement utilisées pour produire des images couleur ou fausse couleur pour les études environnementales ou agricoles sur de petites surfaces. L'usage extensif des caméras obliques pour avoir plusieurs points de vue d'une scène tend à se répandre. En revanche, l'utilisation de caméras petit format implique la manipulation de très grands jeux de données et un grand degré d'automatisation est requis pour le géoréférencement relatif et absolu des images.

### 2.1.2.2 Caméras moyen format

La grande majorité des caméras moyen format utilisées actuellement en imagerie aérienne provient d'anciennes caméras argentiques construites par Hasselblad, Rollei, Mamiya et Contax dont la pellicule est remplacée par un fond de chambre numérique, appelé *dos numériques*. La plupart d'entre eux utilisent des CCD Kodak 16 ou 22 Mégapixels bien que les dernières avancées technologiques autorisent des résolutions de 30 ou 40 Mégapixels. On trouve dans cette catégorie les caméras Applanix DSS, Rollei AIC ou la IGI Digicam. Ces

5. La matrice de Bayer est le moyen le plus courant de produire une image couleur à partir d'un capteur photosensible panchromatique\*. Cette matrice possède un damier de filtres de couleur rouge, bleu et vert. Chaque pixel ne voit donc qu'une seule bande spectrale, la couleur finale étant obtenue par interpolation des deux autres composantes.



**FIGURE 2.2** – *Caméra moyen format développée par l’Institut Géographique National. Source : IGN*

caméras sont souvent intégrées à côté d’un LiDAR\*<sup>6</sup> aéroporté, ce qui permet de générer des modèles numériques de surfaces (MNS) précis et facilite l’orthorectification des images.

Les caméras moyen format conçues spécialement pour l’imagerie aérienne sont très rares : on retrouve principalement la caméra développée par l’Institut Géographique National (IGN)\* en France. Cette dernière, visible sur la figure 2.2 p. 37, produit des images couleur ou fausse-couleur à partir de quatre CCD Kodak 16 Mégapixels. Le principe est similaire à ce que nous avons décrit pour les caméras petit format.

### 2.1.2.3 Caméras grand format

Les caméras grand format, qui produisent des images de plus de 50 Mégapixels, doivent être séparées en deux catégories bien distinctes : les caméras individuelles avec de grands capteurs panchromatiques et les systèmes combinant plusieurs caméras moyen format et dont les images sont fusionnées par la suite en une image plus grande.

Les caméras individuelles utilisent les plus grands capteurs CCD disponibles et sont par conséquent très coûteuses, ce qui réduit leur utilisation aux applications militaires. La caméra CA-260/50 annonce 50 Mégapixels et la caméra de reconnaissance Ultra Haute Résolution monte à 85 Mégapixels avec une fréquence de 2 images/seconde nécessaire pour les vols de reconnaissance à grande vitesse.

De leur côté, les caméras composites ont pu faire leur apparition sur le marché civil avec un angle d’approche très différent : en utilisant plusieurs caméras synchronisées dans un même boîtier, les images résultantes peuvent être mosaïquées pour fournir une grande image panchromatique. Dans le cas des caméras Intergraph et Vexcel Imaging (deux des principaux acteurs dans cette catégorie) la couleur peut être ajoutée par l’utilisation des informations spectrales données par des caméras petit format, elles aussi intégrées dans le système.

La DMC d’Intergraph produit des images panchromatiques 106 Mégapixels appuyées par des images multispectrales\* 6 Mégapixels tandis que l’Ultracam-X de Vexcel Imaging (illus-

---

6. Les capteurs LiDAR utilisent la télémétrie laser pour mesurer des nuages de points 3D qui peuvent être assimilés à la surface survolée.



**FIGURE 2.3** – *Exemple de caméra grand format composée : la Ultracam-X* Source : Vexcel Imaging/Microsoft

trée à la figure 2.3 p. 38) produit des images panchromatiques 133 Mégapixels et des images multispectrales 16 Mégapixels ! Ces systèmes sont bien sûr fournis avec la stabilisation, la géolocalisation\* et tout les services de produits très haut de gamme.

Une autre compagnie construisant des caméras large format est la société DIMAC Systems qui produisait un système modulaire pouvant disposer entre une et quatre caméras verticales ou obliques, la couleur étant obtenue par l'utilisation d'une matrice de Bayer<sup>7</sup> et interpolation.

Nous laisserons volontairement de côté les systèmes linéaires pushbroom, par ailleurs abondamment décrit par [Petrie et Walker \[2007\]](#) et dont les enjeux et les limites sont sensiblement identiques aux caméras matricielles que nous avons présentés.

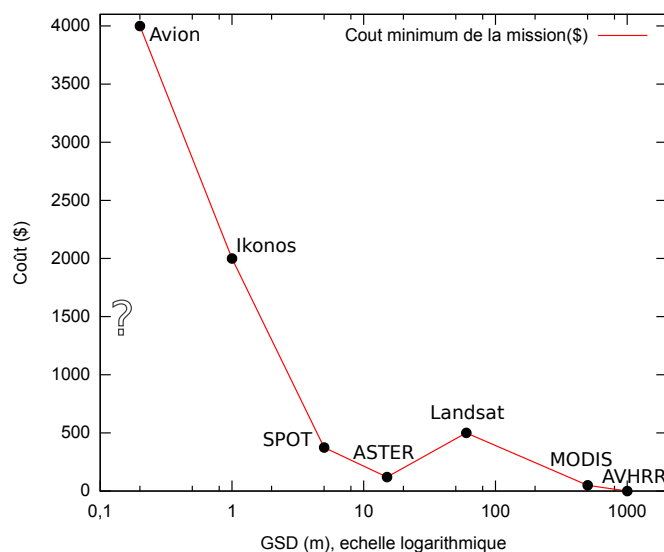
#### 2.1.2.4 Limites opérationnelles

Malgré un intérêt évident pour les applications de cartographie forestière [[IFN, 2010b](#)] ou en agriculture de précision [[Rousseau et al., 2008](#); [Lan et al., 2009](#)] où l'échelle d'analyse requiert de couvrir de vastes surfaces, l'imagerie aérienne présente encore plusieurs inconvénients majeurs pour la cartographie de la biodiversité à l'échelle des individus\*.

La principale contrainte de la télédétection aéroportée est son coût. On peut voir sur la figure 2.4 p. 39 que le coût des images aériennes est très largement supérieur au prix des images satellites. Le coût affiché est le coût minimum pour une zone d'étude inférieure à un kilomètre carré. En effet, si l'on est souvent tenté de regarder le coût au kilomètre carré, qui est un bon indicateur pour les larges étendues, il existe une taille minimale en dessous de laquelle les images ne sont pas vendues, ce qui pénalise l'étude des petites zones isolées

---

7. voir la note 5 p. 36



**FIGURE 2.4** – Coût des images en fonction de la taille de l'échantillon au sol. Le coût considéré est le coût minimum pour une zone de moins d'un kilomètre carré. On distingue un net besoin d'images (très) haute résolution pour un prix abordable. Source : Gademer

comme les zones d'intérêt biologique que nous avons décrites au chapitre 1. Le détail du calcul est donné dans la table 2.3 p. 39.

McRoberts et Tomppo [2007] expliquent que la majeure partie de ce surcoût est liée à la nécessité d'amener l'avion depuis l'aérodrome le plus proche jusqu'au lieu de l'étude, puis à nouveau jusqu'à son point de départ. Le prix de location d'un véhicule aérien et la mobilisation de son pilote étant déjà très élevé, le coût de la mission augmente rapidement avec la durée de la mission ou encore avec la nécessité de multiplier les vols pour suivre les cycles phénologiques de la végétation.

Au niveau du coût humain, on peut ajouter la nécessité de planifier soigneusement le vol

Plateforme	GSD (m)	Fauchée (km)	Coût d'un cliché (\$)	Coût au $km^2$ (\$)	Couverture min. ( $km^2$ )	Coût min. (\$)	Source
AVHRR	1000	2940	0	0	8643600	0	S.
MODIS	500	2330	271,45	0,00005	1000000	50	S.
Landsat-7	60	180	500	0,04	32400	500	G.A.
ASTER	15	60	120	0,03	3600	120	S.
SPOT	5	60	3375	0,94	400	375	Sp.
Ikonos	1	11	2420	20	100	2000	T.
Avion	0,2	2,89	800	96,05	41,64	4000	W.

**TABLE 2.3** – Comparaison des coûts des différents outils de télédétection. Les sources sont données comme suit : S. pour Scanex [2010], G.A. pour Geoscience Australia [2010], Sp. pour Spot [2010], T. pour Telespazio [2010] et W. pour WebAviation [2010].

à l'avance pour obtenir des autorisations de vol et de prise de vue aérienne : sans garantie de succès si les conditions météorologiques sont mauvaises. Quant aux risques encourus par le pilote et l'équipage — même si ceux-ci sont faibles aujourd'hui —, ils expliquent en partie les coûts de l'opération.

D'un autre côté, la taille de l'échantillon au sol de l'imagerie aéroportée n'est pas forcément encore suffisante pour satisfaire les critères que nous avons définis au chapitre 1, malgré une amélioration significative par rapport à la télédétection spatiale.

Pour le vérifier nous nous rappellerons que, comme nous l'avons vu au paragraphe 1.3.3.1 p. 24, la taille de l'échantillon au sol des caméras aéroportées est directement liée à la hauteur sol de l'appareil.

À l'altitude\* moyenne de vol pour des missions d'imagerie, soit environ 2600 mètres, la taille de l'échantillon au sol d'une caméra varie entre 50 centimètres et 2 mètres. Si [Lan et al. \[2009\]](#) annoncent une taille de l'échantillon au sol de 1,6 mètres pour un système multispectral de moyenne gamme, un simple calcul montre une taille de l'échantillon au sol trois fois meilleure pour des caméras plus résolues en petit format — des images acquises avec le Canon EOS-1Ds Mark II auraient une taille de l'échantillon au sol de 70 centimètres<sup>8</sup> — comme en grand grand : l'Ultracam-X donnera une taille de l'échantillon au sol de 47 centimètres<sup>9</sup> pour les images couleurs et de 16 centimètres pour les images panchromatiques<sup>10</sup>.

Pour atteindre une taille de l'échantillon au sol centimétrique, les capteurs aériens doivent descendre à une altitude bien inférieure. [Microsoft \[2008\]](#) précise que son système peut atteindre une taille de l'échantillon au sol de 2,9 centimètres à 500 mètres d'altitude et de 1,8 centimètres à 300 mètres.

Les chiffres tirés de la documentation de l'Ultracam-X ne sont pas donnés au hasard et correspondent aux limites courantes de la législation internationale. En effet, le [Journal Officiel de la République Française \[1957\]](#) stipule que le survol de toute agglomération ou rassemblement de personnes ou d'animaux est limité à 500 mètres (1000 pour une petite ville, 1500 pour une grande ville hors Paris) ainsi qu'à 300 mètres pour les installations à caractère industriel, usines isolées et certaines exploitations et hôpitaux. On notera que sur dérogations, certains hélicoptères peuvent parfois s'affranchir de ces limitations, mais ces derniers ne sont généralement pas équipés pour emporter les caméras autres que les petits formats et le coût s'en trouve encore augmenté.

On en déduit que la télédétection aéroportée ne peut répondre en général à des besoins de taille de l'échantillon au sol subcentimétrique ou millimétrique malgré des capteurs de plus en plus perfectionnés.

### 2.1.3 Télédétection basse altitude


Pour combler le manque observé sur la figure 2.4 p. 39 d'un système d'imagerie avec une haute résolution spatiale mais des coûts raisonnables, on a vu apparaître ces dernières années

8. D'après la formule 1.3 p. 26 :  $GSD_{mm} = \frac{36mm \times 2.6 \cdot 10^6 mm}{5616 pix \times 24mm} = 694mm$ . [[The-Digital-Picture.com, 2009](#)]

9.  $GSD_{mm} = \frac{6 \cdot 10^{-3} mm \times 2.6 \cdot 10^6 mm}{33mm} = 472mm$ . [[Microsoft, 2008](#)]

10.  $GSD_{mm} = \frac{6 \cdot 10^{-3} mm \times 2.6 \cdot 10^6 mm}{100mm} = 156mm$ . *ibid.*

Caractéristique	Plateforme					
	Cerf-volant	Ballon	Para-moteur	Aile fixe	Hélicoptère	Multirotor
Vol lent, basse altitude	★★★	★★★	★★	★★	★★★	★★★
<b>Vol stationnaire</b>	★★★	★★★	—	—	★★★	★★★
Vol automatique <sup>a</sup>	—	—	★★	★★★	★★	★★
Disponibilité	★★★	★★	★	★★★	★★	★
Faible coût d'achat	★★★	★★★	★★	★★	★	★
<b>Faible coût d'utilisation<sup>b</sup></b>	★★★	★	★★	★★	★★	★★
Cartographie de petites parcelles	★★★	★★★	★★	★★	★★★	★★★
Cartographie de grande étendues	—	—	★★★	★★★	★	★
<b>Déploiement facile<sup>c</sup></b>	★★★	★★★	★	★	★★	★★
Déploiement rapide	★★	★★	★★	★★	★★★	★★★
<b>Charge utile<sup>d</sup></b>	★★★	★★	★★★	★★	★	★★
Vibrations	★★★	★★★	★★	★★	★	★
Stabilité	★★	★★★	★	★★	★★★	★★★
Facilité de pilotage <sup>e</sup>	★★★	★★★	★★	★★	★	★
<b>Manœuvrabilité</b>	—	—	★	★★	★★★	★★★
Sécurité	★★	★★★	★	★	★	★
<b>Conditions météo</b>	★	★	★	★★	★★	★★★
<b>Endurance<sup>f</sup></b>	★★	★★★	★★★	★★	★	★
Transportabilité	★★★	★	★★	★★	★★	★★★
Facilité de réparation <sup>g</sup>	★★★	★★	★★	★★	★	★★

TABLE 2.4 – Comparaison des différentes plateformes de télédétection basse altitude<sup>h</sup> Source : Gademer 

- a.* On notera que l'asservissement des ailes fixes est plus simple à mettre en œuvre que celle des hélicoptères.
- b.* Totalement écologique, le cerf-volant ne nécessite que l'action du vent, contrairement au ballon qui nécessite un gonflage/dégonflage à l'hélium très coûteux. Quant aux appareils électriques leur coût d'utilisation est très faible.
- c.* Les appareils à décollage vertical, comme les hélicoptères ou les multi-rotors\* ne nécessitent pas de piste de décollage, rendant leur utilisation plus simple que les ailes fixes.
- d.* Les para-moteurs peuvent emporter de très lourdes charges utiles et sont souvent utilisés pour cette raison en tant que cargo. Les appareils multi-rotors peuvent emporter de plus lourdes charges que les hélicoptères.
- e.* Hors du mode automatique, le pilotage des hélicoptères et des multi-rotors n'est pas une chose facile. On estime qu'il faut deux ans de pratique pour maîtriser précisément la trajectoire de ce genre d'appareil.
- f.* Si les ballons peuvent rester quasiment infiniment en l'air, la consommation des autres appareils définit leur endurance. Les para-moteurs en combinant le soutien du vent et un moteur ont une meilleure endurance que les autres vecteurs à propulsion.
- g.* La fragilité des hélicoptères est un gros point faible. Les appareils multi-rotors, pour leur part, ont moins de pièces mécaniques sensibles.
- h.* Estimation de l'auteur en fonction de son expérience et d'une nombreuse documentation, dont Jensen [2008].

une multiplication de systèmes imaginatifs pour la prise de photographies à basse altitude.

La plupart des systèmes utilisent des plateformes provenant généralement du monde du loisir ou de l'aéromodélisme : cerf-volant, ballon à hélium ou avion modèle réduit, mais dont les capacités ont été améliorées pour les rendre capable d'accomplir des missions professionnelles de cartographie : augmentation de la capacité d'emport, retour de télémessure, stabilisation et parfois même l'adjonction de système de pilotage automatique.

Au-delà des capteurs que l'on cherche à emporter, chaque plateforme a des avantages et des inconvénients dont la plupart sont répertoriés dans la table 2.4 p. 41, mais dont nous pouvons extraire six critères principaux :

- la capacité de faire des vols lents ou stationnaires, qui permettent d'observer avec soin un objet d'intérêt en particulier,
- un faible coût d'utilisation qui permet de réaliser facilement de nombreuses missions successives et de suivre les phénomènes phénologiques,
- la mise en œuvre opérationnelle simple, pour permettre le bon déroulement de la mission en toutes circonstances,
- la capacité à emporter une charge utile\* <sup>11</sup> importante et ainsi de nombreux capteurs complémentaires simultanément,
- la manœuvrabilité générale, soit la capacité à effectuer et à suivre une trajectoire avec précision pour s'assurer de la couverture complète de la zone d'étude,
- une tolérance au vent et à la pluie raisonnable pour éviter de perdre trop de temps sur le terrain,
- l'endurance de l'appareil, qui détermine l'éloignement maximal au pilote et la durée moyenne d'un vol. La durée totale de la mission est déterminée par la capacité à recharger l'appareil et peut être significativement meilleure que son endurance.

Pierre Picavet a développé, dès 1912, un système pour emporter un appareil photographique sur un cerf-volant et obtenir des clichés vus du ciel suffisamment stables pour être utilisés à des fins scientifiques [Cerf-volant ancien, 2004]. Ce système, toujours utilisé de nos jours par les cerf-volistes, correspond au besoin simple d'avoir un outil peu coûteux, manipulable par un des membres de l'équipe terrain permettant de prendre un peu de recul par rapport aux observations terrain. Wundram et Löffler [2007] donnent un exemple d'utilisation des cerfs-volants pour l'acquisition d'images à basse altitude. Le problème principal du cerf-volant vient du peu de contrôle que l'on a sur le positionnement et l'orientation de l'appareil ainsi que des contraintes fortes en terme de vent : ni trop, ni trop peu.

Par temps calme, le ballon dirigeable présente l'avantage certain de pouvoir rester des heures à observer une cible. Par ailleurs, l'absence de vibrations donnent des conditions de prises de vues idéales. D'un autre côté, le dirigeable étant généralement gonflé à l'hélium, ses capacités de charge utile sont moyennes — pour soulever 1 kg il faut entre 1,5 et 5 mètres cubes d'hélium en fonction du type d'enveloppe — et la grande surface du ballon le rend sensible aux vents. De déploiement facile, il doit rester au sol dès 15km/h de vent, ce qui rend son utilisation opérationnelle extrêmement réduite.

---

11. La charge utile est ici définie comme la masse supplémentaire que l'appareil peut emporter en plus de lui-même et de son carburant.

Le para-moteur est la plateforme qui a la plus grande capacité d'emport de charge utile : certains modèles thermiques peuvent emporter jusqu'à 250 kilogrammes[Joli, 2008]. Mais sa manœuvrabilité est très sommaire et elle souffre, comme le ballon dirigeable d'une sensibilité au vent très incapacitante : il ne peut pas décoller si le vent dépasse 25 km/h. Il est incapable de faire des vols stationnaires et sa mise en œuvre nécessite de prévoir une piste de décollage. Son mode de sustentation le rendant relativement endurant, ce modèle est utilisé pour des applications de cargo[Joli, 2008].

L'avion possède une bonne capacité d'emport — environ 25% de sa masse[Fly-n-Sense, 2010] — ainsi qu'une endurance et une stabilité de qualité. Avec une manœuvrabilité et une résistance au vent correcte, et une grande facilité de prise en main. C'est la plateforme la plus répandue dans le commerce. Néanmoins, son incapacité à faire du vol stationnaire et la nécessité de prévoir une piste de décollage sont pénalisantes pour la cartographie de petites parcelles.

L'hélicoptère possède la plus grande maniabilité, passant d'un état stationnaire au mouvement avec une grande rapidité. Possédant une très bonne résistance au vent — l'hélicoptère pourra voler dans des conditions inaccessibles aux avions —, sa capacité de décollage verticale en fait une forme idéale pour des missions urbaines ou dans un espace réduit. Ses seules limitations sont liées à son endurance réduite par rapport aux avions, phénomène aggravé par l'ajout de la charge utile qui peut atteindre 35% de sa masse[SurveyCopter, 2010] et une difficulté de pilotage qui rend nécessaire environ deux ans de formation avant une prise en main assurée.

Enfin, les systèmes multi-rotors\* (quadricoptères, hexacoptères ou octocoptères) présentent tous les avantages de l'hélicoptère en ajoutant une capacité d'emport démultiplié par le nombre de rotors[Draganfly Innovations Inc, 2010] : 35% pour un quadricoptère, 50% pour un hexacoptères, 60% pour un octocoptère ! Cette capacité est contrebalancée par une autonomie réduite due aux nombreux moteurs à alimenter. On notera aussi que malgré une offre grandissante, les plateformes multi-rotors étaient jusqu'à présent extrêmement rares et coûteuses car leur sustentation demande une électronique de contrôle bien plus avancée que les autres plateformes.

Si les aéromodèles\* semblent clairement être plus indiqués pour la cartographie que les ballons et les cerf-volants on notera néanmoins qu'ils nécessitent des compétences de pilotages avancées et généralement une licence de modélisme pour être utilisés, ce qui n'est pas à la portée de tous les scientifiques de terrain et limite fortement les avantages par ailleurs perçus. Heureusement, la révolution technologique de ces dernières années apporte une avancée majeure : la dronification, ou la capacité de rendre automatique le vol de ces appareils.

## 2.2 Arrivée des microdrones civils

### 2.2.1 Brève histoire des drones

Newcome [2004] et Valavanis et Kontitsis [2007] racontent l'histoire des premiers aéronefs inhabités, qui datent de la première Guerre Mondiale. Alors appelés *torpilles aériennes*,



l'objectif de ces prototypes était de pouvoir être pilotés à distance pour les sacrifier avec leur chargement d'explosifs sur un objectif sans coûter la vie d'un pilote. Les précurseurs du domaine étaient l'anglais Archibald Low avec le projet *Aerial Target* (1916) et les américains Elmer et Lawrence Sperry et Peter Hewitt avec le projet *Hewitt-Sperry automatic airplane* (1917). Bien que fortement innovants, ces projets n'ont pas été activement soutenus par leurs gouvernements respectifs, notamment entre les deux guerres mondiales, les prototypes n'ayant pas montré une grande efficacité opérationnelle du fait des limitations techniques de l'époque. Dans les années 1930, l'intérêt pour les aéronefs inhabités fut relancé pour servir d'avion-cible. Dérivés de l'avion DH.82 Tiger Moth Queen Bee (abeille reine), ces aéronefs se révélèrent lents et bruyants. Aussi, par dérision, ces appareils furent surnommés bourdons (*drone* en anglais). Le mot drone\*, populaire dans la communauté francophone pour désigner tout aéronef inhabité, n'a donc pas la même connotation chez les anglophones pour qui un drone est une sous-catégorie des systèmes dédiés aux avions cible.

Si les progrès de l'aéronautique ont profité aux développements des systèmes de missiles, le développement des drones n'a pas connu de bouleversements majeurs jusqu'à l'année 1950 où la conjonction de progrès techniques importants en avionique, en miniaturisation, en télécommunication, en automatisation et en calcul embarqué notamment, ainsi que la pression de l'opinion publique pour réduire les risques des pilotes humains, ont relancé l'intérêt de se doter de systèmes aériens non habités (Unmanned Aerial System (UAS)\* ou Unmanned Aerial Vehicle (UAV)\* en anglais) performants.

Soixante ans plus tard, les drones militaires ont définitivement intégré l'arsenal des armées et Vandewalle et Viollet [2009] donnent pour exemple le drone américain Predator qui a cumulé aujourd'hui plus de 135 000 heures de vol, dont une partie en Irak et en Afghanistan.

Il a cependant fallu attendre les incroyables progrès technologiques réalisés ces dernières décennies en informatique et en électronique pour voir apparaître des drones accessibles financièrement au monde civil ; le champ d'applications est immense et commence tout juste à être découvert.

### 2.2.2 Classification

La classification\* des drones est un exercice périlleux car il n'existe pas d'uniformisation des critères. Cela étant, on peut distinguer les critères liés aux performances techniques et ceux liés à la mission du drone.

**La classification par performances :** on ne s'intéresse ici qu'aux performances techniques des drones. Parmi les critères les plus importants, citons :

- le rayon d'action et l'altitude de croisière,
- l'endurance, c'est-à-dire la durée maximale de vol, qui varie de quelques minutes jusqu'à plusieurs dizaines d'heures pour les plus performants. Il convient de noter l'arrivée des premiers prototypes mûs par énergie solaire, très prometteurs du point de vue de l'endurance[Noth, 2008],

Désignation internationale	poids (kg)	rayon d'action (km)	altitude de croisière (m)	endurance (hrs)
Nano	< 0.025	< 1	100	< 1
Micro	< 5	< 10	250	1
Mini	< 30	< 10	150 - 300	<2
Close Range	25-150	10 - 30	3.000	2-4
Short Range	50-250	30 - 70	3.000	3-6
Medium Range	150-500	70 - 200	5.000	6 - 10
Medium Range Endurance	500-1500	> 500	8.000	10 - 18
Low Altitude Deep Penetration	250-2500	> 250	50 - 9.000	0,5 - 1
Low Altitude Long Endurance	15-25	> 500	3.000	> 24
Medium Altitude Long Endurance	1000-1500	> 500	5/8.000	> 24
High Altitude Long Endurance	2500-5000	> 2000	20.000	>24
Stratospheric	>2500	> 2000	> 20.000	> 48

**TABLE 2.5** – Classification par performances des drone.

- les caractéristiques physiques comme la taille — de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres —, le poids — de quelques grammes à plusieurs tonnes —, le mode de sustentation — plus lourd ou plus léger que l'air —, le mode de propulsion — hélice ou réacteur — ou la capacité à faire un décollage ou un atterrissage vertical.

Proposé par [van Blyenburgh \[2008, 2009\]](#), la table 2.5 p. 45 résume les caractéristiques et les dénominations des principales classes de drones.

**La classification par mission :** Il est important de distinguer les missions militaires des missions civiles.

Selon l'[Office of the Secretary of Defense \[2005\]](#), les principales missions des drones militaires sont :

- de servir de cibles volantes pour l'exercice de tir ou le test de nouvelles armes,
- le recueil de renseignements sur zone (intelligence, reconnaissance et surveillance),
- le combat, soit en embarquant des armes, soit en marquant des cibles pour le guidage d'armes,
- l'appui logistique par drones cargo,
- de servir de démonstrateur pour la validation de nouvelles technologies en permettant notamment de dépasser les limites de résistance (+9g/-3g) d'un pilote humain,
- de servir de solution de déploiement pour la guerre électronique (attaque des réseaux de télécommunications, brouillage ou écoute. . .)
- de servir de relais de communication pour des réseaux locaux et/ou mobiles.

Selon [de Dios et al. \[2007a\]](#), les missions des drones civils sont elles aussi très variées . Citons notamment celles dédiées :

- à la sécurité avec notamment l'aide à la surveillance de sites industriels ou d'infrastructures sensibles (réseau électrique ou téléphonique, canalisations etc...)[[Ro et al., 2007](#)] ainsi qu'au diagnostic d'ouvrages d'art[[Metni et Hamel, 2007](#)],



**FIGURE 2.5** – Un RQ-4 Global Hawk, appareil de reconnaissance américain qui a l’envergure d’un avion de ligne mais est piloté à distance par liaison satellite. Source : U.S. Air Force photo Wikimedia/Bobbi Zapka



**FIGURE 2.6** – Une panoplie de mini-drones militaires (entre 5 et 60 kg). Sous des apparences de jouets, ces appareils onéreux servent à des opérations de reconnaissance. Source : U.S. Navy photo Wikimedia/Daniel J. McLain



**FIGURE 2.7** – Le drone hélicoptère Camcopter S-100 de Schiebel en phase d’atterrissage. La procédure est totalement automatique, malgré les mouvements du bateau. Source : ©MarineBuzz.com

- à la recherche aérienne, aux opérations de sauvetage[Murphy *et al.*, 2008] ou à la gestion de crises humanitaires [Tatham, 2009] ainsi qu’à la lutte contre les incendies de forêts[de Dios *et al.*, 2007b],
- à la mesure de paramètres in-situ dans des endroits périlleux comme au cœur d’un typhon[Lin et Lee, 2003] ou d’un volcan[Astuti *et al.*, 2008],
- à la cartographie très haute résolution. Comme nous l’avons vu au paragraphe 2.1.3, le besoin de données très haute résolution à un prix raisonnable est en plein essor. Cependant, les travaux exploitant les données spécifiquement acquises à partir de drones sont encore assez rares. Parmi les travaux thématiques récents, citons par exemple la cartographie et la génération de modèles numériques de terrain[Everaerts, 2008; Lin, 2008; Eisenbeiss et Zhang, 2006; Jung et Lacroix, 2003a], les applications environnementales[Binenko *et al.*, 2005] ou archéologiques[Bendea *et al.*, 2007; Nebikera *et al.*, 2008].

### 2.2.3 Aspects réglementaires

Asencio [2008] rappelle qu’il est très important de ne pas négliger les aspects réglementaires lors de la mise en œuvre pratique des drones. Or ceux-ci sont en constante évolution car le statut administratif et juridique des drones n’est aujourd’hui pas complètement fixé, notamment pour les micro-drones\*.

En Europe, ce sont les organismes [European Aviation Safety Agency \[2005\]](#) et Eurocontrol qui établissent les règles pour les drones de poids supérieur à 150 kg. Pour les drones de moins de 15 kilogrammes, la réglementation nationale prévaut.

Aux États Unis, tous les vols sont régulés par la [Federal Aviation Administration \[2007, 2009\]](#).

Dans le cas français, les textes de références étaient ceux du [Journal Officiel de la République Française \[2007b,a\]](#) jusqu’en décembre 2009 où un nouvel arrêté du [Journal Officiel](#)

de la République Française [2009] change la donne et prépare le terrain pour une législation plus adaptée en introduisant le concept d'aéronef non habité (automatique ou non) et en séparant l'aéromodelisme comme loisir de l'utilisation commerciale des mêmes appareils.

La demande d'autorisation de vol auprès de la DGAC est donc obligatoire pour toutes les catégories d'aéronef jusqu'à une prochaine évolution de la loi.

Cependant, au vu des législations d'autres pays européens en avance sur la France, la catégorie drones de moins de 15 kilogrammes devrait normalement se voir accorder des souplesses d'utilisation... mais rien n'est encore certain.

Pour suivre ces évolutions législatives en Europe on se référera aux deux groupes de travail se penchant actuellement sur la question de la réglementation des drones en Europe :

- EUROCAE WG 73<sup>12</sup> (Sous-groupe 4 pour les « UAS for Visual Line of Sight Operations »);
- JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems).

Par ailleurs, un rapport de la commission européenne (« Survey on non-military applications for light UAS ») devrait être rendu public très prochainement.

#### 2.2.4 Évolutions technologiques récentes

Il est intéressant de comprendre comment les drones ont pu s'échapper du domaine militaire où les coûts de fabrication les retenait jusqu'ici.

Le système de contrôle d'un drone est généralement composé de capteurs et de calculateurs. Ces derniers permettent d'automatiser la commande de l'appareil en mesurant les paramètres de vol et en maintenant automatiquement leurs valeurs de consigne. En fonction de l'avancée de l'automatisation, le système peut contrôler son attitude\* — son orientation dans l'espace, ce qui lui permet de se maintenir à l'horizontale — ainsi que sa position, soit en relatif — lorsque l'on cherche à rester immobile — ou par rapport à un référentiel, la consigne étant alors donnée sous forme de coordonnées géographiques\*.

L'amélioration continue de ces systèmes de contrôle a permis l'apparition d'engins volants que la taille ou le principe de sustentation rendaient fondamentalement instables et pour lesquels une stabilisation électronique sophistiquée est indispensable. Bouabdallah et Siegwart [2005] ont montré que c'est une caractéristique importante des appareils de type multirotors. Castillo *et al.* [2005] rappellent que si l'invention de ce type de système par George de Bothezat date de 1922 — avant même les hélicoptères dans leur forme moderne —, ces derniers furent abandonnés à cause de leur instabilité.

Les énormes progrès technologiques firent ressortir ce concept en 2002, où Young *et al.* [2002]; Pounds *et al.* [2002]; Altug *et al.* [2002] montrèrent que pour les petits appareils de type aéromodèles, cette configuration pouvait non seulement être stabilisée mais présentait des avantages non négligeables sur les hélicoptères classiques — on se reportera au comparatif de la table 2.4 p. 41.

---

12. [http://www.eurocae.net/WG-73\\_Information.doc](http://www.eurocae.net/WG-73_Information.doc)

Il est intéressant de comprendre quelles sont les évolutions techniques qui ont permis le développement des drones miniatures qui ont vu le jour depuis une quinzaine d'années car elles ont touché tous les domaines de la robotique.

On peut, par exemple, citer :

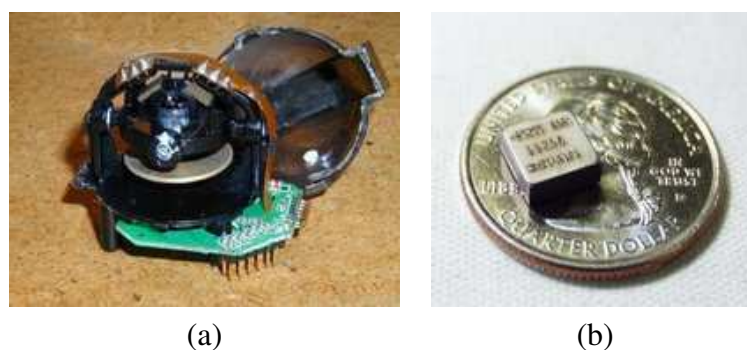
- Dans le domaine de la mécanique, l'accessibilité des matériaux composites, comme la fibre de carbone, dont les coûts ont fortement baissé et qui présentent une légèreté et une résistance supérieure au bois et au métal, a permis de construire des appareils plus légers et donc avec une meilleure portabilité.
- Dans le domaine de la propulsion, la généralisation des moteurs « brushless », dont l'absence de balais<sup>13</sup> minimise les frottements et permet donc un bien meilleur rendement, et l'adjonction de batteries au lithium polymère qui possèdent une très grande densité énergétique, permet d'atteindre un meilleur rapport poids par poussée. Cette amélioration permet de porter plus longtemps une charge utile plus lourde, puisque la puissance de l'appareil augmente à masse de carburant constante. Cela a permis l'apparition d'aéronefs électriques qui, s'ils ne sont pas aussi puissants que leurs équivalents thermiques, sont plus silencieux, moins fragiles et moins coûteux d'utilisation.
- Dans le domaine de l'informatique embarquée, la miniaturisation et l'augmentation de la puissance des micro-contrôleurs permettent d'implémenter des algorithmes de contrôle plus complexes et plus performants. La stabilisation numérique permet de faire voler des plateformes jusque-là trop instables, comme les multi-rotors, mais la possibilité d'implémenter en interne des algorithmes de navigation offre aussi un plus grand degré d'automatisation : décollage ou atterrissage automatique ou parcours selon un plan de vol prédéfini sur tout les types de plateforme.
- Dans le domaine des communications sans-fil, l'expansion des réseaux informatiques sans-fil avec le Wi-Fi<sup>TM</sup> et le Bluetooth<sup>TM</sup> a donné naissance à des systèmes de communication industriels — communication sans-fil par saut de fréquence, par exemple — de taille réduite et possédant de meilleures performances. Cela permet une communication entre l'appareil et le pilote résistante au brouillage et avec un plus gros débit de données.
- Enfin, dans le domaine des capteurs, la miniaturisation, l'amélioration des performances et la réduction des coûts a provoqué une véritable révolution dans le domaine des systèmes embarqués et de la robotique et c'est elle qui a réellement ouvert le marché de drone au domaine civil.

Regardons un cas particulier comme celui des capteurs d'attitude, qui fournissent l'orientation de l'appareil et permettent ainsi sa stabilisation à l'horizontale.

Afin de déterminer l'attitude d'un drone, on utilise une combinaison de capteurs — généralement regroupés sous le nom de centrale inertielle — qui permettent d'obtenir l'orientation de l'appareil dans le repère terrestre. Une centrale inertielle est composée de gyroscopes — qui mesurent la variation d'angle —, d'accéléromètres — qui mesurent l'accélération de l'appareil dans le champ de gravitation terrestre — et de magnétomètres — qui mesurent l'orientation par rapport au champ magnétique terrestre.

---

13. Les balais permettent normalement de fournir par contact le courant au collecteur tournant du moteur. Ce frottement permanent est un des inconvénients des moteurs à courant continu classiques.

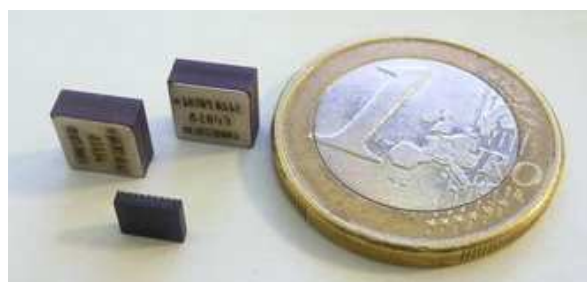


**FIGURE 2.8** – Comparaison de taille entre les gyroscopes mécaniques et les gyroscopes MEMS. — (a) Gyroscopie mécanique utilisé dans le quadri-rotor X-UFO (©2005 Silverlit / Photo [gadgetissime.free.fr](http://gadgetissime.free.fr)) — (b) Gyroscopie MEMS ADXRS300 développé par Analog Device (Photo [SparkFun Electronics](http://SparkFunElectronics.com)).

Il y a quelques années, les seuls gyroscopes abordables étaient mécaniques : en 2005 la société Silverlit a sorti le X-UFO, un quadri-rotor utilisant un de ces gyroscopie comme on peut voir sur la figure 2.8 (a) p. 50. Mais, ces capteurs présentaient deux principaux défauts : leur poids — environ 35 grammes — et leur fragilité. La même année, une alternative au gyroscope mécanique commençait à se développer avec des capteurs de tailles et de poids bien inférieurs : les composants microsystème électromécanique (MEMS)\* basés sur une technologie dérivée de celle de la gravure de processeurs. La figure 2.8 (b) montre un gyroscope MEMS ADXRS300 de chez Analog Device, sorti en 2004 et qui mesure la vitesse angulaire autour d'un seul axe. Il en faut donc deux pour obtenir un équivalent au gyroscope mécanique (deux axes) pour un poids d'environ 1 gramme et un prix aux alentours de 100€. Le prix final du X-UFO étant de 200€, l'usage des MEMS n'était alors pas envisageable.

Si les capteurs MEMS étaient chers en 2004, leur utilisation s'est rapidement démocratisée dans les produits grand public (téléphones portables, consoles de jeux vidéo, appareils photo...). Leurs prix ont alors été divisés par vingt et leurs tailles encore réduites. On peut voir sur la figure 2.9 p. 50 la comparaison de deux ADXRS300 au gyroscope deux axes IDG-500 fabriqués par InvenSense et disponible depuis 2008 pour un prix avoisinant 6€ !

Cet exemple particulier peut se généraliser à l'ensemble des composants des aéro-mo-dèles et explique l'arrivée récente sur le marché civil des drones et particulièrement des



**FIGURE 2.9** – Deux gyroscopes ADXRS300 et un gyroscope deux axes IDG-500 fabriqués par InvenSense (Photo ©atis).

micro-drones qui sont désormais disponibles pour des missions de télédétection basse altitude. Nécessitant un investissement financier significativement plus élevé, quels sont les avantages des micro-drones sur les aéromodèles radio-commandés ?

### 2.2.5 Avantages opérationnels

Selon la classification de la table 2.5 p. 45, les micro-drones sont des appareils d'un poids inférieurs à cinq kilos et sont généralement suffisamment petits pour être transportés — entiers ou démontés — dans un coffre de voiture et suffisamment performant pour voler à une centaine de mètres d'altitude et emporter du matériel d'acquisition optique.

Ils sont donc directement en concurrence avec les appareils radiocommandés dont nous avons parlé au paragraphe 2.1.3 pour des missions de télédétection basse altitude, d'autant qu'ils résolvent une partie des inconvénient de ceux-ci : aussi petits que les modèles réduits, ils sont aussi faciles à déployer sur le terrain. Mais leur capacité à se positionner et à s'orienter précisément dans l'espace leur permet d'assurer des missions avec une régularité professionnelle. Beaucoup plus facile à manier, certains peuvent se déplacer de manière totalement automatique selon un plan de vol prédéfini, ce qui assure une fiabilité beaucoup plus grande pour la prise de vue aérienne. De plus, les capacités de localisation de l'appareil permettent une géolocalisation des images qui leur donne une beaucoup plus grande plus-value et facilite leur intégration dans les outils d'exploitation de données[Eisenbeiss, 2004].

Pour l'instant leurs seuls inconvénients face aux aéromodèles est leur coût et une disponibilité moindre, deux facteurs qui devraient tendre à se réduire avec le développement de l'offre.

En conclusion, les micro-drones devrait probablement être amenés dans un avenir proche à remplacer progressivement les aéromodèles autant pour les loisirs[Parrot, 2010] que pour les applications de télédétection basse altitude. Ce faisant, ils devraient élargir le cercle des applications de celle-ci en apportant une systématisation des acquisitions et leur géolocalisation, ce qu'il était difficile d'obtenir avec les aéromodèles. Cette mutation est d'ailleurs attendue par de nombreux utilisateurs potentiels mais nécessite de relever encore quelques défis technologiques, économiques et juridiques.

### 2.2.6 Limites des systèmes actuels

Le marché des micro-drones (< 5Kg) civils commerciaux n'est composé que d'un petit nombre d'acteurs : DraganFly Inc. aux États-Unis, Mikrokopter GmbH, Microdrones GmbH et Ascending Technology GmbH en Allemagne et quelques acteurs français qui semblent pour l'instant marginaux sur ce marché : Fly-n-Sense, Lehmann Aviation ou encore Parrot. Les autres acteurs du domaine utilisent généralement des micro-drones allemands ou américains plus ou moins modifiés pour leurs activités.

À part Lehman Aviation, la majorité des acteurs ont misé sur les plateformes multi-rotors avec différentes stratégies (quadri-rotors, hexa-rotors contrarotatifs, octo-rotors contrarotatifs ou alignés...) qui leur permettent d'emporter entre 200 grammes et un kilogramme de



charge utile. La figure 2.10 p. 53 illustre différentes plateformes commerciales actuellement disponibles pour la télédétection basse altitude. Les tarifs appliqués se comptent généralement en dizaines de milliers d'euros à la différence notable de Mikrokopter, projet open-source allemand qui vend des « kits » à monter soit-même entre 800 (version quadricoptère) et 1500 € (pour la version octocoptère) ! Une différence de prix notable qui s'explique, en partie, par les connaissances techniques nécessaires à l'assemblage. Cette dernière approche est assez représentative des avancées technologiques des micro-drones non professionnels en Allemagne.

L'AR Drone de Parrot, que l'on peut voir sur la figure 2.10 p. 53, doit être mis à part. Disponible depuis septembre 2010 dans les grands magasins pour la somme réduite de 300€, cet appareil est en train de marquer fortement l'esprit du grand public et de contribuer au développement général des micro-drones à bas coût. Cependant, avec une capacité d'emport de 60 grammes et une autonomie de 12 minutes, il devrait rester un appareil de loisir et ne peut servir à réaliser des missions de télédétection basse altitude comme les autres modèles présentés.

On notera une tendance à l'augmentation du nombre de rotors qui est liée à deux besoins croissants : une augmentation de la capacité d'emport (jusqu'à un kilogramme) mais aussi une fiabilité de vol grâce à une redondance accrue des systèmes : alors qu'un quadri-rotor ne peut voler après le bris d'un moteur ou d'une hélice, un hexacoptère ou un octocoptère peut compenser la perte de puissance et se poser en urgence en toute sécurité.

Si ces micro-drones commerciaux proposent des supports stabilisés (qui compensent les mouvements brusques, comme on peut le voir sur la figure 2.11 p. 54) ou asservis (dont l'orientation peut être choisie par l'opérateur) qui permettent généralement de fixer une large palette de charge utiles (appareils photographiques numériques, caméscopes ou caméras thermiques), ces dernières sont généralement des appareils du commerce, emportés tel quel, et ne possèdent à notre connaissance qu'une électronique de contrôle réduite.

Par ailleurs, si les capacités de positionnement de l'appareil sont, lorsqu'elles sont disponibles, utilisées pour la navigation et le suivi d'un plan de vol, l'orientation précise de la charge utile reste difficile à obtenir. Nous verrons que la stabilisation de la charge utile contre les vibrations et les sautes de vent est un défi important à relever pour obtenir des images de qualité (comme illustré sur la figure 2.12 p. 54).

En conclusion, les micro-drones actuels restent dans leur ensemble des produits chers, surtout si l'on veut avoir une capacité d'emport au-delà de quelques centaines de grammes. Cette limitation, qui joue aussi sur l'endurance de l'appareil, a jusqu'ici empêché l'apparition de charges utiles complexes comme on peut en voir dans des gammes d'appareils plus imposants ou sur des avions.

Par ailleurs, malgré une amélioration sensible des capacités d'asservissement en position il est rare que les informations d'orientation soient facilement utilisables pour le géoréférencement direct\* des images, ce qui est une limitation pour de nombreuses applications de télédétection.

Enfin, on peut noter que si la fiabilité des appareils est de plus en plus au cœur des préoccupations des constructeurs, il faudra encore du temps avant d'arriver à un fonctionnement



Drone Mikrokopter. Source : ©MikroKopter GmbH



Asctec Falcon 8 Source : ©Ascending Technology GmbH



Md4-200 Source : ©Microdrones GmbH



Draganflyer-X6 Source : ©DraganFly Inc.



Scancopter 750 Source : ©Fly-n-Sense



AR Drone Source : ©Parrot



FNS 900 Seeker Source : ©Fly-n-Sense



LM200 Source : ©Lehmann Aviation

**FIGURE 2.10** – *Quelques micro-drones récents.*



**FIGURE 2.11** – Support amorti par piston pour appareil photographique numérique. Source : draganfly.com



(a)



(b)

**FIGURE 2.12** – Exemples d'images acquises par des micro-drones commerciaux. (a) Le Falcon 8 d'Ascending Technology possède un support asservi et stabilisé Source : ascotec.de — (b) Exemple d'image prise avec le support stabilisé du Draganflyer-X6 Source : draganfly.com

basé sur des certifications, comme c'est le cas pour les avions, et ce bien que la législation semble se diriger dans ce sens.

### 2.3 Contraintes sur l'instrumentation

Nous avons établi précédemment que les aéromodèles et a fortiori les micro-drones sont des plateformes idéales en terme de souplesse opérationnelle pour les missions de télédétection basse altitude.

Mais ces plateformes présentent aussi de fortes contraintes — pilotage complexe, durée de vol réduite — mais particulièrement sur la quantité de matériel qu'elles sont capables d'emporter en plus de leur propre poids et de celui du carburant, ce que l'on nomme la charge utile.

### 2.3.1 Notion de charge utile

La charge utile d'un avion ou d'un hélicoptère est normalement la masse transportable en plus de son propre poids. On la calcule à partir de la puissance des moteurs, ce qui donne la capacité d'emport théorique à laquelle on soustrait le poids à vide (sans carburant) de l'appareil.

La charge marchande se calcule avec la charge utile diminuée du poids du carburant. En fonction de la destination, on peut jouer sur le carburant et donc sur la charge marchande. C'est essentiel pour un avion de ligne, mais beaucoup moins pour un aéromodèle ou un micro-drone électrique dont le poids des batteries est généralement constant.

C'est pourquoi la majorité des constructeurs et acteurs du domaine intègre le poids du carburant au poids à vide et confondent la notion de charge marchande avec celle de charge utile.

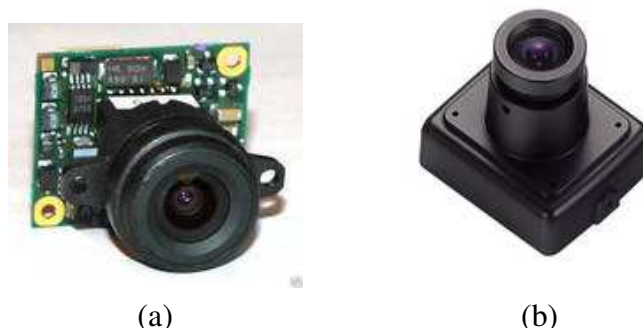
On a vu que la charge utile moyenne d'un micro-drone se situait entre 200 grammes et un kilogramme. Certains aéromodèles ou des drones des catégories supérieures peuvent emporter entre cinq et dix kilogrammes, mais les contraintes économiques et législatives sont alors beaucoup plus élevées.

Les capteurs classiques de la télédétection aéroportée que nous avons vus au paragraphe 2.1.2 sont évidemment trop lourds et volumineux pour être utilisés dans cette catégorie et les systèmes commerciaux sont rares. Voyons quelles sont les solutions technologiques disponibles.

### 2.3.2 Caméras pour les micro-drones

Comme au paragraphe 2.1.2, le terme caméra est ici utilisé dans son sens le plus large de système qui permet la transformation d'image optique en image électronique ; la distinction caméra vidéo et appareil photographique n'est donc pas ici prise en compte.

L'aéromodélisme a fourni de nombreuses caméras miniatures permettant à leur utilisateur de voir la terre vue du ciel. Ces caméras sont généralement d'une légèreté incomparable —



**FIGURE 2.13** – Microcaméras (a) KX-161 (GP-CX161) :  $330 \times 350$ , 30 images/seconde, 8 g Source : Panasonic — (b) KX-131 (KPC-S226) :  $510 \times 492$ , 30 i/s, 28 g Source : KT&C



**FIGURE 2.14** – *Caméra industrielle* — (a) DXC-9000,  $659 \times 494$ , 60 images/secondes, 790 g  
Source : Sony — (b) JAI CV-M50 IR, Monochrome visible et infrarouge,  $752 \times 582$ , 25 images/secondes entrelacées, 230 grammes. Ici, monté par [Vioix \[2004\]](#) avec une roue de filtre.

entre 5 et 30 grammes — ce qui leur permet d’être installées sur les plus petits modèles réduits, mais elles ont généralement une qualité d’image limitée :  $628 \times 582$  pour la KX-131 que l’on voit sur la figure 2.13 p. 55.

Pour avoir une taille de l’échantillon au sol de 0,5 centimètres, une telle caméra devrait voler à moins de 3,7 mètres<sup>14</sup> ce qui, nous le verrons par la suite, obligerait l’appareil à voler à une vitesse extrêmement basse alors que la couverture de chaque image de dépasserait pas 3 mètres sur 3.

On utilise donc uniquement ces caméras pour le loisir, le pilotage embarqué [[Bouvet et al., 2008](#)] — où le pilote voit la scène depuis le cockpit de l’aéromodèle — ou l’asservissement en position [[Kanade et al., 2004](#)], en utilisant le mouvement général de la scène.

On trouve par ailleurs les caméras professionnelles issues des chaînes de contrôle qualité industrielle. D’une très grande fréquence de rafraîchissement — 30 ou 60 images/secondes en moyenne —, elles ont généralement une petite résolution ( $659 \times 494$  pour la DXC-9000 visible sur la figure 2.14 p. 56) mais des optiques de qualité et une vitesse de traitement qui compense extrêmement bien le mouvement de la cible ou de l’appareil. Elles sont parfois utilisées pour la constitution de vidéos géoréférencées [[Eugster et Nebiker, 2007](#)] ou, comme on peut le voir sur la figure 2.14 p. 56 b, pour fabriquer des capteurs multispectraux légers [[Vioix, 2004](#)].

Ces caméras utilisent généralement des optiques avec des focales longues — 38 mm pour la DXC-9000 et 12, 50 ou 100 mm pour la CV-M50 — ce qui autorise une hauteur sol plus conséquente : pour une taille de l’échantillon au sol de 0,5 centimètre et une focale de 50 mm la caméra CV-M50 doit voler à 29 mètres<sup>15</sup> mais la surface couverte par chaque image est toujours extrêmement réduite.

Certains constructeurs de micro-drones, comme [Draganfly Innovations Inc. \[2010\]](#), proposent d’emporter des caméscopes du commerce — comme le HDC-SD9 illustré à la figure 2.15 (a) p. 57 —, qui proposent des vidéos haute définition — Full HD, soit  $1440 \times 1080$

14. D’après l’équation 1.3 p. 26, on a  $H_{mm} = \frac{f_{mm} \times GSD_{mm}}{p_{mm}} = \frac{3,6mm \times 5mm}{4,85 \cdot 10^{-3}mm} = 3,7m$

15. Toujours d’après l’équation 1.3 p. 26, on a  $H_{mm} = \frac{f_{mm} \times GSD_{mm}}{p_{mm}} = \frac{50mm \times 5mm}{8,6 \cdot 10^{-3}mm} = 29m$



**FIGURE 2.15** – Caméscopes HD. (a) HDC-SD9, Full HD (CCD), 300 g Source : Panasonic — (b) Camiléo P10, Full HD (CMOS) pour moins de 150 grammes. Source : Toshiba

pixels — dans des gammes de poids raisonnables — entre 100 et 500 grammes. Avec une focale de 3 mm et une résolution beaucoup plus élevée que les caméras industrielles le HDC-SD9 peut voler à 28,5 mètres<sup>16</sup> et couvrir une étendue de 9,6 par 5,5 mètres à chaque image avec une taille de l'échantillon au sol de 0,5 centimètre. Son zoom intégré — jusqu'à 30x — permet d'envisager des altitudes plus élevées au besoin.

Ces caméscopes pouvant retransmettre au sol une vidéo VGA (640x480) et enregistrer simultanément en Full HD sur un support de stockage, elles sont donc idéales pour la réalisation de films aériens qui peuvent être cadré depuis le sol. Recherchées dans les applications d'exploration ou de films promotionnels, ces caméras n'ont à notre connaissance pas été utilisées jusqu'à présent pour des utilisations cartographiques ou de reconstruction 3D mais on peut espérer que les avancées dans le domaine de la géolocalisation de flux vidéos[Eugster et Nebiker, 2007] ouvriront bientôt la voie.

Notons tout de même que certain capteur CMOS bon marché — comme le Camileo P10, illustré à la figure 2.15 (b) —, présentent des effets optiques problématiques, comme le « rolling shutter » ou obturation roulante, qui les rendent très sensibles aux vibrations et ôte une grande partie de leur compétitivité en terme de poids et de prix. Les caméras CCD comme le HDC-SD9 sont par contre beaucoup plus chères — environ 800\$ contre 130€ pour le camileo P10 — et par conséquent moins accessibles. Par ailleurs, leur poids les réserve aux appareils ayant la plus grande charge utile.

Les appareils photographiques numériques du commerce sont d'usage commun en télédétection basse altitude. Montés sur des cerfs-volant, des ballons, des aéromodèles et des micro-drones, ils sont des capteurs privilégiés par leur disponibilité, leur coût relativement faible et leur légèreté.

Si les appareils photographiques reflex, que nous avons décrit comme des caméras aéroportées petits format au paragraphe 2.1.2, sont toujours préféré équiper les engins qui peuvent les emporter[Haarbrink et Koers, 2006; Eisenbeiss et Zhang, 2006; Rubio *et al.*, 2005], on constate que les systèmes plus légers se sont tournés vers des appareils photographiques de tailles, de poids et de coût plus modestes[Grenzdörffer *et al.*, 2008; Jensen, 2008].

16. Toujours d'après l'équation 1.3 p. 26, on a  $H_{mm} = \frac{f_{mm} \times GSD_{mm}}{p_{mm}} = \frac{3mm \times 5mm}{0,525 \cdot 10^{-3}mm} = 28,5m$



**FIGURE 2.16** – Appareils photographiques compacts (a) Caplio R8, 10 Mpix stabilisé pour 166 g, Source : Ricoh — (b) Lumix-LX3, 10 Mpix stabilisé d’une qualité proche du reflex pour 265 g . . . et le double du prix ! Source : Panasonic

Les appareils compacts sont des appareils grand public et l’on trouve une grande variété de modèles, certains mettant l’accent sur le design, la petite taille ou la prise en main automatique des réglages, d’autres cherchant un public d’amateurs semi-professionnels avec des options manuelles mais une taille plus conséquente.

Pour des missions de télédétection, les critères s’éloignent sensiblement de la cible prévue par les constructeurs : on cherche un appareil avec une bonne qualité d’image, pouvant supporter les réglages manuels liés aux usages de télédétection (exposition, résistance aux vibrations) en restant le plus petit et léger possible. L’utilisateur d’appareil compact se voit aussi contraint de récupérer ses images dans des formats compressés avec des algorithmes à perte (JPEG), le format Raw des appareils reflex n’étant quasiment jamais proposé<sup>17</sup>.

Les deux appareils photographiques illustrés à la figure 2.16 possèdent un capteur 10 Mégapixel pour une résolution de  $3648 \times 2736$ , mais la taille de leurs photosites diffère — 1,67 microns pour le R8 et 2,08 microns pour le LX3 — ce qui modifie légèrement leur paramètre de vols<sup>18</sup> mais surtout leur capacité à capter la lumière : le LX3 avec des photosites plus grands fournira une qualité d’image meilleure que le R8. Le LX3 possède aussi plus de réglages manuels et un format d’image non compressé ! En contrepartie, il est beaucoup plus lourd — 265 grammes contre 166 grammes — et beaucoup plus cher : 600€ contre 300€.

Shortis *et al.* [2006], Habib et Morgan [2005] et Remondino et Fraser [2006] posent la question de la qualité des images produites par ces appareils non professionnels et leur usage pour des applications de télédétection (cartographie, reconstruction 3D. . .) et leurs conclusions sont positives : les déformations dues aux optiques non professionnelles peuvent être considérées comme acceptables avec des systèmes de lentilles fixes si l’on ne se contente pas d’une autocalibration et qu’on prend la peine d’effectuer une calibration avant le vol. Läbe et Förstner [2004] montrent même que les caméras possédant un système de zoom

17. Un appareil sur cent ou moins possède cette propriété ce qui réduit fortement les choix sur les autres paramètres et ne peut donc être pris comme critère de choix.

18. Pour comparaison avec les autres caméras, le calcul précédent nous donne pour une taille de l’échantillon au sol de 0,5 centimètre pour le R8 :  $H_{mm} = \frac{f_{mm} \times GSD_{mm}}{p_{mm}} = \frac{4,98mm \times 5mm}{1,67 \cdot 10^{-3}mm} = 15m$  et pour le LX3 :  $H_{mm} = \frac{5,27mm \times 5mm}{2,08 \cdot 10^{-3}mm} = 12,6m$  et une surface couverte de 18 mètres par 14.

peuvent être utilisées mais elles nécessitent une calibration pour chaque jeu de paramètres (zoom, focus, résolution).

Remondino et Fraser [2006] ajoutent que les variations des paramètres physiques des appareils photographiques génériques dans le temps peuvent généralement être négligées et Chandler *et al.* [2005] montrent que si la calibration prend en compte un modèle image suffisamment précis, les compacts peuvent faire aussi bien que les reflex !

Ce gain en poids, sans perte significative en qualité, ouvre la voie pour les systèmes emportant plusieurs capteurs à la fois et laisse imaginer une reproduction à l'échelle des micro-drones des systèmes multi-vues obliques que l'on peut voir sur les porteurs aériens et qui seront décrits dans la section suivante.

### 2.3.3 Systèmes multi-caméras

#### 2.3.3.1 Systèmes directionnels

On appelle systèmes multi-caméras\* directionnelles des mécanismes permettant la prise de photographies simultanées dans des directions différentes.

Petrie [2008] raconte que ces systèmes sont nés au début du XX<sup>e</sup> siècle ; la première cartographie aérienne des îles russes de l'océan arctique à bord d'un zeppelin avec un système à neuf lentilles s'étant effectuée en 1931. Cependant ce n'est que récemment que les systèmes multi-caméras sont sorties du domaine militaire.

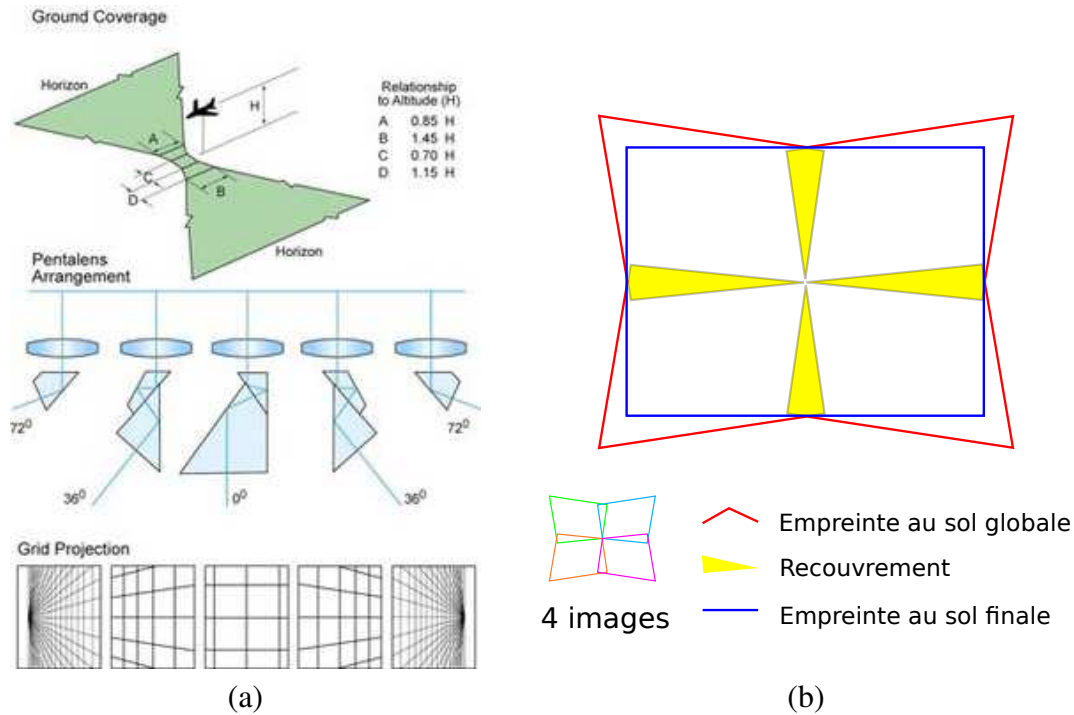
On peut distinguer trois types de systèmes :


- les systèmes "en éventail", illustrés à la figure 2.17(a) p. 60, qui regroupent trois ou cinq caméras alignées perpendiculairement à l'axe de vol et présentant de forts angles d'incidences ( $-72^\circ$ ,  $-36^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $72^\circ$ ).
- les systèmes "en bloc", illustrés à la figure 2.17(b), regroupant des caméras panchromatiques et plusieurs caméras couleur plus petites, présentant des angles d'incidences relatives très faibles ( $< 5^\circ$ ).
- les systèmes "en croix de malte", illustrés à la figure 2.18, constitués d'une caméra verticale, entourée de plusieurs caméras obliques ( $\sim 45^\circ$ ) distribuées sur un cercle. Dans le cas d'un système à cinq caméras, les caméras obliques, placées perpendiculairement — Avant/Arrière et Gauche/Droite — donnent une empreinte au sol caractéristique qui ressemble à la croix de malte.

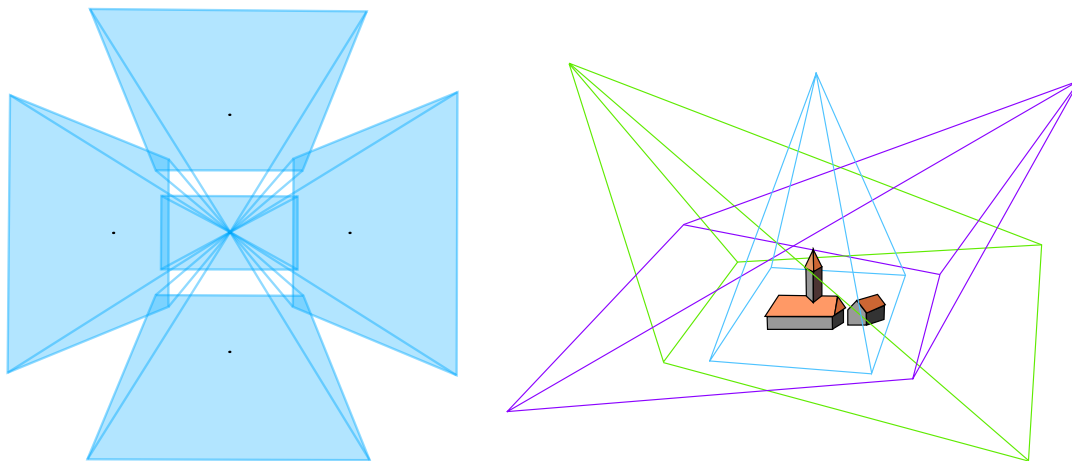
Les systèmes "en éventail" ont été conçus par les militaires pour couvrir la plus grande fauchée latérale possible lors des vols de reconnaissance à basse altitude. Les images très latérales présentent ainsi de fortes déformations mais permettent aux photo-interprètes d'identifier des objets d'un horizon à l'autre. Le passage de l'argentique au numérique n'a quasiment pas changé le procédé qui utilise un système de prisme plutôt qu'une inclinaison des caméras elles-mêmes. La caméra Zeiss Imaging KS-153 (3 ou 5 lentilles), visible sur la figure 2.19 p. 62, est un exemple caractéristique de ces systèmes.


Les systèmes "en bloc" sont nés, pour leur part, du coût de fabrication exponentiel des capteurs en fonction de leur taille. Comme on l'a vu à la section 2.1.2, à partir d'un certain





**FIGURE 2.17** – Empreinte au sol des systèmes multi-caméras. (a) Les systèmes en "éventail" permettent de couvrir la plus grande empreinte au sol possible au prix de fortes distorsions sur les images latérales. Source : Petrie [2008] — (b) À l'inverse les systèmes "en bloc" cherchent à augmenter l'empreinte au sol en minimisant les déformations. Source : Gademer 



**FIGURE 2.18** – Les systèmes en "croix de Malte" (à gauche, un système à cinq caméras) cherchent à visualiser une même scène sous différents angles de vue (à droite, vues Avant/Verticale/Arrière de la scène acquises successivement lors du déplacement de l'appareil). Source : Gademer 

format de caméra il devient plus intéressant d'associer plusieurs capteurs de petit format et fusionner les images résultantes en une image de grande taille que d'essayer de produire un unique capteur de grande taille. À l'inverse du système "en éventail", les systèmes "en bloc" cherchent à minimiser les déformations et présentent donc généralement des angles d'incidence très faibles. Ils présentent à la fois une grande empreinte au sol et une bonne résolution, comme on peut le voir sur la figure 2.20 p. 62. Le capteur virtuel de l'Ultracam-XP atteint 216 Mégapixels ! Ces systèmes sont donc très avantageux malgré leur complexification et un surcoût lié à la nécessité de post-traitement des images. [Petrie \[2008\]](#) annonce que si ces systèmes ont classiquement 4 caméras panchromatiques, on voit venir des systèmes à 6 ou 8 caméras qui proposeront des images de l'ordre de 500 Mégapixels ou du Gigapixel, assurant simultanément une grande résolution et une grande fauchée...

On notera que [Lin \[2008\]](#) a construit un système "en bloc" pour un mini-drone avion (< 30 kg) à partir de quatre appareils photographiques reflex afin d'optimiser la surface couverte à chaque prise de vue.

Les systèmes "en croix de malte" présentent des angles d'incidences intermédiaires aux deux autres ; autour d'une prise de vue verticale "classique" les images obliques permettent de visualiser les alentours. L'angle, proche de 45°, montre les objets selon un point de vue agréable pour les utilisateurs : c'est celui que l'on retrouve lorsque l'on regarde par le hublot d'un avion au décollage. De cette manière, on perçoit aussi bien le toit que les façades des bâtiments et on se repère facilement dans l'image contrairement aux orthophotographies qui présentent un point de vue peu commun et nécessite l'expertise des photo-interprètes.

Si des systèmes à 8 ou 9 caméras ont été fabriqués au début du XX<sup>e</sup> siècle, le système 5 caméras s'est largement imposé depuis. Toujours selon [Petrie \[2008\]](#), cette prise de vue permet historiquement aux topographes américains de l'USGS de faire leurs relevés depuis les années 30 et elle a été remise au goût du jour récemment par la société américaine Pictometry qui a notamment fourni les images obliques du système de Microsoft : Virtual Earth [[Schutzberg et Francica, 2005](#)], illustré par la figure 2.21 p. 62. Aujourd'hui le marché est très largement dominé par Pictometry et ses franchises (MDA au Canada, Blom Aero-films en Europe, AAMHatch en Australie et Asie du Sud-Est, AOC en Afrique du Sud et KKC au Japon). On notera cependant la résistance de petites compagnies indépendantes, soutenues par le système MIDAS de la société Track'Air (Pays-bas) et ce dans un climat d'action judiciaire de l'office des brevets américains.

[Petrie \[2009\]](#) constate que les images latérales de ce type sont aujourd'hui très recherchées par la sécurité civile et les pompiers pour la plus grande facilité d'interprétation de ces images par des non-spécialistes, mais aussi pour la cartographie de l'occupation des sols [[Lemmens et al., 2008](#)], la reconstruction 3D de paysages urbains [[Wang et al., 2008](#); [Toth, 2009](#)] ou la surveillance et la visualisation (mise en valeur de bien, suivi de progression de travaux) à basse altitude [[Petrie, 2009](#)]. Les images obliques permettent aussi de déterminer plus facilement la hauteur des bâtiments même si [Höhle \[2008\]](#) et [Jacobsen \[2008\]](#) précisent que l'adjonction d'un Modèle Numérique de Terrain est indispensable.



**FIGURE 2.19** – D'un horizon à l'autre, avec la caméra Zeiss Imaging KS-153. Source : [Jacobsen \[2008\]](#)



**FIGURE 2.20** – Les systèmes en bloc, comme l'Ultracam-XP permettent de fournir de très grandes images, avec une résolution fine, ce qui serait trop coûteux avec un seul capteur. Source : Terra Messflug GmbH



**FIGURE 2.21** – Notre-dame de Paris vue par Bing Maps, Image Blom. Source : Microsoft

### 2.3.3.2 Systèmes stéréoscopiques

La photogrammétrie\* cherche à retrouver les dimensions et les volumes des objets à partir de clichés photographiques montrant les perspectives de ces objets. Cette approche est très courante en télédétection spatiale et aéroportée et utilise généralement des images acquises successivement le long de la trajectoire mais présentant un fort recouvrement ; généralement entre 60 et 80%.

De manière similaire, [Eisenbeiss et Zhang \[2006\]](#); [Grenzdörffer \*et al.\* \[2008\]](#); [Lin \[2008\]](#) utilisent des clichés acquis successivement avec un unique appareil photographique à partir de drones.

D'un autre côté, [Jung et Lacroix \[2003b\]](#); [Lacroix \*et al.\* \[2002\]](#) ont développé un système stéréoscopique à partir de deux appareils photographiques placés à une distance fixe l'un de l'autre et permettant ainsi l'acquisition d'images stéréo selon une base connue rigide. Ils ont testé leur système à l'aide d'un ballon à hélium et construisent un Modèle Numérique de Terrain (MNT)\* à partir des images.

À notre connaissance, aucun système stéréoscopique bi-caméras n'a été embarqué sur un micro-drone (< 5 kg) à des fins de cartographie<sup>19</sup>, probablement pour des raisons de poids. Nous pensons qu'un tel système pourrait avoir un intérêt pour l'extraction précise de paramètres de surface biophysiques et géophysiques en évitant les écueils classiques de la prise de vue à basse altitude : prise de vue non régulière avec une rotation et un changement d'échelle entre les clichés, ainsi qu'une modification des éléments de la scène due au vent.

Il nous semble que des clichés simultanés pris à partir de deux appareils photographiques espacés permettrait de résoudre un certain nombre de ces problèmes.

### 2.3.3.3 Systèmes multi-spectraux

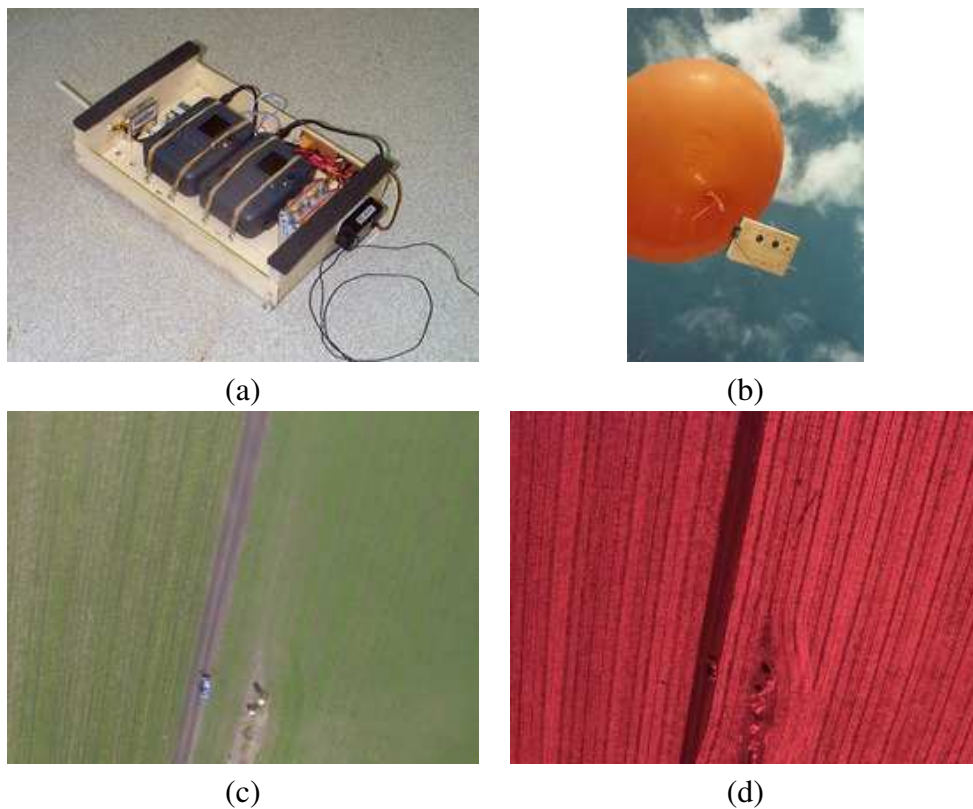
Certains utilisateurs choisissent d'emporter plusieurs caméras, non pour augmenter la surface vue, ni pour multiplier les points de vue sur une scène mais pour visualiser la même scène dans différentes parties du spectre.

Nous avons montré au paragraphe 1.3.1.1 l'intérêt des capteurs multispectraux pour la cartographie de la végétation. [Berni \*et al.\* \[2009\]](#) embarque des capteurs multispectraux et une caméra thermique sur son mini-drone pour extraire des paramètres de surface biophysiques.

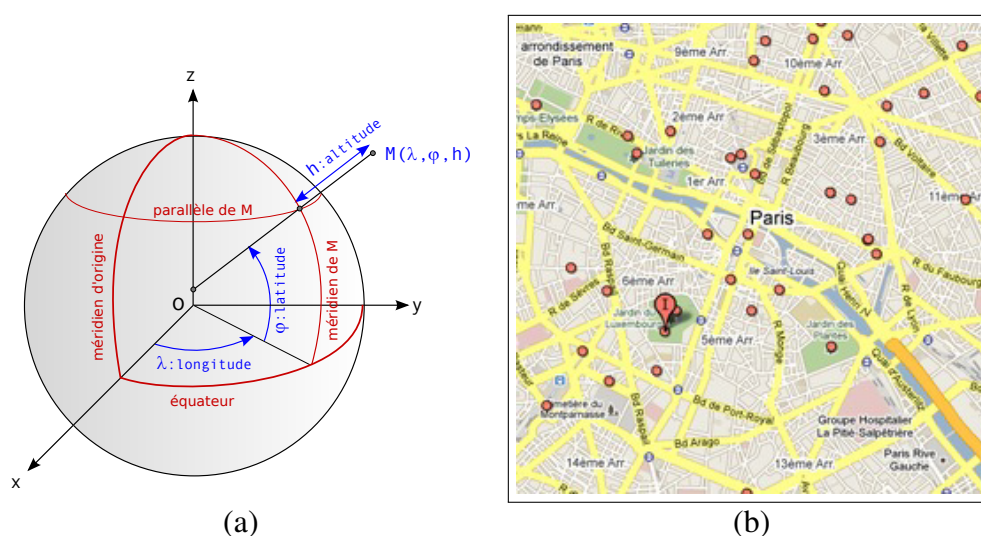
Sur des plateformes plus petites, [Jensen \[2008\]](#) combine un appareil photographique du commerce non modifié avec un appareil identique qu'il a modifié pour percevoir l'infrarouge proche et peut ainsi calculer des indices de végétations. On peut voir une illustration de son système et de résultats qu'il obtient à la figure 2.22 p. 64.

---

19. On trouve des systèmes bi-caméras chez [Kelly \*et al.\* \[2008\]](#) et [Hrabar et Sukhatme \[2006\]](#) mais pour estimer la hauteur sol de l'appareil.



**FIGURE 2.22** – *Système multi-caméras multispectral — (a) Capteur bi-caméras, à partir de deux appareils photographiques compacts — (b) Test avec un ballon à hélium — (c&d) Images acquises simultanément dans le spectre visible (c) et proche infrarouge (d). Source : Jensen [2008]*



**FIGURE 2.23** – Géolocalisation. (a) Coordonnées géographiques. Source : Gademer — (b) Exemple de données géolocalisées : Les parcs de Paris. Source : Google Maps

### 2.3.3.4 Synthèse

La possibilité d'emporter simultanément plusieurs appareils photographiques offre de nombreux avantages : par une disposition directionnelle, elle permet une augmentation de la surface perçue et l'acquisition d'images obliques permettant une meilleure identification des hauteurs, mais si on place les appareils parallèlement on peut aussi obtenir des clichés stéréoscopiques sur une base rigide, ce qui permettrait de minimiser les variations extérieures de prise de vue. Enfin, en combinant les appareils photographiques et les capacités spectrales, il est possible d'améliorer la discrimination des objets de la scène et d'en tirer des informations sur leurs propriétés biophysiques.

## 2.3.4 Géolocalisation des images

### 2.3.4.1 Principe et enjeux de la géolocalisation

Le terme géolocalisation ou géoréférencement s'applique à l'activité de localisation d'un objet dans un référentiel lié à la Terre, généralement en lui attribuant des coordonnées géographiques : longitude, latitude, altitude, comme on peut le voir sur la figure 2.23(a) p. 65.

Des données géoréférencées peuvent être situées sur une carte papier ou intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG)\*, comme sur la figure 2.23(b), qui attribue à chaque information une représentation géométrique (ponctuelle, linéaire ou surfacique) dans un repère géographique ou cartographique. Cette approche permet d'analyser les données dans leurs relations topologiques (proximité, superposition...) et/ou de produire des cartes synthétiques reflétant la nature spatiale de l'information traitée.

La géolocalisation des images acquises à partir de l'aéromodèle ou du micro-drone est nécessaire pour la réalisation de carte de la dynamique de la végétation. Celle-ci est géné-

ralement obtenue par l'utilisation de points d'appui\* — points de l'image dont on connaît aussi la position dans l'espace réel — qui permettent, par des méthodes d'optimisation de retrouver la géométrie de la scène lors de l'acquisition. Une fois la géométrie d'acquisition connue, on peut attribuer des coordonnées géographiques à tous les pixels de l'image.

La difficulté et le coût de l'utilisation des points d'appui proviennent de la difficulté de géolocaliser un nombre de points suffisants sur le terrain et de retrouver ces mêmes points précisément dans les images, elle est cependant aujourd'hui la seule méthode qui assure une précision subcentimétrique sur la position des données.

L'acquisition des informations de géométrie de la scène au moment de la prise de vue se nomme géoréférencement direct et utilise de nombreux capteurs internes au système, comme les récepteurs GPS et les centrales inertielles, pour obtenir la position et l'orientation dans l'espace du système. Cette méthode, qui nécessite moins de manipulation sur le terrain et moins de calcul sur les données, permet quasiment de géolocaliser les images en quasi-temps réel mais ne peut offrir au mieux qu'une précision décimétrique sur la position des données.

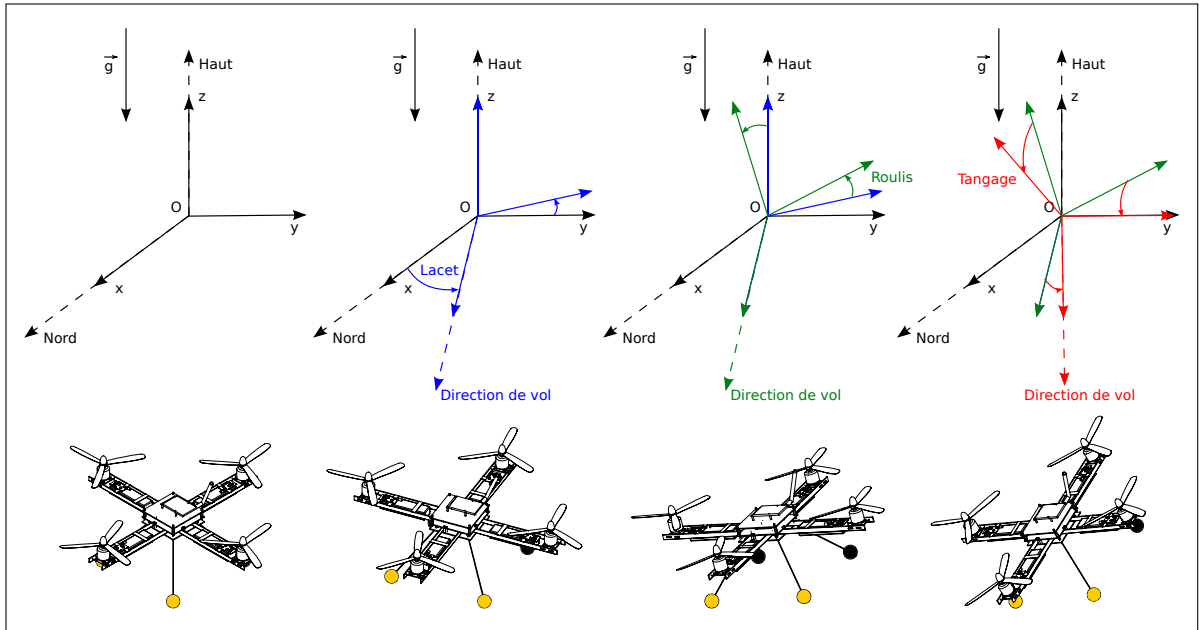
Le délai entre le besoin et la réception des données sera alors un facteur de choix important : l'extraction de paramètres de surface nécessite une géolocalisation à l'échelle des paramètres que l'on cherche à identifier, soit une précision centimétrique mais un géoréférencement direct des données permet de réduire le nombre de points d'appui et ce faisant le coût humain de la géolocalisation. Par ailleurs, le système peut fournir en temps réel des informations sur la qualité ou la complétion de la campagne de mesure et ainsi influencer les décisions prises pour les campagnes suivantes ; ce niveau d'interactivité justifie l'investissement en temps et en énergie de ce choix technologique.

#### 2.3.4.2 Capteurs pour le géoréférencement direct

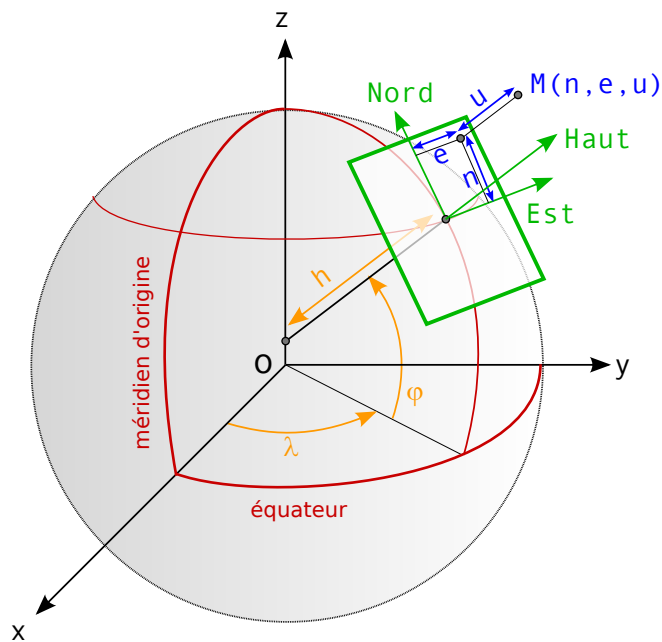
Le géoréférencement direct cherche à déterminer la géométrie d'acquisition des images à partir de la position et l'orientation du porteur au moment de la prise de vue. Cela est rendu possible par l'utilisation de nombreux capteurs intégrés dans les aéromodèles ou les micro-drones. Cette section passera rapidement en revue leur mode de fonctionnement.

**Mesure de l'attitude avec une centrale inertielle** On appelle centrale inertielle, un système fournissant une orientation, sous la forme de trois angles — appelés angles d'Euler, et illustrés sur la figure 2.24 p. 67 — que forme le capteur par rapport au référentiel Est-Nord-Haut que l'on appelle le plan local tangent et illustré à la figure 2.25 p. 67. Les angles ainsi mesurés se nomment le roulis (gauche/droite), le tangage (avant/arrière) et le lacet (autour de la verticale, par rapport au nord).

[Belbouab \[2006\]](#) explique que les centrales inertielles sont généralement composées de trois gyroscopes — qui mesure la variation d'angle —, de trois accéléromètres — qui mesure l'accélération de l'appareil dans le champ de gravitation terrestre — et de trois magnétomètres — qui mesure l'orientation par rapport au champ magnétique terrestre et dont nous avons brièvement parlé au paragraphe 2.2.4. Les mesures de chacun de ces capteurs



**FIGURE 2.24** – Les angle d'Euler — lacet, roulis, tangage — définissent l'orientation de l'appareil dans le référentiel local Est-Nord-Haut. Source : Gademer



**FIGURE 2.25** – Plan local tangent. Référentiel cartésien intuitif, assimilable localement au sol ou à une carte et reprenant les notions de "haut", de points cardinaux Source : Gademer



doivent être effectuées selon trois axes orthogonaux soit par des capteurs multi-axe ou par une combinaison de capteur mono-axe.

La centrale inertielle possède aussi un calculateur dont le rôle est d'intégrer et de filtrer les mesures d'accélération, de champ magnétique et de vitesse angulaire pour fournir une information de haut niveau comme un triplet de valeurs correspondant aux angles d'Euler ou d'une matrice d'orientation qui est la matrice de passage du repère du capteur au plan local tangent. La majorité des centrales inertielles proposent aussi de fournir les informations bas niveau, provenant de chacun des sous-systèmes, comme les vitesses angulaires ou les accélérations, laissant alors le soin à l'utilisateur de filtrer les mesures.

Nous avons vu à la section 2.2.4 que l'évolution technologique avait fait chuté le prix des composants MEMS, mais cependant la complexité des algorithmes mis en œuvre pour le filtrage et la fusion des mesures expliquent en partie le coût encore élevé de ces systèmes<sup>20</sup>.

En simplifiant l'approche théorique, [Edi \[2007\]](#) explique que la centrale utilise les accéléromètres pour détecter le vecteur pesanteur ainsi que les accélérations linéaires dues aux mouvements en translation, les gyroscopes pour les vitesses angulaires lors de la rotation et les magnétomètres pour retrouver de manière fiable le nord magnétique.

Tous ces capteurs physiques ne se basent que sur leur état interne pour faire leurs mesures, ils sont donc très sensibles aux biais de calibration dus à des paramètres externes non contrôlés comme la température et sont susceptibles de dériver dans le temps, c'est-à-dire que l'erreur de mesure va croître (linéairement, voire exponentiellement) dans le temps.

C'est pour limiter au maximum ces erreurs de mesure que la centrale inertielle utilise plusieurs capteurs distincts pour estimer la même grandeur physique.

La fusion de données entre accéléromètres et gyroscopes permet de calculer la valeur de l'angle entre la centrale inertielle et l'horizon du repère terrestre.

L'accéléromètre est utilisé en tant qu'inclinomètre pour mesurer l'angle entre le vecteur pesanteur et le repère dans lequel est mesurée l'accélération. Ce calcul fait l'hypothèse que la seule source d'accélération du capteur est l'accélération due à la pesanteur. En pratique, cette dernière est parasitée par les accélérations relatives aux déplacements du capteur et aux vibrations.

Le gyroscope mesure la vitesse angulaire donc la dérivée de l'angle mesuré par l'accéléromètre. L'intégration de cette valeur permet donc d'obtenir, à une constante près, l'angle recherché. Cependant, un gyroscope a souvent une valeur neutre (correspondant à une vitesse de rotation nulle) imprécise et qui varie au cours du temps<sup>21</sup>. Ainsi l'angle calculé à partir de la vitesse angulaire d'un gyroscope au repos a tendance à dériver au cours du temps et des changements de température.

Si la fusion de données des deux capteurs est correcte, l'angle calculé est très proche de la réalité dans toutes les situations :

---

20. ~2 000€ pour les premiers prix en 2007

21. Beaucoup de gyroscopes MEMS sont aussi influencés par les variations de température dues entre autre à l'échauffement des composants.

- quand les capteurs sont immobiles ou tournent lentement (la rotation est une basse fréquence), l'information de l'accéléromètre est prédominante et renvoie une valeur correcte ;
- quand les capteurs sont soumis à des accélérations parasites ou des rotations rapides (hautes fréquences), l'information intégrée du gyroscope est alors correcte car la valeur de la vitesse angulaire est proportionnellement très supérieure à l'erreur de la valeur neutre.

La fusion de donnée permet d'utiliser les deux types de capteurs dans la plage d'utilisation où chacun est le meilleur et ainsi d'avoir une mesure plus précise dans tous les cas.

D'un manière un peu similaire les magnétomètres (qui ont sensiblement les mêmes défauts que les accéléromètres) sont appariés aux gyroscopes pour avoir une valeur plus précise de l'angle de lacet.

On notera que nous avons parlé ici des mesures instantanées des angles d'Euler mais la centrale inertielle est aussi capable de mesurer la vitesse linéaire et la position relative du système dans le plan local tangent en intégrant dans le temps l'orientation et les accélérations. Malheureusement les erreurs de mesures, négligées pour une estimation instantanée, s'accumulent lors de cette double intégration et rendent cette utilisation des centrales inertielles limitée à quelques secondes.

Lorsque la minimisation des erreurs est cruciale, comme dans les sous-marins qui ne peuvent se baser que sur ce type de capteur, on peut utiliser des sous-systèmes plus précis — comme des gyroscopes laser —, mais les technologies employées dépassent en taille et en coût les applications des micro-drones.

On utilise donc la centrale inertielle seule pour la mesure d'attitude et on préfère l'utiliser conjointement pour les mesures de positions.

**Mesurer la hauteur sol** La première information dont on a besoin pour voler en toute sécurité est la hauteur sol. En effet, si un pilote humain peut compenser les dérives en translation, il est assez ardu de maintenir une hauteur constante lorsqu'il y a beaucoup de vent, comme nous pourrions le voir au chapitre 4 lors de la mission terrain que nous avons effectuée.

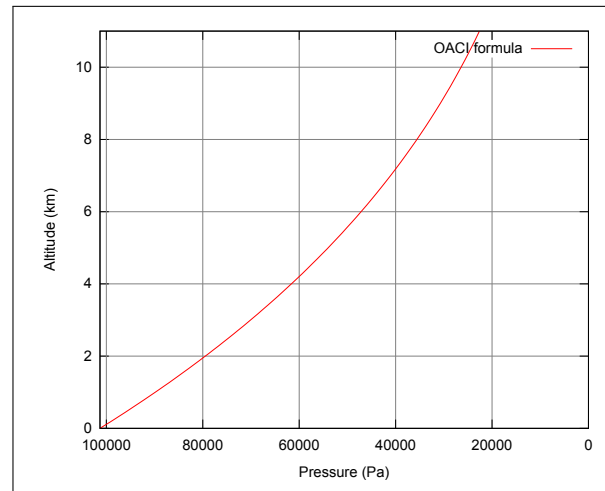
L'asservissement d'un aéromodèle ou d'un micro-drone en hauteur nécessite de pouvoir mesurer et compenser deux paramètres :

- les hautes fréquences, les perturbations de l'air (principalement créées par l'effet de sol\*<sup>22</sup> ou le vent lors de vols extérieurs) qui agissent sur la vitesse verticale de l'appareil ;
- les basses fréquences, dues aux déplacement lents de masses d'air et venant de différents facteurs électriques et électroniques<sup>23</sup> qui agissent lentement sur la hauteur de l'appareil.


---

22. L'effet de sol apparaît lorsqu'un appareil se rapproche du sol et que l'air se retrouve comprimé localement. Cette densité augmente la portance de l'appareil mais est également une source d'instabilité.

23. Quand la consigne donnée à un moteur est constante, la puissance fournie par ce dernier diminue au cours du temps à cause de l'augmentation de la température des moteurs et de leurs contrôleurs, mais aussi de la décharge de la batterie.



**FIGURE 2.26** – Altitude en fonction de la pression (obtenue par inversion de la formule donnée par l'OACI). Nota bene : les abscisses vont de 1 013,25 hPa (Pression au niveau de la mer) à 0 (Espace).

Source : Gademer 

Il y a plusieurs manières de mesurer la hauteur sol ; soit avec des capteurs relatifs comme l'altimètre barométrique\* qui utilise la variation de pression entre le moment de départ et le moment actuel ou avec des capteurs actifs comme les télémètres\* ultrason ou laser qui mesurent une distance entre le capteur et la première surface rencontrée.

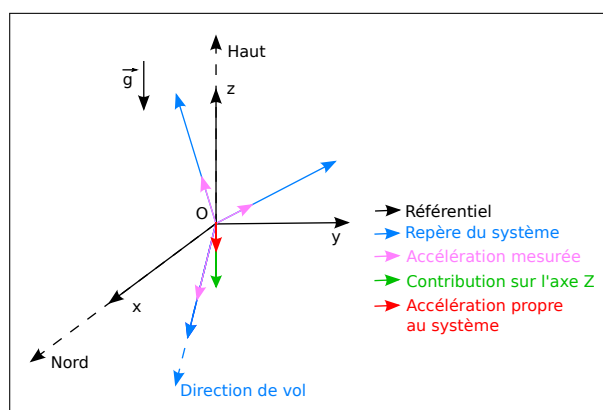
Tang *et al.* [2005] expliquent que l'altimètre barométrique utilise un capteur de pression barométrique pour mesurer le poids de la colonne d'air située au-dessus de lui. L'OACI [1964] propose une formule physique, illustrée à la figure 2.26, qui donne la corrélation entre la pression atmosphérique et l'altitude au dessus du géoïde\*, soit l'équipotentielle zéro de pesanteur qui se prolonge généralement en mer par le niveau moyen des mers. Cette formule reste valable tant que l'on reste dans la troposphère, c'est-à-dire entre 0 et 11 Km d'altitude.

$$P_{alti} = P_{sol} \times \left( \frac{288 - 0.0065 \times altitude}{288} \right)^{5.255} \quad (2.1)$$

Si cette méthode est approximative pour connaître l'altitude de manière absolue à cause de l'influence des conditions météorologiques locales qui ne sont pas prises en compte, c'est un moyen classique pour mesurer la variation relative de hauteur le temps d'un vol court. On se sert alors de l'altitude mesurée au point de départ comme mesure de référence.

On notera que les altimètres barométriques courants possèdent une précision nominale de 3 bars [VTI Technologies, 2007] (soit une trentaine de centimètre), et les mesures empiriques montrent un écart-type de l'ordre de 50 centimètres : la mesure est non seulement extrêmement bruitée (ce qui suggère l'utilisation d'un filtre moyen) mais la pression met du temps avant de se stabiliser alors même que le drone est immobile au sol.

Ainsi, l'utilisation d'un capteur de pression seul ne donne pas de résultats assez précis pour permettre l'atterrissage et le décollage automatique. Vissière *et al.* [2008] et Carballeda



**FIGURE 2.27** – La mesure de l'accélération verticale doit prendre en compte l'orientation des accéléromètres dans le référentiel terrestre et la contribution de la pesanteur. Source : Gademer

et Leroux [2009] proposent cependant une solution consistant à fusionner des informations de pression et d'accélération verticale pour obtenir une précision relative et une réactivité améliorant grandement le contrôle de l'altitude.

On utilise ici les mêmes accéléromètres que ceux présent dans la centrale inertielle mais on s'intéresse plus particulièrement à la contribution sur l'axe vertical. Pour cela il faut remplacer l'accéléromètre 3 axes dans l'espace grâce à l'information d'orientation donnée par la centrale et soustraire la contribution de la pesanteur terrestre, illustrée en vert sur la figure 2.27 p. 71, et considérée constante durant le vol. À partir de l'accélération verticale on peut déterminer la vitesse puis la position selon l'axe vertical par deux intégrations successives.

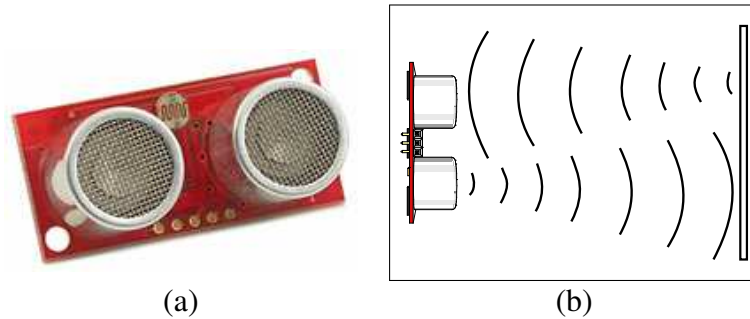
On peut remarquer que les erreurs de mesure de l'accéléromètre s'ajoutant aux erreurs de mesure angulaire de la centrale inertielle, la composante verticale de l'accélération mesurée comprend un bruit aléatoire important ; le fait d'intégrer deux fois cette valeur engendre une erreur considérable sur la position calculée, proportionnelle au carré du temps. L'accéléromètre ne peut donc raisonnablement être utilisé que pour connaître un changement d'altitude relatif et cela pendant un temps assez court en appui de l'altimètre barométrique.


Quoi qu'il en soit, malgré une certaine robustesse, cette mesure relative d'altitude ne prend pas en compte la variation du terrain et peut s'avérer insuffisante pour estimer la distance réelle au sol.

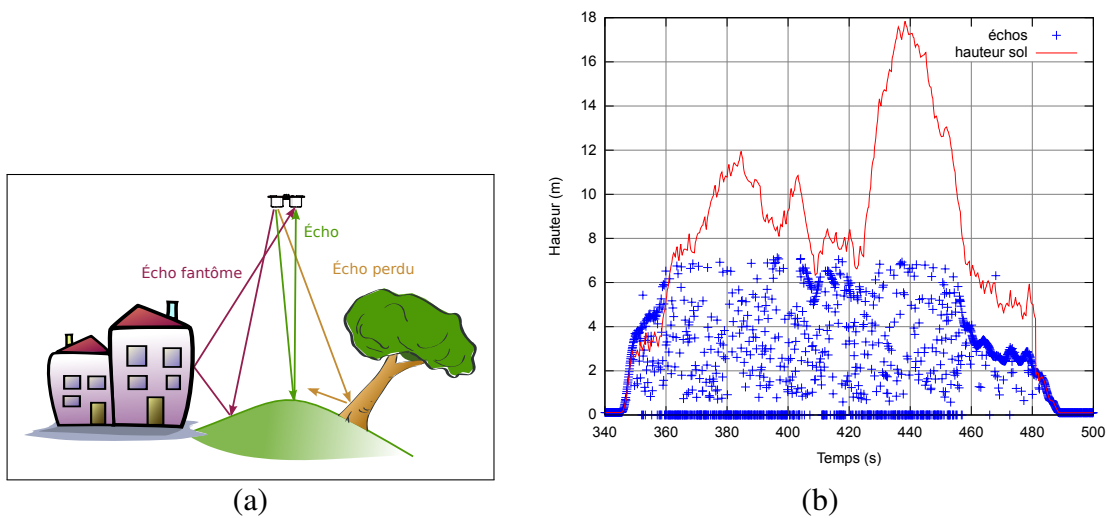
On préfère alors se baser sur un capteur actif de mesure de distance comme un télémètre ultrason ou laser. Comme le montre la figure 2.28 p. 72, ces capteurs mesurent le temps nécessaire à une onde sonore ou électromagnétique pour effectuer un aller retour entre le capteur et une surface ; connaissant la vitesse de déplacement de l'onde, on en déduit la distance.


Les télémètres laser restent pour le moment trop lourds et trop coûteux pour être embarqués sur des micro-drones, mais les télémètres fonctionnant aux ultrasons sont utilisés de manière courante.

D'une précision subcentimétrique et de coût et de poids raisonnable, les capteurs ultra-



**FIGURE 2.28** – Télémètre ultrason. (a) Le module SRF08 est composé d'un émetteur et d'un récepteur ultrason. Source : robot-electronics.co.uk — (b) La vitesse du son dans l'air étant connue, le temps de propagation de l'écho est donc proportionnel à la distance entre le télémètre et la surface réfléchissante. Source : Gademer 



**FIGURE 2.29** – Erreurs de mesure ultrason liées au terrain. (a) Hors du cas théorique d'une surface plane parallèle (cf. Fig. 2.28(b)), certains échos se perdent ou empruntent un chemin plus long fait de multiples rebonds. Les échos perdus ou fantômes perturbent les mesures. — (b) Au delà d'une certaine distance, les échos perçus (en bleu) ne sont plus que des faux-positifs liés aux échos fantômes et ne sont plus significatifs. Source : Gademer 

Caractéristique	Altimètre barométrique	Télémètre ultrason	Télémètre laser
Précision	~ 30cm	~ 1cm	~ 0, 1cm
Réactivité	Lente	Instantanée	Instantanée
Portée max	11 km d'altitude	~ 7m	~ 300m
Portée min	N/A	~ 1cm	~ 4m
Poids	2 g	15 g	225 g
Prix	\$35	\$65	\$500
Type d'information	Altitude relative	Hauteur sol	Hauteur sol
Produit	SCP1000	SRF08	Opti-logic laser range finder

**TABLE 2.6** – Comparaison des capteurs estimant la hauteur sol. Source : Gademer 

sons sont cependant généralement sensibles aux surfaces non planes et ne sont efficaces que sur une courte distance (quelques mètres). Ils sont donc parfaits pour les phases critiques qui nécessitent une grande précision mais souffrent de faux positifs dus aux multiples échos illustrés à la figure 2.29 (a) p. 72. La figure 2.29 (b) montre bien que dès que la hauteur est trop grande, les distances mesurées sont très inférieures à la distance réelle. Les télémètres ultrason ne peuvent donc être utilisés seuls et nécessitent l'usage en parallèle d'un altimètre barométrique.

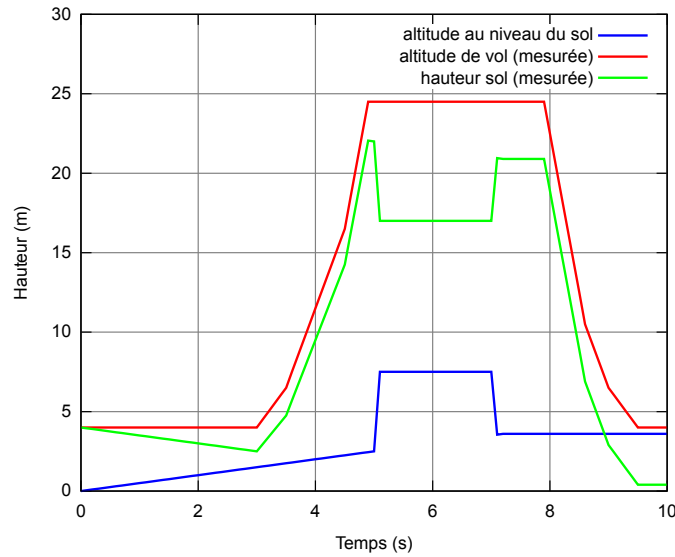
La table 2.6 p. 73 récapitule les différences de caractéristiques entre les différents systèmes d'estimation de la hauteur sol.

Par soucis d'exhaustivité, nous citerons les travaux de [Hrabar et Sukhatme \[2006\]](#); [Kelly et al. \[2008\]](#) qui cherchent à obtenir la hauteur sol — et les éventuels obstacles par des systèmes stéréoscopiques. Leur implémentation est pour le moment au stade de recherche car ils demandent énormément de puissance de calculs et occupent une grande partie de la charge utile de l'appareil.

Enfin, on fera attention aux confusions entre les deux concepts que sont la hauteur sol et l'altitude. La hauteur sol correspond à la distance par rapport au premier obstacle alors que l'altitude se base en distance relative au niveau moyen des mers, la distance entre les deux correspond au relief\* du terrain. En cas de fort relief les deux notions divergent fortement. Si la hauteur sol est généralement privilégiées pour des questions de sécurité, la photogrammétrie demande des prises de vues à une altitude constante pour pouvoir déterminer le relief du terrain. La figure 2.30 p. 74 illustre la différence entre ces deux concepts.

**Se positionner dans le repère terrestre** L'attitude et la hauteur sol de l'appareil étant considérées acquises, il reste à positionner l'appareil dans le plan pour connaître la géométrie d'acquisition.

On a vu précédemment que l'on pouvait intégrer les informations données par la centrale inertielle pour obtenir une information de position mais que cette mesure ne pouvait être utilisée que sur un intervalle de temps très bref à cause du biais et de la dérive du capteur. Le phénomène de biais et de dérive est commun à tous les capteurs qui ne se basent que sur

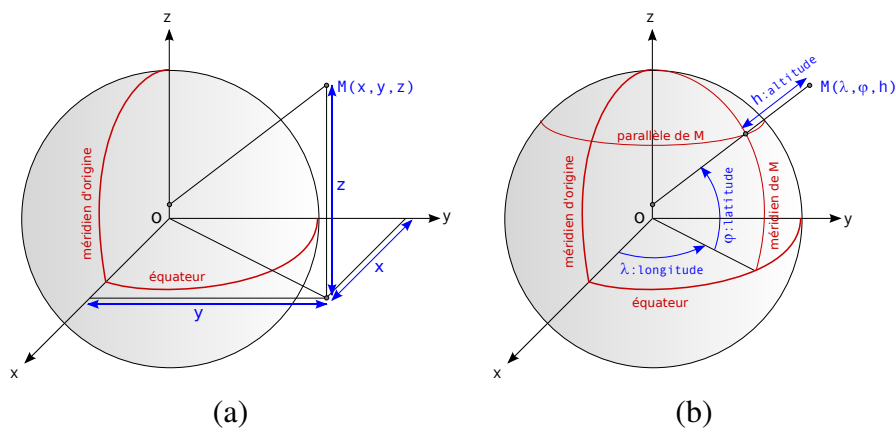



**FIGURE 2.30** – L’altimètre barométrique fournit une information sur l’altitude de l’appareil (en rouge). Le télémètre ultrason, pour sa part, mesure la hauteur séparant l’appareil du sol (en vert). Si ces deux informations coïncident dans l’hypothèse d’une surface plane horizontale, la distance entre les deux informations correspond au terrain (en bleu).

des mesures de changement interne au système. C’est pourquoi on a inventé un système de positionnement absolu basé sur le principe de la trilatération : en mesurant la distance à un certain nombre de points connus on déduit la position dans le système.

Le système de trilatération le plus utilisé est le Global Positioning System (GPS).

Correia [2001] explicite le fonctionnement de ce système : le récepteur GPS capte des



**FIGURE 2.31** – Coordonnées géocentriques (a) La trilatération satellite doit se faire dans un repère cartésien. Le repère géocentrique cartésien passe par le plan de l’équateur, le méridien de Greenwich et le pôle nord. — (b) Les coordonnées GPS sont ensuite converties dans le repère géographique Longitude, Latitude, Altitude pour être facilement utilisées avec les cartes géographiques. ( Source : Gademmer 

ondes électromagnétiques émises par une constellation de satellite et calcule à partir de ces messages le temps de parcours de l'onde et donc la distance à chacun des satellites. La position des satellites étant décrit dans le référentiel géocentrique cartésien, décrit par la figure 2.31(a) p. 74, c'est dans ce même référentiel que la position est obtenue. Le récepteur GPS fournit néanmoins généralement les coordonnées du points sous forme de coordonnées géographiques. Le référentiel géographique est illustré par la figure 2.31(b).

La trilatération Global Positioning System (GPS)\* est illustré par la figure 2.32 p. 76 ; si le modèle théorique peut se contenter de trois distances pour déterminer la position d'un point (a), les différentes erreurs — erreurs de position pour les satellites, décalage dans les horloges, délais dus aux conditions atmosphériques ou aux échos, erreurs volontaires en cas de brouillage — se cumulent et l'on n'obtient qu'une estimation de la position du récepteur (b).

De plus, les satellites de la constellation GPS ont des orbites polaires afin de couvrir l'ensemble du globe. Il en résulte une variation de la répartition des satellites dans le ciel et donc une variation de la précision maximale atteignable. Cette information, illustrée à la figure 2.33 p. 76 est synthétisée sous la forme d'une variable nommée Dilution Of Precision (DOP) et qui correspond à la qualité géométrique de la constellation de satellite vue par le récepteur. On peut voir sur la figure 2.33(a) que cette répartition, bonne ou mauvaise, est fortement liée aux contraintes de trajectoire de satellite et ne peut généralement pas être évitée. La figure 2.33(b) illustre l'influence de l'environnement immédiat, qui peut cacher une partie de la constellation GPS et diminuer la qualité précision de la mesure.

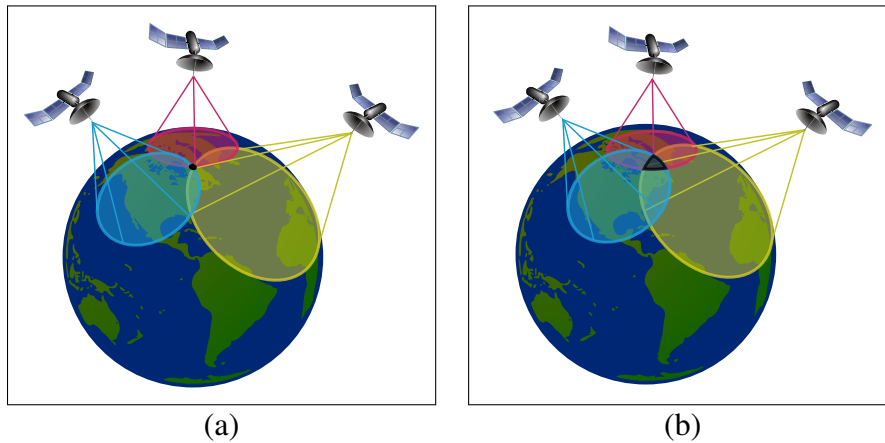
Les multiples erreurs de mesure — précision de la connaissance des éphémérides, précision de la synchronisation des horloges des satellites et du récepteur, échos rebonds ou multiples, disposition défavorable car trop regroupée de la constellation — sont compensées en partie par la comparaison des différents signaux des satellites ; plus le récepteur capte un grand nombre de satellite, plus il peut corriger statistiquement les erreurs et plus la précision sera grande.


On estime aujourd'hui, qu'en environnement urbain — malheureusement propice aux échos rebonds et multiples — la précision obtenue sur le positionnement est de l'ordre de cinq mètres, ce qui est suffisant pour la navigation en voiture mais insuffisant pour permettre le déplacement sécurisé d'un aéromodèle ou d'un micro-drone en mode automatique. Lorsque l'on monte en altitude et que l'on s'éloigne des bâtiments la précision devient meilleure — de l'ordre du mètre — et la navigation automatique est envisageable.

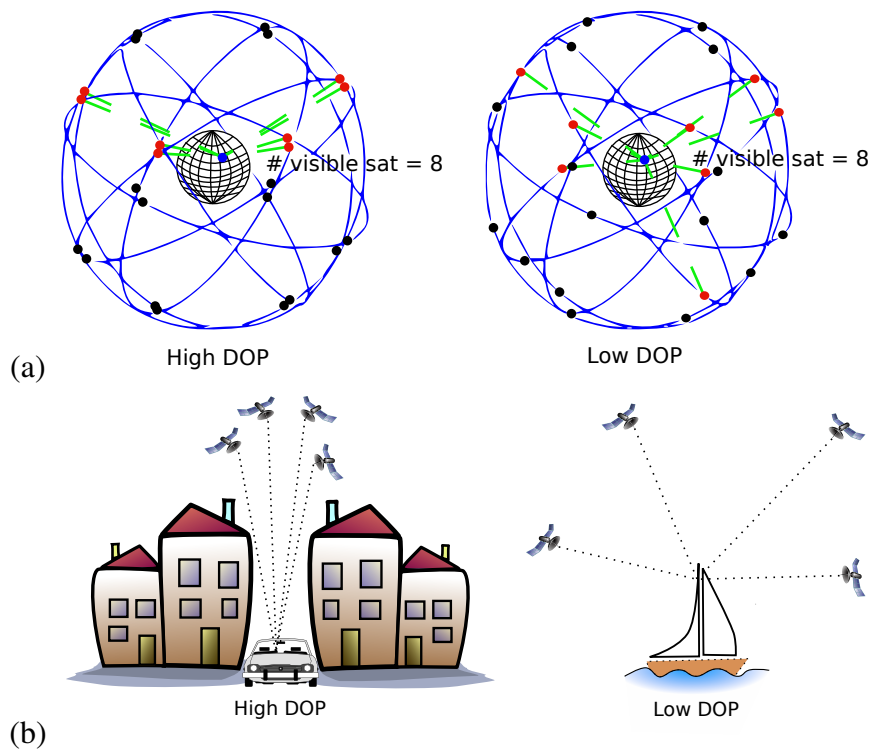
Néanmoins, de nouvelles pistes sont en cours pour se positionner grâce à la vision, ce qui permet un vol à l'intérieur des bâtiments ou dans un environnement urbain ou péri-urbain.


Grâce à l'étude de variations de position de points caractéristiques dans un flux vidéo, ces systèmes utilisent les plus récents algorithmes de traitement d'images pour se positionner dans l'espace. Très efficaces par la précision relative de leur mesure, ils deviennent très intéressants lorsque l'on perd le signal GPS ou à l'intérieur d'un bâtiment. Cependant, ces systèmes sont pour l'instant très coûteux en temps de calcul et nécessitent beaucoup de puissance pour être exécutés à une fréquence suffisante. [Doncieux et Angeli \[2007\]](#) ont montré que des versions plus modestes fournissant uniquement la direction de déplacement ont été





**FIGURE 2.32** – Trilatération GPS. (a) Cas théorique parfait, les trois cercles se coupent en un point unique. — (b) En réalité, les erreurs commises sur le positionnement des satellites, la synchronisation des horloges et les échos fantômes limitent la précision de la trilatération. Source : Gademer 



**FIGURE 2.33** – Dillution of Precision (DOP) Cet indicateur est utilisé pour estimer la qualité prévue des données, le nombre de satellites étant constant. (a) Un DOP haut (à gauche) correspond à des satellites relativement mal répartis dans l'espace, ce qui limite la correction d'erreur. Un DOP bas (à droite) correspond à l'inverse à des satellites bien répartis. — (b) Les obstacles qui limitent le champ de perception du capteur, comme le paysage urbain, causent aussi une augmentation de l'indice DOP. Source : Gademer 

développés récemment ; on les appelle des systèmes optic flow\*[Conroy *et al.*, 2009; Dille *et al.*, 2010; Wenzel *et al.*, 2010; Stowers *et al.*, 2009].

### 2.3.5 Contraintes sur le système

Nous avons vu au paragraphe 2.3.3 p. 59 les avantages que nous attendions de la possibilité d'emporter un système multi-caméras modulaire permettant l'acquisition simultanée d'images géoréférencées.

Afin d'atteindre cet objectif, on peut distinguer trois principaux défis : tout d'abord que le porteur ait effectivement une capacité d'emport suffisante pour emporter plusieurs appareils photographiques pesant chacun plusieurs centaines de grammes ! On a vu au paragraphe 2.1.3 p. 40 que cette capacité pouvait varier fortement en fonction des plateformes et donc la capacité de charge utile sera un critère essentiel.

Ensuite, pour permettre le géoréférencement direct des images, le système devra, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3.4 p. 65, embarquer une batterie de capteurs complémentaires et rendre accessible leurs mesures d'orientation, de position et de hauteur pour pouvoir calculer la géométrie d'acquisition des images.

Enfin, reste la problématique de la synchronisation qui est liée à l'utilisation conjointe de nombreux sous-systèmes. En effet, les appareils photographiques étant des systèmes isolés d'un point de vue électronique, ils possèdent leur propre horloge et leur propre système de datation. D'un autre côté le porteur et son électronique de contrôle possède aussi son référentiel de temps qui est valable pour tous les capteurs : centrale inertielle, altimètre barométrique. ... Enfin, la station sol\* — ordinateur qui gère l'ensemble du plan de vol et des paramètres du drone — possède elle-même une horloge et un temps différent. Le fonctionnement correct du système et la géolocalisation ne sera possible que par une synchronisation précise — de l'ordre de la millisecondes — de tous les sous-systèmes entre eux.

Une synchronisation du porteur et de la station sol est envisageable grâce au temps universel fourni par le récepteur GPS mais la synchronisation des appareils photographiques et du porteur reste une question cruciale à résoudre.

## 2.4 Contraintes tirées du modèle image

On a vu au paragraphe précédent qu'un grand nombre de contraintes technologiques devaient être prises en compte pour le développement d'un système adapté à la Réalité Terrain Étendue (RTE).

Nous avons aussi entraperçu au chapitre 1 paragraphe 1.3.3.1 p. 24, les propriétés géométriques des capteurs optiques qui lient la taille de l'échantillon au sol  $GSD_{mm}$ , la fauchée  $F_{mm}$ , la hauteur sol  $H_{mm}$  et les paramètres internes au capteur comme la focale  $f_{mm}$  et la taille des photosites  $p_{mm}$ , la largeur du fond de chambre  $L_{mm}$  et la résolution du capteur  $R_{pix}$ .

Cette section tentera d'estimer les contraintes posées sur le système en terme de vitesse de déplacement ou de temps d'exposition\* des images par le principe d'acquisition optique à l'œuvre dans les appareils photographiques et les caméras.

Nous avons vu au paragraphe 1.3.3.1 que le modèle optique courant était celui du sténopé ; l'acquisition d'image repose sur le principe physique de la trajectoire rectiligne de la lumière et donc sur des propriétés géométriques simples.

On rappellera les deux formules essentielles 1.3 :

$$GSD_{mm} = \frac{p_{mm}}{f_{mm}} \times H_{mm} = \frac{L_{mm}}{R_{pix} \times f_{mm}} \times H_{mm}$$

et 1.4 :

$$F_{mm} = \frac{L_{mm}}{p_{mm}} \times GSD_{mm} = R_{pix} \times GSD_{mm}$$

### 2.4.1 Calcul de la vitesse de déplacement en fonction du recouvrement désiré

En photogrammétrie, le recouvrement entre les images prises à la verticale permet d'identifier des couples de points entre les images, nommés points d'appariement\*, et de retrouver par des calculs de minimisation de contraintes la géométrie relative de prise de vue. Cette géométrie permet d'améliorer la précision de la localisation des images ou appliquer des traitements plus complexes : mosaïquage[Mainfroy, 2008], orthorectification ou stéréoscopie[Petitpas, 2007].

Or, à basse altitude, le défilement du sol par rapport au capteur est important, il est alors essentiel de maîtriser sa vitesse de déplacement en fonction du recouvrement désiré entre deux photographies successives et de la vitesse de prise de vue autorisée par le capteur. Cette relation est illustrée par la figure 2.34.

En notant  $B_{mm}$  la base, c'est-à-dire la distance entre deux prises de vues en millimètres,  $F_{mm}$  la fauchée en millimètre,  $r_{mm}$  le recouvrement entre deux images en millimètres et  $r_{prct}$  le recouvrement en pourcentage (cf. Fig. 2.34) on a :

$$B_{mm} = F_{mm} - r_{mm} \quad (2.2)$$

$$B_{mm} = F_{mm} \times (1 - r_{prct}) \quad (2.3)$$

En réinjectant l'équation 1.4, on obtient :

$$B_{mm} = GSD_{mm} \times R_{pix} \times (1 - r_{prct}) \quad (2.4)$$

Boureau [2008] rappelle que le recouvrement classique en photogrammétrie est de 60% selon l'axe de vol et 20% entre les passages, mais les travaux de Petitpas [2007] et de Zhang

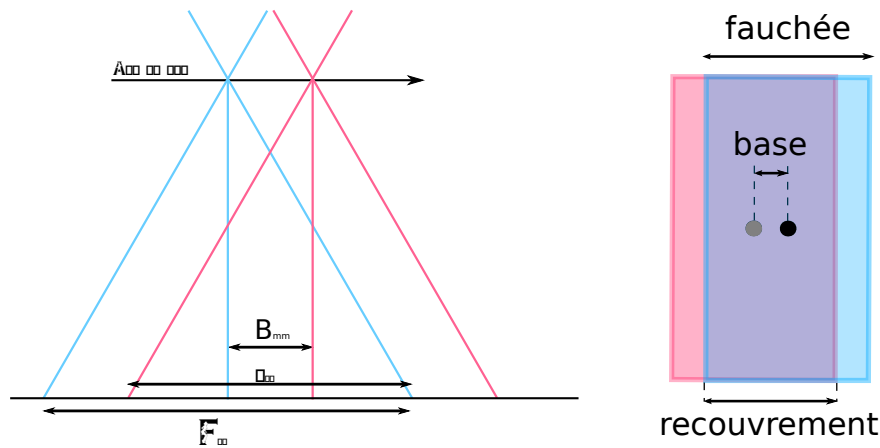



FIGURE 2.34 – Rapport entre la base, la fauchée et le recouvrement. Source : Gademer 

[2008] ont montré qu'un recouvrement de 80% ou plus permettait de meilleurs résultats pour la stéréorestitution\*.

Si l'on reprend les deux appareils photographiques de l'exemple précédent et toujours dans le cadre d'une taille de l'échantillon au sol de 0,5 centimètres, pour un recouvrement selon le petit côté de 80%, on obtient :

$$B_{mm} = 5 \times 3000 \times (1 - 0,8) = 3m$$

Considérant que le temps  $t_s$  minimum entre deux prises de vue est fixé par l'appareil photographique à environ deux secondes[Gademer, 2008], on en déduit la vitesse de vol  $v_{mm/s}$  :

$$v_{mm/s} = \frac{B_{mm}}{t_s} \quad (2.5)$$

soit en kilomètre/heure :


$$v_{km/h} = v_{mm/s} \times \frac{3\,600}{10^6} \quad (2.6)$$

Notre exemple précédent donne :

$$v_{km/h} = \frac{3000}{2} \times \frac{3\,600}{10^6} = 5,4km/h$$

Pour une voilure fixe, il faut comparer cette vitesse minimale à la vitesse de décrochage, c'est à dire la vitesse au dessous de laquelle l'avion n'est plus porté par l'air. Si la vitesse de prise de vue est plus petite que la vitesse de décrochage de l'appareil, il n'est tout simplement pas utilisable pour cette mission.



**FIGURE 2.35** – *Flou de filé. À basse altitude, la prise de vue est plus sensible aux mouvements de l'appareil. — (a) Le capteur n'a pas bougé durant l'exposition, l'image est parfaitement nette. — (b) Le capteur s'est déplacé durant l'exposition provoquant un flou de filé important. Source : Gademmer* 

## 2.4.2 Calcul de la vitesse de déplacement en fonction du flou de filé

Un recouvrement suffisant permet d'assurer une contrainte forte entre les différentes images acquises durant le vol. Mais la qualité intrinsèque de ces images doit aussi être prise en compte. Avec une taille de l'échantillon au sol subcentimétrique, la vitesse de déplacement peut induire un flou de filé\* qui empêche l'exploitation correcte des images.

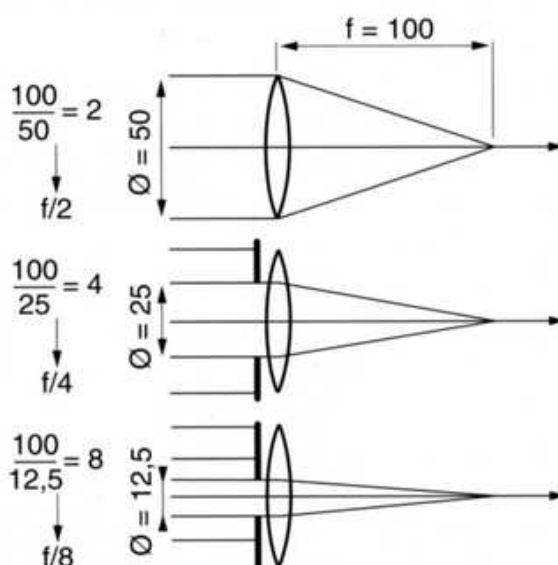
Le flou de filé, illustré à la figure 2.35 p. 80 est le flou produit par le mouvement de l'objectif pendant l'exposition, c'est à dire la durée durant laquelle le diaphragme laisse entrer la lumière et par conséquent durant laquelle l'image optique impressionne le capteur. En photographie aérienne il peut avoir plusieurs origines :

- le déplacement continu du porteur,
- les tremblements introduits par les vibrations des moteurs,
- les oscillations dues à l'éventuelle liberté de mouvement de la charge utile et provoquées par les sautes de vents ou les mouvements brusques du porteur,
- sur un appareil reflex, les vibrations engendrées par le déplacement du miroir.

L'immobilité et la stabilité parfaite n'étant pas possible dans la photographie aérienne, on cherche une durée d'exposition minimale en jouant sur les paramètres de prises de vues : l'ouverture\*, la vitesse d'obturation\* et la sensibilité\* du capteur.

L'exposition correspond en effet à la quantité de lumière reçue par la pellicule ou le capteur et est déterminée par la quantité de lumière que l'on laisse rentrer — qui est liée à la taille du diaphragme et que l'on nomme ouverture — et le temps durant lequel on laisse le capteur exposé — lié à la vitesse d'obturation et appelé temps d'exposition. L'effet de cette exposition est multiplié par la sensibilité du capteur, donnée en ISO.

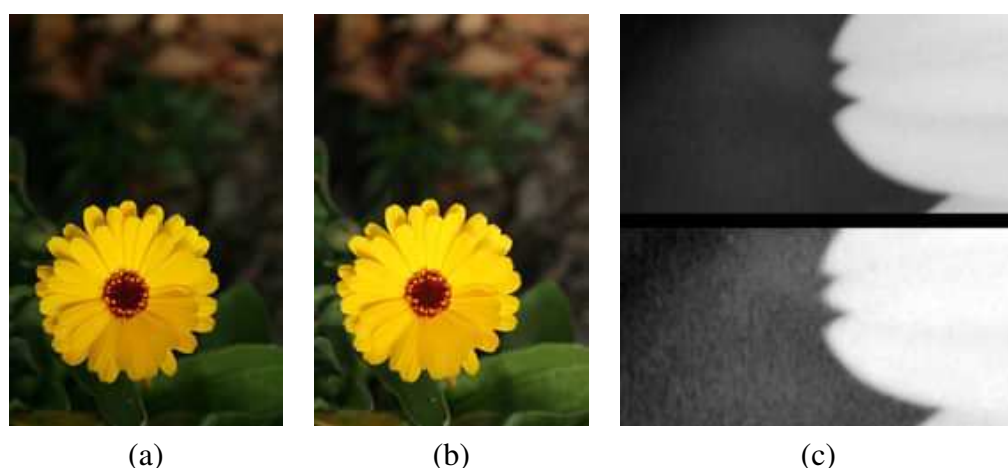
L'ouverture correspond à la taille de la pupille laissant passer la lumière. Comme son effet dépend de la distance focale, elle est généralement donnée comme un rapport entre la distance focale et le diamètre de la pupille. Ce paramètre modifie la quantité de lumière



**FIGURE 2.36** – L'ouverture ou la fermeture du diaphragme (un cache situé avant la lentille), simule une variation de diamètre de la lentille. Comme son influence dépend de la distance focale, elle est généralement notée en tant que fraction de la focale. Source : Rwan / tpephoto.fr.nf



**FIGURE 2.37** – Influence de l'ouverture sur la profondeur de champ. — (a) Image prise avec une ouverture de  $f/5$  — (b) Image prise avec une ouverture de  $f/32$ . Une petite ouverture augmente la profondeur de champ mais nécessite un temps d'exposition plus lent pour capter la même quantité de lumière. Source : Fir0002/Flagstaffotos sous licence GFDL : <http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/fdl-1.2-standalone.html>



**FIGURE 2.38** – Influence de la sensibilité. — (a) Image prise à 100 ISO — (b) Image prise à 1600 ISO — Comparaison d’un détail des deux images précédentes, canal rouge. On voit sur la vignette du bas (1600 ISO) que l’augmentation de la sensibilité à la lumière augmente aussi la sensibilité au bruit électronique du capteur. Source : Wikimedia/HuttyMcphoo

arrivant sur le capteur mais aussi la profondeur de champ, c’est-à-dire la zone autour du focus dans laquelle les objets apparaissent nets. Une plus grande ouverture tend malheureusement à réduire la profondeur de champ, comme on peut le voir sur la figure 2.37 p. 81. Néanmoins, d’après [Bockaert \[2010\]](#) un Pentax A40, avec un capteur 1/1.8”, une focale de 8 mm, une mise au point à l’infini et volant à 12 mètres voit net les objets de 2.6 m à l’infini pour une grande ouverture de  $f/2.8$  et de 1,6 m à l’infini pour une ouverture de  $f/5.4$ . La profondeur de champ ne posera donc de problème que pour les vols à moins de 3 mètres du sol.

La sensibilité ISO d’un capteur définit sa réactivité à la lumière. Initialement définie pour des émulsions argentiques, on trouve une définition très précise pour les capteurs numérique dans la norme ISO 12232 :2006 qui fournit des méthodes de calibration pour les constructeurs d’appareils photographiques. On retiendra que plus l’on augmente la sensibilité ISO, plus on mesure finement les variations de tension aux bornes du photosite qui est proportionnelle au nombre de photons reçus et plus on est capable de distinguer des objets faiblement éclairés. Cependant cette mesure plus fine ne permet pas de distinguer aussi bien les variations de tension dues à l’arrivée de nouveau photons de celles qui sont liées au bruit électronique (signal parasite aléatoire présent dans tout les circuits électronique) et introduisent des erreurs de mesure dans l’image. Les canaux rouge et bleu présentent généralement un bruit plus important, probablement du à la matrice de Bayer<sup>24</sup>. On peut voir une illustration du bruit électronique sur la figure 2.38 p. 82.

La sensibilité d’un capteur définit sa capacité à réagir à une faible quantité de lumière, plus la sensibilité est grande et plus le rapport signal sur bruit du capteur est petit, générant des artefacts dans l’image. Un mauvais réglage de sensibilité peut aussi conduire à une sous- ou une sur-exposition ce qui se traduit par un écrasement du contraste dans le noir ou dans

24. La matrice de Bayer permet de produire une image couleur à partir d’un capteur photosensible panchromatique. Cette matrice utilise un damier de filtres de couleur dont 25% sont rouge, 25% bleu et 50% vert, ce qui peut expliquer une moins grande sensibilité au bruit du canal vert.

le blanc. Dans des conditions normales : en extérieur, en journée, les spécialistes conseillent une sensibilité moyenne de 100 ISO.

La vitesse d'obturation correspond au temps d'ouverture du diaphragme. Les appareils photographiques numériques du commerce calculent en général automatiquement cette vitesse en fonction des autres paramètres de prise de vue, mais elle influence directement le flou de filé. C'est pourquoi il faut chercher à la fixer.

Après plusieurs essais empiriques, une ouverture de  $f/2.8$ , une sensibilité de 100 ISO et une vitesse d'obturation de  $1/500$  semblent donner, pour l'Optio A40, des résultats satisfaisant à l'extérieur, en journée.

À partir de cette vitesse d'obturation nous allons déterminer la vitesse maximale du porteur qui maintient le flou de filé en dessous du seuil de détérioration des images.

Si l'on note  $bg_{mm}$  la distance parcourue par l'appareil durant le temps d'exposition et  $tx_s$  le temps d'exposition on a :

$$bg_{mm} = v_{mm/s} \times tx_s \quad (2.7)$$

Cette distance doit être ramenée à la taille de l'échantillon au sol  $GSD_{mm}$  pour mesurer l'influence du mouvement sur la qualité de l'image : on peut prendre comme hypothèse raisonnable que la distance  $bg_{mm}$  soit inférieure à la moitié de  $GSD_{mm}$

$$vmax_{mm/s} < \frac{GSD_{mm}}{2 \cdot tx_s} \quad (2.8)$$

Soit, pour une taille de l'échantillon au sol de 0,5 centimètre, une vitesse maximale de :

$$vmax_{mm/s} < \frac{5}{2 \cdot \frac{1}{500}} = 1250mm/s = 4,5km/h$$

On en déduit que pour réduire les risques de flou de filé à très basse altitude et malgré des réglages de temps d'exposition faible, le porteur doit être capable de se déplacer très lentement ou de faire du vol stationnaire au dessus des cibles visées.

Nous venons de prendre en compte le flou de filé induit par le déplacement, mais de nombreux porteurs produisent des vibrations dues aux frottement de l'air sur les hélices et les ailes et ces vibrations provoquent un flou de filé non négligeable.

Heureusement les nouvelles générations d'appareils photographiques numériques incorporent généralement une stabilisation mécanique de l'optique ou du fond de chambre, comme illustré sur la figure 2.39 p. 84. En mesurant les mouvements de l'appareils avec des accéléromètres et des gyroscopes, ils compensent les mouvements parasites et en réduisent fortement les effets.





FIGURE 2.39 – Exemple de stabilisation optique. Source : jahmasta.com/Canon

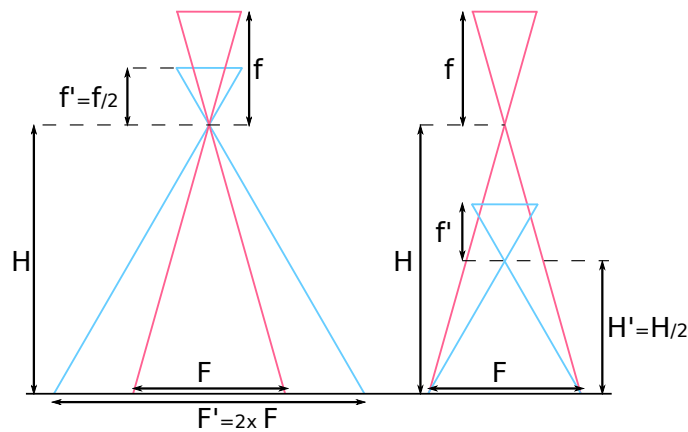


FIGURE 2.40 – Influence du choix de la focale sur la fauchée ou la hauteur sol. À gauche, à hauteur sol constante, le choix d'une focale plus courte augmentera le champ de vision et la fauchée. À droite, à fauchée constante, une focale courte nécessitera une hauteur sol plus petite. Source : Gademer

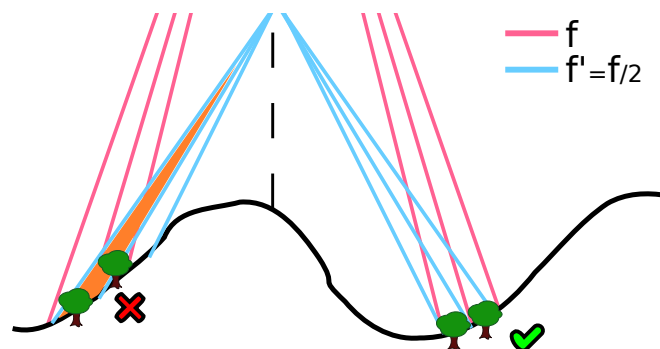


FIGURE 2.41 – Effet de la distance focale sur l'appréciation des objets. En cas de relief, une courte focale peut empêcher l'identification de certains objets sur les bords de l'image. Source : Gademer

### 2.4.3 Choix de la distance focale

Nous avons vu avec les équations 1.3 et 1.4 p. 26 la relation entre la fauchée  $F_{mm}$ , la distance focale  $f_{mm}$ , la largeur du fond de chambre  $L_{mm}$  et la hauteur sol  $H_{mm}$ .

$$H_{mm} = F_{mm} \times \frac{f_{mm}}{L_{mm}} \quad (2.9)$$

Pour un appareil photographique donné — et donc pour une largeur de fond de chambre fixe — le choix de la distance focale agit donc directement sur le rapport hauteur sol sur fauchée.

On voit sur la figure 2.40 p. 84 que le choix d'une focale courte à une hauteur sol donnée augmentera le champ de vision et donc la fauchée. Boureau [2008] prévient cependant que ce choix augmentera le risque de déformation géométrique et d'angle mort, le bord de l'image étant vu avec un angle d'incidence très important. Il note aussi que, comme on peut le voir sur la figure 2.41 p. 84, en présence de relief les courtes focales augmentent le risque de masque d'un objet par un autre, surtout sur le versant opposé au nadir. En revanche, une focale courte permet un recouvrement plus important et une base plus grande entre les photographies, ce qui améliore la précision des mesures altimétrique. Il conclut en disant que les plaines sont généralement photographiées avec des focales courtes, mais que les territoires présentant un fort relief sont généralement photographiées avec une focale deux fois plus grande pour diminuer les déformations géométriques et améliorer la vision stéréoscopique en présence de fort relief.

Les différences de focale, comme la présence d'un « grand angle » sur les appareils photographiques du commerce, est-il un critère contraignant ?

Prenons deux exemple tiré de [Gademer, 2008]. L'Optio A40 de Pentax une focale réelle de 8,12 millimètres, soit une focale équivalente\* de 37 mm<sup>25</sup>.

Un appareil « grand angle » comme le DMC-FX100 de Panasonic, présente une focale réelle plus petite, avec 6,14 mm, soit une focale équivalente de 28 mm.

Les deux appareils ont un fond de chambre et une résolution d'image identiques.

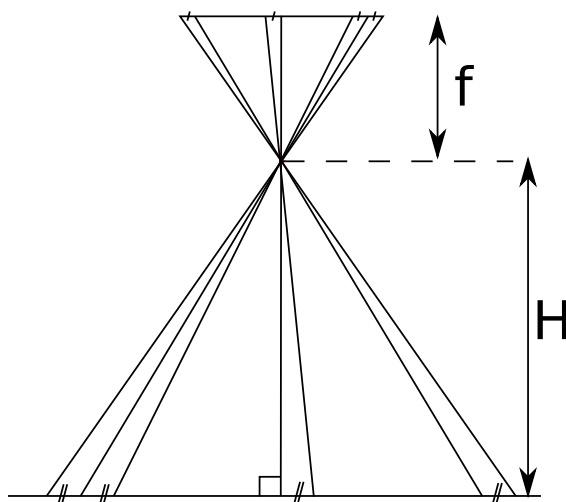
Le rapport entre les deux focales étant de 76%, la formule 2.9 nous informe donc que pour avoir une taille de l'échantillon au sol et une fauchée identique, le DMC-FX100 doit voler à une hauteur sol 76% plus basse que l'Optio A40.

Soit, pour une taille de l'échantillon au sol de 0,5 centimètre à 16,2 mètres<sup>26</sup> au lieu de 21,4 mètres<sup>27</sup>.

25. Comme nous l'avons dit au premier chapitre, l'information donnée par la focale sur le champ de vision de l'appareil n'ayant de sens que par rapport à la largeur du fond de chambre et celle-ci étant devenue variable depuis le passage au capteur numérique, on calcule la focale équivalente qui correspond à celle qu'on aurait eu avec une pellicule argentique standard de 35mm

26.  $H_{mm} = \frac{GSD_{mm} \times L_{pix} \times f_{mm}}{L_{mm}} = \frac{5 \times 4000 \times 6,14}{7,6} \simeq 16,2m$

27.  $H_{mm} = \frac{5 \times 4000 \times 8,12}{7,6} \simeq 21,4m$



**FIGURE 2.42** – Variation de la taille de l'échantillon au sol lors d'une prise de vue nadir Source : Gademmer

La variation de focale ne semble pas significative à l'échelle que nous envisageons car les deux hauteurs de vol sont facilement atteinte par l'ensemble des porteurs de télédétection basse altitude. En revanche, toutes caractéristiques égales par ailleurs, la focale la plus courte pourra être préférée pour une meilleure vision stéréoscopique, l'effet de relief pouvant être négligé à cette hauteur sol.

#### 2.4.4 Influence de l'inclinaison sur la taille de l'échantillon au sol

Ce dernier paragraphe cherche à estimer l'influence de l'inclinaison des appareils photographiques sur la variation de la taille de l'échantillon au sol au sein d'une même image, ce qui provoque des distorsions visible sur les bords de l'image.

Lorsque l'image est acquise strictement à la verticale, le théorème de Thales nous enseigne que la taille de l'échantillon au sol de chaque pixel est identique, comme l'illustre la figure 2.42 p. 86.

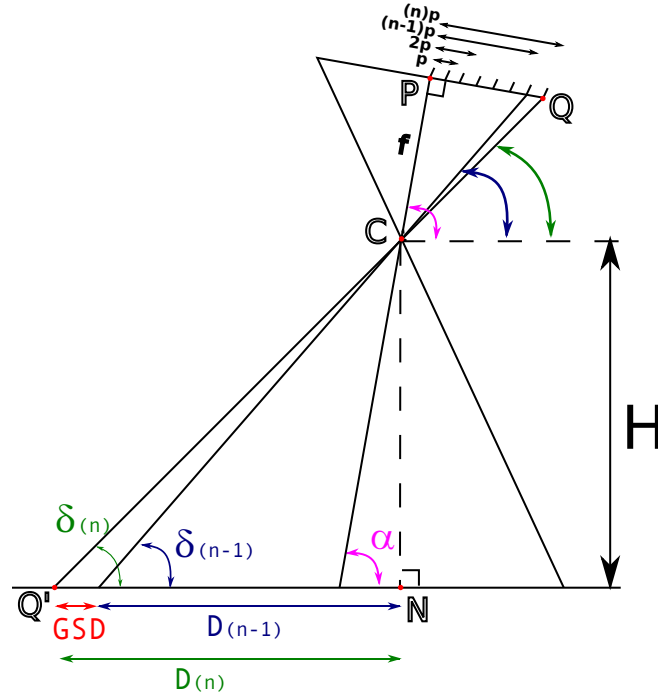
Mais si l'angle de visée  $\alpha$  n'est pas perpendiculaire, la taille de l'échantillon au sol va varier en fonction de la position du pixel.


La figure 2.43 nous permet d'observer la relation suivante ; étant données  $f_{mm}$  la focale,  $p_{mm}$  la taille d'un pixel,  $n$  la position du pixel et  $\delta(n)$  l'angle formé par le rayon lumineux avec le sol, la définition trigonométrique de la tangente appliquée au triangle  $CPQ$  nous donne :

$$\tan(\alpha - \delta(n)) = \frac{n \cdot p}{f} \quad (2.10)$$

soit :

$$\delta(n) = \alpha - \tan^{-1}\left(\frac{n \cdot p}{f}\right) \quad (2.11)$$



**FIGURE 2.43** – Calcul de la taille de l'échantillon au sol lors d'une prise de vue oblique Source : Gademerd 

Cette même définition appliquée au triangle  $CNQ'$  donne :

$$\tan(\delta(n)) = \frac{D(n)}{H} \quad (2.12)$$

soit :

$$D(n) = \frac{H}{\tan(\delta(n))} \quad (2.13)$$

soit en intégrant l'équation 2.12 :

$$D(n) = \frac{H}{\tan(\alpha - \tan^{-1}(\frac{n \cdot p}{f}))} \quad (2.14)$$

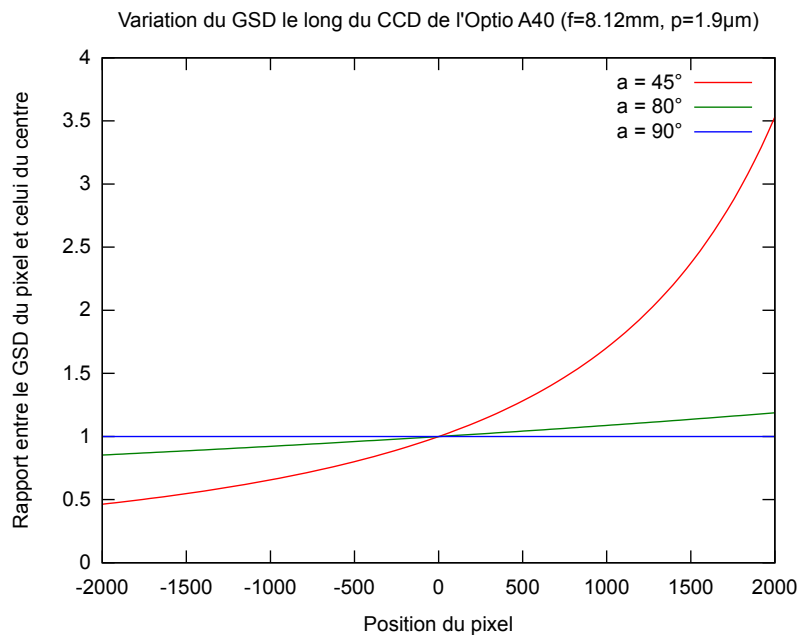
On peut lire sur la figure 2.43 que la taille de l'échantillon au sol du même pixel peut s'écrire :

$$GSD(n) = D(n) - D(n-1) \quad (2.15)$$

soit en intégrant l'équation 2.14 :

$$GSD(n) = \frac{H}{\tan(\alpha - \tan^{-1}(\frac{n \cdot p}{f}))} - \frac{H}{\tan(\alpha - \tan^{-1}(\frac{(n-1) \cdot p}{f}))} \quad (2.16)$$

On peut chercher à voir l'influence de l'angle de visée sur la taille de l'échantillon au sol. En prenant les paramètres intrinsèques de l'Optio A40 on obtient la figure 2.44 p. 88.



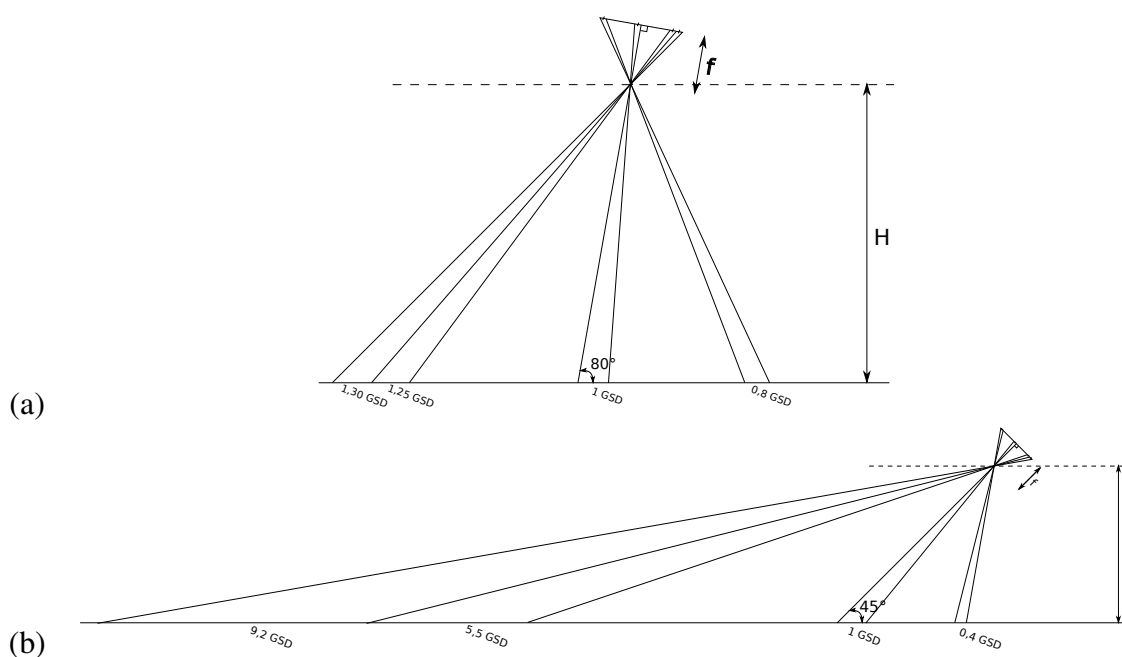
**FIGURE 2.44** – Variation de la taille de l'échantillon au sol en fonction de l'angle de visée. 90° correspond à la vue nadir. Source : Gademer


On lit sur cette figure que pour un angle de visée de 80° par rapport à l'horizontale on mesure une variation de l'ordre de 20% sur les bords par rapport à la taille de l'échantillon au sol au centre, ce qui est négligeable. Mais pour un angle de visée important, on observe une variation de l'ordre de -50% (à l'approche de la verticale) à 350% (vers l'horizon) ce qui doit être pris en compte lors de l'utilisation des systèmes obliques directionnels. La figure 2.45 p. 89 illustre la variation de la taille de l'échantillon au sol avec un angle de visée de 80° puis de 45°.

## 2.4.5 Synthèse générale

Le chapitre 1 fournissait un cahier des charges grossier des besoins des botanistes pour la cartographie de la dynamique de la végétation : un système permettant l'acquisition d'images subcentimétriques géolocalisées sur une surface de quelques hectares et supportant des contraintes de simplicité, de souplesse d'utilisation et de coût raisonnable. Afin de distinguer correctement les espèces végétales dont la forme et la signature spectrale\* sont proches et de permettre l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques au sein de la Réalité Terrain Étendue (RTE), l'utilisation combinée de la photogrammétrie et de la phénologie\* a été préconisée.

Nous avons vu au cours de ce chapitre que la télédétection basse altitude répondait aux critères de taille de l'échantillon au sol, de surface couverte ainsi qu'à celui d'une souplesse d'utilisation suffisante pour intégrer les contraintes phénologiques. Nous avons vu aussi que l'usage des micro-drones civils devraient permettre de gagner en précision de géolocalisation



**FIGURE 2.45** – Variation de la taille de l'échantillon au sol lors d'une prise de vue oblique — (a) Angle de visée de  $80^\circ$ — (b) Angle de visée de  $45^\circ$  Source : Gademer 

des images mais aussi en fiabilité, en rationalisation et en simplicité d'utilisation, tout en restant dans des coûts raisonnables en comparaison de la télédétection aéroportée ou spatiale. Enfin, nous avons vu que les systèmes multi-caméras devraient offrir la possibilité de l'acquisition à la demande d'images obliques ou stéréoscopiques ou multispectrales\* permettant de nombreuses pistes de recherche pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques ou géophysiques.

Le paragraphe 2.3.5 p. 77 nous rappelait les contraintes technologiques qu'une telle solution doit envisager : une forte capacité d'emport de charge utile, le géoréférencement direct des images et donc une synchronisation de l'ensemble du système : porteur, station sol et charge utile.

Le modèle du sténopé que nous avons utilisé dans ce dernier paragraphe nous permet d'ajouter d'autres contraintes à notre système et d'en tirer quelques conséquences pratiques : afin d'obtenir un recouvrement suffisant entre les images et de limiter le flou de filé notre système devra pouvoir faire des vols très lents ou des vols stationnaires ce qui indique une plateforme à voilure tournante — hélicoptère ou multi-rotors — et des appareils photographiques à courte focale présentant une déviation par rapport à la verticale faible pour éviter les déformations trop importantes.





# Chapitre 3

## Systeme micro-drone multi-cameras développé durant la thèse

### 3.1 Présentation du système utilisé

Nous avons vu dans le chapitre 2 que la télédétection basse altitude\* en général et les micro-drones\* en particulier semblaient être une solution pertinente pour l'extraction de paramètres de surface\* biophysiques et géophysiques dans le cadre de la Réalité Terrain Étendue (RTE)\* et par conséquent une réponse adéquate à la problématique de la cartographie de la dynamique de la végétation posée au chapitre 1. Malheureusement, alors que nous débutions cette thèse, il n'existait pas de plateforme micro-drone dans le commerce qui réponde aux critères que nous avons établis à propos de la charge utile, de la souplesse opérationnelle et du coût. Dans le domaine des capteurs embarqués, le constat était similaire avec l'absence d'un système simple et léger permettant l'acquisition simultanée de plusieurs images. Or nous avons vu au chapitre 2 que cette capacité, qu'on l'utilise pour l'acquisition oblique, stéréoscopique ou multispectrale, était essentielle pour la discrimination efficace des espèces végétales entre elles.

Nous avons donc décidé de construire notre propre plateforme micro-drone et notre propre capteur multi-caméras\* pour des applications de cartographie de la végétation et de manière plus générale pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques dans le cadre de la RTE.

#### 3.1.1 Choix du quadri-rotors

Nous avons vu au paragraphe 2.1.3 que les plateformes multi-rotors\* avaient tous les avantages de l'hélicoptère : possibilité de faire du vol stationnaire, facilité d'utilisation par sa capacité de décollage et d'atterrissage vertical, résistance au vent, mais présentent en plus une capacité d'emport maximale (hormis les para-moteurs) et une plus grande manœuvrabilité. En revanche, ce type de plateforme nécessite un temps d'apprentissage élevé pour maitrise



son pilotage — tant que la stabilisation automatique n'est pas disponible — et elle possède une endurance réduite ainsi qu'une disponibilité moindre dans le commerce.

Dans le cadre de la RTE, le système est emporté sur le terrain par les chercheurs et n'a pas à se rendre sur la zone d'étude par ses propres moyens. Dans ces conditions, une endurance réduite est moins pénalisante et devient négligeable au regard des avantages apportés par la plateforme.

Il restait à choisir le nombre de rotors : la simplicité de conception mécanique ainsi que la question du coût nous a orienté vers un système à quatre rotors. En effet, la multiplication des rotors augmente considérablement le coût total du système car les moteurs, les contrôleurs et les hélices sont des pièces coûteuses : Chéron *et al.* [2008] estiment un coût d'environ 150€ par rotor supplémentaire.

La faible disponibilité des plateformes commerciales en 2007 nous a poussé à en développer une nous-même. La possibilité de participer, durant le temps de la thèse, au *Challenge Minidrones 2007-2009* [DGA, 2008] organisé par la Direction Générale de l'Armement (DGA)\* et l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA)\*, dont l'objectif était précisément de construire un micro-drone, nous a donné les moyens et la dynamique pour y parvenir.

Nous n'aborderons pas ici les défis techniques et humains que nous avons dû relever lors de ce concours. Ils ont été relatés en partie par Chéron [2008, 2010]; Monat [2008, 2009]; Pouillailleau [2008]; Chéron *et al.* [2008]; Avanthey *et al.* [2009]; Avanthey et Germain [2009]. Les figures 3.1, 3.2 et 3.3 illustrent cependant quelques unes des étapes marquantes de cette aventure.

C'est donc dans ce contexte que nous avons décidé de construire un micro-drone quadricopters dont nous allons expliciter rapidement le fonctionnement.

### 3.1.2 Principe de vol

Les plateformes multi-rotors, comme les hélicoptères, sont des appareils à voilure tournante, dits à décollage et atterrissage vertical — Vertical Take-Off and Landing (VTOL)\* chez les anglophones — dont le principe de sustentation repose uniquement sur la rotation rapide d'une ou plusieurs hélices autour d'un axe sensiblement vertical. La force de portance étant perpendiculaire au plan de l'hélice, le déplacement est provoqué par l'inclinaison de l'appareil.

Alors qu'un hélicoptère possède des pales à pas variable<sup>1</sup> ce qui lui permet de changer la portance de chacune d'entre elle et donc d'incliner l'appareil pour provoquer le déplacement, les systèmes multi-rotors possèdent généralement des hélices à pas fixe, possédant une mécanique plus simple et jouent sur la vitesse de rotation relative des paires de rotors pour déterminer l'inclinaison. Ce mécanisme est illustré par la figure 3.4 p. 96.

---

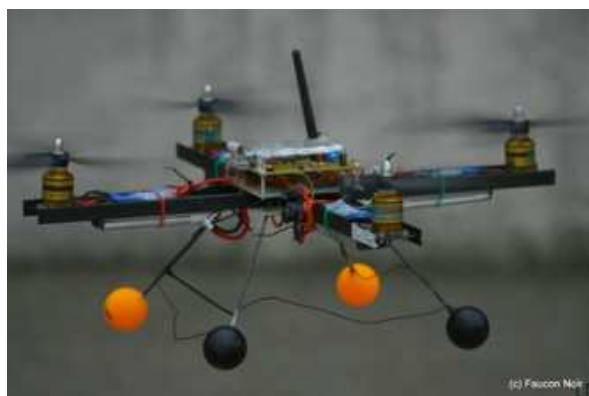
1. Le pas correspond à l'incidence de la pale c'est-à-dire son angle d'attaque dans l'air et influence donc directement la portance de celle-ci.



Équipe initiale du projet (2007)



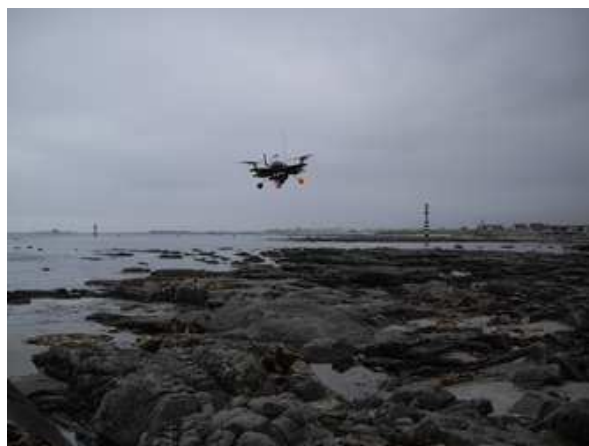
Premier jury



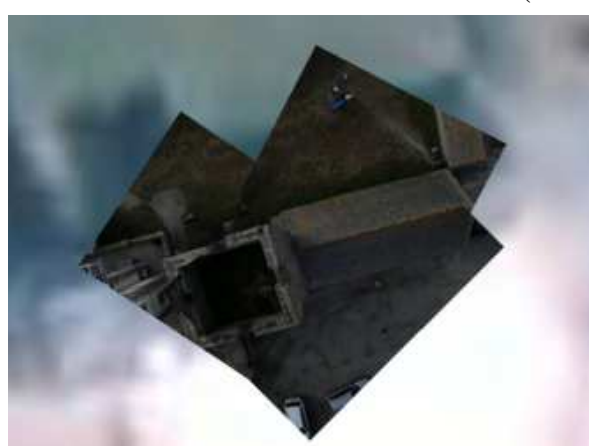
Premier vol



Démonstration à l'École navale de Brest (2008)



Essais au phare d'Eckmühl

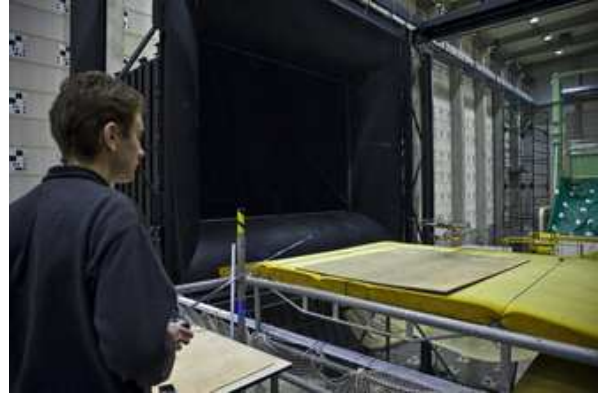


Premières photographies en vol

**FIGURE 3.1** – Déroulement du Challenge Minidrones 2007-2008 Source : ©ATIS



Épreuve au B20 de Lille (2008)



Test en soufflerie



Explication devant le jury



Équipe en 2008



Essais terrain du système complet (2009)



Première vidéo HD

FIGURE 3.2 – Déroulement du Challenge Minidrones 2008-2009 Source : ©ATIS



Épreuve finale à Beynes (juin 2009)



Démonstration de vol



Démonstration de charge utile (1kg)



Équipe finale en 2009

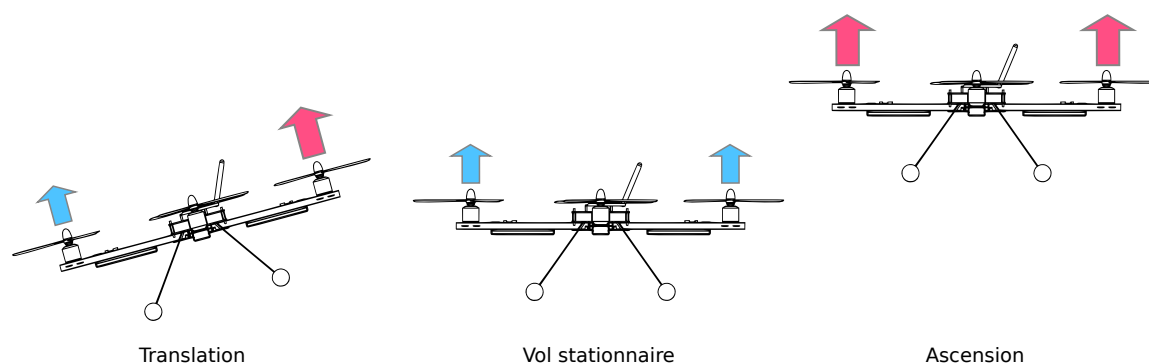



Démonstration lors de la remise des prix

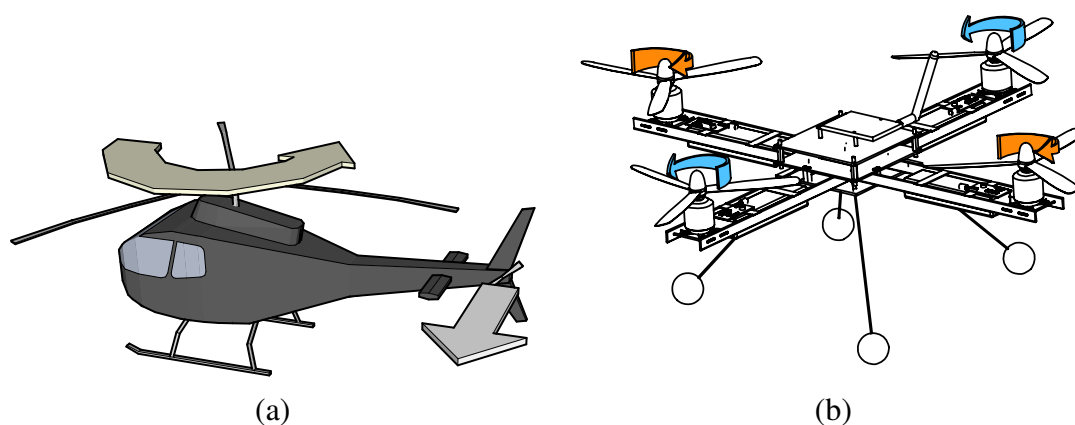



3<sup>e</sup> place derrière Sup' Aéro et l'ENAC

**FIGURE 3.3** – *Déroulement du Challenge Minidrones 2009* Source : ©ATIS



**FIGURE 3.4** – C'est le rapport de vitesse entre les différents rotors qui permet l'inclinaison de l'appareil et indirectement sa translation. Le mouvement vertical est obtenu en changeant la vitesse des quatre rotor dans une même proportion. Source : Gademer 



**FIGURE 3.5** – (a) Sur les hélicoptères, le couple est composé par le rotor de queue. (b) Sur les systèmes multi-rotors, les hélices sont appariées de manière à tourner en sens inverse et compensent ainsi naturellement l'effet de couple. Source : Gademer 

Enfin, contrairement aux hélicoptères, les multi-rotors n'ont pas de rotor de queue pour compenser le couple du rotor de sustentation, comme illustré sur la figure 3.5(a) p. 96. Le couple est provoqué par la rotation rapide du rotor. S'il n'est pas compensé il provoque une rotation non désirée selon l'angle de lacet : l'appareil tourne sur lui-même autour de la verticale. Dans le cas d'un nombre pair de rotors, les rotors sont montés deux à deux avec des hélices de pas contraire — comme le montre la figure 3.5(b) —, ce qui compense naturellement le couple et évite une rotation intempestive sur le lacet. Les systèmes à trois rotors compensent le couple par l'inclinaison d'un des trois rotors, ce qui complexifie la mécanique et le contrôle de l'appareil.

Terminons en disant que les hélicoptères, grâce à l'ajout d'une barre de Bell — qui permet de lisser la variation d'incidence des pales — et à la longueur de leurs hélices, possèdent une plus grande stabilité naturelle que les systèmes multi-rotors qui doivent posséder un asservissement électronique de haute qualité pour pouvoir voler correctement. D'un autre

côté, la quasi-disparition des pièces mécaniques sur les systèmes multi-rotors les rendent plus faciles à concevoir, à entretenir et à réparer.

### 3.1.3 Architecture du système

Le système de drone\* dans son ensemble — appelé Unmanned Aerial System (UAS)\* par les anglophones — est composé du porteur, de sa charge utile\* et de sa station de contrôle au sol, plus brièvement appelée station sol\*. Ce système est un assemblage complexe de composants communicant en temps réel et son bon fonctionnement dépend fortement de la collaboration étroite des différents sous-systèmes.

La figure 3.6 p. 98 reprend l'organigramme des différents sous-systèmes de notre appareil et de leurs moyens de communications.

#### 3.1.3.1 Assistant bas niveau

L'ensemble des sous-systèmes vitaux est coordonné par une carte électronique appelée « Assistant bas niveau » qui joue le rôle de chef d'orchestre. Elle doit simultanément :

1. vérifier l'attitude\* de l'appareil fournie par la centrale inertielle\*,
2. vérifier la hauteur sol\* fournie par la carte secondaire altimètre,
3. recevoir les commandes du pilote — s'incliner vers l'avant, monter...—,
4. calculer les consignes de gaz correspondant au modèle de vol en fonction des points (1) (2) et (3),
5. envoyer les consignes de gaz aux différents variateurs "brushless"<sup>2</sup> qui contrôlent la puissance des moteurs,
6. renvoyer les données d'état de l'appareil vers la station au sol.

Cette carte est le cœur vital de l'appareil puisque c'est elle qui calcule l'asservissement de l'assiette et contrôle directement la puissance des moteurs. Un dysfonctionnement de cette carte signifie toujours un accident grave ; elle a donc été développée par nos soins avec la plus grande attention. Basée sur la technologie dsPIC, un unique processeur, qui gère toutes les communications : deux liaisons série, deux bus<sup>3</sup> Serial Peripheral Interface (SPI) avec trois interlocuteurs et un bus Inter Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C) avec quatre interlocuteurs. Il gère en plus les calculs et les filtrages nécessaires pour le vol tout en conservant les contraintes de précision et de temps réel imposées par le système. Cette carte effectue tous les traitements bas niveau nécessaires à la sustentation.

---

2. La particularité des moteurs "brushless" est de devoir être contrôlés par un circuit électronique particulier, appelé variateur "brushless" ou contrôleur "brushless" et qui envoie la consigne en impulsions électriques selon les phases du moteur.

3. Un bus de donnée est une connexion qui relie plusieurs périphérique simultanément. Pour s'assurer que chaque périphérique ne reçoivent que les messages qui lui sont adressé, chaque élément connecté au bus doit utilisé un protocole de communication très strict.

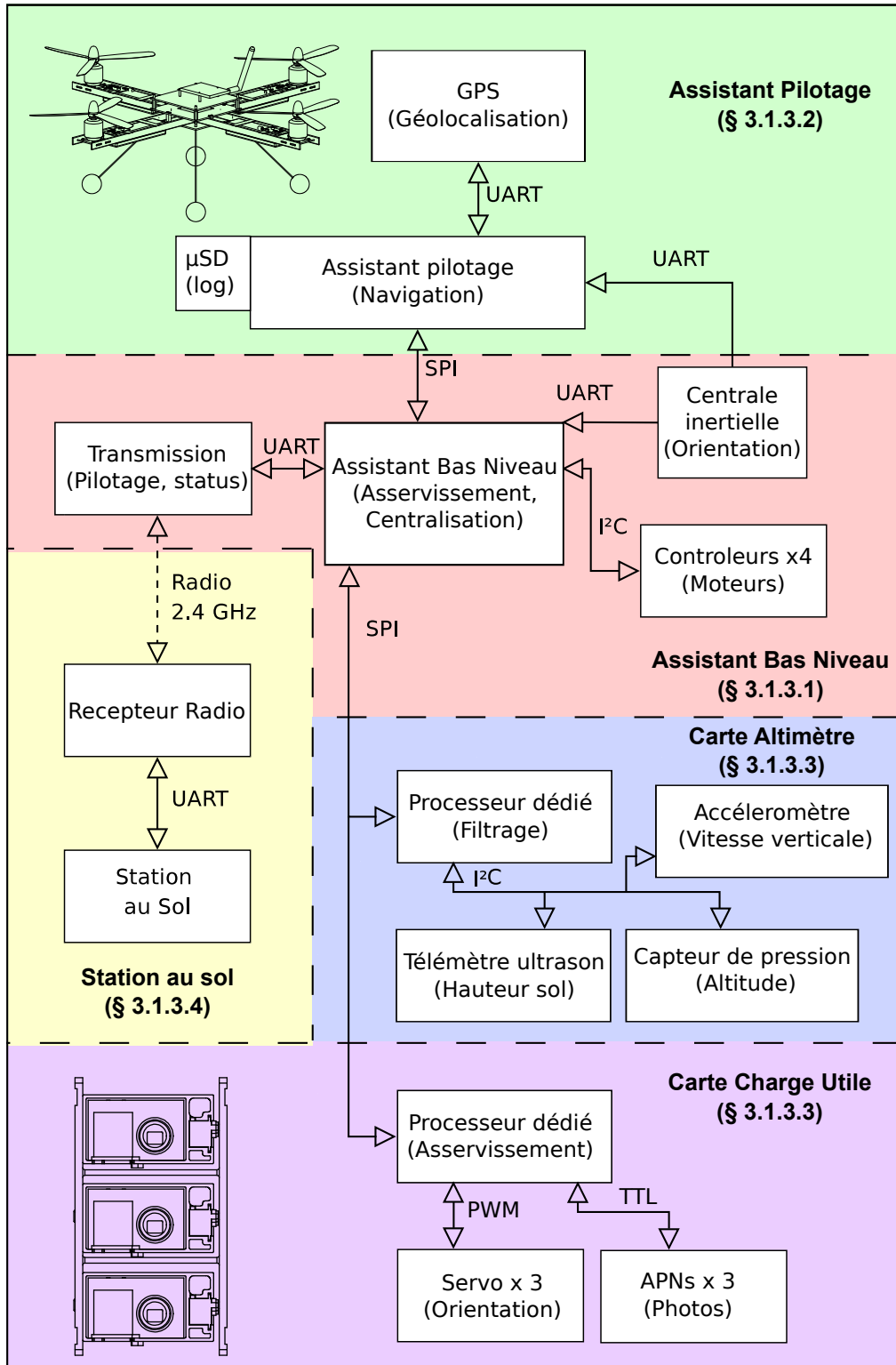


FIGURE 3.6 – Organisation générale du système. Source : Gademer

### 3.1.3.2 Assistant pilotage

Pour sa part, l'assistant pilotage prend en charge le recueil des informations nécessaires aux décisions à plus long terme comme le positionnement et la navigation. Intégrant les informations de positionnement dans l'espace (récepteur GPS\*, centrale inertielle, carte altimètre), c'est lui qui calcule la trajectoire optimale et remplace, si on lui demande, le pilotage manuel par des commandes automatiques. C'est un calculateur flottant qui, libéré des très fortes contraintes qui pèsent sur l'assistant bas niveau, prend en charge les lourds calculs de trajectoire.

Il lui incombe aussi de stocker toutes les informations de vol dans un fichier texte sur une carte microSD pour analyse ultérieure : on y retrouve les données du récepteur GPS, de la centrale inertielle, de la carte altimètre mais aussi la datation des photographies. Ce fichier est l'équivalent de la boîte noire des avions.

La carte assistant pilotage n'est pas un sous-système critique : si elle présente une défaillance lors d'un vol automatique, l'assistant bas-niveau a les capacités d'immobiliser le drone et d'entamer une lente descente jusqu'au sol, à moins que le pilote ne reprenne le contrôle direct de l'appareil.

### 3.1.3.3 Cartes filles : altimètre et charge utile

Au-delà des deux cartes principales, l'appareil peut se reposer sur des cartes intermédiaires qui intègrent les mesures de plusieurs capteurs pour fournir une information unique plus fiable ou valable dans une plus grande plage d'utilisation. C'est par exemple le cas de la carte altimètre qui fusionne les mesures du baromètre, de l'accéléromètre et de l'ultrason pour calculer une hauteur sol suffisamment précise pour toutes les situations, du décollage jusqu'au vol à 80 mètres.

Enfin, une carte électronique est dédiée à chaque charge utile. Le porteur pouvant embarquer différents types de capteurs ayant chacun leurs propriétés, nous avons conçu une carte d'interface spécifique à la charge utile : asservissement sur cible, déclenchement et datation des données, tel est le rôle de la carte qui cherche à contrôler de manière optimale les appareils photographiques.

### 3.1.3.4 La station sol

La station sol est un sous-système essentiel qui a pour rôle de rendre accessible à un utilisateur non pilote le contrôle de l'appareil et de fournir au pilote des renseignements et des alertes pour faciliter sa tâche.

Elle prend généralement la forme d'un ordinateur portable sur lequel sont exécutés des logiciels spécifiquement développés pour le drone.

Elle reçoit et analyse en permanence les changements d'état de l'appareil — position, orientation, état des circuits électroniques, puissance des signaux de communications, endurance restante — et prévient le pilote ou l'opérateur de tout signe avant-coureur d'un éventuel problème.



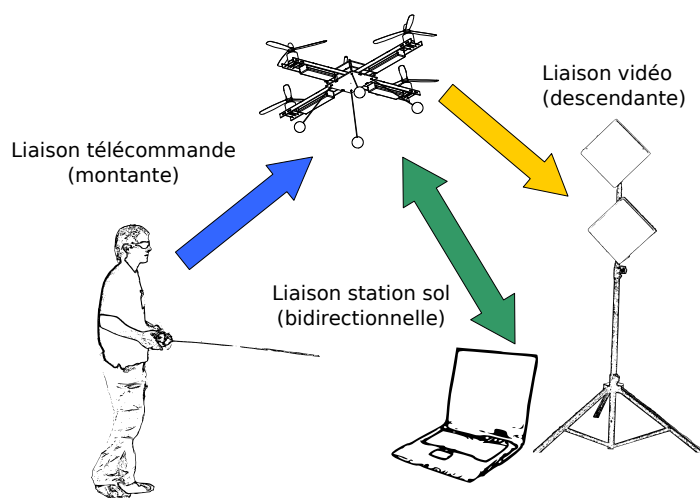


FIGURE 3.7 – La station sol est au cœur des communications avec le drone. Source : Gademer

Elle peut aussi permettre d'envoyer des ordres au porteur ou à sa charge utile comme une demande d'asservissement en hauteur/position ou de déclenchement de la prise de photo, ou, dans le cas d'un vol automatique, de planifier ou modifier le plan de vol et de suivre en temps réel son exécution.

C'est un outil indispensable, qui distingue le micro-drone de l'aéromodèle\* et donne une réelle dimension opérationnelle au système.

La figure 3.7 p. 100 illustre l'ensemble des liaisons de données qui relie le pilote, le drone et la station sol.

### 3.1.4 Caractéristiques du porteur

Au final, le micro-drone Faucon noir, illustré à la figure 3.8 p. 101 révèle des atouts significatifs pour la télédétection basse altitude.

D'une taille inférieure à 70 centimètres, avec un train détachable facilement, il tient dans une petite valise et peut-être emporté facilement dans un coffre de voiture.

Avec ses 1,6 kilogrammes à vide, il rentre dans la catégorie des micro-drones, ce qui est un atout au regard de la législation et de la sécurité — un drone léger fera moins de dégâts en cas d'accident.

Sa petite taille lui confère une meilleure résistance au vent et lui permet d'avoir une plus petite distance de sécurité aux objets que ce soient des murs ou des arbres.

Malgré une configuration à quatre rotors, il est capable d'emporter 60% de sa masse avec une charge utile de 1 kilogramme. Seules les configurations du commerce à huit rotors présentent des caractéristiques similaires.

Son endurance de 25 minutes — à vide — est relativement faible, mais nous avons vu que c'était une caractéristique de la plateforme et elle le place au même niveau que les plateformes commerciales.



**FIGURE 3.8** – *Le micro-drone Faucon noir développé durant la thèse. Source : ©ATIS/Gademer*

Taille (avec le train d'atterissage)	70 × 70 × 50cm
Taille (sans le train d'atterissage)	70 × 70 × 15cm
Poids (avec batterie)	1,6 kilogramme
Charge utile	1 kilogramme
Batterie	Lithium Polymère 11,1V 8400 mAh
Puissance max	1kW
Endurance (à vide)	25 minutes
Endurance (chargé)	20 minutes
Fréquence pilotage	72 MHz
Fréquence station sol	2.5 Ghz
Hauteur sol max (vol à vue)	80 mètres
Hauteur sol max (légal)	150 mètres
Charge utile testées	KX-131, Camileo P10 (×3), Capteur tri-caméras

**TABLE 3.1** – *Caractéristiques du micro-drone Faucon noir*

Le Faucon noir possède aussi une station sol performante qui permet d'optimiser les conditions opérationnelles et de sécurité.

Enfin et surtout, le fait de développer notre propre plateforme nous a permis de gérer au niveau électronique les problèmes posés par les charges utiles dédiées à la cartographie : géoréférencement direct\*, communication et synchronisation avec la station sol, ce qui aurait été impossible — ou illégal — avec des plateformes du commerce.

La table 3.1 reprend les différentes caractéristiques du micro-drone Faucon noir.

## 3.2 Capteur multi-caméras

### 3.2.1 Avantages attendus du système

En parallèle du développement du micro-drone décrit dans la section précédente, nous avons développé un capteur unique répondant au cahier des charges défini au chapitre 2 : un système permettant l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques lors des missions de télédétection basse altitude.

Nous sommes partis de plusieurs constats. Tout d'abord l'utilisation d'appareils photographiques du commerce semblait correspondre aux critères de taille de l'échantillon au sol\* posés par l'équipe de botanistes du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)\*, tout en conservant des propriétés optiques permettant un traitement photogrammétrique de qualité[Shortis *et al.*, 2006; Habib et Morgan, 2005; Remondino et Fraser, 2006].

Cependant l'instabilité naturelle de la trajectoire des micro-drones fait que le taux de recouvrement suffisant des photographies n'est pas assuré. C'est pourquoi nous avons envisagé d'emporter deux appareils photographiques numériques simultanément pour constituer une base stéréoscopique fixe. Si l'idée de la base stéréoscopique a déjà été traitée par Jung et Lacroix [2003b]; Lacroix *et al.* [2002], à notre connaissance aucun micro-drone (< 5 kg) n'a fait voler simultanément deux appareils photographiques, probablement pour des raisons de capacité d'emport insuffisante.

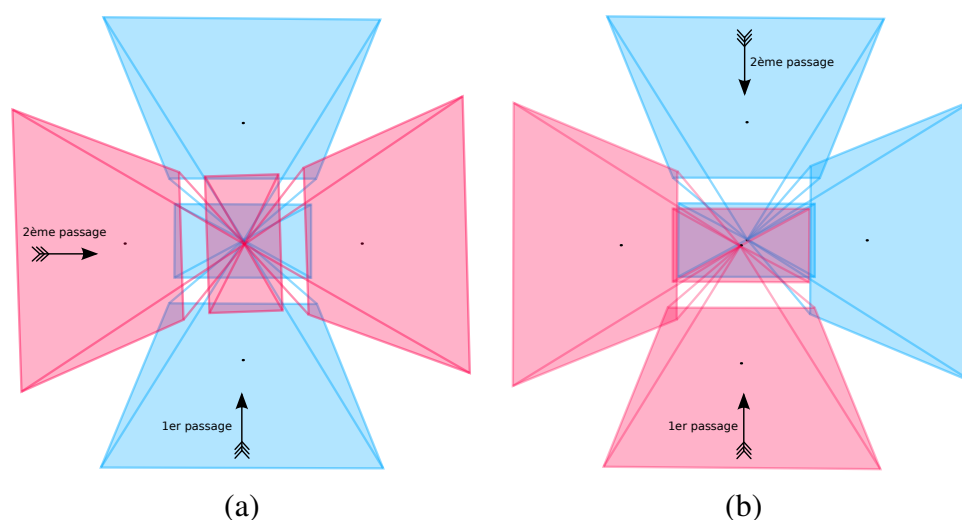
Par ailleurs, les appareils photographiques du commerce ne perçoivent usuellement que le spectre visible, et les modifications possibles pour les rendre sensibles à l'infrarouge proche les privent de leur capacité initiale[Jensen, 2008]. Afin de mesurer la réponse spectrale de la végétation dans le visible et le proche-infrarouge, il est nécessaire d'emporter simultanément deux appareils photographiques. Vioix [2004] propose une solution avec une caméra et une roue de filtre mais cette solution nécessite une vitesse d'obturation\* très rapide ou une vitesse de déplacement très lente pour éviter le flou de filé\* comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4.2 p. 80, et n'a donc pas été retenue.


Enfin, des études annexes, comme celle de Petrie [2009], nous ont convaincu de l'intérêt d'un système multi-caméras directionnel comme nous l'avons décrit au paragraphe 2.3.3.1 p. 59 ; avec l'acquisition d'images obliques, 45°avant et 45°arrière, en plus de l'image verticale. Ce système permet de fournir une vision d'ensemble de la zone d'étude et donc une meilleure appréhension des relations spatiales des différents éléments, autorisant une interprétation plus riche par le spécialiste.

C'est pourquoi nous avons décidé de concevoir un système tri-caméras\* modulaire permettant l'acquisition à la demande de données obliques ou stéréoscopiques, ou encore de données multi-spectrales.

### 3.2.2 Support tri-caméras

L'avantage du système tri-caméras établi, sa réalisation nous confrontait cependant à quelques contraintes techniques.



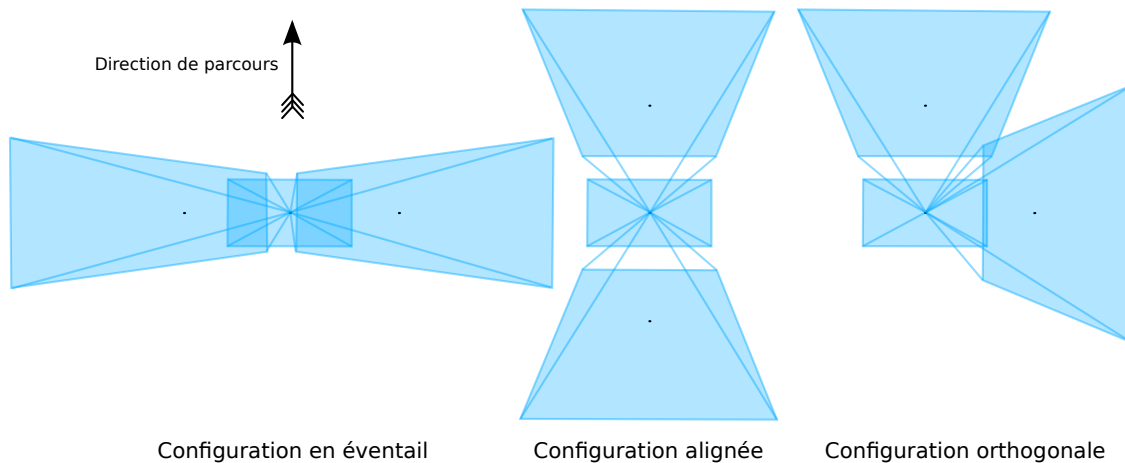
**FIGURE 3.9** – Simulation d'un système en « croix de malte » par deux passages successifs. — (a) Système tri-caméras alignés — (b) Système tri-caméras orthogonales. Source : Gademer 

La première contrainte était celle du poids. Si notre micro-drone avait été pensé pour emporter 1 kilogramme de charge utile, une gestion économe du poids du capteur était nécessaire pour une plus grande endurance et de meilleures capacités opérationnelles. Nous verrons dans le paragraphe suivant que le choix des appareils photographiques eux-même a du tenir compte de manière très stricte de la contrainte de poids. Se basant sur une estimation de 200 grammes pour chaque appareil photographique, un système tri-caméras devait peser autour de 800 grammes en comptant la structure et les servo-moteurs dédiés à l'asservissement. Dans l'optique d'un système multi-caméras directionnel, la référence en télédétection aéroportée\* est le système « croix de malte » qui nécessite cinq appareils photographiques — un vertical et quatre orientés de manière oblique. Ce système n'est pas envisageable à notre échelle pour des raisons de poids, mais peut être simulé en augmentant le nombre de passages lors de l'acquisition, ce qui est illustré par la figure 3.9 (a) p. 103.

Les systèmes tri-caméras peuvent être orientés de trois manières différentes par rapport à la trajectoire de vol, comme illustré sur la figure 3.10 p. 104 : soit en « éventail » (Gauche/Nadir/Droite), perpendiculairement à la trace comme dans les systèmes de reconnaissance militaire<sup>4</sup> ; soit alignées dans la direction de parcours (Avant/Nadir/Arrière) ; soit placées de manière orthogonale (Avant/Nadir/Gauche).

Nous cherchons à avoir un support qui puisse convenir quels que soient les objectifs de la mission : acquisitions directionnelles, stéréoscopiques ou multispectrales. Le système en « éventail » favorise le recouvrement entre les images verticales et obliques en se plaçant sur la grande largeur de l'appareil, en revanche, il favorise les déformations dues à l'angle de visée que nous avons vu au paragraphe 2.4.4 p. 86. De plus, il nécessite un support complexe pour aligner les optiques des appareils photographiques, car celles-ci ne sont jamais au centre de l'appareil mais déportées sur le côté. D'un point de vue stéréoscopique ou multispectral, la nécessité de réaliser un capteur compact favorise déjà un fort recouvrement au sein du

4. Cette disposition est illustrée en détail au paragraphe 2.3.3.1 p. 59



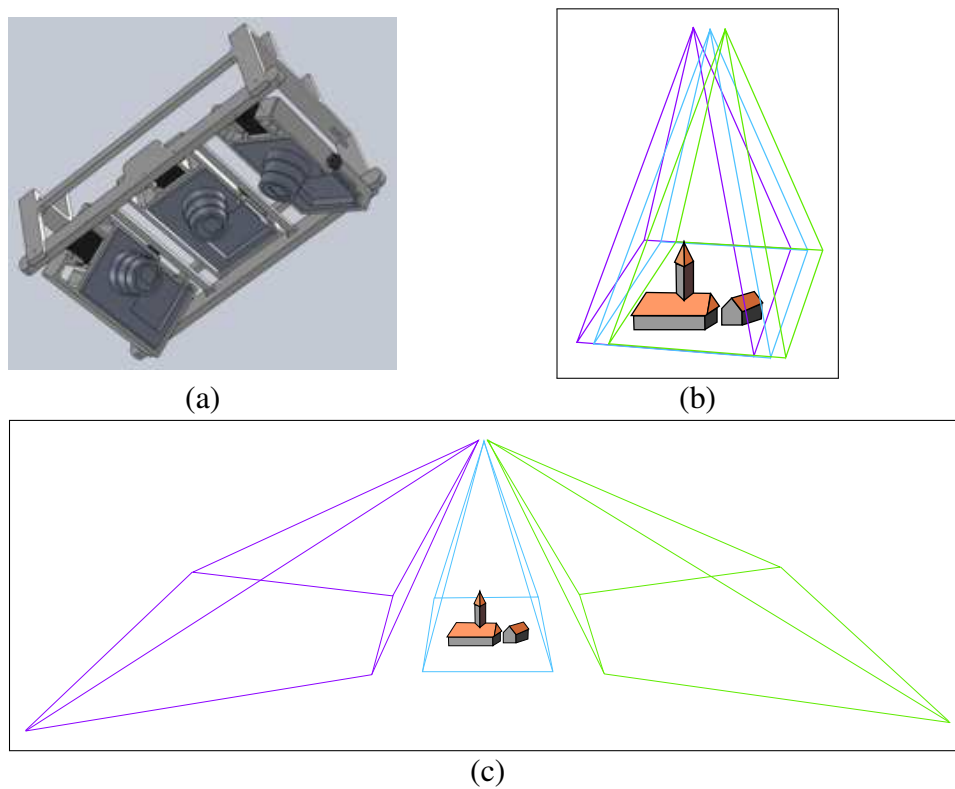
**FIGURE 3.10** – *Différentes configurations possible pour un système tri-caméras*


couple et ne justifie pas le placement en éventail. Le système orthogonal assure la propriété d'orthogonalité sur les couples d'images obliques mais fournit un capteur fortement déséquilibré dans la répartition des masses. De plus, si cette disposition n'a pas d'effet négatif sur un éventuel capteur multispectral, il ne permet pas d'avoir une base stéréoscopique.

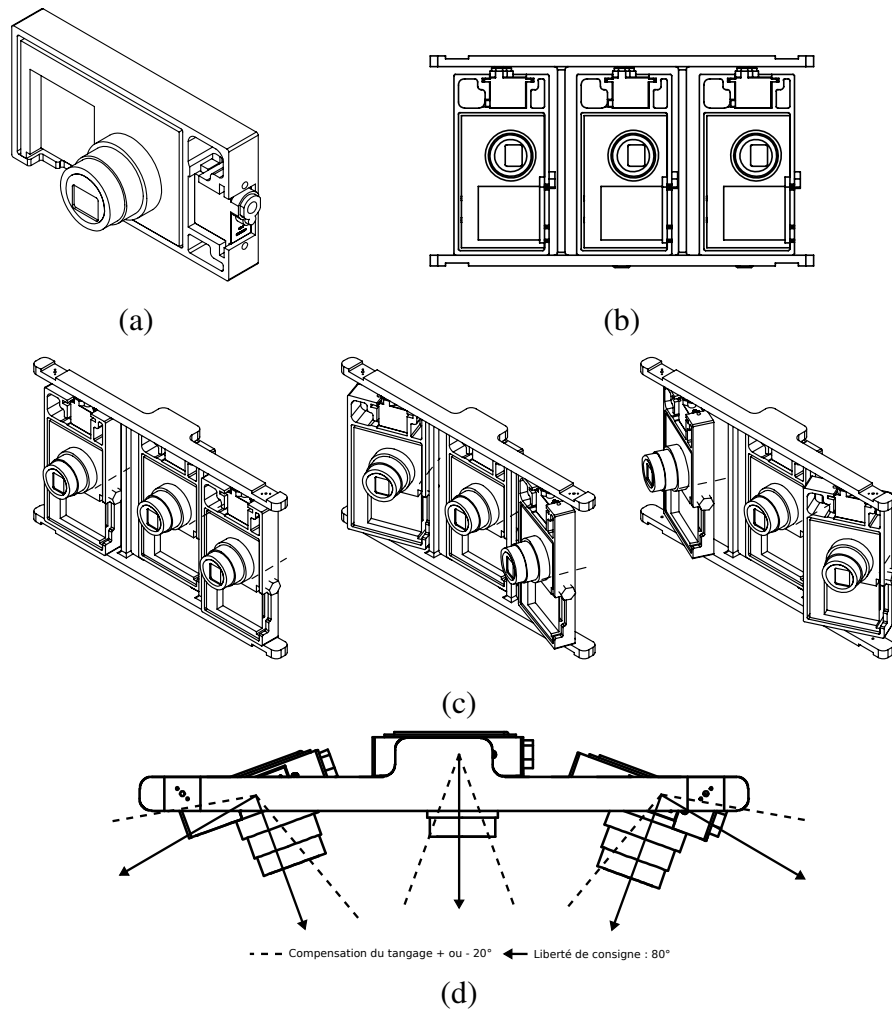
Enfin, la configuration alignée présente l'avantage de la simplicité de placement des appareils photographiques entre eux : il présente un alignement naturel des optiques et l'avantage d'une répartition homogène des masses autour du centre optique de l'appareil central. Enfin, c'est la configuration la plus simple pour la réalisation mécanique du support et il est utilisable pour les trois types d'acquisition. On peut voir une illustration de ce support et de ses configurations possibles sur la figure 3.11 p. 105 (a,b,c).

De plus, alors que le mode stéréoscopique et le mode multispectral ne nécessitent normalement que deux appareils, la possibilité d'en avoir trois ouvre la perspective d'utiliser les deux simultanément : l'appareil photographique central est configuré pour voir le proche infrarouge afin de détecter la végétation alors que les deux appareils situés aux extrêmes peuvent être utilisés, dans le spectre visible, pour la photogrammétrie\*, comme l'illustre la figure 3.11 p. 105 (b).

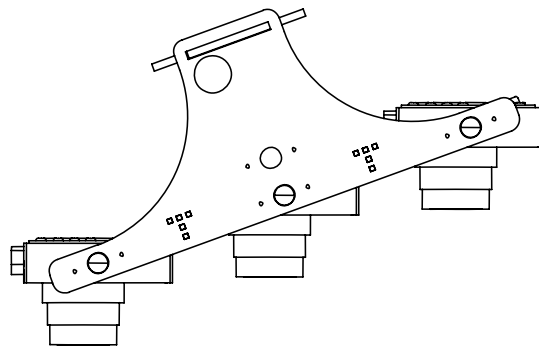
Afin de rendre le système modulaire — l'orientation de chaque appareil dépendant de la mission à réaliser —, un servo-moteur a été associé à chaque appareil pour contrôler son orientation selon l'axe de tangage. La disposition finale, illustrée à la figure 3.12 p. 106 est composée de trois supports individuels (a) qui permettent l'intégration d'appareils photographiques du commerce, qui sont ensuite rattachés ensemble, dans la configuration alignée (b) sur la structure principale. En fonction de la mission, on associe une consigne d'orientation à chaque servo-moteur (c). Dans la plupart des cas, cette consigne reste fixe durant le vol, faisant du capteur un bloc rigide permettant de simplifier les calculs d'orientation relative menés lorsque l'on cherche à retrouver la géométrie d'acquisition. Une piste envisagée était d'utiliser le débattement supplémentaire proposé par les servo-moteurs (d) pour compenser l'effet du tangage induit par le mouvement de l'appareil car, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.2, le porteur s'incline en tangage pour avancer. Néanmoins, l'expérimentation



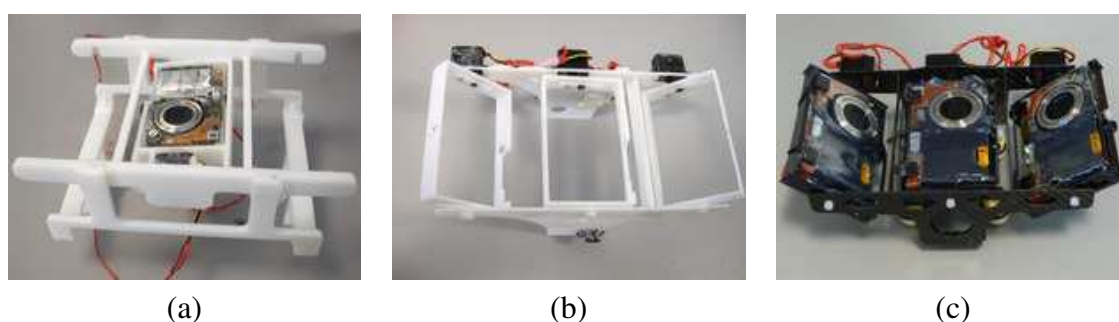
**FIGURE 3.11** – *Système tri-caméras alignées* — (a) *Modélisation 3D du système. Les appareils photographiques sont en disposition directionnelle* — (b) *Acquisition stéréoscopique et/ou multispectrale* — (c) *Acquisition directionnelle*. Source : Gademer 




**FIGURE 3.12** – (a) Association de l'appareil photographique et du servo-moteur (à droite) — (b) Les trois appareils sont alignés dans l'axe de vol — (c) Grâce aux servo-moteurs, l'orientation relative des appareils est configurable en fonction des besoins. — (d) Illustration des angles de débattement autorisés par les servo-moteurs. Source : Gademer



**FIGURE 3.13** – Compensation de l'inclinaison en tangage de l'appareil. Source : Gademer



**FIGURE 3.14** – Évolution du support illustrée par les prototypes successifs. Diminution drastique du poids et augmentation de la résistance des matériaux. Source : Gademer 

nous a montré que cette idée posait de nouveaux problèmes : elle provoquait une distorsion de la base relative des appareils photographiques — l'appareil avant se trouvant plus bas que celui de l'arrière, comme le montre la figure 3.13 p. 106 — et perturbait l'utilisation des images à des fins de photogrammétrie. Dans une future version, et grâce aux réductions de poids permises par l'amélioration des techniques de conception mécanique (décrites au paragraphe suivant) nous pensons pouvoir ajouter un servo-moteur au niveau de la fixation du capteur, ce qui devrait permettre une compensation du tangage pour l'ensemble de la charge utile.

### 3.2.3 Réalisation mécanique

Au cours de la thèse, plusieurs réalisations du support ont été effectuées : un premier prototype a pu être obtenu grâce à l'aide précieuse de l'Association Française contre la Myopathie (AFM) qui nous a aimablement autorisé à utiliser son imprimante 3D.

Cette imprimante permet la réalisation de pièces tridimensionnelles par le collage successif de couches de plastique micrométriques, autorisant la fabrication de pièces complexes. Si cette méthode nous a permis de réaliser sans trop de connaissances mécaniques un support fonctionnel, illustré sur la figure 3.14(a) p. 107, directement à partir de la modélisation 3D, les contraintes de poids impliquaient la réalisation de pièces fines (b) et par conséquent fragiles pour ce mode de réalisation. Plusieurs vols, dont ceux décrits au chapitre 4 ont cependant utilisés cette version du support.

Plus récemment, l'accès à une machine à commande numérique — permettant le découpage de pièce en carbone — a donné lieu à une nouvelle réalisation plus légère et plus solide : ce qui nous a permis de réduire de 30% le poids du capteur embarqué. Cette version, illustrée à la figure 3.14(c) intègre les observations précédentes en matière de praticabilité opérationnelle.

### 3.2.4 Choix du modèle d'appareil photographique numérique

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 au paragraphe 2.4 les paramètres intrinsèques du capteur influencent directement les conditions d'acquisition. Il nous a donc fallu trouver



un modèle d'appareil photographique répondant à toutes nos contraintes.

Finalement, un comparatif[Gademer, 2008] regroupant plus de quarante appareils photographiques numériques compacts a été réalisé sur la base de nombreux critères :

- le poids, lié directement à la charge utile,
- la taille, pour pouvoir tenir sous le porteur,
- le prix, pour maintenir le coût du système dans des limites abordables,
- la stabilisation du capteur, pour limiter le flou de filé,
- le temps de prise de vue entre deux photographies, qui influence la vitesse de déplacement,
- la capacité au mode rafale en continu, pour réduire le temps de prise de vue,
- la capacité aux réglages manuels, pour éviter le flou de filé lié aux calculs automatiques des conditions de prise de vue,
- la possibilité de sauvegarder des images raw, pour éviter les artefacts de compression,
- la présence d'une interface (par exemple avec une télécommande), pour la synchronisation des déclenchements,
- la résolution\* du capteur et la focale, qui détermine la hauteur sol durant le vol,
- la capacité de la carte mémoire, qui influence la durée de vol,
- la qualité géométrique de l'optique, qui minimise les déformations sur l'image.

Nous avons vu que les contraintes de poids et de taille étaient liées à la capacité d'emport réduite sur les micro-drones. L'objectif étant de pouvoir emporter trois appareils simultanément, le poids d'un appareil seul ne devait pas dépasser 200 grammes. De la même manière, l'appareil devait mesurer une dizaine de centimètres de large pour limiter l'encombrement sous le porteur. Si l'ensemble des appareils étudiés rentraient dans les critères de dimensions, ils présentaient une plus grande variété de poids avec des modèles entre 135 et 315 grammes (180 grammes en moyenne). Le plus léger était le Caplio R7 de Ricoh, le plus lourd le Powershot A640 de Canon.

Le prix de l'appareil devait bien entendu être pris en compte, un prix trop élevé pénalisant aussi bien les essais techniques que le nombre d'appareils photographiques pouvant être embarqués. Sur cette étude les prix s'échelonnent entre 160€(Powershot A570 IS) et 345€(DSC-W3000 de Sony) avec une moyenne de 240€.

On a vu au paragraphe 2.4.2 que les mouvements du porteur risquaient de provoquer un flou de filé sur l'image. La stabilisation optique, innovation importante au moment du test est alors devenue un atout essentiel et les huit appareils qui ne possédaient pas cette caractéristique ont été directement écartés.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4.1, les vols à basse altitude\* impliquent une fréquence de prise de vue soutenue pour maintenir un recouvrement suffisant, et nous avons cherché à estimer le temps minimum entre deux prises de vue en mode normal comme en mode rafale. Les appareils possédant la résilience théorique la plus rapide étaient les modèles Ixus 70 et Ixus 860 IS de chez Canon, l'Optio A40 de chez Pentax, le Caplio R7 de chez Ricoh avec une petite seconde, les plus mauvais les DMC-FX35 et DMC-FX100 de Panasonic, DSC-W150 de Sony, Finepix F50fd de Fujifilm avec presque deux secondes et demi ! Ce critère est difficile à évaluer tant il est variable d'un modèle à l'autre, même au sein d'une

même marque : si l'IXUS 70 est de nouveau prêt au bout d'une seconde, l'IXUS 80IS a besoin du double de temps. Et ces calculs ne prennent pas non plus en compte la complexité de la scène et la rapidité de la carte mémoire qui jouent aussi sur ce temps de latence. Ce critère crucial est rarement documenté avec la précision requise pour des applications d'imagerie et la sélection finale se base sur des estimations théoriques et le recoupement de plusieurs sources d'informations.

Le mode rafale permet d'acquérir une série de photographies avec les mêmes paramètres de prise de vue, ce qui permet de réduire le temps de résilience entre les clichés. Si les appareils reflex peuvent généralement prendre des rafales comprenant des centaines de photographies, les appareils photographiques compacts sont généralement limités dans le nombre de clichés successifs. Par exemple, le DMC-FX35, dont le temps de résilience est de 2,3 secondes entre les photographies a la capacité de prendre cinq images successives en deux secondes – et donc avec une fréquence cinq fois plus rapide — mais s'interrompt ensuite pendant plusieurs secondes pour traiter et stocker les images acquises. Seuls les lourds Powershot et la gamme des Optio annoncent une prise illimitée de photographies en rafale avec entre 1,3 et 2,1 images/seconde en continu. Il est important de noter que la pratique nous a appris que le mode rafale n'était pas utilisable en conditions opérationnelles : la prise de vue se fait aussi rapidement que possible mais sans contrôle sur les intervalles entre les photographies, ce qui rend impossible la synchronisation des différents appareils photographiques.

Le critère suivant concerne la capacité à débrayer certains réglages de paramètres de prise de vue qui sont généralement calculés automatiquement par les appareils photographiques. Tous les appareils professionnels et la grande majorité des appareils reflex proposent aux photographes de pouvoir fixer eux-même certains paramètres comme le temps d'exposition, l'ouverture, la mise au point, etc. afin de produire des effets particuliers. Les appareils photographiques compacts, pour leur part, n'ont pas toujours ces options ; les constructeurs considèrent que le mode automatique est généralement suffisant pour le grand public. La capacité à fixer les réglages de prise de vue manuellement est cependant importante car, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4.2, ces réglages influencent fortement la qualité des images aériennes. De plus, le calcul automatique de ces derniers augmente le temps entre deux prises de vue, car l'appareil doit déterminer les paramètres adéquats par des mesures de luminosité. Finalement, seule la moitié des appareils testés donnaient la possibilité à l'utilisateur de pouvoir fixer la mise au point et à peine un quart d'entre eux l'ouverture et le temps d'exposition.

Un critère essentiel pour la qualité des images est celui du format d'image. Une fois acquises les images brutes subissent un pré-traitement et sont enregistrées sur la carte mémoire. Le format le plus répandu sur les appareils compact est le format JPEG, format de compression avec perte qui fonctionne un peu comme le mp3 avec la musique : les informations de détail, non perçues par l'œil sont supprimées pour gagner de la place. Cette perte de données pénalise énormément les algorithmes de traitement d'image tel que le mosaïquage ou la stéréorestitution\*. C'est pourquoi, la majorité des appareils photographiques professionnels proposent de sauvegarder les images dans un format brut (raw en anglais). Ce format non traité permet aux photographes professionnels de tirer le maximum de leurs photographies en appliquant uniquement les traitements qu'ils désirent. Dans notre cas, cela permettra d'obtenir une meilleure précision lors de la recherche de points d'appariement\*. Malheureusement,

Constructeur	Modèle	Poids (avec batt.)	Dimensions	Prix (€)	Stabilisation	Temps entre deux photos	Mode rafale	Focus manuel	Ouverture manuel	Vitesse manuel	Télécommande	Résolution	Taille du capteur	Focale équivalente	Capacité max
Panasonic	DMC-FX33	154 g	95 x 52 x 22 mm	200	Oui (Opt.)	1.2 s	3 fps, max 7 img.	Non	Non	Non	Non	8.1 million	1/2.5 "	28 mm	32 Go
Panasonic	DMC-FX100	150 g	54 x 97 x 24 mm	300	Oui (Opt.)	2.26 s	2 fps, max 5 img.	Non	Non	Non	Non	12.0 million	1/1.7 "	28 mm	32 Go
Canon	PowerShot A570 IS	215 g	90 x 64 x 43 mm	160	Oui (Opt.)	1.6 s	1.7 fps, illimité	Oui	Oui	Oui	Non	7.1 million	1/2.5 "	35 mm	32 Go
Canon	PowerShot A590 IS	225 g	94 x 65 x 41 mm	170	Oui (Opt.)	1.6 s	1.4 fps, illimité	Non	Oui	Oui	Non	8.0 million	1/2.5 "	35 mm	32 Go
Canon	Ixus 80 IS	165 g	86.8 x 54.8 x 22.0 mm	230	Oui (Capt.)	1.9 s	1.3 fps	Non	Non	Non	Non	7.0 million	1/2.5"	38 mm	32 Go
Canon	Ixus 860 IS	165 g	93 x 59 x 26 mm	260	Oui (Opt.)	1.1 s	1.3 fps	Non	Non	Non	Non	8.0 million	1/2.5 "	28 mm	32 Go
Canon	Ixus 950 IS	195 g	90 x 57 x 26 mm	220	Oui (Opt.)	1.7 s	1.3 fps, illimité	Non	Non	Non	Non	8.0 million	1/2.5 "	35 mm	32 Go
Canon	Ixus 960 IS	205 g	96 x 96 x 28 mm	330	Oui (Opt.)	1.5 s	1.5 fps	Non	Oui	Oui	Non	12.1 million	1/1.7 "	36 mm	32 Go
Ricoh	Caplio R6	165 g	100 x 55 x 23 mm	223	Oui (Capt.)	1.25 s	3 fps, max 10 img.	Oui	Non	Non	Non	7.1 million	1/2.5 "	28 mm	32 Go
Ricoh	Caplio R7	135 g	100 x 55 x 23 mm	200	Oui (Capt.)	1.1 s	2.5 fps, illimité	Oui	Non	Non	Non	8.15 million	1/2.5 "	28 mm	32 Go
Ricoh	Caplio R8	166 g	102 x 58 x 26 mm	290	Oui (Capt.)	1.1 s	1.4 fps, max 999 img.	Oui	Non	Non	Non	10.0 million	1/2.3 "	28 mm	32 Go
Pentax	Optio A30	145 g	89 x 57 x 24 mm	200	Oui (Capt.)	1.3 s	1.3 fps, illimité	Non	Non	Oui	Oui	10.0 million	1/2.5 "	38 mm	32 Go
Pentax	Optio A40	170 g	91 x 56.5 x 23.5 mm	240	Oui (Capt.)	1.25 s	1.25 fps, illimité	Oui	Oui	Oui	Oui	12.1 million	1/1.7 "	37 mm	32 Go
Fujifilm	Finepix F100fd	153 g	98 x 59 x 23 mm	300	Oui (Capt.)	1.6 s	0,3 fps, illimité	Non	Oui	Oui	Non	12.0 million	1/1.6 "	28 mm	32 Go
Casio	Exilim EX-V8	199 g	96 x 60 x 25 mm	250	Oui (Capt. \& Opt.)	1.75 s	3 fps, illimité	Oui	Oui	Oui	Non	8.1 million	1/2.5 "	38 mm	32 Go

TABLE 3.2 – Top 15 du comparatif des appareils photographiques numérique compacts. Source : Gademer 

Focale équivalente : Comme nous l'avons dit au premier chapitre, l'information donnée par la focale sur le champ de vision de l'appareil n'ayant de sens que par rapport à la largeur du fond de chambre et celle-ci étant devenue variable depuis le passage au capteur numérique, on calcule la focale équivalente\* qui correspond à celle qu'on aurait eu avec une pellicule argentique standard de 35mm, ce qui permet la comparaison.

dans la gamme des appareils photographiques compacts, cette fonctionnalité n'est que très rarement proposée dans la gamme de prix de notre étude. Dans notre cas, seul le Caplio R3 permettait cette fonctionnalité mais les autres caractéristiques de cet appareil n'étaient pas suffisantes pour le retenir.

Le déclenchement des appareils photographiques numériques se fait classiquement par une pression sur un bouton que l'on nomme le déclencheur. Si cette opération est naturelle pour un humain, elle est complexe à réaliser avec précision par un système embarqué. Les aéromodélistes ont l'habitude de détourner à leur profit une fonction présente dans certains modèles : la capacité à recevoir des ordres par l'intermédiaire d'une télécommande infra-rouge. Les ordres sont très simples et consistent généralement au déclenchement et parfois au zoom avant/arrière mais nous semblaient suffisants pour notre application. Cette option est assez rare cependant et ne concernait que la gamme Optio dans notre étude. Nous verrons à la section 3.2.5 que malgré cette caractéristique favorable nous avons du recourir à d'autres méthodes pour assurer le déclenchement de nos appareils photographiques.

Le critère de résolution du capteur n'est pas un critère essentiel. En effet, nous avons vu au paragraphe 1.3.3.1 p. 24 que la taille de l'échantillon au sol des images était liée à la hauteur de vol, une plus faible résolution du capteur pouvait donc être facilement compensée par un vol à plus basse altitude. Pour autant, une grande résolution du capteur, associée à une courte focale, permet de couvrir une plus grande surface au sol à chaque photographie et était donc un petit avantage pour le système. Les résolutions de capteur des modèles étudiés variaient entre 3 (pour le Powershot A410) et 13,6 Mégapixels (pour le DSC-W300) avec une médiane de 8 Mégapixels. Les focales (données en équivalent argentique<sup>5</sup>) variaient entre 25 mm (le très grand angle du Panasonic DMC-FX35) et 41 mm (l'angle plus réduit du Powershot A410) pour une médiane de 35 mm.

Les appareils photographiques numériques présentent l'avantage d'une bien plus grande capacité de prise de photographie que l'argentique. La capacité des cartes mémoire doit cependant être prise en compte pour pouvoir assurer avec certitude la totalité de la mission d'une seule traite. Si les différentes technologies (Memorystick, Carte MMC, Carte SD...) ont des caractéristiques similaires, certaines versions sont limitées en capacité : les cartes SD sont limitées à 2 Go, alors que leurs successeurs, les cartes SDHC peuvent aller jusqu'à 32 Go.

Enfin, le dernier critère pris en compte est celui de la qualité optique de l'appareil photographique. C'est un élément essentiel mais qui est malheureusement très mal documenté et ne peut généralement pas être pris en compte dans la sélection. Dans tout les cas où cela était possible, des comparatifs indépendants comme celui de « [Digital Photography Review](#) » ou du site « [Les numériques](#) » ont été utilisés pour vérifier la qualité optique des appareils.

La table 3.2 p. 110 montre les quinze appareils ayant passé tous les critères minimaux : poids inférieur à 200 grammes, prix inférieur à 300€, stabilisateur optique ou capteur et pré-

---

5. La longueur focale n'ayant de sens que dans son rapport à la largeur du capteur, et celui-ci pouvant fortement varier d'un appareil photographique numérique à l'autre, celles-ci sont généralement données comme si le fond de chambre avait la largeur des pellicules argentiques, soit 35 mm. Un appareil photographique ayant une focale équivalente de 50 mm présente un angle de vision instantanée proche de celui de l'œil humain, soit environ 45°.



**FIGURE 3.15** – *Pentax Optio A40, 12 Mpix stabilisé, mode rafale illimité et télécommande pour 170 g! Source : Pentax*

sentant de bonnes caractéristiques techniques. C'est parmi cette liste que nous avons choisi les appareils photographiques de notre système et finalement, c'est le modèle Optio A40, que l'on voit sur la figure 3.15 p. 112 qui fut choisi : 12 Mégapixels, capteur stabilisé, mode rafale continu illimité, télécommande, réglages manuels pour seulement 170 grammes.

Alors que nous utilisons ces appareils depuis bientôt deux ans, nous pouvons analyser à nouveau certains critères de choix, comme la télécommande ou le mode rafale en continu. Nous verrons dans la section 3.2.5 que la télécommande a du rapidement être remplacée par un système de contrôle plus efficace. Par conséquent nous la retirerions des critères important si nous devons refaire une nouvelle étude. Pour des raisons similaires, le mode rafale n'a pas rempli les critères pour lesquels il avait été choisi — engendrant des photographies floues et désynchronisées — et l'on ne doit prendre en compte que la vitesse de résilience lors du fonctionnement normal de l'appareil.

Nous terminerons en disant que les critères de poids, de stabilisation, de vitesse de prise de vue (et de la carte mémoire) et la capacité de définir manuellement certains paramètres de prises de vue se sont révélés des critères intéressants à retenir pour le choix d'un appareil dédié à la télédétection basse altitude.

### 3.2.5 Électronique de contrôle et station sol

Une fois le choix des appareils photographiques arrêté, nous nous sommes posés la question de l'électronique de contrôle. Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.3.3, nous avons décidé de créer une carte électronique dédiée à la gestion du capteur permettant ainsi une plus grande souplesse d'opération en cas de modification de la charge utile ou du porteur.

Concernant l'architecture du système, le rôle de la carte dédiée au capteur était de permettre une communication avec les autres cartes : avec la carte assistant pilotage, car c'est elle qui est en charge du plan de vol, avec la carte bas niveau, qui renseigne sur l'orientation de l'appareil, ainsi qu'avec la station au sol pour permettre un contrôle de l'opérateur sur l'acquisition des données.

Du point de vue de l'acquisition, cette même carte devait contrôler l'orientation des appareils photographiques ainsi que leur état — allumés, éteints ou en cours d'acquisition — et répondre à des commandes envoyées par le système.

Nous verrons donc dans cette partie comment nous avons pu transformer des appareils photographiques du commerce en caméras d'imagerie asservie, puis comment la carte dédiée au capteur communique avec le reste du système.

### 3.2.5.1 Contrôle électronique d'un appareil du commerce

Le contrôle électronique d'un appareil photographique recouvre les opérations courantes d'allumage et de déclenchement de l'acquisition mais initiées par un système de commande électronique. Dans notre cas, il concerne aussi la datation et la validation des prises de vues.

Généralement les systèmes proposés dans le commerce ne s'occupent que du déclenchement : les appareils doivent être allumés manuellement et les utilisateurs doivent se contenter de la datation interne de l'appareil, récupérée dans les métadonnées\* EXIF<sup>6</sup>.

On peut voir sur la figure 3.16 p. 114, quelques exemples courants de déclencheurs. Les systèmes mécaniques, illustrés par la figure 3.16(a), cherchent à reproduire la pression du doigt avec un servo-moteur. Ils ont l'avantage de pouvoir être mis en place sur n'importe quel appareil du commerce mais ils manquent généralement de fiabilité et demandent un réglage fin pour que le contact du servo-moteur sur le bouton pression se fasse convenablement. Pour les activer de manière efficace, on peut utiliser des systèmes comme le ShutterBug Pro [DPC AV, 2007] qui permet, entre autres, de contrôler la fréquence d'acquisition.

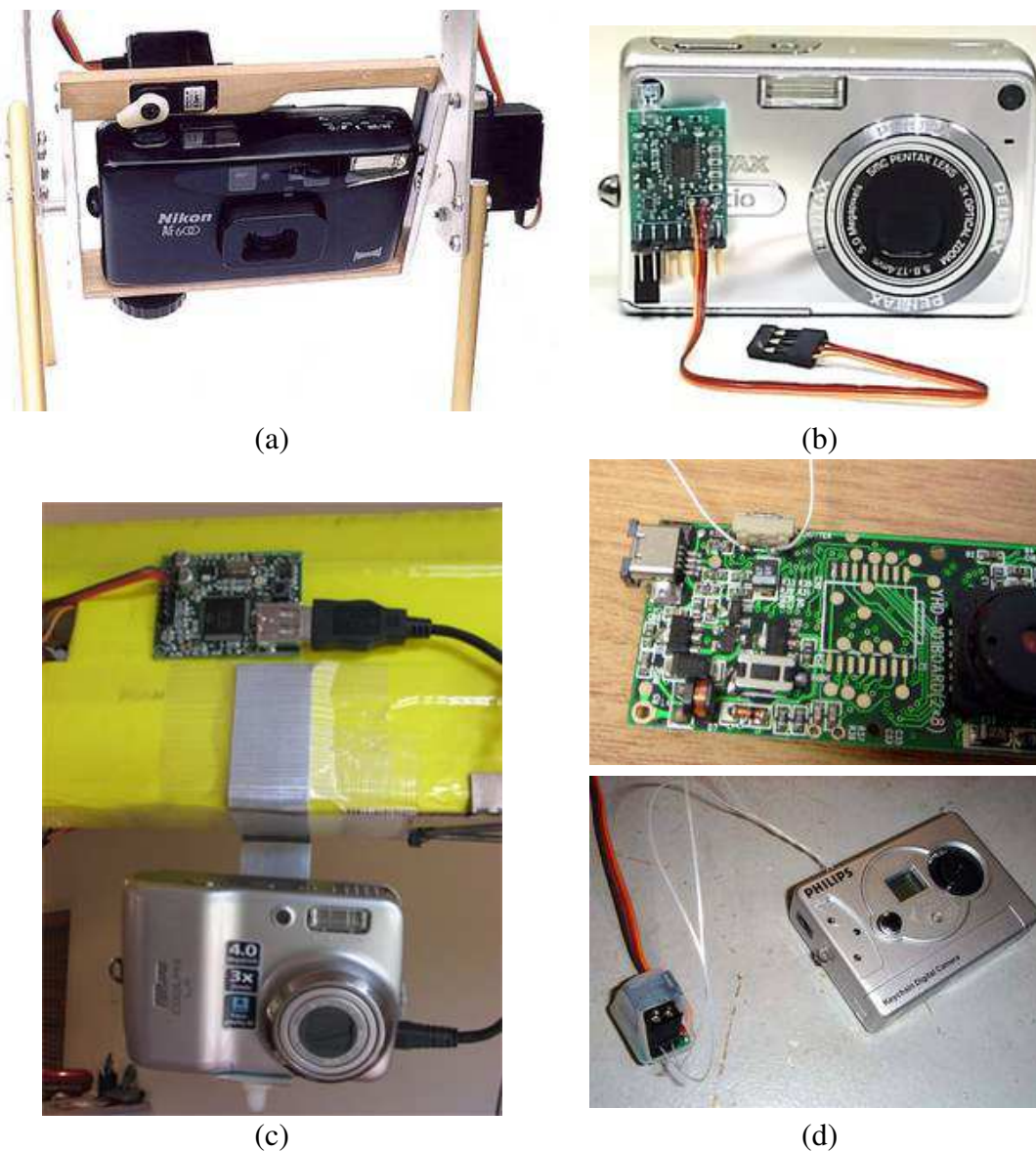
Les systèmes infrarouges, illustrés par la figure 3.16(b), peuvent être utilisés sur certains appareils photographiques qui possède un récepteur infrarouge conçu pour communiquer avec une télécommande infrarouge. On trouve dans le commerce des systèmes miniatures, comme le système PRISM de la société Hexpert System [Woolsey, 2005], qui reproduisent les signaux infrarouges lorsqu'ils reçoivent un signal PWM<sup>7</sup>, utilisés couramment en aéromodélisme. Malgré une fiabilité plus grande que les systèmes mécaniques, cette solution nécessite que l'appareil photographique possède un mode télécommande et que le mode de prise de vue désiré le permette, ce qui est assez rare.

Nous avons vu à la section 3.2.4 p. 107 que les Optio A40 de chez Pentax avait cette fonctionnalité et que cela avait été un critère favorable lors du choix de l'appareil le plus adapté. Néanmoins, lors de nos tests, il s'est révélé que le mode télécommande impliquait une fréquence de prise de vue très basse — environ trois à quatre secondes entre deux photographies — et une synchronisation déplorable entre les appareils. Enfin, si l'ordre de prise de vue arrivait alors que l'appareil photographique n'était pas prêt, l'ordre était tout simplement ignoré.

---

6. Les métadonnées EXIF, devenues le standard des métadonnées pour les images JPEG contiennent de nombreuses informations comme la focale\*, le temps de pose ou la date de prise de vue au format Heures :Minutes :Secondes.

7. Les signaux PWM (en Modulation de la Largeur d'Impulsion) sont très utilisés en robotique et en aéromodélisme pour contrôler les servo-moteurs. De manière synthétique on peut dire que la largeur d'impulsion est proportionnelle à la consigne.



**FIGURE 3.16** – Systèmes de déclenchement courants (a) Déclenchement mécanique avec un servo-moteur. Source : [kap.online.fr](http://kap.online.fr) — (b) Déclenchement simulant une télécommande infrarouge. Source : [hooked-on-rc-airplanes.com](http://hooked-on-rc-airplanes.com) — (c) Déclenchement utilisant le port USB. Source : [aeromodelism-virtual.com](http://aeromodelism-virtual.com) — (d) Déclenchement utilisant les niveaux logiques. Source : PicoSwitch

On peut aussi trouver des systèmes de déclenchement, comme le système URBI [Blip It Pty Ltd, 2010] illustré par la figure 3.16(c), qui communique directement avec le port USB de l'appareil. En effet, si tous les appareils photographiques sont aujourd'hui équipés d'un port USB pour se brancher sur un ordinateur et télécharger les photographies qui sont en mémoire, certains d'entre eux — les appareils Canon et Nikon en particulier — ont poussé plus loin cette interface et permettent un contrôle (restreint) de l'appareil via l'ordinateur. Pour ceux qui ne peuvent pas embarquer un PC portable sur leur porteur, il reste le système URBI qui reçoit des signaux PWM — comme ceux qui activent le déclencheur infrarouge — et envoie les instructions sur le port USB de l'appareil photographiques, simulant la présence d'un ordinateur. Comme ce système ne fait que quelques centimètres et ne pèse que 32 grammes il est probable que son usage se généralise sur les avions\* léger. Pour notre part, nous n'avons pas encore eu la possibilité de tester ce type de système.

Les solutions présentées jusqu'ici sont appelées « non intrusives », car elles ne demandent pas d'ouvrir la coque de l'appareil photographique. Elles s'opposent en cela à notre dernière catégorie de solution, dite « intrusive », et qui demande des opérations « chirurgicales » plus ou moins lourdes.

Les électroniciens débutants se tournent généralement vers des systèmes, comme le PicoSwitch [Dimension Engineering LLC, 2010], illustré par la figure 3.16(d), qui servent de relais électrique. Branchés entre les deux polarités du bouton de déclenchement — (d), en haut —, ils actionnent à la demande le passage du courant ce qui simule l'activation du bouton. Comme les systèmes précédents, ils utilisent des signaux PWM en entrée.

La dernière solution consiste à faire soit même une carte électronique qui joue un rôle similaire au PicoSwitch mais qui est parfaitement adaptée à la caméra que l'on asservit. On utilise alors les capacités des microprocesseurs pour servir de relais, analyser les signaux provenant de la caméra ou communiquer avec le reste du système : par des signaux PWM ou d'autres moyens plus adaptés, comme nous le verrons par la suite. On trouve sur internet des instructions détaillées pour asservir de cette manière certaines caméras du commerce [RC-CAM, 2009] mais malheureusement ces instructions ne sont pas généralisables et l'on doit s'adapter à chaque nouvelle caméra que l'on désire ainsi transformer.

### 3.2.5.2 Analyse des signaux

Nous avons donc commencé par démonter les appareils photographiques avec le double objectif de comprendre leur fonctionnement et d'enlever toutes les parties qui les alourdisaient inutilement, comme on peut le voir sur la figure 3.17 p. 116.


Le poids de l'appareil fut réduit par cette opération de 170 grammes à 119 grammes, soit un amaigrissement de 30%. Ce gain n'est pas aussi important que l'on pouvait l'espérer<sup>8</sup> car, une fois enlevés la coque extérieure et l'écran, nous avons dû garder une grande partie de la structure sur laquelle étaient fixées les cartes électroniques et l'optique et qui ne pouvait être enlevée sans disloquer complètement l'appareil.

---

8. Un travail similaire mais plus significatif est décrit au paragraphe 3.2.6.2 p. 126 avec un caméscope numérique.





**FIGURE 3.17** – Démontage de l'Optio A40. En partant de la coque extérieure, jusqu'aux circuits électroniques, il faut identifier et numéroté chaque pièce pour pouvoir remonter les parties essentielles. En haut à droite, les boutons d'allumage et de déclenchement. Source : Gademer 

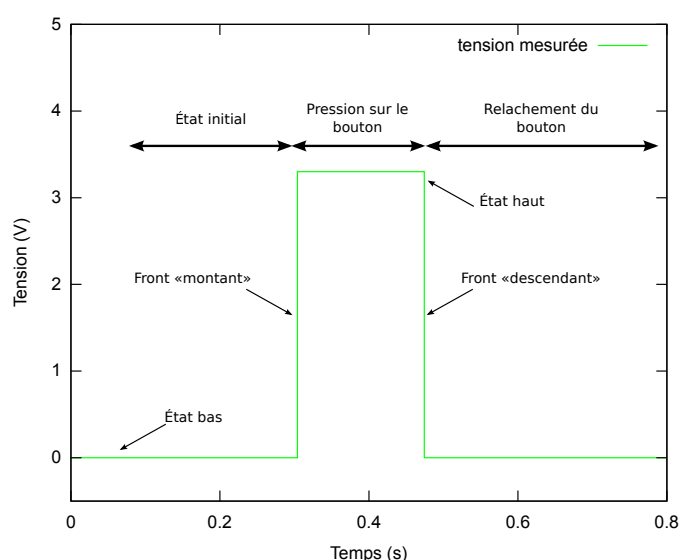
Une fois l'accès à l'électronique de l'appareil obtenu, nous nous sommes intéressés au déclenchement et à la mise sous tension. On peut voir sur la figure 3.17 p. 116, en haut à droite, les deux boutons poussoirs — autrement appelés activateurs électromécaniques — numériques correspondant respectivement à la mise sous tension et au déclenchement de la prise de photo.

Dans la plupart des appareils photographiques récents ces contacteurs électroniques ont remplacé les boutons mécaniques. Ces derniers fonctionnent sur le principe d'une différence de voltage, illustrée par la figure 3.18 p. 117 : lorsque le bouton est au repos la tension mesurée sur le fil TRIGGER, que l'on retrouve sur la figure 3.19 p. 118, est nulle — on parle de niveau bas —, le fil est relié à la masse (GND), mais lorsque celui-ci est pressé il met le fil en contact avec une source de tension et la tension mesurée sur le fil TRIGGER est non nulle — on parle de niveau haut.

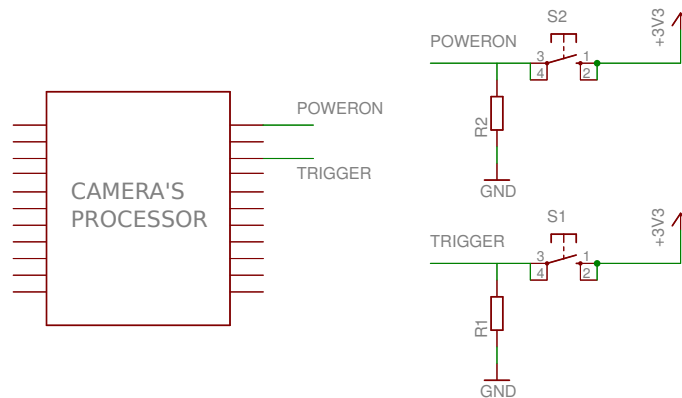
Le circuit électronique fonctionnant — pour la partie observée — selon une logique numérique (0 ou 1), la pression du bouton provoque une action au sein du microprocesseur qui déclenche la séquence de prise de photo. On trouve plusieurs conventions de tension en électronique numérique, c'est-à-dire plusieurs définitions de la tension minimale à partir de laquelle le circuit considère que la valeur est 1 ; ici nous avons observé un fonctionnement en TTL (Transistor-Transistor Logic) 3.3V, et nous avons donc choisi de définir notre carte électronique dans ce même mode de fonctionnement.

En comparaison, le PicoSwitch, en choisissant un fonctionnement de type relais<sup>9</sup>, sépare

9. En électronique l'utilisation de transistors pour servir de commutateur est un des principe fondateur. La tension qui active le relais et celle qui passe dans le relais peuvent être totalement différentes, ce qui offre une grande robustesse au système.



**FIGURE 3.18** – Fonctionnement d'un activateur électromécanique. La tension aux bornes du bouton passe de l'état bas à l'état haut durant la durée de la pression. Le système peut détecter le front « montant » (pression) ou le front « descendant » (relâchement). Source : Gademer



**FIGURE 3.19** – Schéma électronique de l'Optio A40. Dans la plupart des appareils récents des contacteurs électroniques ont remplacés les boutons mécaniques. Source : Gademer

sa tension de fonctionnement de celle qui passe dans le relais et peut donc s'adapter à de nombreux systèmes. À l'inverse, en choisissant de fonctionner directement à la même tension nous pouvons interagir de manière beaucoup plus simple avec l'appareil, au coût d'une moins grande flexibilité. Le schéma électronique de la figure 3.19 p. 118 correspond à ce que nous pensons être le fonctionnement de l'électronique de l'appareil.

Nous avons donc établi qu'en mettant directement à l'état haut (3.3V) les bornes du processeur de l'appareil correspondant au déclenchement et à la mise sous tension nous pouvons contrôler deux des principaux processus de l'appareil. L'appareil étant capable de mémoriser les réglages (vitesse d'obturation, ouverture, focale à l'infini...) de prise de vue d'un allumage à l'autre, nous avons un système quasiment fonctionnel.

Il est légitime de se demander pourquoi il est nécessaire de contrôler la mise sous tension aussi bien que le déclenchement ; à notre connaissance, l'ensemble des systèmes (aéromodèles ou drones) proposés dans le commerce ne le font pas et les appareils photographiques sont mis en route en même temps que le porteur, avant le décollage.

Dans notre cas, nous avons considéré que la capacité de mise sous tension était un avantage important pour deux raisons ; tout d'abord pour limiter la hauteur de la charge utile. Notre quadri-rotor étant petit, l'espace disponible au niveau du train d'atterrissage est assez réduit. Notre système tri-caméras étant tout de même assez imposant il devenait nécessaire de rentrer les objectifs avant de se poser : comme ceux-ci sont majoritairement orienté vers le bas, un appui même bref sur les optiques pourrait les rayer.

La seconde raison est d'ordre opérationnelle ; lors du décollage et de l'atterrissage les systèmes à voilure tournante (hélicoptères ou multi-rotors) produisent des tourbillons d'air, appelés effets de sol\*, qui sont dus à la force du souffle qui se projette sur le sol. Ces tourbillons lèvent énormément de poussières même si cette phase reste brève. En allumant les appareils après cette phase et en les éteignant avant l'atterrissage, on s'assure de limiter la quantité de poussière qui entre dans les optiques, ce qui endommagerait les appareils et nuirait à la qualité des photographies.

Après plusieurs tests, la qualité mesurée de synchronisation des appareils photographiques

entre eux est de 50 millisecondes en moyenne pour des prises de photographies au coup par coup. La réactivité des appareils permet de réduire l'intervalle entre deux photographies de 3 secondes (déclencheur infrarouge) à 1,5 secondes (déclencheur électronique). Malheureusement il arrive que certaines circonstances extérieures, souvent liées à la complexité de la scène acquise, empêche le bon déroulement de la prise de photo. Bien que le système électronique réduise fortement ce risque par rapport au système infrarouge, il nous semblait important de pouvoir valider avec certitude que l'ordre avait bien été exécuté ou non.

Par ailleurs, la géolocalisation\* des images exigeait une connaissance fine de la date de prise de vue. Sur un appareil dont la trajectoire et l'assiette sont très perturbés, comme les systèmes multi-rotors, une datation des images à la seconde — comme proposé en interne dans les métadonnées EXIF — nous semblait fortement inadaptée : la centrale inertielle fournit 300 positions par seconde et le récepteur GPS cinq positions par seconde. Une meilleure datation signifiait pour nous une meilleure géolocalisation.

Pour toutes ces raisons, nous avons poussé plus loin nos analyses du fonctionnement des appareils pour découvrir des pastilles dont le signal dépendait de l'état interne de l'appareil et nous les avons trouvés sur l'une des cartes internes de l'appareil, comme l'illustre la figure 3.20(a) p. 120.

L'une d'entre elles, située en bas à droite de la série de dix pastilles illustrées sur la figure 3.20, présentait en particulier un comportement intéressant :

- alors que l'appareil était éteint, la tension mesurée entre la masse et la pastille était nulle (c),
- lorsque l'appareil était allumé, on pouvait observer un signal TTL périodique passant à l'état haut durant deux millisecondes toutes les vingt millisecondes (b et c),
- enfin, lors de la prise de photo, ce même signal passait à une période de cent-vingt millisecondes (d).

En observant les fronts montants de ce signal, nous pouvions donc connaître l'état de l'appareil — éteint ou allumé — et dater les photographies avec une précision de vingt millisecondes, cette précision étant liée à la périodicité du signal dans l'état normal de l'appareil.

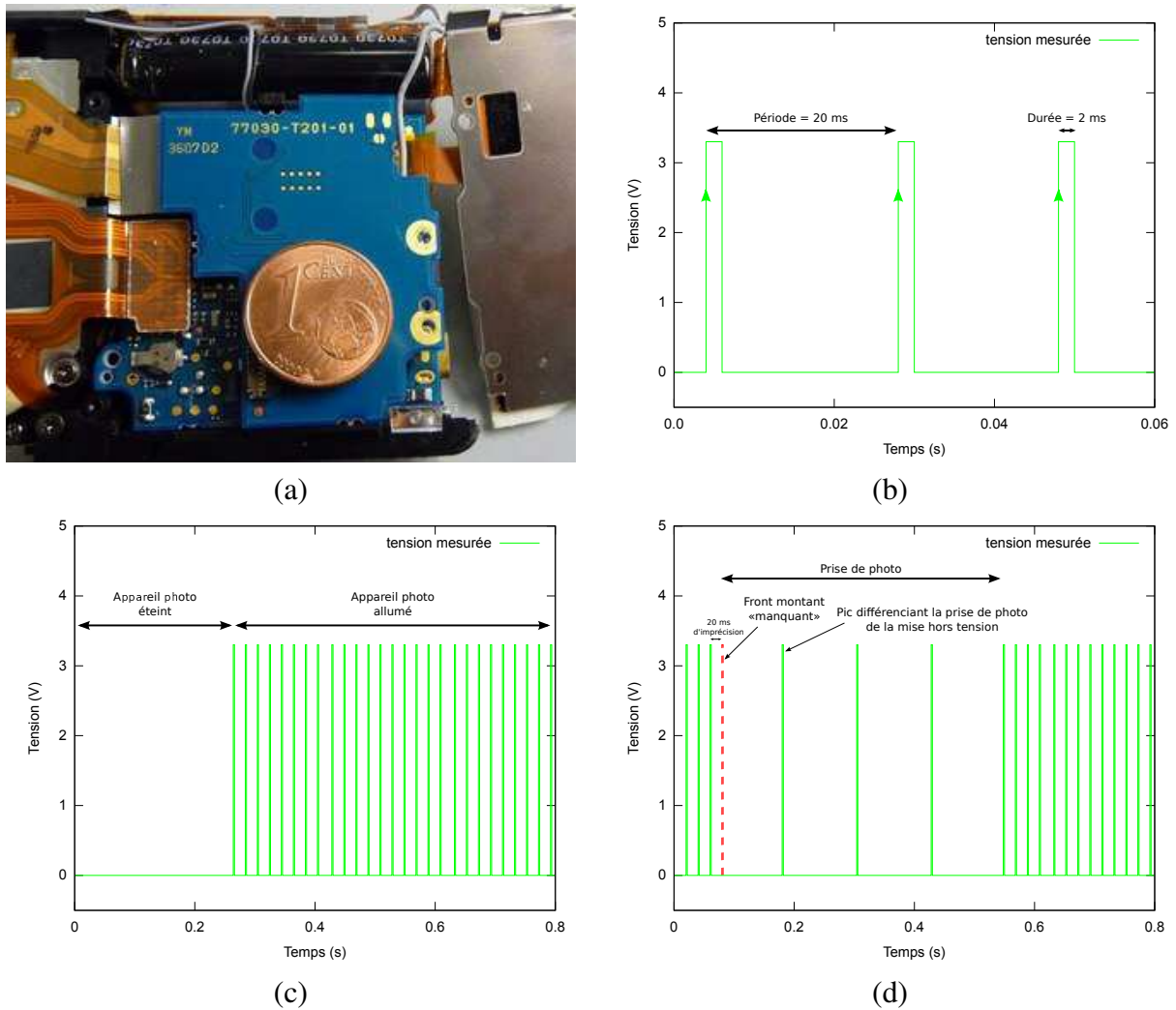
Il est important de noter que d'un point de vue algorithmique qu'il nous faut aussi compter le nombre de pics « absents » pour différencier la prise de photographie d'une mise hors tension pure et simple, comme illustré sur la figure 3.20 (d) p. 120.


### 3.2.5.3 Réalisation de la carte

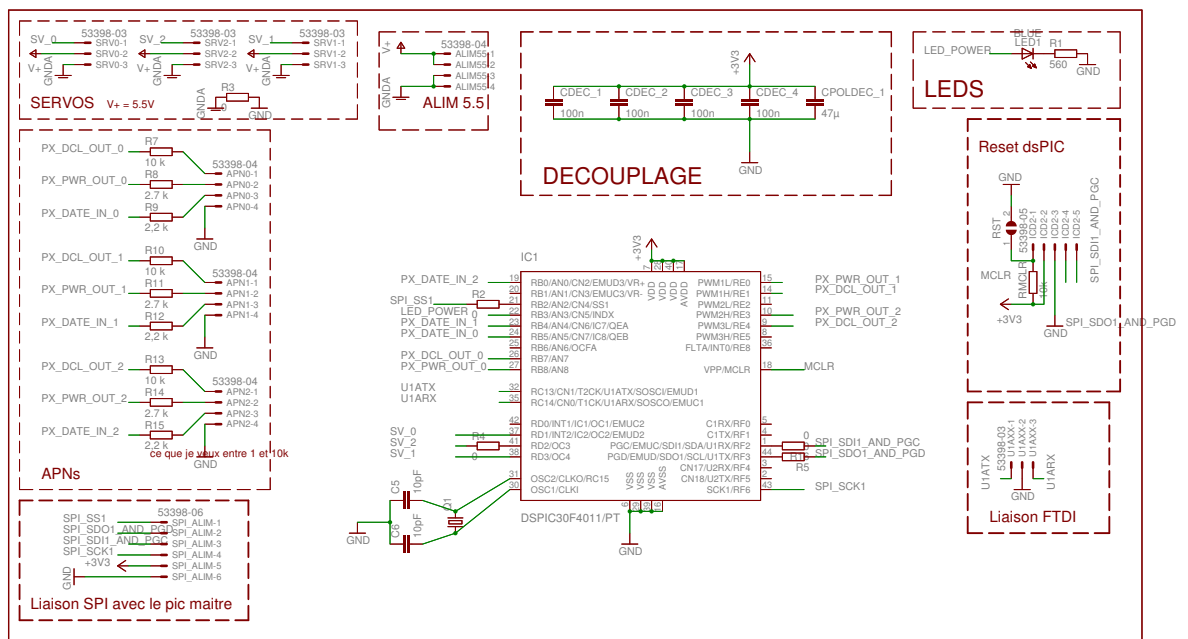
Pour la réalisation de la carte, nous avons utilisé un microcontrôleur dsPIC 30F4011 de chez Microchip. Cette puce avait l'avantage d'intégrer de nombreuses fonctionnalités comme la gestion des signaux PWM<sup>10</sup> — pour pouvoir facilement commander aux servo-moteurs —, la lecture de plusieurs signaux numériques en parallèle (*change notification* en anglais) pour pouvoir récupérer les dates de tous les appareils photographiques en même temps, ainsi que la

---

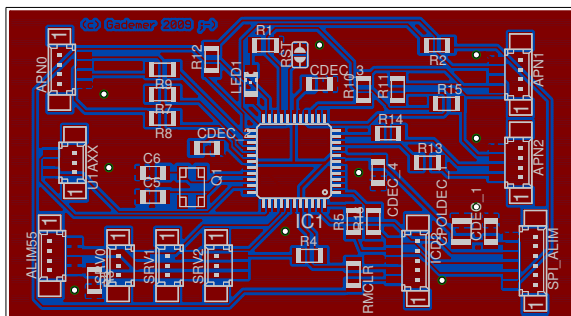
10. Les signaux PWM (en Modulation de la Largeur d'Impulsion) sont très utilisés en robotique et en aéromodélisme pour contrôler les servo-moteurs. De manière synthétique on peut dire que la largeur d'impulsion est proportionnelle à la consigne.



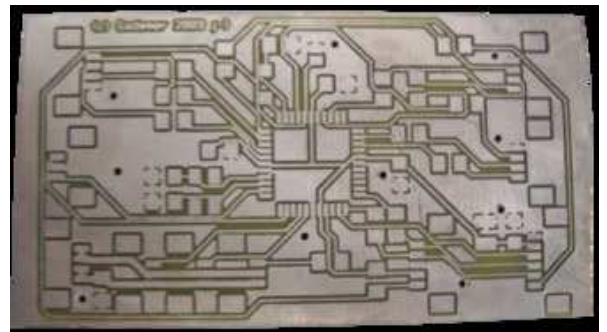
**FIGURE 3.20** – Signal de maintenance de l’Optio A40. (a) Les pastilles de maintenance de l’Optio A40. Ces pastilles servent au service après-vente pour vérifier le bon fonctionnement de l’appareil. — (b) Le signal émis est un signal carré durant 2 ms et d’une périodicité de 20 ms. Nous mesurons les fronts montants de ce signal. — (c) En observant cette pastille on peut détecter la mise sous tension (ou hors tension) de l’appareil. — (d) On peut aussi détecter et dater la prise de photo, car le signal change de période durant l’acquisition. Source : Gademer 



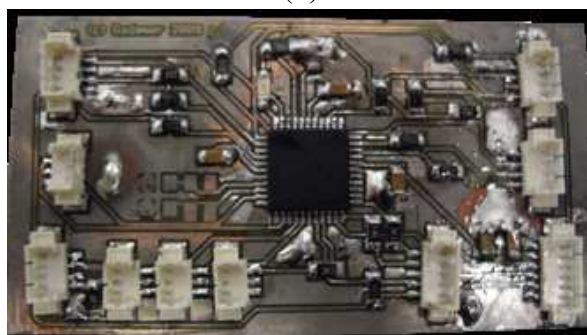
(a)



(b)



(c)

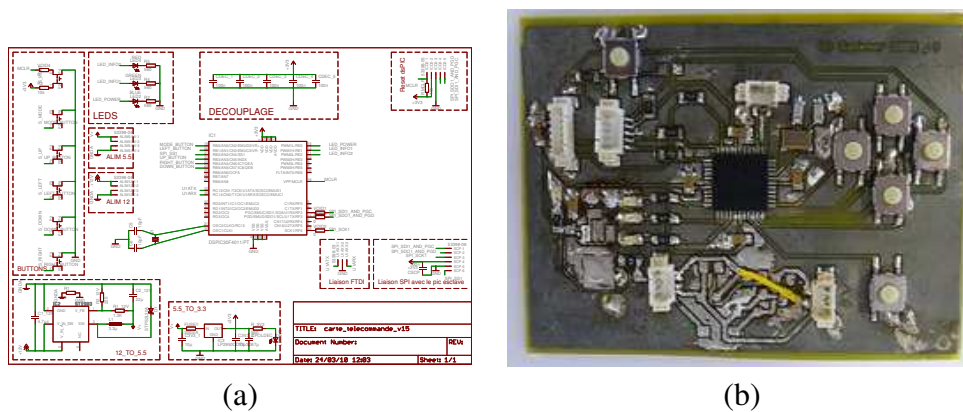


(d)



(e)

**FIGURE 3.21** – Réalisation de la carte charge utile. (a) Schéma électronique. — (b) Plan du circuit. — (c) Circuit réalisé par gravure chimique — (d) Carte, une fois les composants soudés — (e) Carte, reliée aux différents capteurs. Source : ©ATIS



**FIGURE 3.22** – Circuits électroniques de la carte « Télécommandes » — (a) Schéma réalisé avec Eagle — (b) Réalisation finale. Les boutons pressoirs servent à envoyer des commandes à la carte du capteur et vérifier son bon fonctionnement. Source : ©ATIS

production de signaux TTL pour la mise sous tension et le déclenchement des photographies. Enfin, cette puce pouvait être configurée pour implémenter le protocole Serial Peripheral Interface (SPI), ce dernier étant utilisé par la carte bas-niveau pour communiquer avec tous les sous-systèmes.

Pour tester le fonctionnement de la carte séparément du développement du drone, une seconde carte dite « carte télécommande », illustré à la figure 3.22 p. 122 fut conçue pour simuler la communication avec la carte bas-niveau et développer proprement les protocoles de communication.

La carte dédiée à la charge utile fonctionne en collaboration avec les autres cartes du système et en particulier avec la carte bas-niveau. Cette dernière, de part son statut de carte principale, fonctionne sur le principe maître-esclave sur le bus<sup>11</sup> SPI (Serial Peripheral Interface). Cette liaison est une liaison série synchrone permettant à un unique système « maître » d'interroger à la demande un grand nombre de périphériques « esclaves » par une seule et même voie de communication. On parle de liaison synchrone car le maître et l'esclave parlent en même temps, ce qui exige une réactivité maximale de la part des périphériques esclaves puisqu'ils n'ont que le temps de parole du maître pour lui « répondre ».

En pratique cela revenait à établir des registres<sup>12</sup> virtuels dans lesquels le maître pourrait venir lire ou écrire des données. Par exemple, le maître devait pouvoir écrire l'ordre de déclenchement pour un ou tous les appareils photographiques, ou à l'inverse lire la liste des dates des photographies prises depuis sa dernière « visite ». On retrouvera la liste de ces registres en annexe p. 229.

Pour les tests, il a fallu développer le protocole du côté esclave pour la carte dédié à la charge utile mais aussi le côté maître pour la carte « Télécommande » ce qui a permis de

11. Un bus de donnée est une connexion qui relie plusieurs périphériques simultanément. Pour s'assurer que chaque périphérique ne reçoit que les messages qui lui sont adressés, chaque élément connecté au bus doit utiliser un protocole de communication très strict.

12. Les registres d'un microprocesseur sont des zones mémoires réelles ou virtuelles dans lesquelles on trouve soit des données, soit des instructions que le microprocesseur doit exécuter.

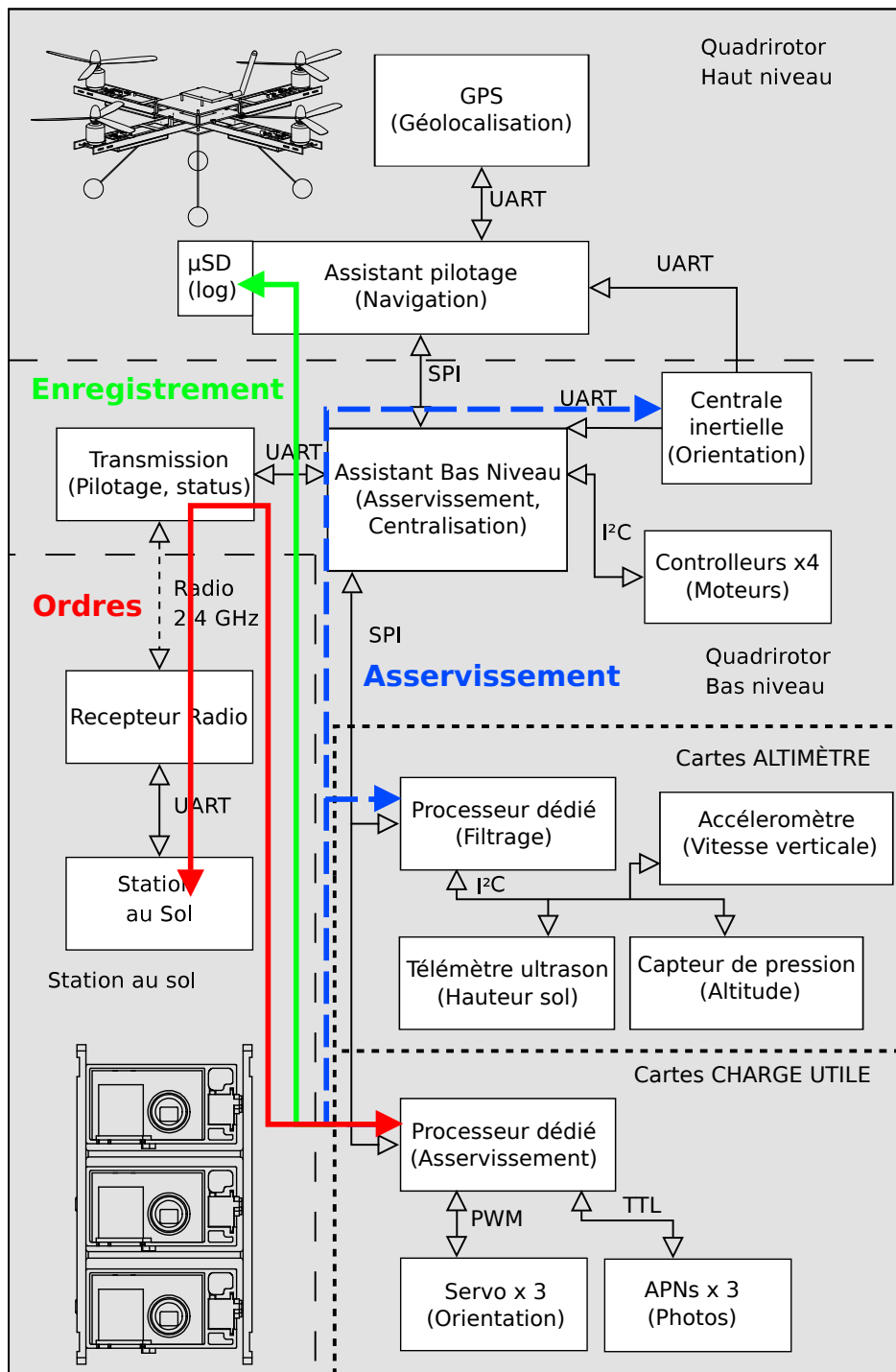


FIGURE 3.23 – Différentes liaisons entre la charge utile et les autres sous-systèmes Source : ©ATIS





FIGURE 3.24 – Station au sol. Interface charge utile Source : ©ATIS

mettre en place des protocoles de communication propres et évolutifs.

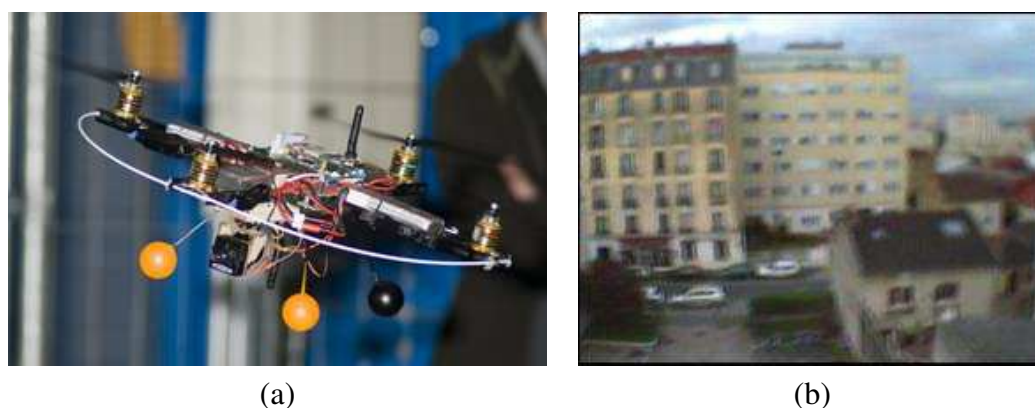
Le protocole prévu et implémenté entre la carte dédiée à la charge utile et la carte « Télécommande » comprenait :

- ⇒ réception des ordres de mise sous tension et de déclenchement
- ⇒ réception du signal de synchronisation des horloges
- ⇒ réception de l'attitude et de l'altitude (pour la compensation du tangage)
- ⇐ envoi des dates des photographies prises depuis la dernière demande
- ⇐ envoi des statuts des appareils photographiques.

Une fois la carte opérationnelle et testée avec la carte « Télécommande », il a fallu l'intégrer dans le système complet du drone. On voit sur la figure 3.23 p. 123, que celle-ci nécessitait trois chemins de communications. Le premier (en rouge) concernait le contrôle des appareils photographiques depuis la station sol. Cela impliquait l'ajout, au sein du protocole de communication série entre la station et la carte-bas niveau, de plusieurs types de messages dédiés à la charge utile, ainsi qu'une nouvelle interface au sein de la station sol (cf Fig. 3.24).

Le second chemin (en vert) concernait l'enregistrement des métadonnées. Les photographies sauvegardées sur les cartes mémoires des appareils photographiques contiennent des métadonnées stockées au format EXIF comme la longueur focale, l'exposition et la date de prise de vue au format Heures : Minutes : Secondes. Néanmoins la géolocalisation des données nécessite d'autres informations comme l'orientation de l'appareil au moment de la prise de vue et sa position dans l'espace. Pour ce faire on a besoin de placer dans un même référentiel de temps les données du récepteur GPS, de la centrale inertielle, de la carte altimètre et la datation précise des photographies obtenues par la charge utile. L'ensemble de ces informations est rassemblé par la carte « Assistant pilotage » qui les enregistre sur un support mémoire microSD que l'on récupère à la fin du vol.

Le dernier chemin (en bleu) qui n'est pas finalisé, permettrait de mettre en relation les informations d'orientation et de hauteur avec l'asservissement du capteur, pour compenser le



**FIGURE 3.25** – *Caméra aéromodeliste sur le drone.* — (a) *La caméra aéromodelisme KX-131 fixée à l'avant de l'appareil pour un retour vidéo en temps réel.* — (b) *Image vue depuis la caméra aéromodeliste et simulant la vue depuis le « cockpit ».*

tangage et maintenir les appareils photographiques dans la configuration désirées quels que soient les mouvements du drone. En effet, on a vu à la section 3.1.2 p. 92 que le micro-drone s'inclinait pour obtenir le mouvement de translation.

### 3.2.6 Autres systèmes de vision

Au delà du capteur multi-caméras dédié aux mission cartographiques, nous avons développé en parallèle un système de vision embarqué, dont le rôle était de fournir un retour vidéo temps réel de ce qui était vu par le drone et par conséquent de permettre soit le pilotage « embarqué », soit l'aide à la visée lors du déclenchement manuel des prises de vues.

#### 3.2.6.1 Système de visée et de pilotage embarqué

Notre première approche fut d'utiliser une caméra habituellement utilisée sur les aéromodèles et dont nous avons présenté les caractéristiques au chapitre 2, paragraphe 2.3.2 p. 55 : une KX-131, illustrée sur la figure 3.25 p. 125, et qui nous permet pour un poids minimal — 30 grammes + 20 grammes d'émetteur — de retransmettre une image VGA ( 640 × 480) en temps réel à la station sol.

Orienté vers l'avant, ce retour vidéo simule la vue depuis le « cockpit » du drone et permet à l'opérateur d'estimer ce que voit l'appareil. Orienté vers le bas, il fournit des informations sur ce que voit le capteur de la charge utile et permet à l'opérateur de déclencher la prise de vue au dessus des scènes d'intérêt.

On tiendra cependant compte du fait que la retransmission de la vidéo par une communication analogique sans fil — les systèmes de communication numérique étant hors de notre gamme de prix — est sensible aux parasites dus au bruit électromagnétique et à la distance. La qualité des images qui arrivent à la station sol, si elle est suffisante pour un opérateur humain, ne permet pas de traitement a posteriori pour extraire des informations sur le vol

et c'est pourquoi nous avons cherché une solution alternative permettant à la fois un retour vidéo en temps réel et un post-traitement des données.

### 3.2.6.2 Acquisition de flux vidéos

On trouve aujourd'hui des caméscopes du commerce qui présentent les avantages d'être relativement légers, de permettre une sortie vidéo secondaire analogique et un enregistrement de qualité.

Notre choix s'est porté sur le Camileo P10 de Toshiba, qui était le premier caméscope à proposer une vidéo Full HD ( $1920 \times 1080$ ) sur un appareil pesant moins de 150 grammes et coûtant moins de 150€. Cette révolution était permise par l'utilisation d'un capteur optique CMOS, dont la technologie, proche de celle des processeurs d'ordinateurs, révélait des coûts de production beaucoup plus bas.

Notre premier travail, comme pour les appareils photographiques fut de retirer toutes les parties superflues comme l'illustre la figure 3.26 (a) p. 127. Contrairement aux appareils photographiques, la structure n'était pas nécessaire pour le maintien de l'ensemble et nous avons pu l'enlever complètement. Une fois l'électronique mise à nue, nous avons dérivé l'alimentation pour nous passer de la batterie interne, ainsi que le retour vidéo pour nous passer du lourd connecteur de transmission. Enfin nous avons déplacé la carte secondaire qui contenait les boutons et rajouté un bouton d'allumage et d'enregistrement plus accessibles (b).

Le résultat final (c) est impressionnant avec moins de 35 grammes pour la caméra au final.

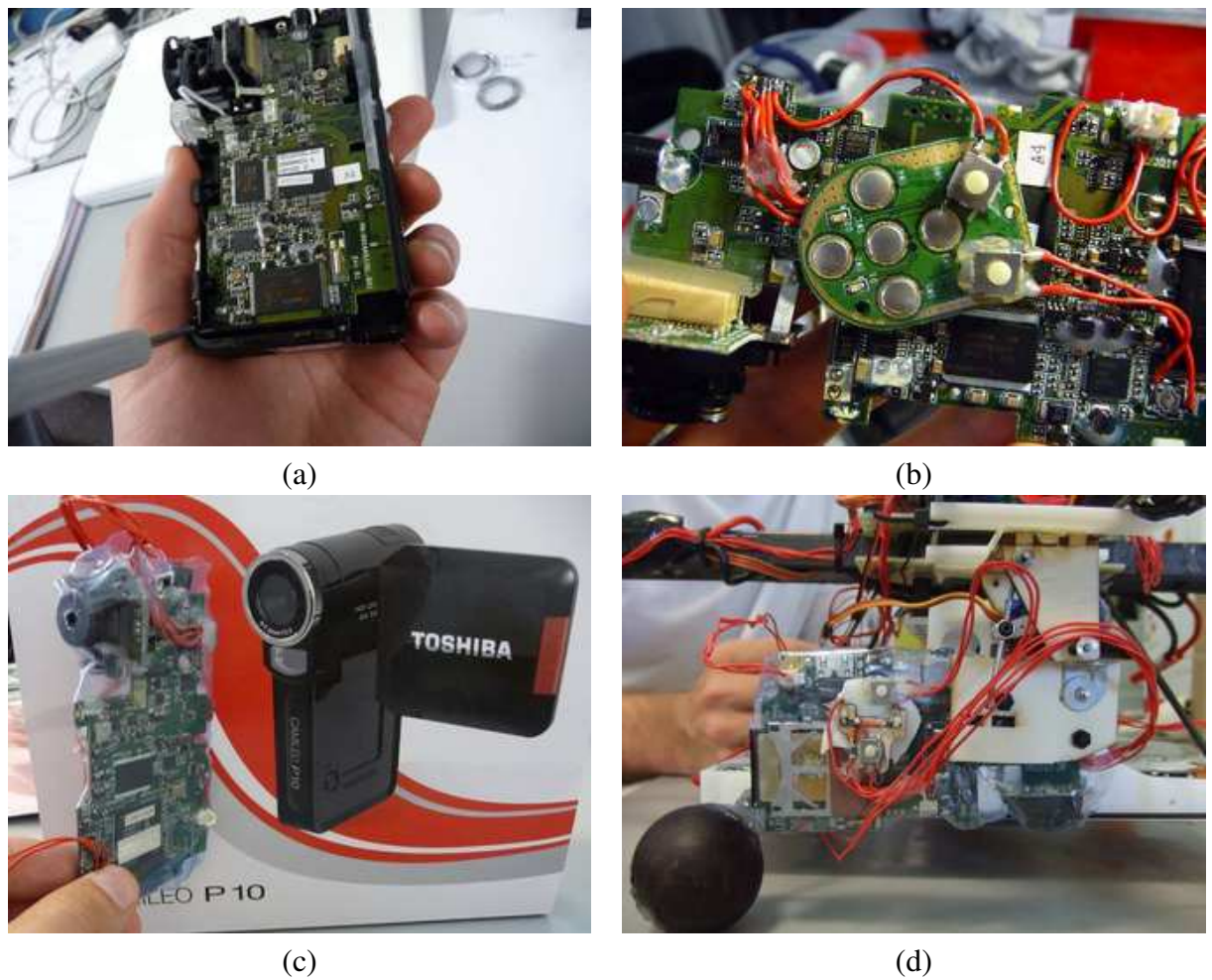
La capacité de retour vidéo en temps réel permettait de remplacer la caméra aéromodéliste en rajoutant un stockage en interne avec une qualité d'image inégalée. Le poids minimal nous permettait de l'emporter en supplément du capteur multi-caméras sans surcharge (d) et nous avons même fait un test avec trois caméscopes simultanément pour une vision omnidirectionnelle, comme le montre la figure 3.27 p. 127.

Les deux seuls inconvénients de ce nouveau système étaient un encombrement plus important dû à la longueur de la carte électronique de la caméra et pour laquelle nous avons dû ajouter un système de servo-moteur permettant de rétracter la caméra à l'atterrissage, visible sur la figure 3.26 (d) p. 127 et une grande sensibilité des capteurs CMOS aux vibrations à cause du « Rolling Shutter » implémenté dans ces appareils nécessitant l'ajout d'amortisseurs performants pour que les images HD soient utilisables, comme on peut le voir sur la figure 3.28 p. 128.

### 3.2.6.3 Afficheur tête haute

Nous concluons cette section consacrée aux capteurs en parlant des capacités de pilotage « embarqué » offertes par l'ajout de ce second système de vision.

En effet, la capacité à se projeter mentalement et visuellement dans le « cockpit » de l'appareil permet de simuler la présence du pilote dans l'appareil et donc d'augmenter la



**FIGURE 3.26** – Conditionnement du Camileo P10. — (a) Réduction du poids — (b) Simplification des contrôles, de l'alimentation et du retour vidéo. — (c) Une transformation drastique pour une efficacité opérationnelle maximale. — (d) La caméra, fixée sur une des branches du drone permet de voir ce que survole le capteur tri-caméras.



**FIGURE 3.27** – Vidéos prises simultanément avec trois camileo P10 selon les axes Gauche, Avant et Droite. Source : ©ATIS/Mainfroy



**FIGURE 3.28** – *Rolling shutter. Cette méthode de récupération par ligne des informations du capteur CMOS le rend extrêmement sensible aux mouvements brusques et aux vibrations et provoque des artefacts caractéristiques sur l'image. Source : ©ATIS/Gademer*

portée du pilotage. Contrairement au pilotage à vue qui nécessite que le pilote au sol visualise la position et l'orientation de l'appareil en permanence limitant l'éloignement et l'altitude atteignable par l'aéromodèle ou le drone, le pilotage « embarqué » ne limite plus la portée du drone qu'aux capacités de communication et d'endurance de l'appareil ce qui peut couvrir plusieurs kilomètres — ou milliers de kilomètres dans le cas des drones militaires lourds.

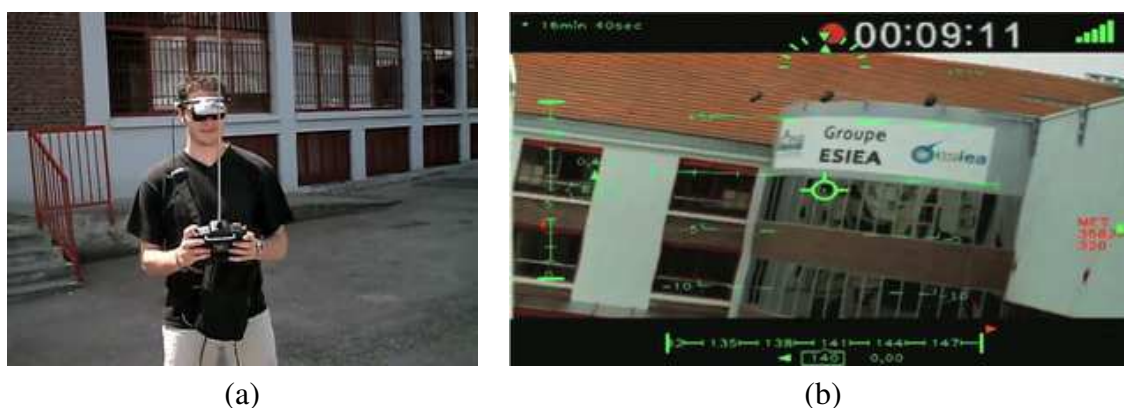
La problématique principale de ce système, bien connu des simulateurs de vol, est liée au manque de sensation physique du pilote, qui contrairement au pilote à bord de l'appareil ne ressent ni la direction de la gravité, ni l'accélération. Ces sensations, combinées à la vue à travers le « cockpit », permettent normalement au pilote de se représenter la position de l'appareil dans l'espace et de maintenir l'assiette et l'altitude et la direction de l'appareil.

Pour palier à ce défaut de sensation, les simulateurs ont recours à des systèmes d'aide visuelle de réalité augmentée<sup>13</sup> qui prennent la forme de symboles s'ajoutant à la scène vue par le pilote et que l'on nomme le viseur tête haute ou Head-Up Display (HUD)\*.

À partir des informations d'orientation et de position fournies par la station sol, [Avanthey et al. \[2009\]](#) ont développé un système de HUD pour notre micro-drone permettant d'ajouter en temps réel un ensemble complet de symboles sur le retour vidéo provenant du drone et permettant le pilotage « embarqué » comme on peut le voir sur la figure 3.29 p. 129.

En conclusion le HUD améliore les capacités opérationnelle du micro-drone pour les

13. La réalité augmentée est la discipline, à la frontière du traitement d'image et de la réalité virtuelle, qui se consacre à l'ajout d'informations virtuelles sur des flux vidéos réels en tenant compte de la scène réelle visualisée.



**FIGURE 3.29** – *Head-Up Display.* — (a) Retransmise sur des lunettes de réalité virtuelle, la vidéo embarquée, augmentée des symboles de navigation, permet au pilote de voler comme s’il était à l’intérieur de l’appareil. — (b) Les symboles permettent de compenser le manque de sensation physiques en redonnant au pilote des informations sur la hauteur, l’horizon, etc. Source : ©ATIS / S. Monat

missions de télédétection basse altitude et complète efficacement la panoplie du système de drone.

### 3.3 Avancées logicielles

On a vu dans les sections précédentes que la conception d’un système micro-drone multi-caméras adapté aux missions de RTE nous avait amené à nous poser de nombreuses problématiques et à relever un certain nombre de défis technologiques dans les domaines de la mécanique, de l’électronique ou de la programmation des systèmes embarqués. Mais un système de drone ne serait pas complet sans l’ensemble des logiciels qui interagisse avec le système ou utilise les données brutes produites et c’est pourquoi nous allons voir ici plusieurs de ces éléments que nous avons développés durant la thèse et qui contribuent à l’efficacité opérationnelle du système.

#### 3.3.1 Station sol

Le développement de la station sol a été décrit en détail par [Monat \[2008\]](#) et nous n’en présenterons ici qu’une petite partie.

La station sol est un élément incontournable des systèmes de drones [[Everaerts, 2008](#); [Eisenbeiss, 2004](#)]. On peut voir sur la figure 3.30 p. 130 deux exemples de stations sol commerciales : la station sol de chez Microdrones GmbH (a) est composée d’un simple ordinateur portable relié au système de communication sans fil tandis que la solution de chez Draganfly Inc. (b) réunit en un seul système la station sol et la télécommande, ce qui permet de limiter le nombre de personnes nécessaires à l’exécution de la mission.

La station sol a pour rôle de gérer le flux de donnée continu entre le drone et les opérateurs au sol. Afin d’assurer une sécurité maximale il est essentiel que ceux-ci soit avertis



**FIGURE 3.30** – Deux exemples de station sol. — (a) Station sol du quadri-rotors de Microdrones GmbH : Un ordinateur portable relié au système de communication sans fil. — (b) Draganfly Inc. a fait le pari d’intégrer la station sol et la télécommande en un seul système pour limiter le nombre de personnes nécessaires à l’exécution de la mission.

de la moindre avarie des systèmes de l’appareil pour pouvoir réagir, en provoquant un crash contrôlé dans le pire des cas. La station sol permet aussi à l’opérateur chargé de l’acquisition de visualiser la zone survolée et de provoquer à la demande la prise de vue, la mise sous tension et hors tension des appareils — lors du décollage ou de l’atterrissage — ou le début d’une séquence d’acquisition.

Dans notre cas, nous avons développé trois aspect principaux de la station sol. Le premier concerne la vérification au démarrage, puis durant toute la durée du vol, des paramètres d’état de l’appareil. À la moindre perte de donnée, ou affaiblissement du signal de la liaison ou seuil critique de la batterie, la station au sol prévient le pilote et l’opérateur station par un signal sonore distinctif. Cela permet de prévenir les erreurs et de diminuer le risque



**FIGURE 3.31** – Phase de vérification du protocole de mise en route, grâce à la station sol.

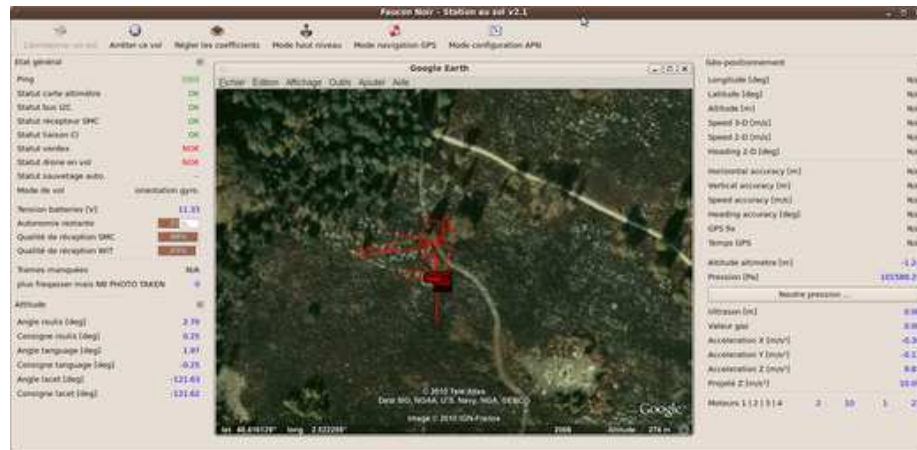


FIGURE 3.32 – Interface graphique de la station sol.

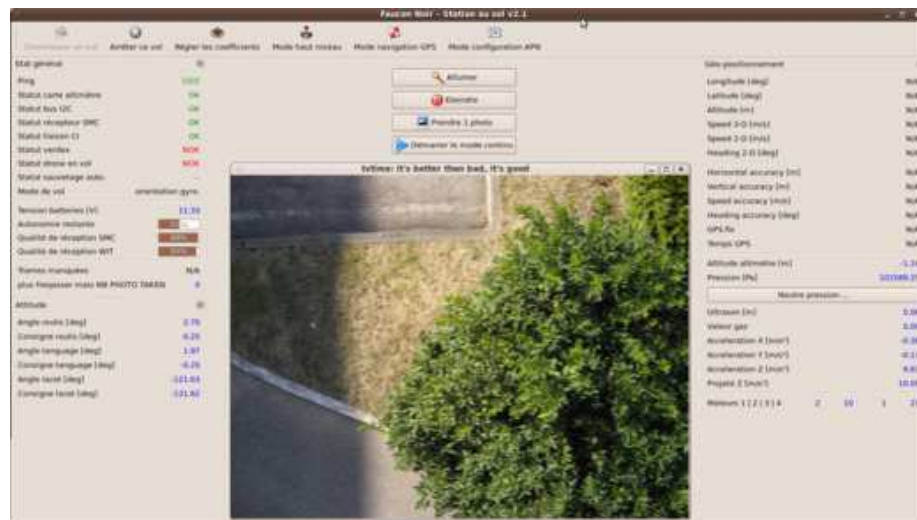


FIGURE 3.33 – Contrôle de la charge utile depuis la station sol.



d'accidents. La majeure partie des accidents survenus durant le développement du système provenant d'erreurs humaines, nous avons donc instauré un protocole de mise en route semi-automatique, inspiré de ce qui se fait en aéronautique, qui demande aux opérateurs de vérifier la bonne configuration de l'appareil avant le décollage. Si l'opérateur n'a pas validé toutes les étapes et que tous les sous-systèmes n'ont pas été validés par la station sol, l'appareil n'est pas autorisé à décoller. La figure 3.31 p. 130 montre l'interface de notre station sol lors de cette phase de vérification. Les points essentiels de la liste sont :

1. Est-ce que les batteries sont fixées solidement sur le cadre ?
2. Est-ce que l'antenne de la liaison bi-directionnelle est relevée ?
3. Est-ce que le récepteur de la liaison bi-directionnelle est bien branché à la station ?
4. Est-ce que le support du capteur est bien fixé ?
5. Est-ce que la télécommande est en position sécurité et les gaz à zéro ?
6. Est-ce que le mode automatique est désactivé ?
7. Est-ce que la télécommande est bien allumée ?
8. Est-ce que le drone a été mis sous tension ?

Si ces questions peuvent sembler triviales, l'expérience montre que dans des conditions opérationnelles, les opérateurs peuvent faire preuve de précipitation, ce qui risquerait de s'avérer fatal pour le système. Pour notre part, depuis la mise en place de ce système, plus aucune erreur humaine n'est à déplorer.

D'un autre côté la station sol fournit de nombreuses informations tout au long du vol : état de fonctionnement des sous-système, qualité de la liaison, charge de la batterie, mais aussi la hauteur sol, le régime des moteurs, la position et l'attitude de l'appareil. L'ensemble de ces informations est stocké localement et double le relevé d'information stocké par l'assistant pilotage à bord de l'appareil.

La figure 3.32 p. 131 montre l'interface graphique courante de la station sol. Les colonnes de gauche et de droite de l'écran synthétisent toutes les informations essentielles de l'appareil, tandis qu'au centre la position et la trajectoire sont affichées en temps réel dans le logiciel Google Earth<sup>TM</sup>.

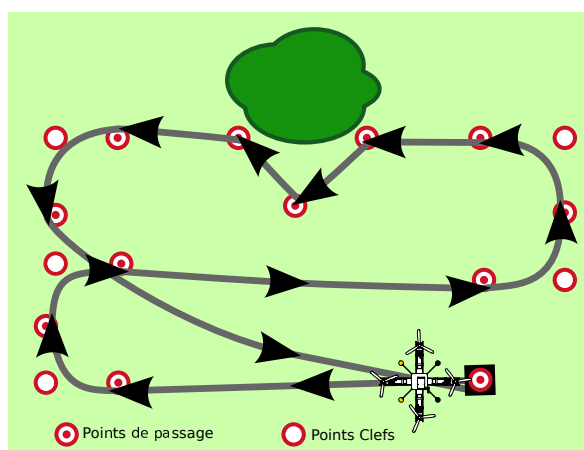
Enfin, notre station sol permet aussi d'envoyer des instructions au micro-drone : réglages des coefficients de vol, consigne de hauteur sol en mode automatique ou, comme l'illustre la figure 3.33 p. 131, les consignes à transmettre à la carte dédiée à la charge utile : mise sous tension, prise de vue unique ou continue<sup>14</sup>. Le retour vidéo en temps réel, fourni par le système de vision annexe décrit au paragraphe 3.2.6, permet d'estimer précisément la zone imagée par les appareils photographiques.


### 3.3.2 Plan de vol

Une autre fonctionnalité courante des stations sol associés aux micro-drones concerne la préparation et le suivi des vols automatisés. Nous avons dit au paragraphe 2.2 que l'avantage

---

14. La prise de vue continue, contrairement au mode rafale prend des photographies synchronisées à intervalle régulier.



**FIGURE 3.34** – Trajectoire simulée de l'appareil à partir des contraintes données par les points clefs et les points de passage. Source : Gademer 

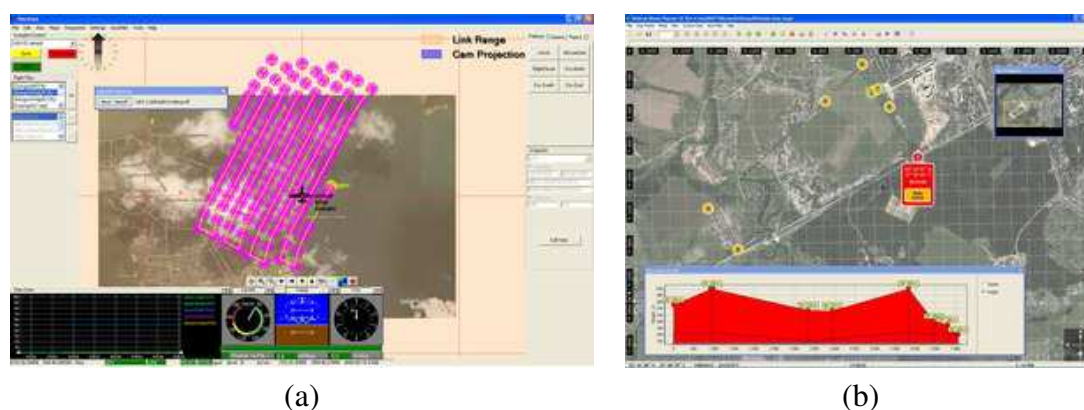
principal des drones sur les aéromodèles était la capacité à effectuer des vols de manière automatique selon un plan de vol prédéfini par les opérateurs.

Cette possibilité vient de la capacité du drone à se géolocaliser en temps réel grâce au récepteur GPS. Les coordonnées géographiques\* de l'appareil lui permettent de s'orienter dans l'espace et de rejoindre un nouveau triplet de coordonnées géographiques correspondant à l'objectif à atteindre.

Le plan de vol du drone correspond alors à une succession de coordonnées géographiques que le drone doit atteindre l'une après l'autre. La manière dont le drone cherche à atteindre ces points peut varier en fonction des objectifs défini par les opérateurs. On distingue les points de passage, que le drone doit atteindre et que l'on utilise pour spécifier les zones qui doivent être observées par l'appareil, des points clefs qui servent à orienter la trajectoire générale de l'appareil. Ces points clefs permettent de faire des virages, des demi-tours ou des figures. La figure 3.34 p. 133 illustre la manière dont les points de passage et les points clef peuvent être utilisés pour définir une trajectoire. On notera que sans les points clefs, l'opérateur ne pourrait pas avoir l'assurance que le drone commence sa ligne de vol avec la bonne orientation pour les prises de vues. D'un autre côté, les points de passage permettent de s'assurer de la trajectoire précise de l'appareil, ce qui peut être crucial lorsque l'on doit éviter un obstacle.

On notera immédiatement que les conditions réelles du vols, prenant en compte le vent et l'imprécision des capteurs rendent d'autant plus critique la différence entre les deux comportements : l'appareil maintiendra au plus proche sa trajectoire entre deux points de passage, au risque de ralentir, tandis qu'il cherchera à minimiser la dépense énergétique lors du dépassement d'un point clef. L'interface sert alors à la fois à la définition du plan de vol mais aussi au suivi continu de la trajectoire réelle de l'appareil.

L'interface graphique de la partie programmation du plan de vol est généralement sobre avec la capacité d'afficher une carte ou une image aérienne de la zone de vol sur laquelle s'ajoutent les données vectorielles liées au vol : point de passage, point clef, trajectoire pré-



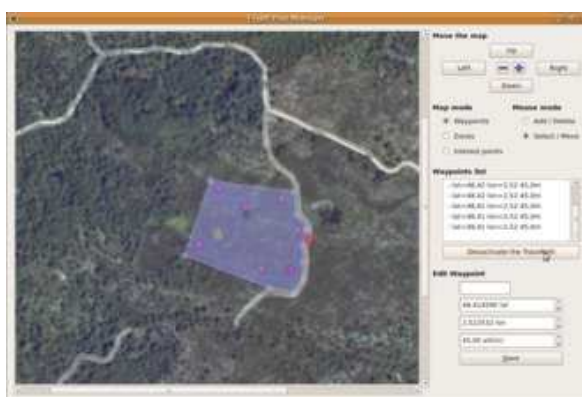
**FIGURE 3.35** – Programmation du plan de vol. — (a) Les passages successifs au-dessus de la zone sont programmés afin d'assurer un recouvrement minimal entre les photographies. Source : [gisondemand.blogspot.com](http://gisondemand.blogspot.com) — Lorsque l'information est disponible, une représentation du relief permet d'estimer l'altitude de vol, compromis le plus favorable entre la sécurité de l'appareil et l'homogénéité d'échelle des images. Source : [www.tekno1.ru](http://www.tekno1.ru)

vue, trajectoire réelle et position actuelle de l'appareil. La figure 3.35 p. 134 illustre des interfaces graphiques proposées par deux constructeurs de drones. Si certaines présentent une interface minimale (a), d'autres ajoutent des informations secondaires comme le relief ou des informations sur les risques d'obstacles sur le trajet (b). En effet, la très grande majorité des drones actuels n'ont pas de capacité de détection d'obstacle et suivent le plan de vol à la lettre, c'est donc à l'opérateur de se montrer extrêmement prudent lors de la définition du plan de vol et l'ergonomie de l'interface de définition du plan de vol est, dans ces conditions, un facteur crucial. On notera aussi que, comme entraperçu au paragraphe 2.2.3 page 47, d'un point de vue légal et de sécurité, lors des vols automatisés, un pilote doit toujours pouvoir reprendre le contrôle de l'appareil en cas d'avarie du système de pilotage.

[Avanthey et Germain \[2009\]](#) proposent une interface ergonomique pour les systèmes de micro-drone pour des missions de télédétection basse altitude, intégrant des images aériennes de la zone et si possible une information de relief ainsi que la possibilité d'ajouter de nombreuses informations vectorielles, basées sur les connaissances a priori de la zone d'étude. Ils démontrent aussi l'intérêt de prévoir les empreintes au sol\* des images — qui peuvent être vues comme la projection au sol de la surface imagée par le capteur — et donc le recouvrement attendu des images.

Lors de la phase de vol, ce même système de calcul des empreintes au sol — communiquant avec la carte dédié au capteur pour savoir si l'acquisition a bien eu lieu ou non — permet de s'assurer de l'adéquation entre la prévision de couverture et la couverture réelle probable — qui peut subir un retard temporaire du capteur ou simplement l'influence du vent — permettant, sans avoir visionnées les données, de reprogrammer un passage sur la zone présentant un « trou » et ainsi de gagner énormément de temps.

Une autre fonctionnalité proposée par [Avanthey et Germain \[2009\]](#) concerne l'optimisation automatique du plan de vol selon des critères topologiques : taux de recouvrement des images, plus court chemin, chemin le moins coûteux d'un point de vue autonomie ou assurant



**FIGURE 3.36** – *Préparateur de mission. Proposant classiquement une image aérienne pour visualiser la zone d'étude, ce préparateur de mission se distingue par la capacité à rajouter de nombreuses informations vectorielles et par une optimisation automatique de la trajectoire de vol selon des critères extérieurs ; ici le plus court chemin. Source : ©ATIS/Avanthey et Germain [2009]*

la plus grande résistance aux aléas liés aux vents. Si leurs travaux, illustrés à la figure 3.36 p. 135, sont encore au stade de développement, les idées originales qu'ils proposent devraient améliorer significativement les conditions opérationnelles des vols.

### 3.3.3 Projection des empreintes au sol des images

On a vu au paragraphe précédent que la capacité à calculer les empreintes au sol des images acquises durant le vol à partir des données de trajectographie et d'orientation des capteurs était un avantage significatif pour estimer la couverture réelle des données acquises. Nous verrons par la suite que ce calcul permet aussi d'estimer les relations topologiques entre les images, permettant ainsi de localiser rapidement des images d'intérêt particulier dans un grand jeu de données.

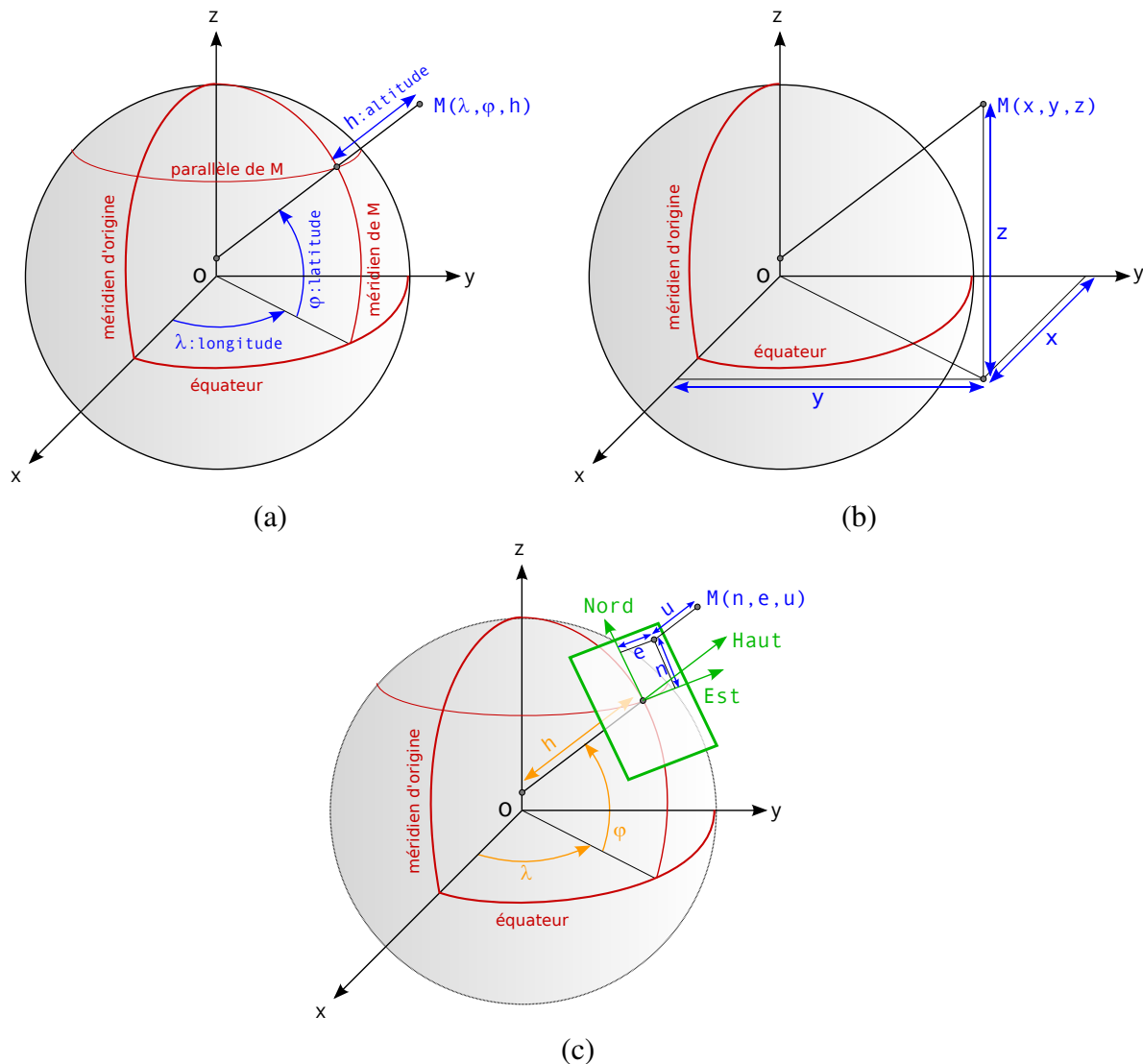
Explicitons la méthode et les facteurs qui contraignent ce calcul. Nous avons vu au chapitre 2, paragraphe 2.3.4.2 p. 66 que le géoréférencement direct cherchait à estimer la géométrie d'acquisition des images sans utiliser les données images elles-mêmes, c'est-à-dire sans utiliser les points d'appui\* au sol<sup>15</sup> ni les points d'appariement<sup>16</sup> entre les images.


Nous allons donc utiliser uniquement les informations des capteurs et les connaissances a priori sur les paramètres intrinsèques de l'appareil photographique pour calculer l'empreinte au sol des images.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3.4.2, le récepteur GPS donne la position de l'appareil sous la forme de coordonnées géographiques : longitude, latitude, altitude. Ce format permet de comparer facilement la position du drone avec sa position théorique sur le

15. Points identifiables dans l'image et dont on connaît précisément la position dans le monde réel. Ces points permettent le géoréférencement précis des images.

16. Points identifiables dans plusieurs images et qui correspondent au même objet dans le monde réel. Les points d'appariement permettent, par des méthodes d'optimisation de retrouver la géométrie relative des images entre elles.



**FIGURE 3.37** – Changement de référentiel. (a) Le repère géographique Longitude, Latitude, Altitude est utilisé pour la représentation sur les cartes et par le récepteur GPS. C'est un repère qui ne peut être utilisé facilement pour les projections. — (b) Le repère géocentrique cartésien passe par le plan de l'équateur, le méridien de Greenwich et le pôle nord. S'il possède les propriétés mathématiques nécessaires pour permettre la projection, la surface du sol n'est décrite par aucune équation simple dans ce repère. — (c) Le repère East-North-Up (ENU) ou plan local tangent est aussi un repère cartésien mais dont l'origine est définie par l'utilisateur. Il redéfinit la surface du sol comme étant le plan tangent à la surface de la sphère terrestre au niveau de l'origine, et coïncidant avec celui formé par les axes Nord et Est. Puisqu'il inclut la notion de sol et celle de Haut et de Bas, ce repère est idéal pour réaliser les projections et établir les relations topologiques entre les images. Source : Gademer 

plan de vol ou de visualiser sa trajectoire sur une carte, dans un Système d'Information Géographique (SIG)\* ou dans Google Earth<sup>TM</sup>. Cependant le référentiel cartographique, illustré à la figure 3.37 (a) p. 136, est un repère qui ne peut être utilisé facilement pour les projections car les équations de droite dans ce référentiel sont complexes.

En revanche, le repère géocentrique cartésien, illustré sur la figure 3.37 (b) qui passe par le plan de l'équateur, le méridien de Greenwich et le pôle nord est un repère cartésien, et il est justement utilisé pour effectuer les calculs de trilatération du système Global Positioning System (GPS)\*, malheureusement la surface du sol n'est décrite par aucune équation simple dans ce repère et ce n'est donc pas un choix pertinent pour la projection des images.

On notera que l'altitude est donnée comme la hauteur au dessus du niveau moyen des mers, autrement dit par rapport à l'équipotential de gravité que l'on nomme géoïde\*. Le géoïde est une forme complexe déterminé par la répartition des masses à la surface du globe et ne peut être décrit par une formule mathématique simple. Pour avoir la hauteur du point au dessus de l'ellipsoïde\*<sup>17</sup>, seule coordonnée qui puisse nous permettre d'effectuer un changement de repère vers le repère géocentrique cartésien, on doit ajouter la hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde aux coordonnées du point. Heureusement, le récepteur GPS fournit cette donnée en même temps que l'altitude.

Walchko et Mason [2002] présentent un troisième référentiel qui possède de nombreux avantages, le référentiel East-North-Up (ENU) ou plan local tangent et que l'on peut voir sur figure 3.37 (c). C'est un repère cartésien mais dont l'origine est défini par l'utilisateur. Ce référentiel définit la surface du sol comme étant le plan tangent à la surface de la sphère terrestre au niveau de l'origine, et fait coïncider le plan du sol avec celui formé par les axes Nord et Est. L'axe Haut est donné par la direction orthogonale au plan. On trouve des variantes de ce référentiel, comme les référentiels Nord-Ouest-Haut ou Nord-Est-Bas, basés sur les mêmes axes mais dont le signe est inversé. En incluant de manière intuitive la notion de sol et celle de verticalité, ce repère est idéal pour réaliser les projections et établir les relations topologiques entre les images. On notera cependant que l'approximation de la rotondité de la terre à un plan est évidemment fautive dès que l'on s'éloigne trop du point d'origine mais reste satisfaisant dans le cadre de missions de télédétection basse altitude qui restent près du sol et couvrent de petites surfaces.

Des formules de passage d'un référentiel à l'autre [Duquenne, 2005; Institut Géographique National, 1995; Portland State Aerospace Society, 2007], permettent de convertir les coordonnées des points dans un sens puis dans l'autre, ce qui nous autorise à faire les calculs dans le plan local tangent et à afficher les coordonnées géographiques de l'empreinte calculée sur la carte ou dans Google Earth<sup>TM</sup>.

Une fois dans le référentiel cartésien du plan local tangent on utilise les informations fournies par la centrale inertielle sur l'orientation de l'appareil que l'on combine à notre connaissance a priori de la géométrie relative des appareils photographiques par rapport au drone — fixées par l'orientation des servo-moteurs et les dimensions de la structure — et aux paramètres intrinsèques des appareils photographiques — focale, taille du capteur CCD — pour obtenir la direction des rayons optiques partant des quatre coins du capteur CCD.

---

17. L'ellipsoïde de référence des récepteur GPS est généralement l'ellipsoïde WGS84.

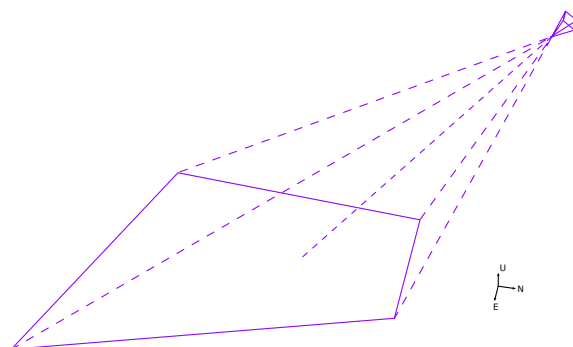


FIGURE 3.38 – Projection de l’empreinte au sol. Source : Gademer 

Si l’appareil regarde vers le sol<sup>18</sup>, ces quatre rayons doivent couper la surface du sol en quatre points qui correspondent aux quatre sommets du polygone de l’empreinte au sol, comme l’illustre la figure 3.38 p. 138.

La problématique de l’intersection à la surface au sol est complexe, car l’information de relief n’est pas fournie par les données de trajectographies. S’il semble évident que le dénivelé local influencera la forme de l’empreinte au sol et la zone réellement vue sur l’image, c’est une information difficile à obtenir et c’est généralement l’un des paramètres de surface géophysique que l’on cherche à retrouver.

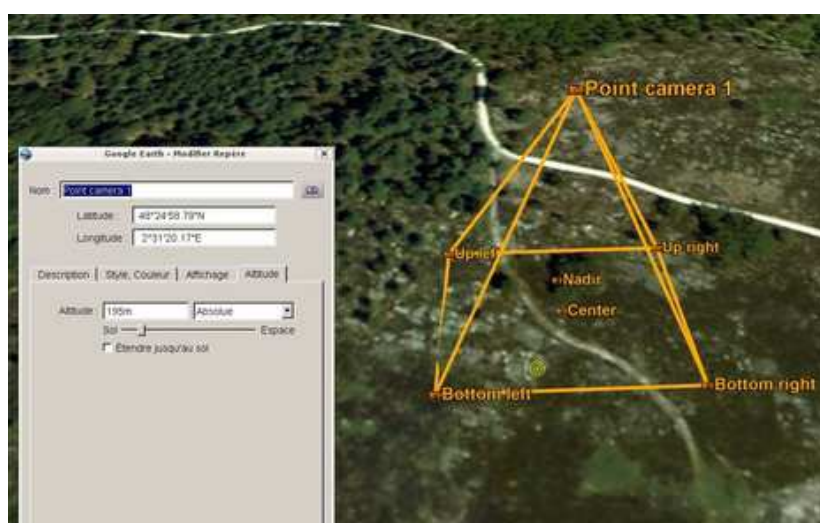
Pour des images prises à la verticale, l’information de hauteur sol donnée par le porteur pourrait servir d’approximation valable si la surface couverte par l’image n’est pas trop grande. Malheureusement nous avons vu au paragraphe 2.3.4.2 que les capteurs permettant de donner une hauteur sol précise, comme les télémètres\* ultrason ne fonctionnaient que lors de la phase de décollage ou d’atterrissage. Au moment de l’acquisition, on ne possède que l’information provenant de l’altimètre barométrique\*, soit l’altitude relative par rapport à l’altitude au décollage et qui ne tient pas compte du relief\* et ne peut donc pas être utilisée pour effectuer la projection. C’est pour cette raison que nous avons préféré faire l’approximation d’un sol uniformément plan à l’altitude du point d’origine, en attendant l’utilisation d’un Modèle Numérique de Terrain (MNT)\* construit a priori ou d’un télémètre laser dont la portée correspondrait à la hauteur de vol.

L’empreinte au sol obtenue, illustré sur la figure 3.39 p. 139, n’est donc qu’une approximation mais elle suffit cependant pour des calculs temps réel de couverture ou pour la recherche topologique dans les données qui nécessite quoi qu’il arrive un plan de projection unique des empreintes au sol pour établir ses relations.

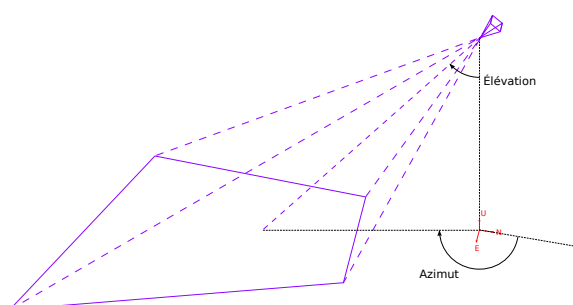
### 3.3.4 Recherche topologique dans une base d’images

La souplesse opérationnelle permise par la télédétection basse altitude, mais aussi les contraintes d’endurance des micro-drones ont pour conséquence une multiplication des vols

18. Si la direction de prise de vue montre que appareils regardent le ciel ou l’horizon, c’est à dire un angle de visée supérieur à + ou - 60° par rapport à la verticale, le calcul n’est pas effectué.



**FIGURE 3.39** – Empreinte au sol d'une image, calculée à partir des données de trajectographie et affichée dans Google Earth™.



**FIGURE 3.40** – On identifie deux caractéristiques des images par rapport à leur géométrie d'acquisition : l'azimut et l'élévation. Source : Gademer 

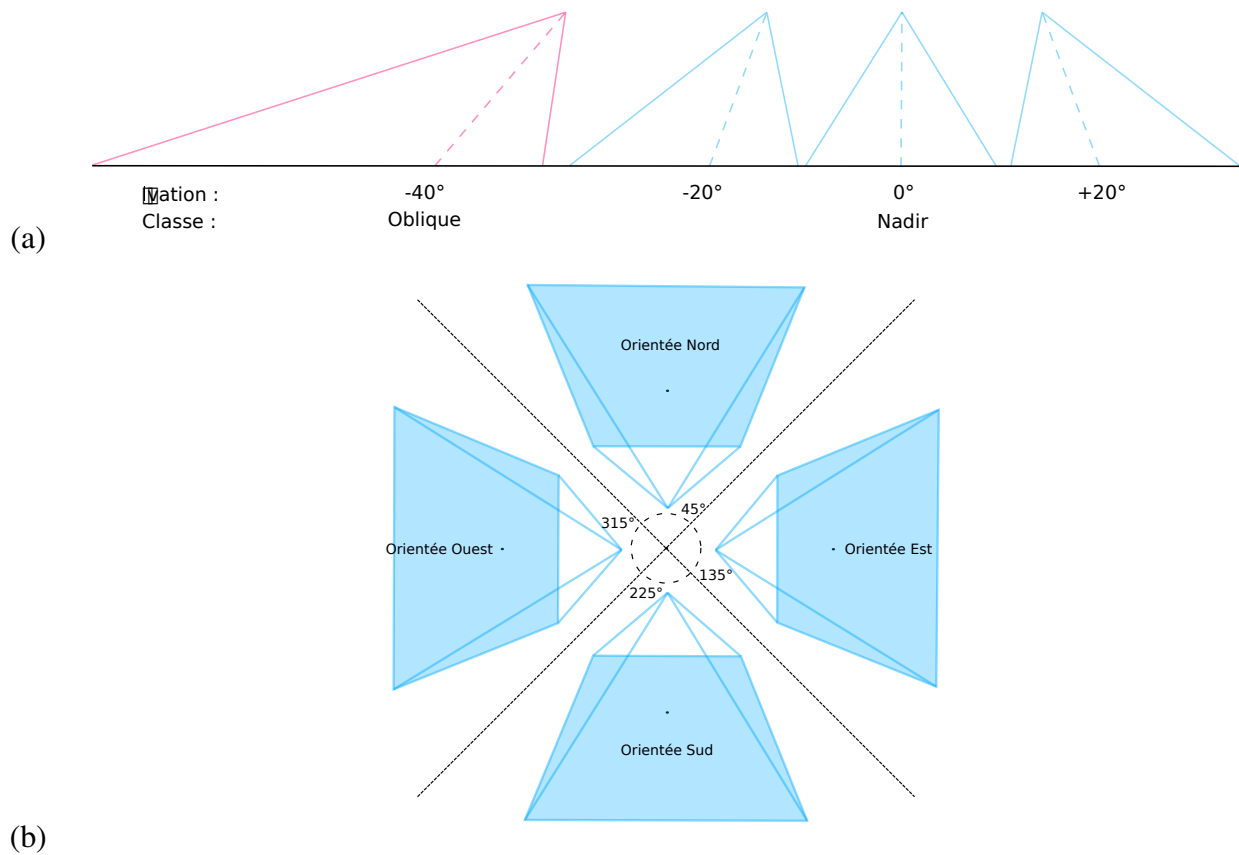
de l'appareil. Par ailleurs, l'influence des conditions de vent sur la trajectoire peut provoquer des « trous » dans la couverture des données, ce qui doit être détecté le plus tôt possible.

Nous avons donc réfléchi à la définition d'un outil permettant aux opérateurs de vérifier la qualité de la couverture de données et de pouvoir choisir rapidement de visualiser certaines images piochées parmi l'ensemble des images acquises au vol précédent. Il nous fallait donc développer un outil permettant la constitution rapide d'une base de données d'images et des relations topologiques qui les relient à partir des données de trajectographie et des métadonnées des images.

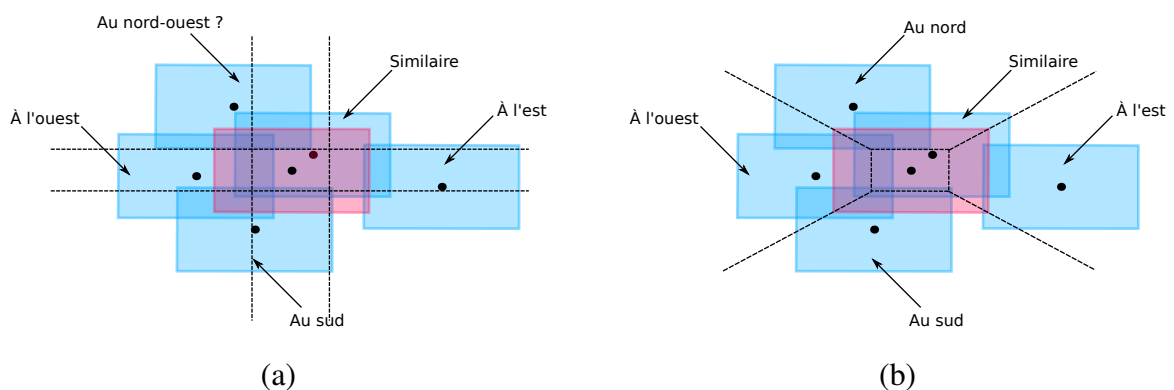
Par relations topologiques, nous entendons la position relative de ces images entre elles : les images couvrant la même zone, ou situées au nord ou sud d'une image. Selon nous, ces liens topologiques devraient permettre aux opérateurs de retrouver rapidement les images concernant un sujet d'intérêt afin de vérifier la qualité de cette acquisition.

Concernant les images obliques, l'orientation — appelé ici azimut — et l'inclinaison — appelée aussi élévation — de la prise de vue, qui sont illustrées à la figure 3.40 p. 139

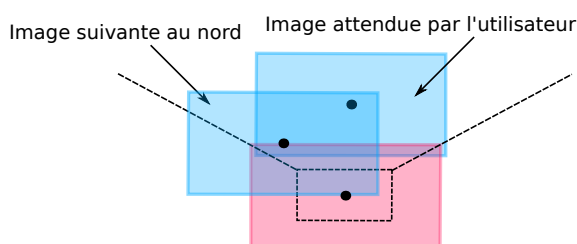





**FIGURE 3.41** – Différentes classes d'images. — (a) Distinction selon l'élévation entre la classe Nadir et les classes Obliques. — (b) Distinction selon l'azimut entre les classes Obliques. Source : Gademer



**FIGURE 3.42** – Liens topologiques entre les images. — (a) Un découpage orthogonal nécessite neuf liens topologiques pour qu'on soit sûr de ne jamais oublier d'images. — (b) Un découpage en cinq secteurs, correspond moins strictement aux concepts associés mais simplifie la gestion des liens et améliore l'ergonomie lors de la recherche. Source : Gademer



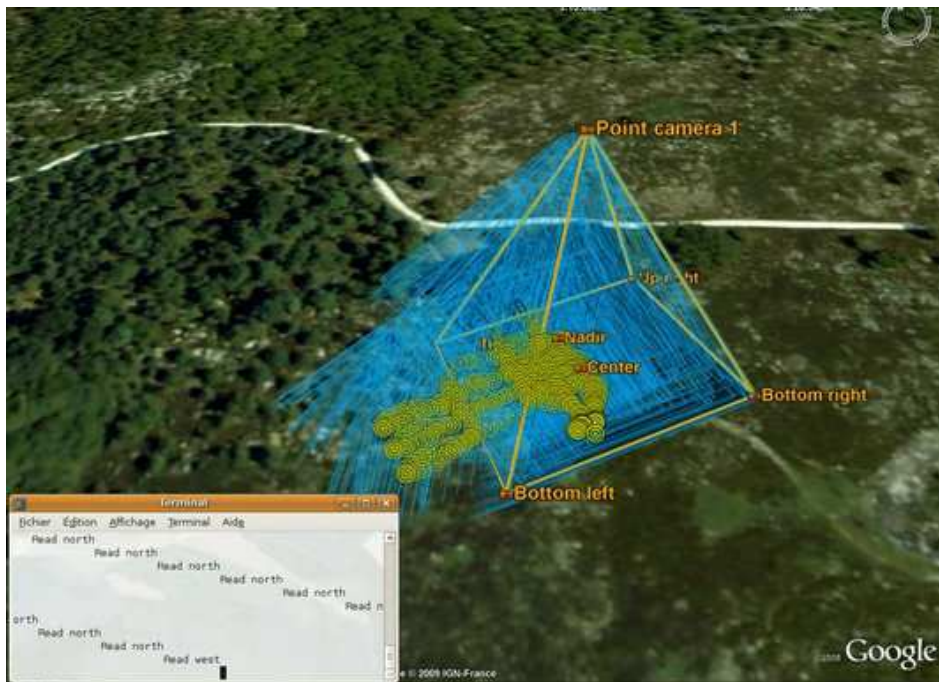
**FIGURE 3.43** – Exemple de confusion liée au choix de la topologie. L'utilisateur s'attend à ce que l'image radicalement au nord soit choisie, mais l'image au nord-ouest est la plus proche. Source : Gademerd 

doivent être prises en compte. Afin de simplifier la navigation nous avons créé cinq classes d'images, illustrées à la figure 3.41 p. 140, et basées sur les deux caractéristiques d'orientation des images. La classe Nadir est la classe principale qui regroupe toutes les images dont l'élévation est inférieure à  $20^\circ$  et qui correspond à toutes les images communément prise à la verticale (a). Puis nous avons quatre classes qui regroupent les photographies obliques suivant leur azimut : les images orientées vers l'est dont l'azimut est compris entre  $45^\circ$  et  $135^\circ$ , celles orientées au sud dont l'azimut est entre  $135^\circ$  et  $225^\circ$ , celles orientées vers l'ouest dont l'azimut est entre  $225^\circ$  et  $315^\circ$  et celles au nord, dont l'azimut est compris entre  $315^\circ$  et  $45^\circ$  (b).

Les recherches s'effectuent au sein d'une même classe homogène mais nous avons instauré des commandes rapides permettant de passer de la classe Nadir aux classes Obliques ou de « tourner » entre les classes Obliques selon le sens horaire ou anti-horaire, ce qui permet de voir une même scène sous des points de vue différents si les images le permettent. Au sein d'une même classe les liens topologiques entre les images sont basés sur les positions relatives des centres d'images. Comme l'illustre la figure 3.42 p. 140, nous avons deux ensembles possibles de liens topologiques ; le premier (a) est basé sur un découpage en grille, définissant neuf secteurs : le centre, les quatre directions cardinales et les quatre composées : NO, NE, SO, SE. S'il a l'avantage d'être parfaitement intuitif pour les utilisateurs, il nécessite de développer neuf directions possibles de recherche, ce qui n'est, de notre point de vue, pas très ergonomique car nécessitant neuf touches différentes ou neuf boutons pour l'interface. Néanmoins, supprimer simplement les composées n'était pas envisageable car certaines images n'ayant que des voisins en diagonale seraient devenues inaccessibles. Nous proposons un compromis en définissant cinq secteurs, comme le montre la figure 3.42 (b), qui permettent d'allier simplicité et exhaustivité. En contrepartie, certains choix du logiciel paraissent parfois un peu moins logique à l'utilisateur lorsque les images sont placées en quinconce, ce qui est illustré à la figure 3.43 p. 141.

Néanmoins les premiers résultats obtenus avec notre logiciel semblent prometteurs : basé sur une base de données XML<sup>19</sup>, notre programme récupère les données stockées par l'assistant pilotage sur la carte microSD qui comportent les données de trajectographie ainsi que la date de prise de vue de toutes les images de chaque appareil photographiques. À partir de ces

19. Les bases de données XML sont des bases de données spécialisées dans la gestion des fichiers XML et la recherche d'information au sein de ces fichiers.



**FIGURE 3.44** – Navigation dans les données. Les empreintes au sol de toutes les images apparaissent en bleu dans le logiciel Google Earth™, en orange, l'image actuellement sélectionnée.

informations, il génère des métadonnées qui sont intégrées au système de base de données XML. Le logiciel génère ensuite à la demande des fichiers KML qui sont mis à jour en temps réel dans l'interface du logiciel Google Earth™ permettant ainsi la visualisation de toutes les empreintes au sol et la sélection de l'empreinte désirée. Une fois l'empreinte choisie, le logiciel charge automatiquement l'image et l'affiche au sein du logiciel Google Earth™ : à la demande, l'opérateur peut avoir accès à l'image en pleine résolution. La vitesse des requêtes est accélérée en chargeant en arrière plan les cinq voisins de l'image, avant la demande de l'utilisateur.

Comme nous l'avons précisé précédemment, ce positionnement est approximatif mais nous permet cependant une visualisation des données moins de cinq minutes après l'atterrissage, ce qui est un avantage opérationnel significatif.

Le résultat final peut être vu à la figure 3.44 p. 142.

## 3.4 Bilan des travaux

### 3.4.1 Sorties terrain

Au cours des quatre années de développement du système, c'est la confrontation à la mise en œuvre opérationnelle qui nous a permis de cerner les difficultés des utilisateurs sur le terrain et d'améliorer sans cesse l'ergonomie de notre système. Avec des vols réguliers, comme ceux illustrés à la figure 3.45 p. 143 le système a pu accumuler un peu moins d'une



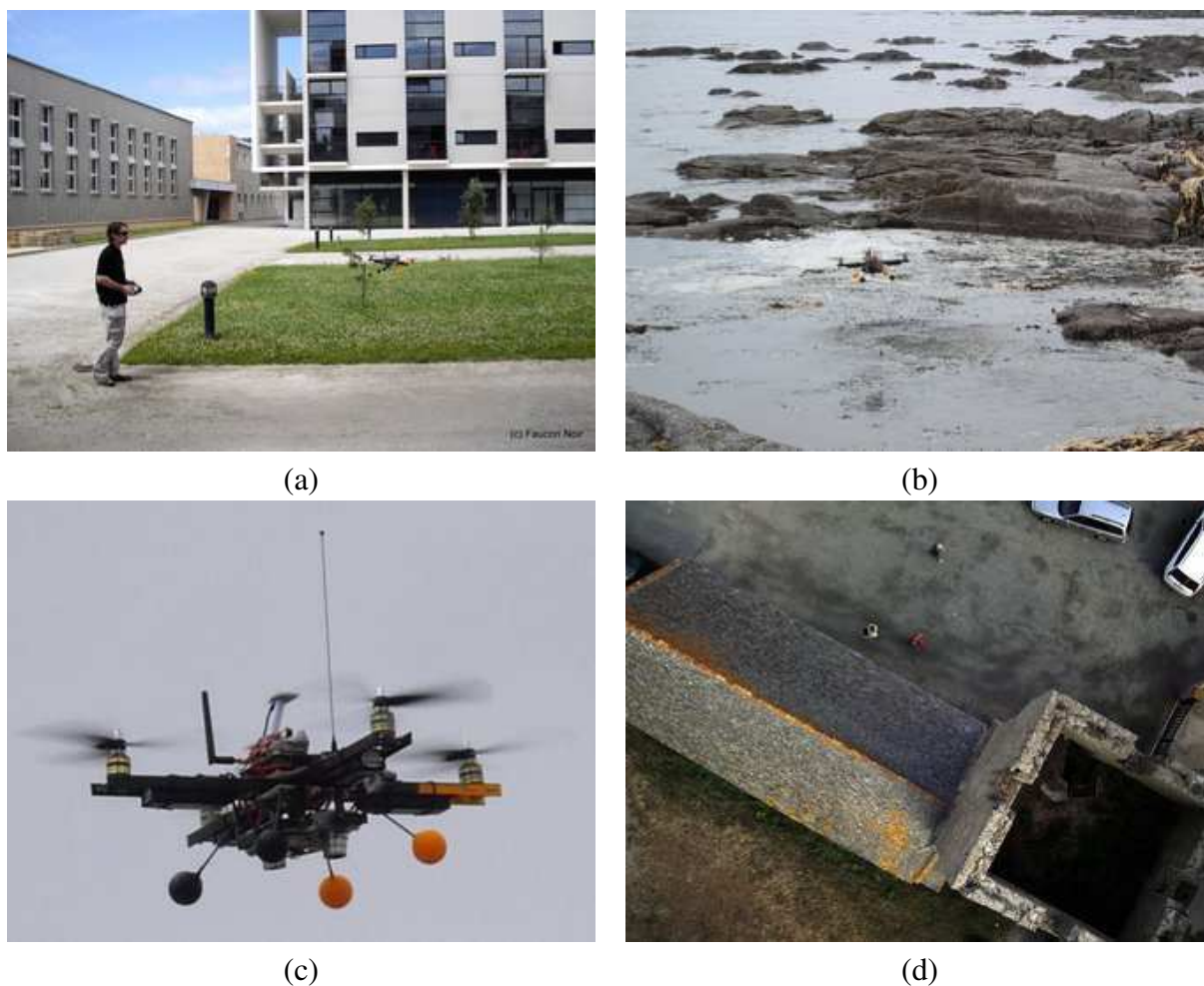
**FIGURE 3.45** – Vol de test dans la cour de l’ESIEA. — (a) Retour vidéo en temps réel — (b) Image acquise par l’un des appareils photographiques. Source : ©ATIS

centaine d’heure de vol, mais c’est lors des missions terrains que nous avons pu réellement prendre la mesure de ses capacités.

Notre première mission terrain a eu lieu en 2008 en Bretagne. Financée par l’École Doctorale Mathématique et STIC, elle devait permettre de tester notre appareil, fraîchement conçu, dans des conditions réelles d’utilisation. La figure 3.46 p. 144 illustre quelques uns des événements marquant de cette mission ; après une démonstration au sein de l’école Navale de Brest devant des futurs officiers de la Marine (a), nous sommes allés au phare d’Eckmühl, à la pointe du Finistère sud pour notre premier vol en extérieur (b). Ce fut aussi l’occasion de tester un premier système d’acquisition photographique (c) et nous avons pu photographier le fort abandonné au pied du phare (d), ce qui nous a conforté dans l’intérêt de notre système pour des applications de cartographie. C’est avec cette première sortie terrain que nous avons pris conscience de l’importance des capacités opérationnelles de notre système.

À partir de 2009, nous avons fait plusieurs déplacements sur le terrain, comme l’illustre la figure 3.47 p. 145, qui nous ont permis de tester l’ensemble du système de drone en situations réelles. Alors que nous approchions de la finale du Challenge Minidrones, le porteur (a) et le système multi-caméras (b) atteignaient leurs versions finales. La station sol (c) s’était enrichie de toutes les fonctionnalités de contrôle et de retour vidéo permettant l’exécution d’objectifs de cartographie. Avec plus d’espace disponible (d), nous pouvions tester les problématiques de capacité de vol de l’appareil en toute sécurité et nous permettre l’acquisition d’images (e) et de vidéos (f) à une hauteur sol de plusieurs dizaines de mètres.

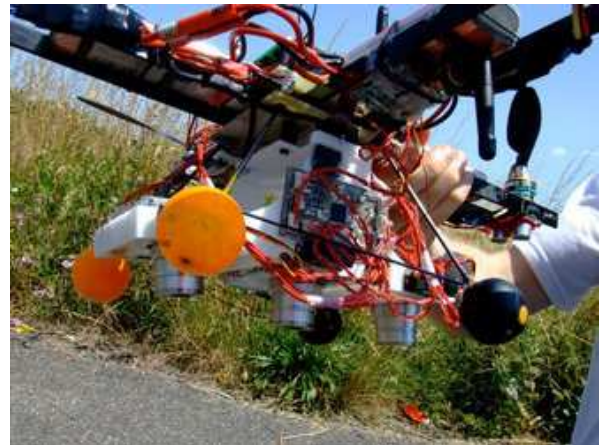
Il faut ajouter aux vols de test les vols de présentation dont l’objectif était pédagogique, comme lors des journées portes ouvertes de l’ESIEA, illustrés à la figure 3.48 p. 146, dont l’objectif est de sensibiliser les nouvelles générations d’étudiants aux problématiques et enjeux des robots d’exploration ou pendant le salon Eurosatory, comme on peut le voir sur la figure 3.49 p. 146, en juin 2010, lors de la conférence UAS sur les micro-drones pour illustrer de manière concrète les discussions abordées dans des présentations orales[Gademer *et al.*, 2010d].



**FIGURE 3.46** – *Sortie terrain en Bretagne en Juillet 2008. — (a) Démonstration à l'École Navale de Brest — (b) Vol test au phare d'Eckmühl — (c) Premières tentatives de prises de vues aériennes et de géolocalisation — (d) Premier cliché à basse altitude. On voit l'intérêt de l'outil pour l'inspection de bâtiments. Source : ©ATIS*



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**FIGURE 3.47** – *Sortie terrain à Vitry-sur-seine en Juin 2009. — (a) Le micro-drone est dans sa structure finale — (b) et le système tri-caméras est prêt pour son premier test — (c) La station sol est en place avec un retour vidéo en temps réel et un contrôle de la charge utile — (d) L'espace disponible nous permet de tester les capacités de vol de l'appareil en toute sécurité — (e) Photographie prise lors du vol de test — (f) Enregistrement interne du caméscope HD. Source : ©ATIS*



(a)



(b)

**FIGURE 3.48** – Démonstrations publiques. — (a) Lors des journées portes ouvertes de l'ESIEA en 2009 — (b) Lors de la visite de Nathalie Kosciusko-Morizet, Secrétaire d'État chargée de la Prospective et du Développement de l'économie numérique, à l'ESIEA Laval Source : ©ESIEA



(a)



(b)

**FIGURE 3.49** – Démonstration lors du salon Eurosatory 2010 (a) Explication devant les participants du colloque UAS sur les drones — (b) Démonstration de stabilité, le pilote (à gauche) lâche la télécommande et perturbe l'assiette de l'appareil. Source : ©ATIS Crédit photographique pour (a) A.H. van Blijenburgh



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**FIGURE 3.50** – (a&b) Présentation du micro-drone durant la conférence Defcon 17 en août 2009 à Las Vegas — (c) Vol de test devant l’hôtel Riviera — (d) Démonstration en public, vue depuis l’Optio A40 enregistrant une vidéo depuis l’appareil. — (e) Sortie terrain à Red rock canyon — (f) Vidéo interne avec un Panasonic Lumix TZ5. Source : ©ATIS Crédit photographique pour (e) Matthew Stits.



Enfin notre première sortie terrain à l'étranger, illustrée à la figure 3.50 p. 147, s'est déroulée aux États-Unis où nous étions invités à parler lors de la conférence internationale de sécurité Defcon 17 qui a eu lieu en août 2009 à Las Vegas. Si nous avons dès 2008 publié des articles au sujet de notre système dans différentes conférences internationales [Gademer *et al.*, 2009a,b, 2008; Gademer et Chéron, 2009; Petitpas *et al.*, 2010a; Gademer *et al.*, 2010b,c; Avanthey *et al.*, 2010; Gademer *et al.*, 2010d; Beaudoin et Gademer, 2010; Beaudoin *et al.*, 2007; Petitpas *et al.*, 2010a; Gademer *et al.*, 2010a], cette conférence fut l'occasion de la première sortie du territoire de notre système, ce qui demanda la plus grande précaution administrative et la constitution d'un dossier ATA auprès de la CCIP. Cette conférence fut l'occasion de nous confronter à des spécialistes de l'électronique (a&b) mais aussi de faire plusieurs tests (c) et démonstration (d) des capacités de vol de notre appareil. Nous avons conclu notre voyage par une sortie terrain au Red rock canyon (e), dans les environs de la ville où nous avons tester un autre type d'appareil photographique (f) pour y comparer les résultats avec ceux obtenus lors de la mission de Fontainebleau, présentée au chapitre 4.

### 3.4.2 Avancement

La conception et réalisation complète d'un système de drone intégrant le porteur, sa charge utile et sa station sol s'est révélé, comme nous nous y attendions, un travail immense. Et c'est pourquoi, alors que se termine cette thèse, de nombreux sous-systèmes nécessitent encore des améliorations. Bien que notre porteur soit totalement fonctionnel et remplisse son cahier des charges en terme de stabilité, de capacité d'emport et d'intégration de tous les capteurs nécessaires à la géolocalisation des images, nous n'avons pas eu le temps de mettre en place l'ensemble les protocoles d'asservissement en hauteur et en position qui permettrait son vol automatique à partir d'un plan de vol et augmenterait sa simplicité d'utilisation. Ce n'est cependant pas un verrou technologique puisque ce type de service est offert dans les systèmes commerciaux qui sont apparus depuis le début de cette thèse, seul un investissement en temps et en argent nous séparent aujourd'hui de ces fonctionnalités.

Concernant le système multi-caméras, les objectifs sont atteints avec un système tri-caméras orientable basé sur des appareils photographiques du commerce et donc à relativement bas coût. La synchronisation et le contrôle des appareils photographiques est réussie et seuls quelques ajustement au niveau du géoréférencement direct nous sépare d'un système optimal. On notera que la piste des appareils photographiques modifiés pour percevoir l'infrarouge proche, si elle n'a pas été réalisée sur nos appareils photographiques, a été validée avec succès sur des webcams et devrait faire l'objet d'un test très bientôt.

Enfin, notre station sol nous permet d'avoir un contrôle complet sur le système, intégrant sécurité et souplesse opérationnelle avec une visualisation temps réelle de la trajectoire et de la vision embarquée. De nombreux sous-systèmes ont été développés, concernant le plan de vol ou la navigation dans les données par exemple, et n'attendent que la finalisation de la partie électronique de la géolocalisation et de l'asservissement pour être mis en place de manière opérationnelle.

En conclusion, bien que certaines caractéristiques restent à améliorer, nous avons dès aujourd'hui un système de télédétection basse altitude fonctionnel, capable de réaliser des

missions terrains et prêt à valider son intérêt pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques dans le cadre de la Réalité Terrain Étendue (RTE).





# Chapitre 4

## Mise en œuvre du système et premiers résultats

### 4.1 Mission terrain

Nous avons vu au paragraphe 3.4.1 p. 142 que les sorties terrains étaient l'occasion de confronter notre système aux conditions opérationnelles qu'impose la réalisation de missions de cartographies.

Ce chapitre fait part du retour d'expérience avec notre système micro-drone\* multi-caméras\* lors de la mission terrain effectuée en Juillet 2009 en partenariat avec l'équipe Écologie et Gestion de la biodiversité du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)\*-CNRS pour valider la plus-value que celui-ci pourrait apporter pour la cartographie de la végétation.

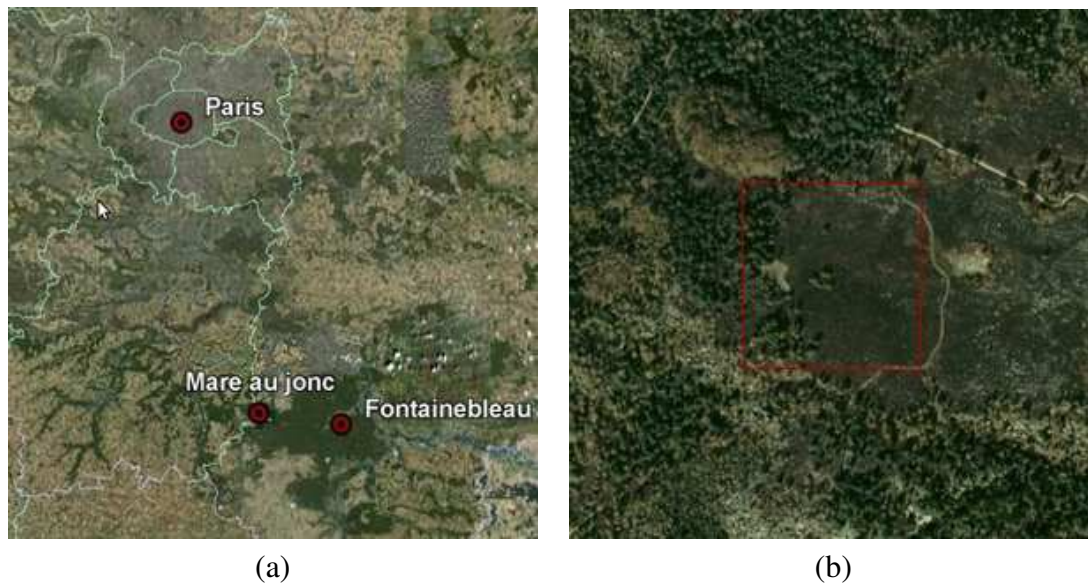
#### 4.1.1 Présentation de la zone d'étude

L'équipe Écologie et Gestion de la Biodiversité du MNHN-CNRS étudie un certain nombre de zones d'intérêt biologique pour tenter de comprendre les phénomènes de dynamiques végétales à l'échelle des populations. Dans le cadre de ces travaux, elle a cherché une zone d'étude pouvant rassembler diverses communautés de biologistes — botanistes, entomologistes, ornithologues — autour d'un même site afin de permettre des recherches parallèles sur le long terme.

Le site dit de la « Mare au Joncs » est situé au sein de la Zone d'Intérêt Communautaire de la forêt de Fontainebleau, appartenant au réseau [Natura 2000](#) et géré par l'Office National des Forêts (ONF)\* (voir la figure 4.1 (a) p. 152). Ce site a été retenu pour sa situation géographique qui le place à la frontière entre les zones phytogéographiques\* de la forêt et de la lande, comme on peut le voir sur la figure 4.1 (b) p. 152. En outre, l'équipe disposait d'informations antérieures sur cette zone : des photographies aériennes datant des cinquante dernières années et une carte de la zone, réalisée en 2000<sup>1</sup> par des membres de l'ONF.

---

1. La carte complète est visible à la figure 1.4 p. 14.



**FIGURE 4.1** – *Emplacement de la zone d'étude.* — (a) La « Mare au joncs » est située au sein de la Zone d'Intérêt Communautaire de Fontainebleau, au sud de Paris. — (b) La zone est encadrée par la forêt à l'ouest, au nord et au sud et par la lande à l'est. La mare qui a donné le nom au lieu-dit se situe juste à l'est de la zone d'étude.

Ce site témoigne d'une diversité d'espèces\* caractéristiques de la forêt de Fontainebleau ; de nombreuses espèces arbustives — bruyère des marais\*, bruyère cendrée\*, callune\* — ou herbacées\* — molinie\*, petite oseille\* — ainsi que des arbres — bouleaux, chênes, trembles — et des affleurements calcaires nus ainsi qu'une mare. La description précise des différentes espèces de plante peut être trouvée en annexe p. 225.

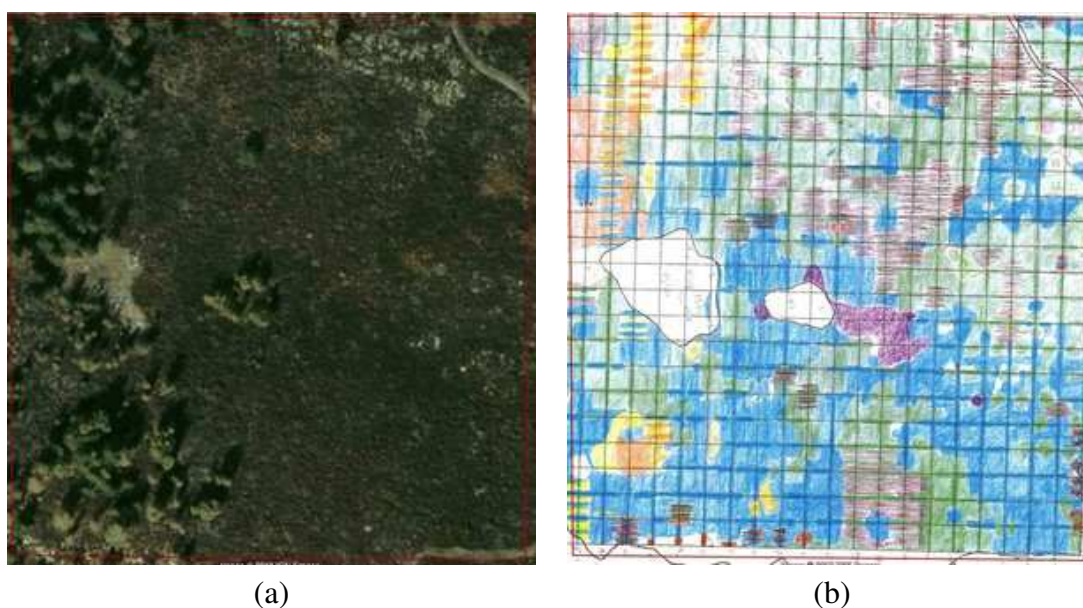
La zone, que l'on peut voir sur la figure 4.2 p. 153, mesure 200 mètres par 200 (soit 4 hectares) et présente les caractéristiques de la lande<sup>2</sup> : arbres rares et isolés et présence de nombreux arbrisseaux\*. La zone est encadrée par la forêt à l'ouest, au nord et au sud et par la lande à est. La mare qui a donné le nom au lieu-dit se situe juste à l'est de la zone d'étude.

Cette zone a été cartographiée en 2000 par l'ONF selon une grille décimétrique et répertorie l'ensemble des espèces — arbres, arbrisseaux, herbacés — selon des groupes phytogéographiques précis. On peut voir le résultat de cette cartographie sur la figure 4.2(b) p. 153.

Si les méthodes d'observation manuelles se sont améliorées, il faut néanmoins 2,5 mois/hommes pour faire le relevé cartographique de la zone et environ 6 mois/homme pour l'interprétation. [Voix \[2004\]](#) note que ce type de relevé terrain\* est toujours un travail long et fastidieux, ce qui tend à augmenter les risques d'erreur.

À titre d'exemple, en 2008, le seul recensement de l'ensemble des quelques 600 individus\* de plus de 10 cm de diamètre présents sur la zone a nécessité le travail quotidien de deux botanistes et de leurs stagiaires durant une semaine.

2. L'IFN [2010a] catégorise la lande ligneuse selon de nombreux critères mais nous pouvons retenir un taux de couverture des arbres inférieur à 10% et un taux de couverture des ligneux bas\* supérieur à 25%.



**FIGURE 4.2** – Terrain d'étude de la Mare aux joncs. — (a) Image Google earth de la zone. À cette échelle on ne peut faire que la distinction arbre/lande. Source : ©Google/Tele Atlas/IGN — (b) Extrait de la cartographie effectuée en 2000 par l'ONF. On distingue les différents groupes phytogéographiques de chaque espèce : arbre, arbrisseau ou herbacée. Source : ©ONF/Lalanne

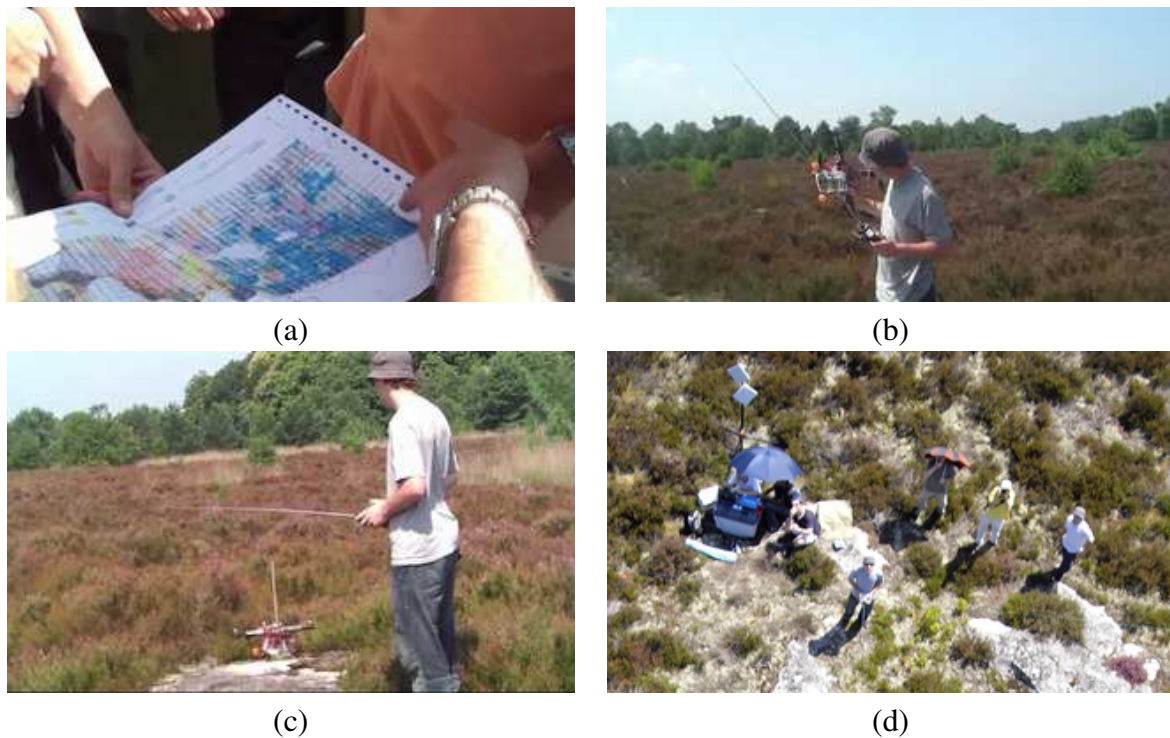
En plus de la carte d'occupation des sols, des mesures ponctuelles régulières, obtenues au moyen d'un inclinomètre et géolocalisées avec un récepteur GPS\* permettent de produire un Modèle Numérique de Terrain (MNT)\* grossier, à l'échelle de la parcelle, d'où sont tirées une carte des pentes et une carte d'ensoleillement.

Les cartographies successives, en estimant les relations spatiales et l'abondance relative de chaque espèce, permettent d'inférer la dynamique d'évolution des populations.

Cependant, cette cartographie ne fournit pas d'information sur les variations de caractéristiques au sein des groupes phytogéographiques comme la densité du feuillage ou la concentration spatiale au sein du groupe. Elle ne tient pas non plus compte des espèces minoritaires dans les groupes mixtes, ce qui réduit la portée des études sur les conditions de concurrence. Enfin, elle ne permet pas la détection des rejets arborescents avant qu'ils ne dépassent la taille des arbrisseaux, ni l'identification des espèces rares ou à cycle de vie court.

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, les botanistes sont désireux de trouver des outils permettant la caractérisation rapide de ces nombreux paramètres de surface\* biophysiques et géophysiques : discrimination des espèces au niveau des individus — permettant d'estimer la concentration et la mixité des espèces —, densité foliaire et densité des floraisons, estimation des hauteurs et du volume de la partie visible de la plante — pour estimer, entre autres, la classe d'âge ou l'état de santé des individus —, ainsi que les notions de pente, de rugosité et de type de sol qui influencent la dynamique des populations et le peuplement.

Nous avons vu aux chapitres 2 et 3 que notre système de micro-drone multi-caméras pouvait répondre à ce besoin et nous avons donc organisé une mission terrain pour valider



**FIGURE 4.3** – Déroulement de la mission. — (a) Description de la zone d'étude à partir de la carte de l'ONF. — (b) Vérification des sous-systèmes. — (c) Décollage depuis un rocher plat — (d) Station sol : l'antenne principale sert au retour vidéo en temps réel. Source : ©ATIS

son intérêt.

#### 4.1.2 Déroulement de la mission terrain

La mission terrain sur le site de la « Mare au jonc » a eu lieu au mois de Juillet 2009.

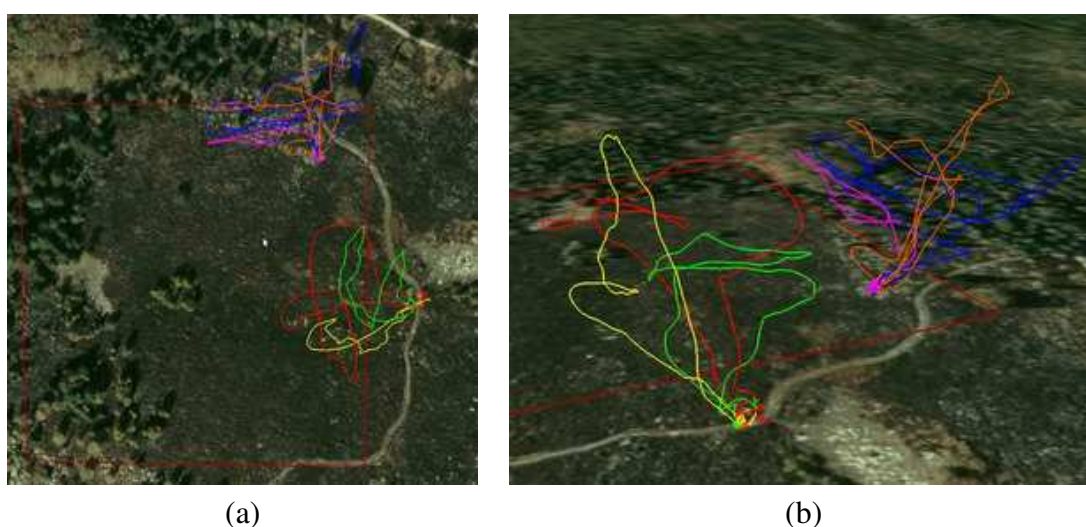
L'objectif de la mission était de nous joindre à une opération de relevé terrain menée par les botanistes du MNHN-CNRS et de faire des acquisitions d'images à différentes altitudes\* pour valider l'intérêt potentiel de ces images pour la cartographie de la dynamique de la végétation.

Malheureusement, à cette époque, notre système était encore en cours de développement et en particulier n'avait pas de capacité de vol automatique à partir d'un plan de vol, comme nous l'avons décrit au chapitre 3, paragraphe 3.3.2.

Le capteur tri-caméras\* étant néanmoins en grande partie achevé, nous avons donc décidé de réaliser tout de même la mission pour valider l'intérêt des outils de télédétection basse altitude\*, l'apport de l'automatisation permise par les drones\* devant être validé par la suite.

La démarche était donc prospective et n'avait pas encore de contraintes de cartographie en terme de surface couverte ou de taille de l'échantillon au sol\* sur les images.

Après une description de la zone par les botanistes du MNHN-CNRS (voir la figure 4.3 (a) p. 154) nous avons décidé de faire les premiers vol de test sur la partie Est de la zone



**FIGURE 4.4** – Trajectoires des différents vols. — (a) Vue verticale. Les vols 1, 2 et 3 se sont concentrés sur la partie Est de la zone et les vols 4, 5 et 6 sur sa partie Nord-Est. Le décollage avait lieu près du chemin par souci de facilités opérationnelles. — (b) Vue en perspective. Les vols ne dépassaient généralement pas les soixante mètres de hauteur, à l'exception du vol n°3 (en jaune) et du vol n°5 (en orange) qui ont atteint les soixante-dix mètres. Source : ©ATIS

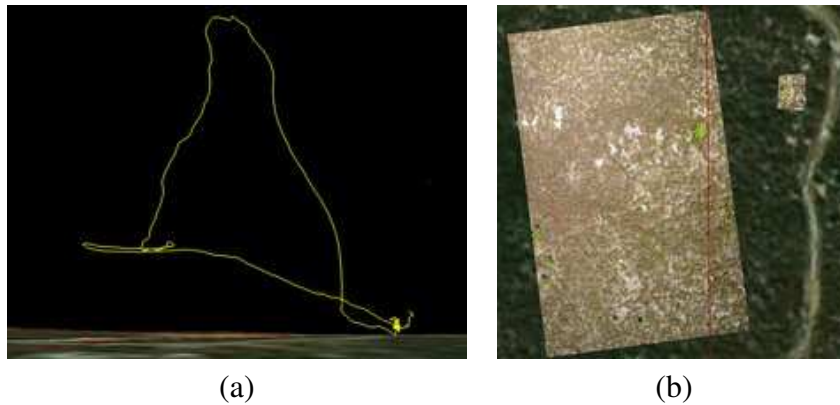
d'étude. Cette zone offrait l'avantage de présenter une large diversité d'arbrisseaux et de laisser de grands espaces pour les premiers tests. L'ensemble des vols étant piloté à vue depuis le sol, nous n'avons que peu de certitude sur les capacités de contrôle sur la hauteur sol\* et la dérive latérale et nous préférons commencer avec une grande marge de sécurité. Ce vol étant le premier test en condition opérationnelle du capteur tri-caméras, décrit au paragraphe 3.2 p. 102, nous avons effectué de nombreux réglages (b) mais il restait encore beaucoup d'inconnues.

Afin de minimiser l'interaction entre les hélices du drone et la végétation, nous avons autant que possible choisi des aires de décollage planes et dénudées, utilisant le chemin ou les affleurements rocheux (c). À proximité, la station sol (d), composée de deux ordinateurs portables, d'une antenne de réception vidéo directionnelle et d'un parapluie pour se protéger du soleil, surveillait les conditions de vol du drone et contrôlait les acquisitions. grâce au retour en temps réel du caméscope camileo P10, que nous avons décrit la mise en œuvre au paragraphe 125 p. 125.

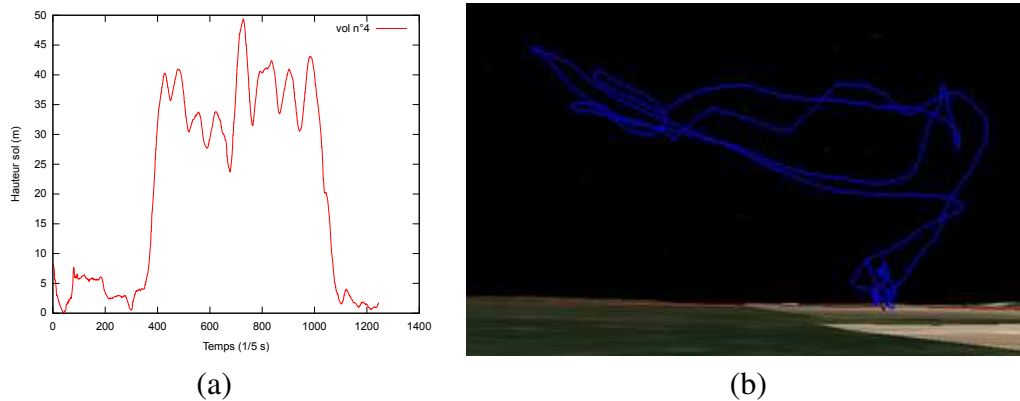
La mission s'est finalement découpée en six vols : trois pour la partie Est et trois pour la partie Nord-Est qui présentait plus d'arbres et faisait un contre-point intéressant à la lande de la partie Est. Chaque vol s'est effectué avec des réglages du capteur différents, en essayant de le faire converger vers un fonctionnement idéal. On peut voir sur la figure 4.4 que le premier vol (en rouge) a tout d'abord couvert une large zone puis, lors du vol n°2, nous avons tenté de faire des balayages (en vert), ce qui n'était pas une manœuvre simple depuis le sol, d'autant que des vents importants — 20 à 25 km/h— soufflaient sur la lande et tendaient à faire dériver le drone soit latéralement, soit verticalement en lui donnant de l'altitude.

Avec le vol n°3 nous avons cherché à prendre des photographies avec des tailles d'échan-





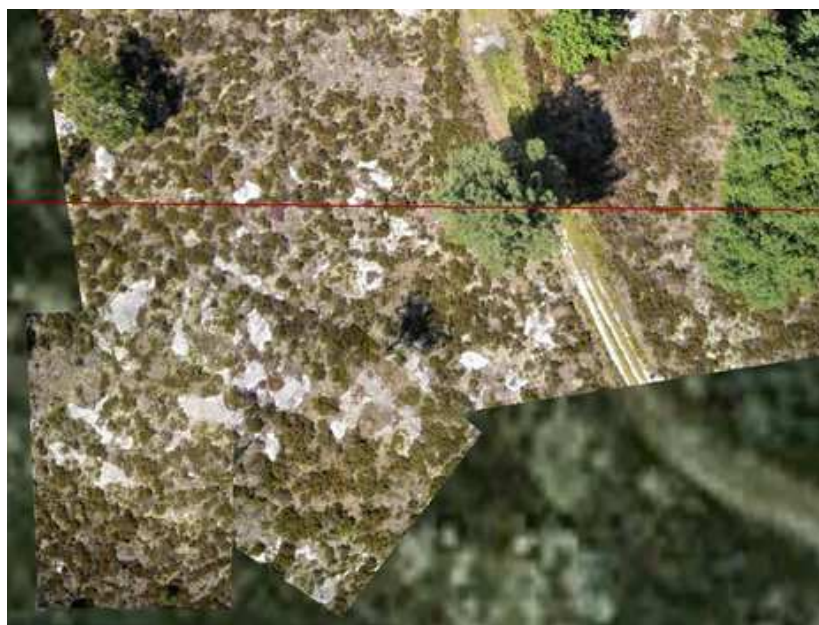
**FIGURE 4.5** – Différentes échelles de prises de vues — (a) Le vol n°3 tente de prendre des images de plus en plus haut. Mais le vent pousse le drone de plus en plus loin du pilote. — (b) La taille de l'échantillon au sol étant inversement proportionnelle à la hauteur sol, on trouve une grande disparité dans les photographies Source : ©ATIS



**FIGURE 4.6** – Vol à altitude constante — (a) Hauteur sol mesurée durant le vol n°4. — (b) Trajectoire du vol n°4 : Il est extrêmement difficile pour le pilote au sol de maintenir une altitude constante. Source : ©ATIS

tillons au sol variables par une ascension verticale (en jaune). On peut voir sur la figure 4.5 (a) p. 156 que la verticalité n'est pas la caractéristique principale de ce vol. En effet, sans contrôle automatique sur la position, le vent tend à faire dériver le drone sans que le pilote ne le perçoive de manière significative. Il en résulte une dérive horizontale sur plusieurs dizaines de mètres. Néanmoins, les différences d'échelles des images acquises sont visibles (b) : la plus grande, prise à 75 mètres, couvre une surface de 70 mètres par 53 avec une taille de l'échantillon au sol de 1,75 centimètres alors que la plus petite, prise à 6,4 mètres, couvre 6 mètres sur 4,5 mètres avec une taille de l'échantillon au sol de 0,15 centimètre.

Lors du vol 4 (en bleu) nous avons essayé de couvrir la zone en maintenant une hauteur sol constante. Mais, comme illustré sur la figure 4.6 (a) p. 156, les altitudes enregistrées montrent une variation importante de l'altitude au cours du vol. En effet, sans asservissement, il est très difficile pour le pilote d'estimer la hauteur de vol depuis le sol et on observe une variation de plus ou moins dix mètres par rapport à la hauteur de consigne. La hauteur



**FIGURE 4.7** – *Géoréférencement relatif des petites images sur les images à large fauchée.*  
Source : ©ATIS

sol augmente aussi avec la distance au pilote, ce qui peut s'expliquer par des effets de paralaxe qui perturbent la sensation de hauteur du pilote proportionnellement à l'éloignement de l'appareil .

Ce type d'expérience montre l'importance de l'asservissement en hauteur grâce aux capteurs comme l'altimètre barométrique\* que l'on a décrit à la section 2.3.4.2 p. 66, et qui n'était malheureusement pas disponible au moment de la mission. Des tests ultérieurs ont cependant montré que ce type de capteur permet de fournir une variation sur l'altitude<sup>3</sup> inférieure à cinquante centimètres.

Le vol 5 (en orange), s'est déroulé en deux parties, la première partie cherchant à renouveler la mesure ascensionnelle de changement d'échelle mais avec une plus grande vitesse d'ascension pour maintenir la position, puis un nouvel essai de vol en plateau. Les réglages des appareils photographiques ont aussi été modifiés sur ce vol pour limiter la surexposition et le flou constaté par l'observation sur place des images des premiers vols grâce aux outils de la station sol.

Cette série d'images, couvrant le coin Nord-Est de la zone d'étude est celle qui présente des caractéristiques les plus proches de ce que l'on désire obtenir dans le cadre de la télé-détection basse altitude : avec des images présentant une large fauchée qui permettent de localiser précisément les images et d'autres avec une taille de l'échantillon au sol plus petite. En effet, les petites images présentant de nombreux détails et nécessitant donc une grande précision de géolocalisation\* sont aussi les plus difficiles à géoréférencer car il est ardu de

---

3. On notera encore une fois la différence entre hauteur sol et altitude mais le problème est insoluble avec le matériel disponible et très certainement négligeable dans le cas présent avec une précision d'asservissement du même ordre que la déclivité.



**FIGURE 4.8** – Panorama de la zone d'étude, tiré des images horizontales du dernier vol.  
Source : ©ATIS



**FIGURE 4.9** – À cause de la chaleur, une hélice s'est brisée en vol après 4h de mission et 35 minutes de vol cumulés. Sur un appareil à quatre rotors, la perte d'une hélice est fatale. Source : ©ATIS

trouver des points d'appui\* caractéristiques sur le terrain ou des points d'appariement\* dans les autres images à la même échelle. Par comparaison, les images à large fauchée sont plus faciles à géoréférencer à partir de point d'appui ou de points d'appariement dans des images tirées de la télédétection spatiale\* ou aéroportée. Une fois ces images à large fauchée géolocalisées, elles peuvent elles-même servir à géoréférencer les images de l'échelle du dessous et ainsi de suite, comme le montre la figure 4.7 p. 157.

Enfin, le dernier vol (en rose sur la figure 4.4 p. 155), fut un vol d'essai avec une orientation horizontale des appareils photos, afin d'avoir des photographies d'ensemble de la zone d'étude. Ces images fortement obliques devaient permettre de repérer l'ensemble de la zone et d'identifier la hauteur de certains arbres. La figure 4.8 p. 158 montre un panorama tiré des images du vol n°6.

Nous devons noter qu'après 4h de mission sous un soleil de plomb et 35 minutes de vol cumulé<sup>4</sup>, un incident technique a malheureusement mis fin au vol n°6 au moment où nous

4. Les vols ont duré 6 minute en moyenne pour 300 à 350 clichés. Le vol le plus long fut le vol 5 avec 7 minutes.



**FIGURE 4.10** – « Rolling shutter » sur les vidéos de la mission, les vibrations rendent les vidéos inexploitable. Source : ©ATIS

avons planifié le dernier passage. Une hélice s'est brisé en vol, sous l'action combinée de la chaleur et de l'effort, provoquant la chute de l'appareil.

Cet accident doit nous rappeler la réalité d'utilisation des appareils aériens, prototype ou commerciaux, dont les pannes sont généralement impressionnantes. [Asencio \[2008\]](#) explique en effet que le taux d'attrition des drones reste actuellement au moins dix fois supérieur à ceux des avions pilotés et que les causes concernent pour 30% le contrôle du vol ; pour 25% la motorisation et 25 % des cas les erreurs humaines, le reste concernant les communications ou l'énergie.

Dans notre cas, nous avons cependant pris toutes les mesures de sécurité et si les dégâts matériels étaient importants, comme on peut le constater sur la figure 4.9 p. 158, les personnes présentes n'ont couru aucun danger.

### 4.1.3 Bilan de la mission

Avec approximativement 300 clichés par vol pour un total de 1817 photographies récupérées, l'objectif de la mission semblait atteint.

Néanmoins, comme le système était encore en cours de développement, un certain nombre de points viennent relativiser ce résultat. Tout d'abord les vidéos embarquées étaient inexploitable à cause du « Rolling Shutter » et des vibrations des moteurs non amorties, comme on peut le voir sur la figure 4.10 p. 159. Ensuite, on remarque un fort flou de filé, qu'on peut identifier sur la figure 4.11 p. 160 sur environ 80% des images acquises ce que nous avons incriminé à posteriori aux réglages de vitesse d'obturation automatique. Ce problème, moins présent sur le vol n°5, diminue partiellement la portée des conclusions que l'on peut tirer sur l'adéquation du système pour la classification\* automatique.

Heureusement, les images étant fortement résolues, une partie d'entre elles ont pu être sous-échantillonnées et utilisées pour la classification ou la photogrammétrie\*comme nous le verrons à la section suivante.



**FIGURE 4.11** – *Flou de filé dans les images. Les deux extraits sont tirés de deux images successives. Acquisées avec la même taille de l'échantillon au sol de 1,2 centimètres, l'image de droite présente un fort flou de filé qui supprime tous les détails de l'image. La seule solution reste de sous-échantillonner l'image. Source : ©ATIS*

Par ailleurs, une erreur de programmation au niveau de l'enregistrement des données de trajectographie et un problème — décrit depuis par [Jensen et al. \[2010\]](#) — de délai de la puce du récepteur GPS ont empêché toute tentative de géoréférencement direct\* et de calcul des empreinte au sol\*.

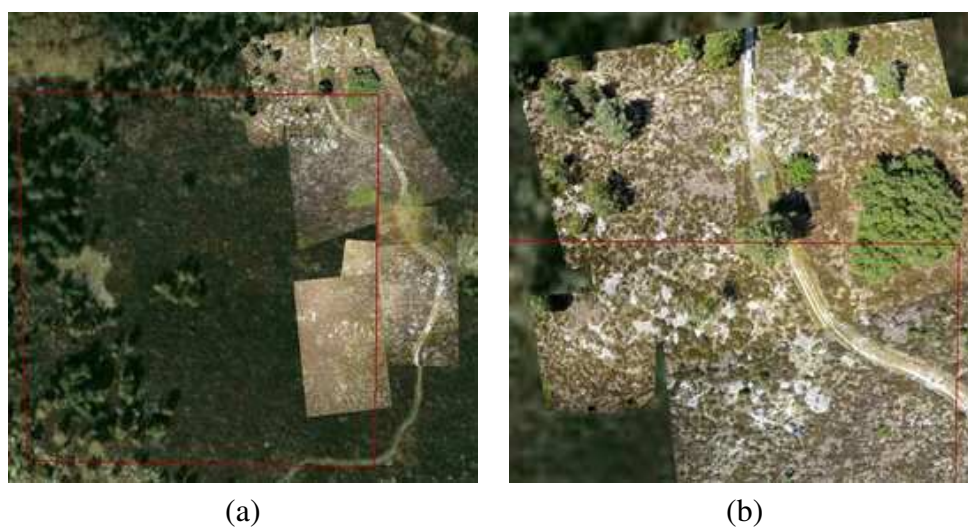
#### 4.1.4 Exemples d'images acquises et interprétation manuelle

Concernant la couverture des données, la figure 4.12 p. 161 montre que le système a pu couvrir environ 20% de la zone d'étude. Néanmoins, la couverture relativement réduite et le manque d'homogénéité des données sont fortement liés au pilotage à vue ainsi qu'aux objectifs de la mission. Nous n'avons pas cherché à simuler une cartographie opérationnelle mais bien à tester les propriétés de notre système. Sur la zone Nord-Est (b), la couverture est plus satisfaisante grâce à l'expérience que nous avons accumulé le matin.

Les figures 4.13 à 4.17 p. 161-163, illustrent quelques exemples de données permettant de conclure à l'intérêt de notre système pour la cartographie de la végétation et les applications de la Réalité Terrain Étendue (RTE)\*.

Ainsi, la figure 4.13 p. 161 montre une image acquise lors du vol n°5 avec une taille de l'échantillon au sol de 1,87 centimètres. On distingue nettement sur cette image les différentes essences d'arbre présentes sur la zone en fonction de la forme et de la couleur de leur feuillage. À cette taille de l'échantillon au sol, on peut même distinguer des détails fins comme les pommes de pins. Bien que les images de ce type, prises à la verticale, ne permettent pas d'estimer la hauteur des arbres — que nous obtiendrons par stéréoscopie ou grâce aux images obliques —, elles donnent des informations cruciales sur la taille et la forme du houppier, ce qui permet aux botanistes d'estimer l'âge et l'état de santé de l'arbre.

Pour les arbrisseaux, dont les formes souvent similaires rendent l'identification plus difficile sur les images de télédétection\*, on peut voir sur la figure 4.14 p. 162 qu'une taille



**FIGURE 4.12** – Couverture de la zone d'étude. — (a) Couverture totale. Les images acquises durant les 6 vols couvrent une grande partie de l'est de la zone d'étude. — (b) Détail. La zone Nord-Est totalise le plus d'images utilisables, avec des images à large fauchée et des images précises. Source : ©ATIS



**FIGURE 4.13** – Image présentant un GSD de 1,87 cm et utilisable pour l'identification des arbres. Source : ©ATIS



**FIGURE 4.14** – Image présentant un GSD de 0,3 cm et utilisable pour l'identification des arbrisseaux. Source : ©ATIS



**FIGURE 4.15** – Image présentant un GSD millimétrique et utilisable pour la discrimination floristique. Source : ©ATIS



**FIGURE 4.16** – *Image oblique, permettant d’avoir une vue d’ensemble de la zone d’étude.*  
Source : ©ATIS



**FIGURE 4.17** – *Les images obliques offrent un point vue plus « naturel » que la vue nadir et permettent une meilleure reconnaissance des relations spatiales pour l’œil humain. On voit ici nettement le quadrillage décimétrique utilisé par les botanistes pour leur cartographie.* Source : ©ATIS



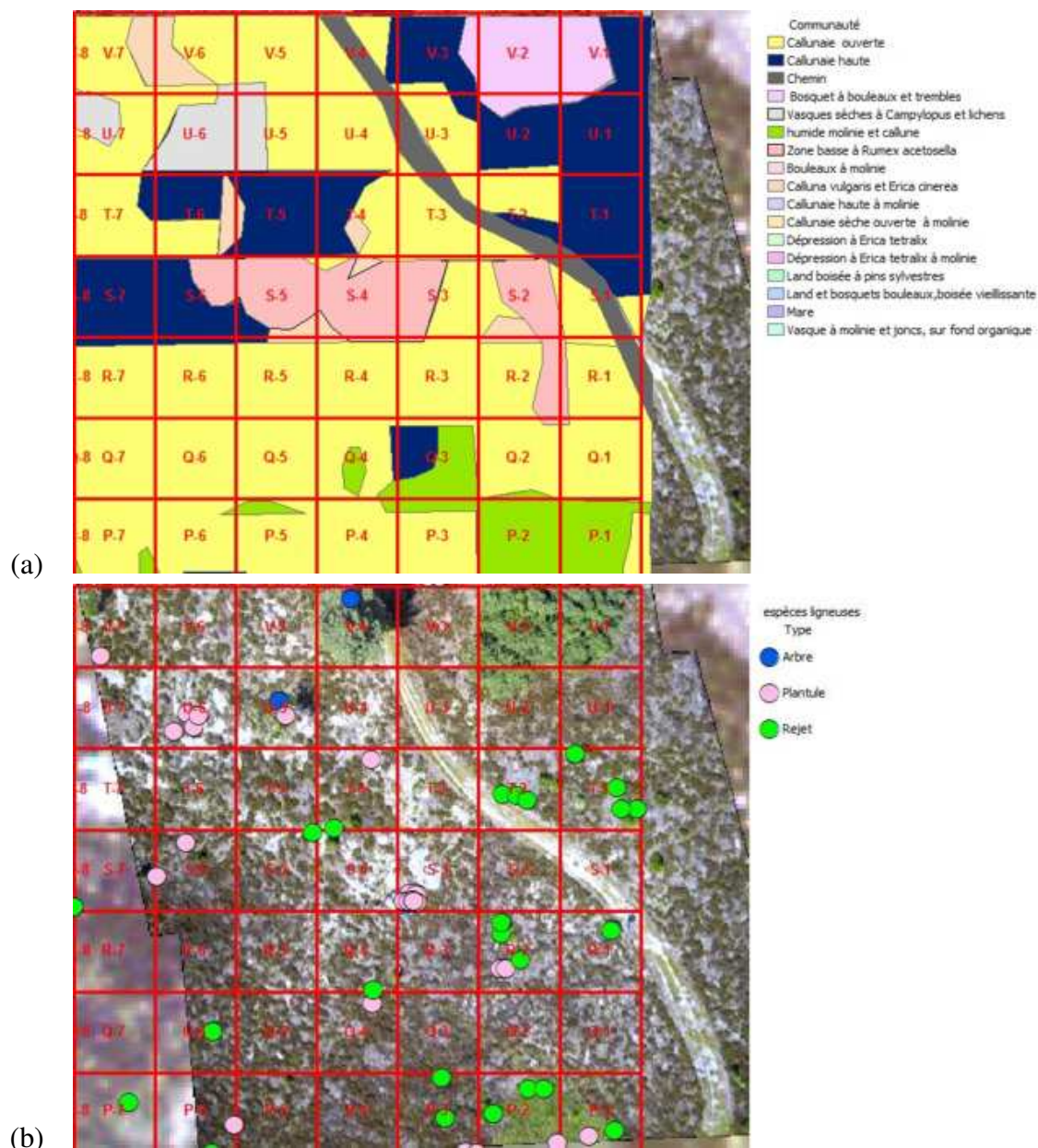
de l'échantillon au sol plus petite permet d'appliquer les mêmes critères d'identification que pour les arbres. L'image, acquise durant le vol n°6 avec une taille de l'échantillon au sol de 0,3 centimètre, permet d'extraire de nombreux paramètres de surface biophysiques : on peut voir des plants de callune verdoyants ainsi que plusieurs plants secs et l'on peut détecter la présence d'une bruyère cendrée par sa floraison caractéristique. On remarque aussi sur le bas de l'image, un rejet de pin plus clair parmi la callune qui n'aurait pas été visible sur des images aériennes car il ne mesure quelques centimètres de haut. Ainsi une taille de l'échantillon au sol subcentimétrique, combinée aux différences de floraisons liées aux cycles phénologiques des deux plantes, semblent effectivement être pertinente pour la discrimination des espèces comme nous en avons fait l'hypothèse au chapitre 1.

Sur la figure 4.15 p. 162, on peut voir une image acquise sur le vol n°5 par un des appareils photographiques orientés obliquement avec un angle de 10°. La taille de l'échantillon au sol est difficile à déterminer à cause du flou de file lié au mouvement de l'appareil, mais l'identification possible des fleurs de bruyères laisse supposer que celle-ci est millimétrique. Cette image démontre les possibilités de l'appareil en terme d'identification floristique ; à cette échelle, on distingue sans ambiguïté les deux espèces de bruyères entre elles, ainsi que la bruyère par rapport à la callune et même un certain nombre de rejets arborescents — probablement des trembles. Avec une cartographie régulière à cette échelle, les possibilités d'analyse des botanistes seraient grandement augmentées et ouvriraient de nouvelles perspectives en terme de cartographie de la dynamique de la végétation.

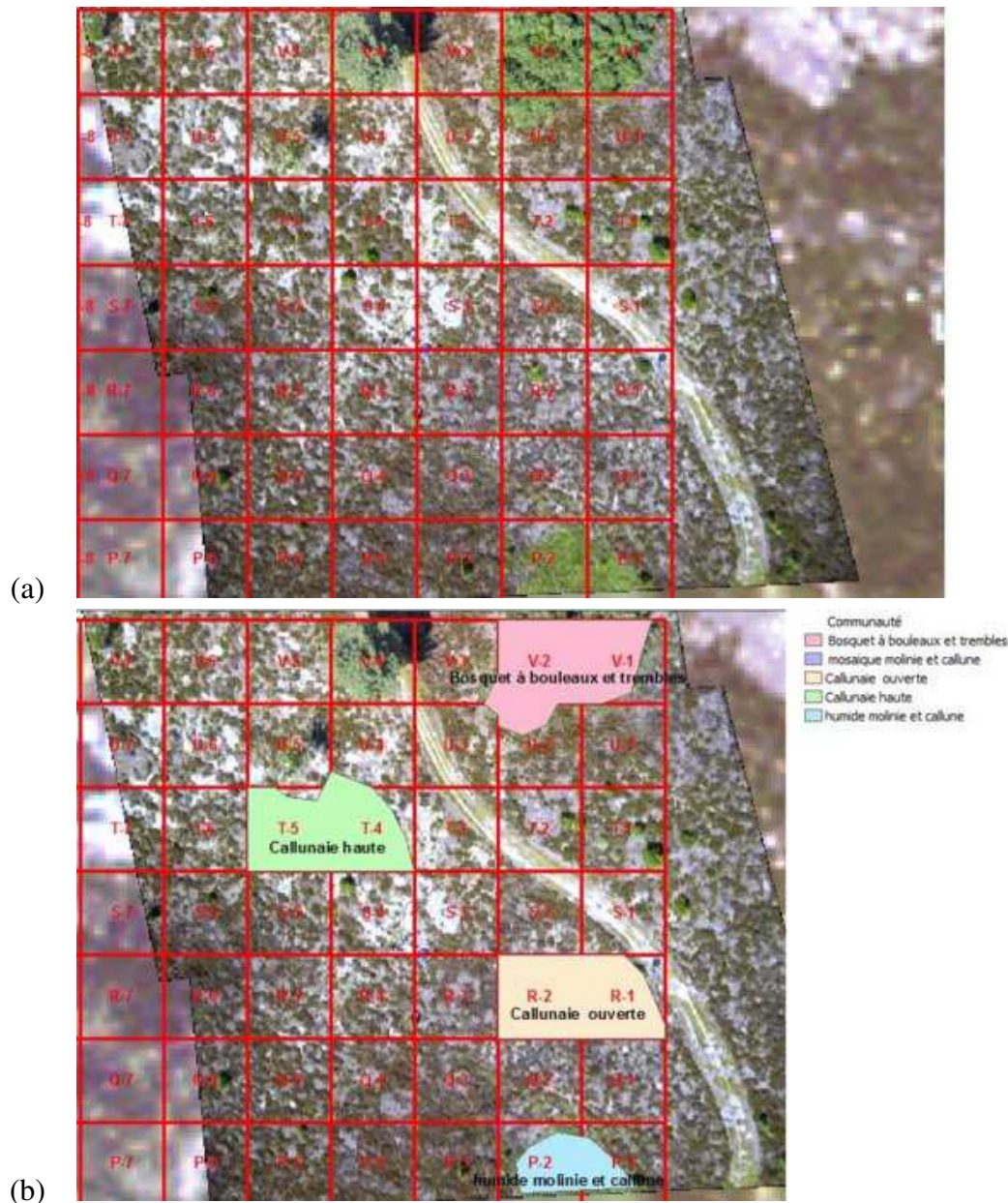
Enfin, on peut voir sur les figure 4.16 et 4.17 p. 163 des images prises lors du vol n°6 avec un très fort angle de visée latérale et qui présente l'avantage de permettre une visualisation de la scène dans son ensemble et sous un angle familier, constituant une meilleure représentation spatiale de la zone lors de l'analyse. Les images obliques permettent aussi une estimation facilitée de la hauteur des éléments représentés dans la scène et peuvent être une alternative intéressante à la photogrammétrie. De l'analyse de ces premières données, l'équipe Écologie et Gestion de la Biodiversité a confirmé l'intérêt des ces images et la valeur ajoutée que la production systématique de celles-ci permettrait dans leur travail.

Dans un rapport interne de l'UMR 7179 CNRS-MNHN, [Mobaied et Riera \[2010\]](#) font le bilan de la cartographie de la végétation obtenue à partir de la mission terrain : comme lors de la campagne de l'ONF effectuée en 2000, une cartographie des formations végétales, illustrée à la figure 4.18 (a) p. 165, a été réalisée à partir de l'observation manuelle des types de végétation basée sur une grille décimétrique. Par ailleurs, l'ensemble des arbres, rejets et plantules au sein de la lande ont été recensés et géolocalisés, toutes ces informations étant ensuite intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG)\*, comme on peut le constater sur la figure 4.18 (b) p. 165.

L'interprétation des photos aériennes datant de 2003 au 1/25000, acquises par l'Institut Géographique National (IGN)\*, a permis à ces botanistes de « distinguer trois types de végétations (bruyères, graminées, boisements) retrouvés au moment de la cartographie sur le terrain. » La taille de l'échantillon au sol de ces photographies aériennes n'était cependant « pas suffisante ni pour affirmer cette interprétation, ni pour cartographier les individus des espèces ligneuses » et ils concluent en disant que « les images actuelles à haute résolution acquises par le drone sur ce dispositif seraient un apport déterminant dans la réalisation de la



**FIGURE 4.18** – Cartographie réalisée lors du relevé terrain. — (a) Cartographie de la végétation obtenue par l'observation manuelle des types de végétation lors du relevé terrain — (b) Géolocalisation ponctuelle de tous les arbres, rejets et plantules par rapport à la grille décimétrique Source : CNRS-MNHN/Mobaeid



**FIGURE 4.19** – Cartographie réalisée par photo-interprétation. — (a) Géolocalisation d'une image acquise lors du vol n°5 relativement à la grille décimétrique servant à la cartographie manuelle — (b) Cartographie de la végétation obtenue par l'interprétation de l'image acquise lors du vol n°5. Source : CNRS-MNHN/Mobaëid

carte des types de végétation et de leur évolution temporelle. »

À partir des données du vol n°5, prises à 75 mètres et que l'on peut voir sur la figure 4.19 p. 166, [Mobaied et Riera \[2010\]](#) distinguent « quatre types de végétation parmi les sept types présents sur la zone photographiée : callune haute continue, callune ouverte discontinue, les formations à molinie et les zones boisées. En revanche, à cette altitude on ne peut pas distinguer : les zones de bruyère cendrée, les zones de petite oseille ni les vasques sèches à mousses et lichens. »

Toujours selon ce rapport, les photographies prises par notre système permettent aussi de « réaliser une cartographie positionnant les arbres et les rejets au sein de la lande d'une façon précise par rapport à la cartographie faite par relevé du terrain ».

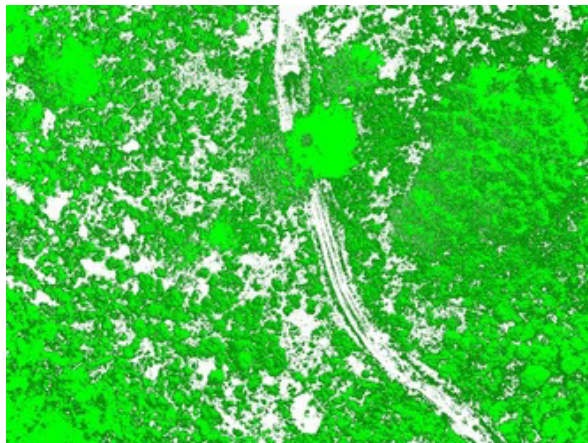
Les images du vol n°6, prises à plus basse altitude, n'ont pu être utilisées à l'époque pour la cartographie à cause de la difficulté de les géolocaliser de manière précise sans les données de trajectoires. Elles ont cependant démontré pour les botanistes un « intérêt pour cartographier les communautés végétales de grande valeur qui occupent une zone plus petite comme l'*Erica tetralix* ».

Enfin, concernant la gestion de la Réserve Biologique Dirigée, le rapport explique que « les deux menaces principales de la lande — le reboisement par les espèces ligneuses et l'apparition des graminées — ont été identifiées sur les images du drone » et qu'une « cartographie automatique de la végétation (Bruyère, Graminée, Boisement) » permettant de « calculer automatiquement la surface au sol recouverte par chaque classe de végétation » a pu être effectuée. Ces images présentent donc un fort intérêt pour la cartographie des espèces ligneuses : « on peut positionner les arbres et les rejets et donc savoir la densité de ces individus sur une zone donnée », ce qui pourrait permettre « au gestionnaire de mieux planifier les interventions pour la gestion de ces milieux dans le cadre des programmes de maintien des landes ».

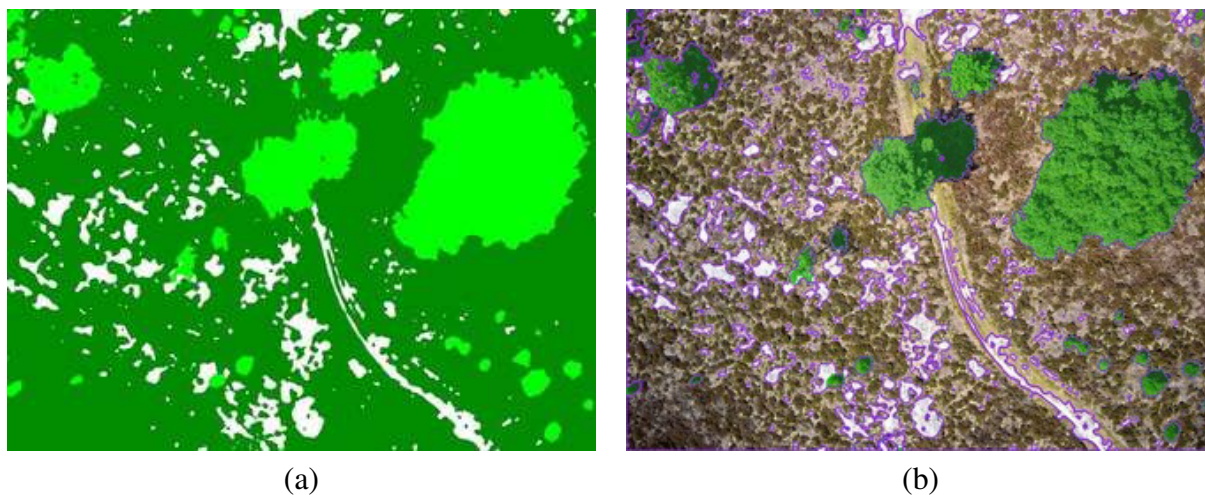
## 4.2 Premier travaux sur les images

Nous avons vu que les images acquises par notre système micro-drone multi-caméras, malgré quelques réserves liées à l'implémentation et non au concept de télédétection basse altitude, semblent répondre aux attentes des botanistes pour les aider dans leur cartographie de la dynamique de la végétation.

Nous présenterons dans cette section les travaux qui se sont appuyés sur les données acquises lors de cette mission pour aller au delà de l'identification visuelle. La première étude est décrite par [Mainfroy \[2009\]](#) et concerne la classification automatique des images de la partie Nord-Est de la zone d'étude et la seconde concerne les travaux de thèse de [Benoît Petitpas](#) sur l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques par stéréorestitution\*.



**FIGURE 4.20** – Classification non supervisée par la méthode *K-Means* avec 3 classes. Si l'algorithme semble faire la distinction entre le sol et la végétation, il se montre incapable de distinguer les arbres des arbrisseaux. Source : [Mainfroy \[2009\]](#)



**FIGURE 4.21** – Classification supervisée par la méthode *Maximum Likelihood Estimation*. — (a) On distingue trois classes : le sol, les arbres et les arbrisseaux. — (b) Les contours des classes ont été superposé à l'image d'origine. Source : [Mainfroy \[2009\]](#)



FIGURE 4.22 – Couple d’images acquises lors du vol n°5. Source : ©ATIS

### 4.2.1 Classification automatique

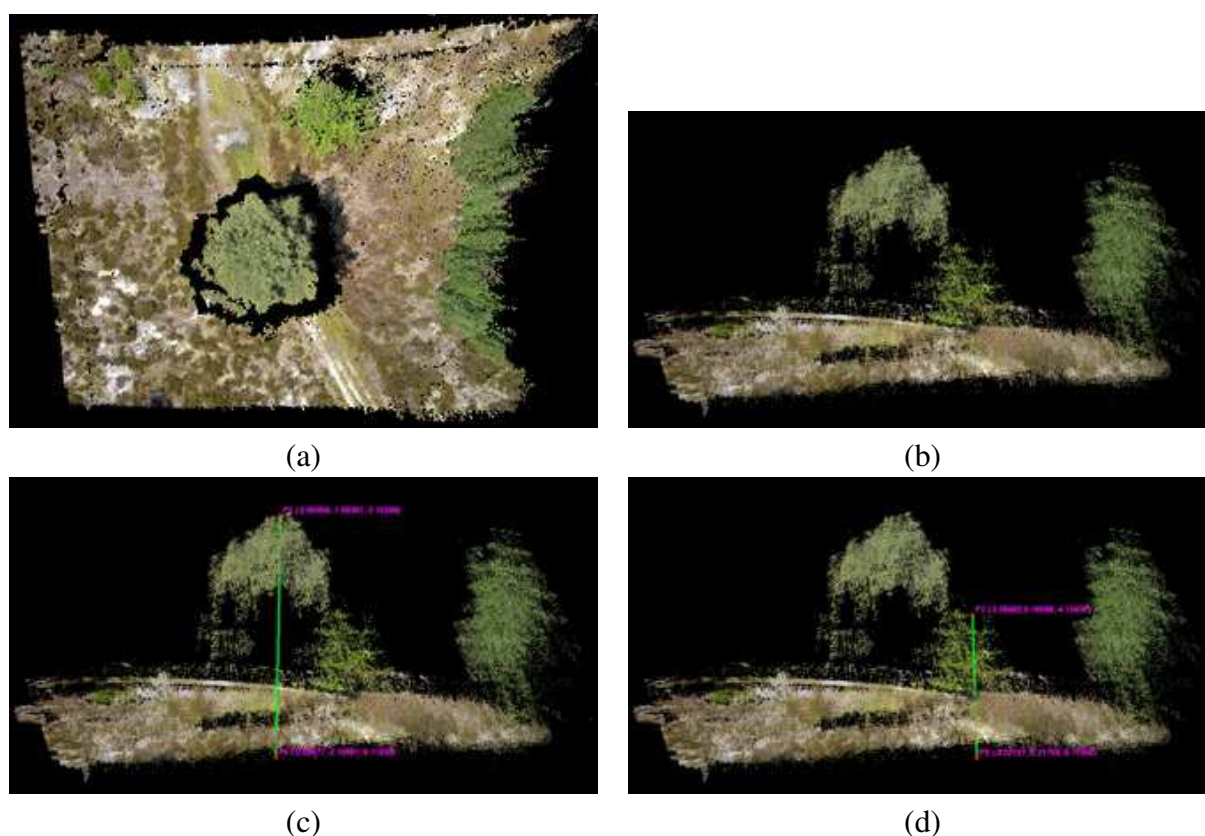
Mainfroy [2009] a utilisé les images de la partie Nord-Est et particulièrement les images du vol n°5, prises avec une taille de l’échantillon au sol de 1,87 centimètre et montrant à la fois des arbres et des arbrisseaux. Il s’est intéressé à la comparaison de deux types de classifications : la classification non supervisée avec la méthode K-Means[Lloyd, 2002] et la classification supervisée avec la méthode Maximum Likelihood Estimation[Data *et al.*, 2008].

On peut voir sur la figure 4.20 p. 168, le meilleur résultat obtenu par Mainfroy [2009] avec la méthode K-Means. Cette classification non supervisée avec trois classes — sol, arbres, arbrisseaux — semble capable de différencier le sol de la végétation, mais montre beaucoup plus de difficulté à distinguer les deux types de végétation alors qu’ils sont de texture\* significativement différente. De son côté la méthode MLE semble beaucoup plus convaincante dans le cas étudié et l’on peut voir sur la figure 4.21 p. 168 que les trois classes — sol, arbres et arbrisseaux — sont bien identifiées par l’algorithme. En conclusion, ces travaux confirment le potentiel des images de télédétection basse altitude pour la classification automatique de la végétation mais nécessitent encore de nombreux approfondissements.

### 4.2.2 Stéréorestitution

Du côté de la stéréorestitution, de nombreux travaux ont été menés en collaboration avec Benoît Petitpas [Petitpas, 2007; Petitpas *et al.*, 2010b,a] pour les méthodes de photogrammétrie aux images acquises par notre système et le développement de nouvelles méthodes permettant l’extraction automatisée de paramètres de surface biophysiques et géophysiques.

En partant de couples d’images, comme celles illustrées à la figure 4.22 p. 169, Petitpas *et al.* [2010b] applique une chaîne de traitement de stéréorestitution afin de retrouver les paramètres de calibration et la géométrie d’acquisition des deux images, un appariement robuste est effectué à partir de l’algorithme SURF[Bay *et al.*, 2008] dont les détecteurs de points d’appariement ont l’avantage d’être invariants au changement d’échelle et au rotation. Les images sont ensuite mises en géométrie épipolaire en vu d’un appariement dense



**FIGURE 4.23** – Nuage de point 3D obtenu par [Petitpas et al. \[2010a\]](#) à partir du couple d'images précédent. — (a) Vue verticale — (b) Vue en coupe. — (c&d) Mesures de distance  
Source : ©ATIS/Gademer

qui nous fournira le nuage de points 3D correspondant à la scène observée. Ils utilisent ensuite une méthode de rectification épipolaire polaire, comme celle décrite par [Oram \[2001\]](#), puis la stéréorestitution dense est obtenue par la méthode d'appariement hiérarchique avec relaxation, décrite par [Leloglu et al. \[1998\]](#).

La figure 4.23 p. 170 (a,b) montre le nuage de point 3D obtenu à partir du couple d'images précédent. La restitution de la notion de relief permet d'estimer de nombreux paramètres de surface biophysiques comme la hauteur des arbres (c&d). Les travaux dans ce domaine semblent très prometteurs et génèrent de nombreux sujets de recherche. Afin de subvenir à ces besoins, il semble important d'améliorer la qualité de l'acquisition afin de pouvoir obtenir des données tridimensionnelles de manière systématique lors de la cartographie de la dynamique de la végétation.

### 4.3 Perspectives pour de nouvelles missions

En conclusion, nous dirons de cette mission terrain qu'elle confirme l'utilité de la télédétection basse altitude pour la cartographie de la dynamique de la végétation et renforce

notre conviction sur l'usage des micro-drones en remplacement des aéromodèles\* afin de faciliter les conditions opérationnelles d'utilisation en rendant possible la systématisation de ce type d'acquisition. Les données elles-mêmes ont confirmé ce que nous avons perçu au chapitre 1 avec un fort potentiel pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques, tant par photo-interprétation que par cartographie automatique ou par stéréorestitution.

Néanmoins, cette mission met aussi l'accent sur un certain nombre d'améliorations qu'il sera nécessaire d'obtenir avant une utilisation régulière d'un tel système :

- Tout d'abord concernant la qualité des images, un meilleur réglage des prise de vue est nécessaire pour éviter une telle proportion de photographies floues<sup>5</sup> et une stabilisation anti-vibratoire doit être ajoutée pour éviter l'effet de « Rolling Shutter » sur les vidéos.
- Par ailleurs, les trajectoires fortement perturbées de l'appareil empêchent toute cartographie régulière de la zone et l'intégration des capacités de vol automatique semblent indispensables à l'utilisation systématique de ce type d'appareil.
- La précision du géoréférencement direct doit par ailleurs être évaluée avec soin et l'ajout de points d'appui au sol généralisé.
- Enfin, la fiabilité mécanique de l'appareil doit être améliorée avec des systèmes de redondance des sous-systèmes et un éventuel passage à des plateformes hexa-rotors ou octo-rotors qui semblent à même de se poser en urgence sans accident en cas de bris d'une hélice ou d'un moteur.

Malgré tout, le potentiel de ce système semble acquis et seul un investissement financier et humain supplémentaire est nécessaire pour la réalisation de tous ces objectifs.



---

5. Des tests encourageants menés depuis, ont montré qu'en fixant la vitesse d'obturation à 1/500<sup>e</sup> de seconde avec une sensibilité de 100 ISO, on obtient des photographies nettes dans 95% des cas, sans problème de sous-exposition tant que l'on est en extérieur et en plein jour. Un exemple de photographies prises avec ces nouveaux réglages peut être vu sur la figure 4.24 p. 174.





# Conclusion générale et perspectives

## Conclusion générale

L'extraction de paramètres de surface\* fait l'objet de nombreuses recherches au sein des Sciences de la vie et de la Terre, car ces paramètres permettent l'analyse des phénomènes complexes qui animent la biosphère. On distingue habituellement les méthodes d'acquisition de ces paramètres par observation directe lors des relevés terrain\* des méthodes de télédétection\* qui permettent de les estimer à l'aide de capteurs distants. Mais les évolutions technologiques récentes tendent à réduire la frontière entre ces deux domaines par l'avènement de la télédétection basse altitude\* qui permet d'étendre les méthodes usuelles de relevé de la réalité terrain\* à l'ensemble des méthodes d'imagerie sans sacrifier la qualité de l'observation directe. Dans le cadre d'une coopération entre l'Université Paris-Est, l'École Supérieure d'Informatique Électronique et Automatique (ESIEA)\* et le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)\* l'étude et la conception d'un système micro-drone\* multi-caméras\* ont été conduites. Cette étude a pris la forme de plusieurs projets d'ingénieur et d'une thèse qui avait trois objectifs :

- tout d'abord poser correctement la problématique de la cartographie de la dynamique de la végétation à partir de drones\*,
- puis comprendre les contraintes et les enjeux de cette application spécifique,
- enfin, réaliser un tel système comprenant le porteur, le capteur permettant de répondre à la problématique, ainsi que l'ensemble des logiciels rassemblés dans la station sol\*.

On peut voir sur la figure 4.24 p. 174 quelques uns des derniers résultats obtenus par notre équipe. La qualité des images a pu être grandement améliorée, permettant la synthèse de nuage de points 3D plus dense. Ces résultats sont prometteurs pour l'extraction automatique de paramètres de surface biophysiques et géophysiques.

L'objectif ambitieux de réalisation du système complet de micro-drone multi-caméras a pu être atteint en grande partie. Avec l'aide des étudiants de l'ESIEA et des subventions du Challenge Minidrones organisé par l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA)\* et la Direction Générale de l'Armement (DGA)\*, un porteur quadri-rotors ayant une capacité d'emport supérieure aux produits du commerce a pu être entièrement conçu et réalisé par notre équipe durant le temps de la thèse. Malheureusement, nous n'avons pu finaliser dans les temps le module permettant le vol automatique et nous avons dû nous contenter de le piloter comme un aéromodèle\* lors de la mission sur le terrain. Il possède néanmoins des caractéristiques qui rivalisent toujours avec les derniers modèles de drones



**FIGURE 4.24** – *Nouvelles acquisitions simultanées pour des applications de stéréorestitution. — (a) Couple stéréoscopique acquis à 7 mètres de hauteur sol avec une taille de l'échantillon au sol de 1,5 millimètres. — (b) Nuage de points 3D obtenu par B. Petitpas. La meilleure qualité des images sources augmente la capacité de l'algorithme à reconstruire un nuage dense. Source : ©ATIS/Petitpas*

sortis en 2010 et il nous a permis de valider l'ensemble du système dans des conditions opérationnelles réelles.

Par ailleurs, la conception innovante et la réalisation du capteur multi-caméras ont pu être menées à leur terme, malgré de nombreux défis techniques et des contraintes fortes en terme de poids et de coût. La modularité du système, prise en compte dès la conception, permet de très nombreuses perspectives pour l'acquisition d'images obliques, de couples stéréoscopiques ou d'images multispectrales\* à partir de porteur léger. Bien que toutes les pistes, comme celle de l'imagerie multispectrale, n'aient pas pu être explorées en pratique, l'intérêt et la faisabilité de plusieurs d'entre elles ont été démontrés.

Du point de vue des logiciels, là encore, toutes les réalisations techniques n'ont pas abouti mais notre système dispose d'un système de communication performant entre l'appareil et les opérateurs leur permettant d'estimer en temps réel l'état de l'appareil, de visualiser ce qui est perçu par lui et de contrôler à distance le comportement de la charge utile\* démontrant les avantages opérationnels majeurs de ce système (et des systèmes de drone) sur des simples aéromodèles.

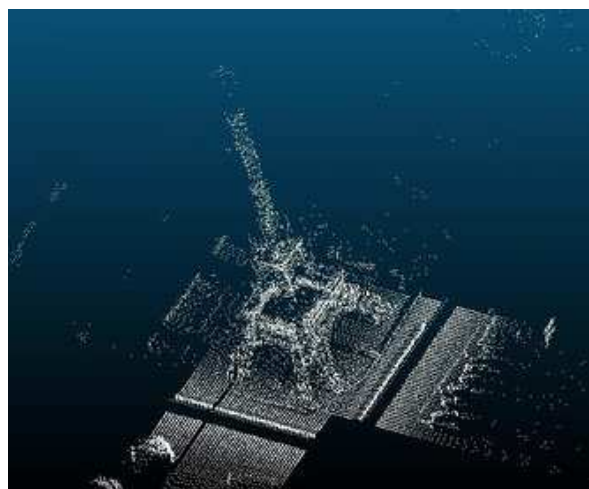
Enfin, l'ensemble du système a pu être testé dans des conditions opérationnelles réelles : avec 35 minutes de vol réparties dans la journée et l'acquisition de 1800 clichés, notre système micro-drone multi-caméras semble répondre au cahier des charges que nous lui avons fixé. Si certains aspects ont du être corrigés par la suite, les botanistes du MNHN se sont déclarés satisfaits et désireux de continuer plus avant notre collaboration. Par ailleurs les données produites ont alimenté plusieurs projets de recherche dont une thèse, actuellement en cours à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée et qui prolonge cette étude en abordant la question de l'extraction automatique des paramètres de surface à partir des méthodes de stéréorestitution. L'ensemble du système va par ailleurs continuer à être développé au sein de la collaboration de laboratoires pour aboutir à ce qui devrait être un système original et un réel atout pour les chercheurs sur le terrain.

## Perspectives

Si l'on ouvre le champ de notre étude et qu'on regarde les perspectives qui nous sont offertes ; on trouve de nombreuses possibilités.

Concernant le porteur, de nouvelles offres commerciales sont apparues depuis le lancement du projet, dont les caractéristiques commencent à s'approcher de notre cahier des charges et, s'il semble qu'une maîtrise de l'ensemble des sous-systèmes par l'équipe restera une plus-value déterminante pour le géoréférencement direct\* des données, il sera nécessaire d'évaluer précisément les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'une plateforme commerciale. On peut cependant déjà imaginer qu'une amélioration de la disponibilité et un standardisation des pièces de rechange permettrait un déploiement opérationnel accru au prix d'une moins grande capacité d'adaptation et d'évolution.

Pour le capteur, nous pensons que l'ajout de la capacité multispectrale au système multi-caméras démultiplierait son potentiel pour l'extraction de paramètres de surface biophysiques. Notre système actuel pouvant embarquer jusqu'à trois appareils photographiques



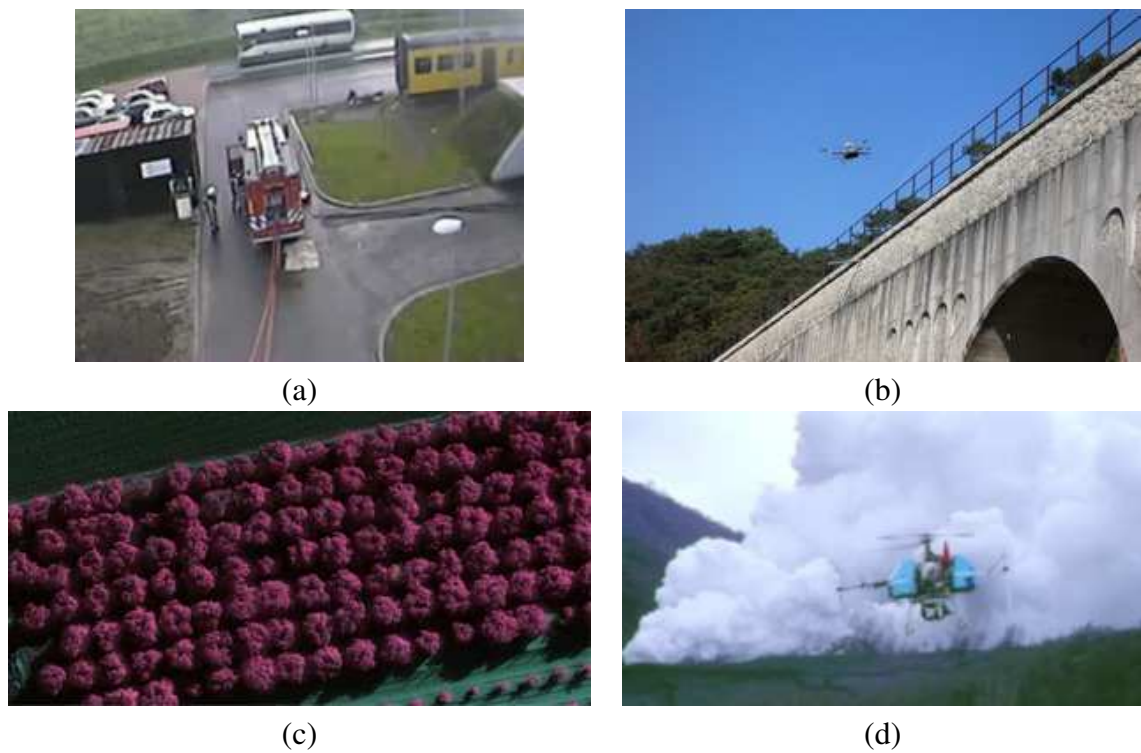
**FIGURE 4.25** – Exemple d’acquisition de nuage de points 3D effectuée avec un LiDAR  
Source : ©ATIS

simultanément nous devrions pouvoir acquérir des couples stéréoscopiques et ajouter l’information multispectrale sur l’appareil placé au centre. La modification d’appareils photo du commerce pour la perception du proche-infrarouge ayant été démontré par [Vioix \[2004\]](#), des premiers tests en condition opérationnelles pourraient se réaliser très vite.

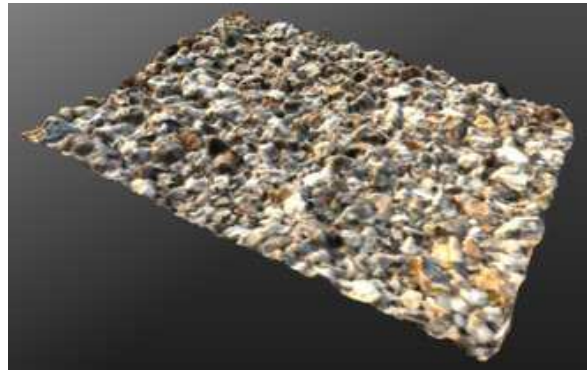
Une autre piste de recherche concerne l’emport d’un capteur LiDAR, télémètre laser tournant qui permet l’acquisition d’un nuage de points 3D comme illustré sur la figure 4.25 p. 176. Le LiDAR permettrait d’ajouter une information importante sur le relief et la hauteur sol permettant d’augmenter les possibilités d’extraction de paramètres de surface géophysiques. Le principal frein à ce développement est le poids des capteurs LiDAR qui dépasse généralement la capacité d’emport des micro-drones et la nécessité d’une source d’énergie et d’un centre de calcul pour traiter et stocker les données. Des essais sont actuellement effectués pour réduire le poids de ces systèmes mais leur coût (autour de 5000€) limite les approches que nous avons pu appliquer sur les appareils photographiques compacts.

La problématique de la qualité du géoréférencement direct des images acquises à partir de drone fait l’objet de nombreuses recherches. [Jensen et al. \[2010\]](#) ont démontré la nécessité de calibrer les capteurs internes pour corriger les imprécisions sur la géolocalisation\*. Une fois cette information obtenue, les outils de visualisation en temps réel de la couverture des images et de navigation dans les images, décrits au paragraphe 3.3 p. 129, devraient apporter une vraie plus-value opérationnelle lors des missions terrains.

Le système dans son ensemble, une fois achevé, rendrait possible des acquisitions d’images pertinentes dans de nombreux domaines d’applications, illustrés par la figure 4.26 p. 177. [Petrie \[2008\]](#) rappelait — comme nous l’avons vu au paragraphe 2.3.3.1 p. 59 — que l’acquisition d’images obliques pourrait avoir de nombreux avantages pour les services publics comme la sécurité civile, les pompiers ou la police. De plus, la capacité à produire et analyser rapidement des données acquises à basse altitude, généralement appelée *cartographie rapide*, semble pouvoir intéresser des secteurs comme l’humanitaire ou la gestion de crise lors des catastrophes naturelles. L’agilité de notre système en environnement urbain, sa ca-



**FIGURE 4.26** – *Autres champs d'application possibles pour notre système.* — (a) *Cartographie rapide lors des opérations de la sécurité civile* Source : [airdrone.de](http://airdrone.de) — (b) *Inspection d'ouvrage d'art* Source : J.Naudin, <http://jnaudin.free.fr> — (c) *Agriculture de précision* Source : Zarco-Tejada et al. [2008] — (d) *Observation des milieux dangereux, comme les volcans* Source : Sato [2003]



**FIGURE 4.27** – *Reconstruction 3D d'une scène de galets. Petitpas et al. [2010b] montrent la pertinence du processus de stéréorestitution pour l'extraction de paramètres de surface géophysiques comme la rugosité. Source : ©Petitpas*

pacité à prendre plusieurs images obliques simultanément et la navigation immédiate dans les données pourraient être des atouts majeurs dans ce type de situation.

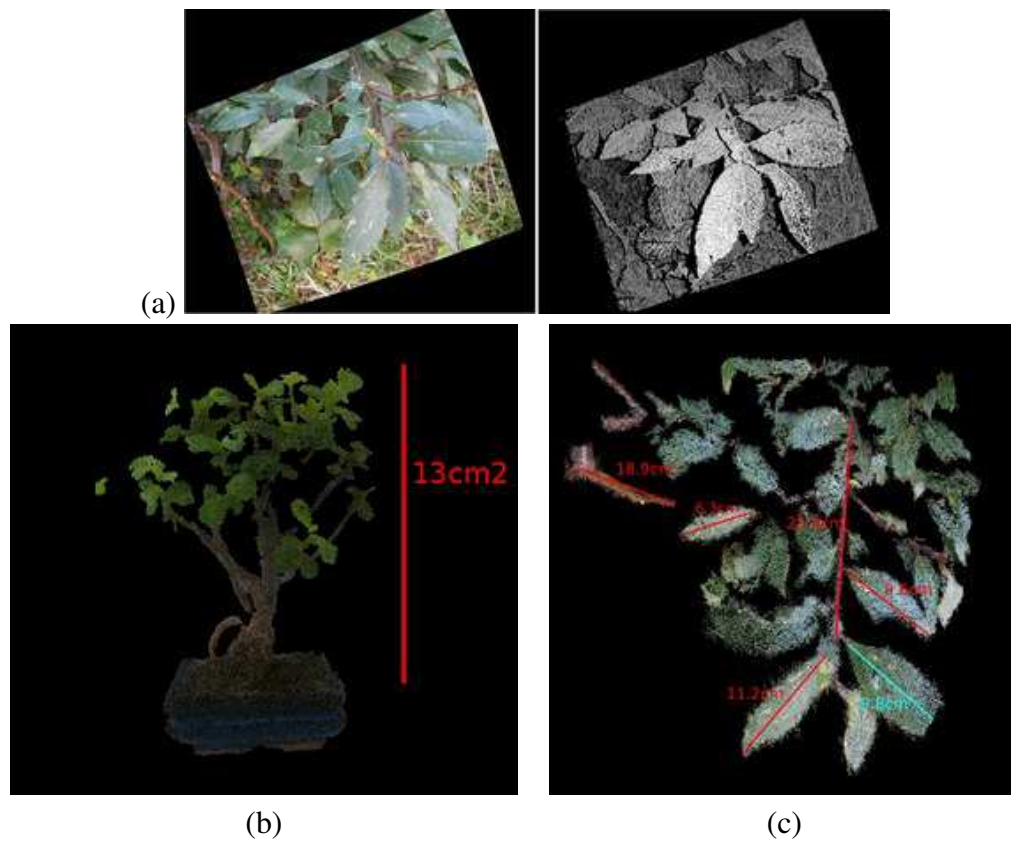
On trouvera aussi des applications chez [Derkx et Sorin \[2008\]](#), montrant le besoin d'un système d'acquisition stéréoscopique de petite taille pour la détection de fissure dans les ouvrages d'arts. La petite taille de notre système lui permettrait de voler suffisamment près de l'ouvrage pour permettre une détection des fissures les plus fines à l'aide de la stéréoscopie. Néanmoins, le développement d'un système pour voler à une distance constante d'une surface et une automatisation complète semble nécessaire avant de remplir des missions de cet ordre.

Au paragraphe 1.3.1 p. 17, nous avons basé notre réflexion sur la discrimination des espèces végétales sur de nombreux travaux en agriculture de précision. Malgré de plus grandes étendues à couvrir et avec un éventuel changement de plateforme, notre système multicaméras pourrait très certainement apporter de nombreux résultats pour la détection d'adventices, de plantes envahissantes ou pour surveiller la croissance des productions agricoles. Dans une problématique de santé, en améliorant la détection des variations phénologiques de certaines plantes allergisantes on peut aussi espérer renforcer les systèmes d'alerte aux populations sensibles.

Enfin, on peut imaginer de nombreuses applications dans lesquelles les mesures de paramètres de surface sont nécessaires mais trop dangereuses pour des humains en cas de cyclones ou bien lors de l'analyse des coulées de lave et des panaches de fumées dans les volcans, comme le montre l'article de [Sato \[2003\]](#).

Une dernière application concerne plus généralement la Réalité Terrain Étendue (RTE) et l'usage qu'on peut en faire pour l'interprétation d'images de télédétection optique ou radar\*. L'extraction de paramètres de surface géophysiques comme la rugosité, à partir d'une chaîne de stéréorestitution, comme illustrée sur la figure 4.27 p. 178, devrait permettre selon [Petitpas et al. \[2010b\]](#) de mieux comprendre la rétro-diffusion du signal radar et donc d'améliorer la qualité d'interprétation.

Enfin, les derniers résultats de notre coopération avec Benoit Petitpas semblent montrer que l'extraction de paramètres de surface biophysiques à partir de nuages de points 3D est



**FIGURE 4.28** – Les travaux de [Petitpas et al. \[2010a\]](#) montrent des résultats probants pour l'extraction de paramètres dendrométriques comme la taille et la largeur des branches et des feuilles à partir de nuages de points obtenus par stéréorestitution. — (a) Le processus de stéréorestitution permet d'obtenir une carte de distance puis un nuage de points tridimensionnel. — (b&c) Avec une information sur l'échelle de la scène, on peut alors déduire des informations de taille et de volume sur les plantes. Source : ©Petitpas



réalisable, comme le montre la figure 4.28 p. 179. [Petitpas \*et al.\* \[2010a\]](#) ont calculé des mesures dendrométriques, comme la taille et la largeur des branches et des feuilles, à partir de nuages de points obtenus par stéréorestitution, ouvrant la voie à de nombreuses possibilités d'exploitation de la Réalité Terrain Étendue (RTE).

En définissant clairement les besoins exigeants de la communauté des botanistes pour la cartographie de la dynamique de la végétation et en y cherchant à y répondre, nous avons tenté de poser les bases d'un système performant et adaptable. Les pistes de recherche qui s'ouvrent devant nous et dont la portée s'étend bien au delà de la biologie montre l'étendue des possibilités qui restent encore à découvrir.



# Glossaire

**aéromodèle** Copie d'un aéronef\* volant à une échelle réduite , pilotée depuis le sol avec une télécommande. L'aéromodélisme est une pratique de loisir qui consiste à construire et à piloter ces modèles réduits. 43, 48, 50, 51, 54–57, 65, 66, 69, 75, 100, 111, 118, 125, 128, 133, 171, 173, 175, 186

**aéronef** L'appellation d'aéronef recouvre tous les appareils capables de se diriger dans les airs[[CNRTL](#)]. Certains utilisent aussi l'expression *aéronef inhabité* comme synonyme du terme drone\*. 35, 44, 48, 49, 115, 181–183, 185–189, 191

**AHRS** Attitude and Heading Reference System. Acronyme anglophone désignant un capteur fournissant une information de cap et d'orientation dans l'espace. Il désigne les systèmes complets composés d'accéléromètres, de gyroscopes (comme les centrales inertielles\*) ainsi que de magnétomètres qui fournissent l'information de cap. 182

**altimètre barométrique** L'altimètre barométrique est un capteur qui mesure le poids de la colonne d'air située au-dessus de lui à l'aide d'un capteur de pression. Grâce à une formule théorique donnée par l'[OACI \[1964\]](#), on peut en déduire l'altitude\* au dessus du géoïde\*. 70, 71, 73, 74, 77, 138, 157

**altitude** Hauteur d'un lieu ou d'un engin au dessus du géoïde\*. C'est l'une des trois coordonnées géographiques\* utilisées pour géolocaliser\* des objets par rapport à la surface terrestre. 23, 40–42, 44, 45, 51, 57, 59, 61, 63, 65, 70, 71, 73–75, 78, 80, 83, 108, 111, 135–137, 144, 154, 156, 157, 181, 183–185, 188, 190

**angle d'Euler** Angle formé par un système relativement au référentiel Est-Nord-Haut du plan local tangent\*. On distingue le roulis (gauche/droite), le tangage (avant/arrière) et le lacet (autour de la verticale, par rapport au nord), comme l'illustre la figure 2.24 p. 67. 66–69, 181

**arbrisseau** Aussi appelés ligneux bas\*, les arbrisseaux sont des plantes vivaces, ramifiées dès la base et de petite hauteur. Ils ne possèdent pas de tronc principal distinct et ces troncs font généralement moins de cinq centimètres. Le noisetier ou les bruyères\* sont des exemples d'arbrisseaux. 4, 9, 10, 18, 19, 24, 28, 152, 153, 155, 160, 162, 168, 169, 182, 186

**attitude** On parle de l'attitude d'un aéronef\* comme étant son orientation dans l'espace. Cette orientation peut être donnée par exemple grâce aux angles d'Euler\* ou par une matrice d'orientation. 48, 49, 69, 73, 97

- biodiversité** La biodiversité recouvre l'ensemble des milieux naturels et des formes de vie (plantes, animaux, champignons, bactéries, virus. . .) ainsi que toutes les relations et interactions qui existent, d'une part, entre les organismes vivants eux-mêmes, et d'autre part, entre ces organismes et leurs milieux de vie. C'est à la fois la diversité des milieux de vie, celle des espèces\* et celle des individus\* au sein de chaque espèces. [[Biodiversité 2010](#)]. 2, 5, 30
- biomasse** Ensemble de la matière vivante dans une aire donnée. La biomasse est généralement calculée en volume ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) ou en masse ( $t \cdot ha^{-1}$ ). 3, 187
- bruyère cendrée** Arbrisseau\* de la famille des bruyères. Pour une description complète, voir l'annexe Floristique, p. 226. 28, 152, 164, 167, 181
- bruyère des marais** Arbrisseau\* de la famille des bruyères. Pour une description complète, voir l'annexe Floristique, p. 226. 152, 167
- callune** Arbrisseau\* de la famille des bruyères. Pour une description complète, voir l'annexe Floristique, p. 225. 8, 9, 28, 29, 152, 164, 167
- CCD** Charge-Coupled Device ou Dispositif à Transfert de Charge. Capteur électronique photosensible. Ce sont les premiers capteurs optiques numériques et encore aujourd'hui les plus utilisés. Ils sont plus sensibles que les CMOS\* mais sont aussi plus chers, car leur technologie nécessite un usinage spécifique. 35–37, 57, 183, 187–189
- centrale inertielle** Les centrales inertielles, désormais nommées AHRS\* par les anglophones, sont des capteurs permettant de déterminer l'orientation dans l'espace d'un système à partir du champ de pesanteur terrestre (grâce à des accéléromètres) et de la mesure de l'inertie du système (grâce à des gyroscopes). L'adjonction récente de magnétomètres permet d'ajouter l'information de cap par rapport au nord magnétique et explique le néologisme anglophone qui n'a pour l'instant pas d'équivalent en français. 35, 49, 66, 68, 69, 71, 73, 77, 97, 99, 119, 124, 137, 181, 185
- charge utile** La charge utile d'un aéronef\* consiste en la quantité de matériel dédié à la mission que celui-ci peut emporter en plus de son propre poids. La source d'énergie (carburant ou batterie) n'est ici pas comptabilisée dans la charge utile. Par extension, on utilise aussi ce terme pour parler du système dédié à la mission qui est embarqué par l'aéronef\*. 42, 49, 54, 55, 57, 77, 89, 97, 100, 101, 103, 107, 108, 112, 122, 124, 131, 132, 145, 148, 175, 191
- classification** La classification est l'action de répartir des objets au sein de groupes homogènes appelés classes. En biologie, on cherche à ranger les individus\* parmi leurs pairs selon une similarité de forme (classification populaire), de propriétés (classification phénotypique) ou de parenté génétique (classification phylogénique)[[Stuessy, 2009](#)]. Leur degré de similarité définit alors leur appartenance à différents ensembles imbriqués : classes, ordres, familles, genres et espèces\*. 2, 8, 10, 17, 18, 21, 22, 30, 44, 45, 51, 159, 167, 169, 184
- classification supervisée** En traitement d'image, on cherche à identifier des objets, ou des pixels, en les regroupant en classes. La mesure de similarité peut-être effectuée à partir de la couleur, de la signature spectrale\*, de la forme ou de la texture\* de l'objet.

Si cette classification est basée sur la différences des objets entre eux et sans données extérieures, la classification est dite non-supervisée. Si l'on utilise des connaissances a priori sur les propriétés des objets (leur couleur ou leur forme théorique), la classification est dite supervisée. A posteriori, la vérification de la qualité de la classification peut-être faite par comparaison avec la réalité terrain\*. 17, 168, 169

**CMOS** Complementary Metal Oxide Semiconductor : composant électronique de technologie similaire à celle des processeurs d'ordinateur. Les capteurs photosensibles CMOS sont moins chers et plus rapides que les CCD\* mais sont aussi moins sensibles à la lumière. 35, 57, 128, 182, 187–189

**coordonnée géographique** Coordonnée permettant de positionner un objet sur une carte ou sur la surface terrestre. L'ensemble des coordonnées géographiques est composé de la longitude — angle formé avec le méridien de référence —, de la latitude — angle formé avec l'équateur — et de l'altitude\* — hauteur au dessus du géoïde\* c'est-à-dire du niveau moyen des mers. On trouvera une illustration avec la figure 2.23 p. 65. 11, 48, 75, 133, 135, 137, 181, 184, 188

**DGA** Direction Générale de l'Armement. vii, 92, 173, 219

**DIREN** Direction Régionale de l'Environnement. 7

**donnée raster** Donnée sous la forme d'une grille de mesure bidirectionnelle. On les utilise pour représenter dans un environnement numérique des phénomènes continus comme la température d'une pièce ou une image optique. 13, 15

**dpi** Dot per inch : nombre de points d'encre par pouce. Résolution d'une image lors de l'impression sur un format papier. 26

**drone** Aéronef\* volant inhabité, généralement automatisé pour réaliser des missions répétitives ou dangereuses pour l'homme. Les anglophones parlent de UAV\* ou de UAS\*. 43–45, 47–50, 53, 55, 61, 63, 77, 97, 99, 100, 118, 122, 124, 125, 127–129, 133–135, 137, 143, 146, 148, 154, 155, 159, 173, 175, 181, 189–191, 220

**échelle** Héritée de la cartographie, la notion d'échelle peut être définie comme le rapport entre la taille de l'objet réel et celle de sa représentation : sur une carte à l'échelle 1 :20000, un centimètre de distance mesuré correspond à 200 mètres sur le terrain. 3, 5, 6, 9–12, 15–19, 23–30, 189

**écosystème** Selon le [Rapport de l'ONU sur l'évaluation des écosystèmes pour le Millénaire](#), un écosystème est un « complexe dynamique composé de plantes, d'animaux, de micro-organismes et de la nature morte environnante agissant en interaction en tant qu'unité fonctionnelle ». 6, 30

**effet de sol** L'effet de sol apparaît lorsqu'un aéronef\* se rapproche du sol et que l'air se retrouve comprimé localement. Cette densité augmente la portance de l'appareil mais est également une source d'instabilité. 69, 118

**ellipsoïde** Surface mathématique simple que l'on utilise pour approximer la surface terrestre et particulièrement le géoïde\*. Il existe des ellipsoïdes de référence qui approximent au mieux chaque partie du globe et d'autres qui cherchent à minimiser l'erreur globale comme le GRS80 qui est utilisé par les récepteurs GPS\*. 137, 184

- empreinte au sol** L'empreinte au sol d'une image peut être vue comme la projection au sol de la surface imagée par le capteur. 134, 135, 138, 139, 160, 184, 185, 188
- ENSG** École Nationale des Sciences Géographiques. 2
- ESIEA** École Supérieure d'Informatique Électronique et Automatique. vii, viii, 2, 143, 146, 173
- espèce** Le **CNRTL** définit la notion d'espèce comme un ensemble d'êtres vivants possédant des caractères anatomiques, morphologiques et physiologiques communs, qui reproduisent entre eux des êtres semblables et également féconds. 2, 5–10, 12, 16–19, 21–24, 27–30, 34, 88, 152, 153, 164, 167, 182, 184, 185
- exposition** Durée durant laquelle l'ouverture\* du diaphragme de l'appareil photographique laisse entrer la lumière et par conséquent durant laquelle l'image optique s'imprime sur le capteur. 78, 80–83, 184, 191
- fauchée** La fauchée représente la largeur du champ de vision du capteur. On peut aussi la voir comme la largeur de l'empreinte au sol\* de l'image. On trouvera une illustration de la fauchée à la figure 1.12 p. 25. 25, 26, 31, 34, 35, 61, 77, 79, 84, 85, 157, 158, 161, 184, 190
- floristique** La floristique est l'étude et la description des espèces végétales selon le port de la plante, la couleur, l'orientation, les points d'insertion, la dimension et la forme des branches, feuilles et fleurs. La floristique permet une classification\* précise des espèces\* végétales par les botanistes. 9, 10, 28–30
- flou de filé** Flou produit par le mouvement de l'objectif pendant l'exposition\*, illustré à la figure 2.35 p. 80. 80, 83, 89, 102, 108, 159, 160, 164, 191
- focale** La distance focale ou focale correspond à la distance entre le fond de chambre et le centre optique, où converge l'ensemble des rayons lumineux. Cette distance influence fortement la géométrie d'acquisition de l'image et en particulier le champ de vision, la taille de l'échantillon au sol\* et la fauchée\*. 25, 35, 77, 84–86, 89, 113, 184
- focale équivalente** L'information donnée par la focale\* sur le champ de vision de l'appareil n'ayant de sens que par rapport à la largeur du fond de chambre, et celle-ci étant devenue variable depuis le passage au capteur numérique, on calcule la focale équivalente qui correspond à celle qu'on aurait eue avec une pellicule argentique standard de 35mm. Pour donner un ordre de comparaison, une focale équivalente de 28 mm est considérée comme un grand angle, alors qu'une focale équivalente de 50 mm reprend approximativement la vision humaine. 26, 85, 110
- géoïde** Équipotentielle zéro de pesanteur, elle se prolonge généralement en mer par le concept de niveau moyen des mers. Le géoïde sert de référence pour la notion d'altitude\* malgré le fait qu'il n'est pas représentable sous une forme mathématique simple comme un ellipsoïde\*. 70, 137, 181, 183
- géolocalisation** La géolocalisation consiste en l'attribution d'une position spatiale à une information ou à un objet. Généralement ces coordonnées seront dans un référentiel connu, comme le repère des coordonnées géographiques\*. La géolocalisation se fait

- généralement par des mesures de distances relativement à un groupe d'objets connus : un point de référence topométrique ou des émetteurs radio dont on connaît la position (cf. GPS\*). 11, 29, 36, 38, 51, 57, 65, 66, 77, 88, 119, 124, 133, 135, 144, 148, 153, 157, 158, 164–167, 176, 181, 185, 188
- géoréférencement direct** Méthode de géolocalisation\* qui calcule la géométrie d'acquisition à partir de capteurs internes, comme les récepteurs GPS\* et les centrales inertielle\*, et en déduit la position spatiale de l'empreinte au sol\* des images. 52, 66, 77, 89, 101, 135, 148, 160, 171, 175, 176
- GPS** Global Positioning System. Acronyme anglophone désignant le système de positionnement par triangulation à l'aide d'une constellation de satellites.. 74, 75, 137, 185, 188
- GSD** Ground Sample Distance. Acronyme anglophone désignant la taille de l'échantillon au sol\*, soit la taille de la surface au sol imagée par un photosite\*. 24, 27–29, 161, 162, 189
- hauteur sol** Distance entre la surface du sol et l'aéronef\*. À ne pas confondre avec l'altitude\* qui est donnée par rapport au niveau moyen des mers. La différence entre l'altitude\* et la hauteur sol est donnée par le relief\*. 25, 35, 40, 56, 63, 69, 70, 73, 74, 77, 84–86, 97, 108, 132, 138, 143, 155–157, 174, 176, 188
- herbacée** Les herbacées se définissent en opposition aux plantes ligneuses comme les arbres ou les ligneux bas\* qui produisent du bois. La molinie\* ou les céréales sont des exemples d'herbacées. 4, 9, 10, 18, 152, 186, 187
- houppier** Le houppier est la partie visible d'un arbre lorsqu'on le regarde vu du ciel. L'ensemble des houppiers forme la voûte de la forêt. 34
- HUD** Head-Up Display. Acronyme anglophone pour les viseurs tête haute qui permettent d'afficher des informations de vol en superposition à la vue du pilote. 128
- IFN** Inventaire Forestier National. 17
- IGN** Institut Géographique National. 37, 164
- image multispectrale** Les images multispectrales acquièrent des informations radiométriques au-delà du spectre visible accessible à l'œil humain ou aux appareils photographiques « classiques ». La plupart des satellites optiques et des capteurs d'imagerie aérienne peuvent être considérés comme des capteurs multispectraux. Les capteurs hyperspectraux se distinguent par une mesure continue de la signature spectrale\* : leurs bandes spectrales sont juxtaposées. 30, 31, 35, 37, 38, 40, 56, 63, 64, 89, 91, 102–105, 175, 176
- individu** Spécimen vivant appartenant à une espèce\* donnée ; être organisé, vivant d'une existence propre et qui ne peut être divisé sans être détruit.[CNRTL]. 2–6, 8–12, 15, 16, 22, 24, 28–30, 38, 152, 153, 182, 189
- interpolation** Intercaler des valeurs ou des termes intermédiaires dans une série de valeurs ou de termes connus[CNRTL]. L'interpolation est une méthode classique en informatique lorsque l'on cherche à approximer une information continue par une série de

points. On utilise alors une fonction mathématique, appelée fonction d'interpolation, qui cherche à approcher au mieux le comportement de l'objet réel. 12, 13

**LiDAR** Construit sur l'acronyme anglophone « LIght Detection And Ranging », les capteurs LIDAR sont basés sur le principe du télémètre\* laser mais ajoutent la notion de balayage grâce à l'adjonction d'un miroir tournant. De ce fait, ils sont capables d'acquérir plusieurs centaines de mesures de distance par seconde et permettent la reconstruction de « nuages de points » permettant de retrouver le volume des objets ou le relief\* du terrain. 22, 37, 176, 190

**ligneux bas** Les plantes ligneuses sont des plantes qui produisent du bois, contrairement aux herbacées\*. On distingue les arbres des ligneux bas, que l'on nomme aussi arbrisseaux\*. 28, 152, 181, 185

**MEMS** MicroElectroMechanical Systems. Acronyme anglophone désignant des capteurs électroniques miniatures. 50, 68

**métadonnée** Étymologiquement : données au sujet des données. En informatique, les métadonnées sont des informations concernant les fichiers : auteur, date de modification... Les métadonnées EXIF sont des informations insérées par l'appareil photographique dans les fichiers images (JPEG ou TIFF) et contiennent, entre autres, la date et les paramètres de prise de vue. 113, 119, 124, 139, 142

**micro-drone** Les micro-drones sont des aéronefs\* inhabités dont la taille et le poids réduits les rapprochent des aéromodèles\*. Ils se distinguent de ces derniers par leur degré d'automatisation accru ce qui leur permet de remplir des missions professionnelles. Ce ne sont généralement pas des copies réduites de modèles plus grands mais des appareils conçus pour fonctionner à cette échelle. 4, 46, 47, 51–57, 59, 63, 65, 66, 69, 71, 75, 88, 91, 92, 100–103, 108, 125, 128, 129, 132, 134, 138, 143, 145, 147, 151, 153, 167, 171, 173, 175, 176, 219

**MNHN** Muséum national d'Histoire naturelle. 1, 2, 8, 9, 12, 22, 24, 28, 29, 31, 102, 151, 154, 173, 175

**MNT** Modèle Numérique de Terrain. Surface 3D qui cherche à approximer l'information de relief\* du terrain. On parle aussi de Modèle Numérique de Surface (MNS) lorsque la surface inclut les objets situés sur le terrain, comme les bâtiments et la végétation. 37, 63, 138, 153

**molinie** Herbacée\*. Pour une description complète, voir l'annexe Floristique, p. 227. 152, 167, 185

**MSG** Météosat Seconde Génération. Satellite météorologique géostationnaire. 11

**multi-caméras** On parle de système multi-caméras lorsque l'on utilise plusieurs caméras pour faire l'acquisition de la même scène sous différents angles. Le déclenchement des caméras est synchronisé afin de pouvoir considérer que la géométrie relative d'acquisition est constante. 4, 59, 60, 64, 77, 89, 91, 102, 103, 125, 126, 129, 143, 148, 151, 153, 167, 173, 175, 178, 191

- multi-rotors** Modèle d'aéronef\* à voilure tournante composé d'une structure en croix ou en étoile, où chaque branche supporte un ou deux rotors responsables de la sustentation et de l'orientation. On trouve des modèles à trois, quatre, six ou huit rotors. 41, 43, 49, 51, 91, 92, 96, 97, 118, 119, 191
- NDVI** Indice de végétation normalisé. Formule mathématique permettant d'estimer la fraction végétale d'un pixel à partir de la signature spectrale\* caractéristique de la végétation chlorophyllienne. 17
- ONERA** Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales. vii, 92, 173, 219
- ONF** Office National des Forêts. 7, 151–154, 164
- ontologie** « Une ontologie informatique est une représentation de propriétés générales de ce qui existe dans un formalisme supportant un traitement rationnel. C'est le résultat d'une formulation exhaustive et rigoureuse de la conceptualisation d'un domaine. Cette conceptualisation est souvent qualifiée de partielle car, en l'état de l'art, il est illusoire de croire pouvoir capturer dans un formalisme toute la complexité d'un domaine[[Interstices.info](#)] ». En cartographie, c'est l'ensemble des objets que l'on désire représenter sur la carte et leur relations. 17
- optic flow** Capteur de position basé sur l'analyse en temps réel du mouvement dans un flux vidéo. 77
- ouverture** L'ouverture\* correspond à la taille de la pupille laissant passer la lumière. Comme son effet dépend de la distance focale, elle est généralement donnée comme un rapport entre la distance focale et le diamètre de la pupille. Ce paramètre modifie la quantité de lumière arrivant sur le capteur mais aussi la profondeur de champ, c'est-à-dire la zone autour du focus dans laquelle les objets apparaissent nets. Une plus grande ouverture tend malheureusement à réduire la profondeur de champ. 80, 83, 184, 187, 191
- panchromatique** Un capteur est dit panchromatique s'il est sensible à toutes les couleurs visibles du spectre[[CNRTL](#)]. Les capteurs numériques CCD\* et CMOS\* sont naturellement panchromatiques et doivent être munis de filtres pour distinguer les différentes longueurs d'ondes et retranscrire l'information de couleur ou de signature spectrale\*. 36–38, 40, 82
- paramètre de surface** Paramètres mesurables à la surface de la terre. La télédétection\*, par ses méthodes d'acquisition à distance, procure généralement des cartes de paramètres de surface qui sont ensuite utilisées pour l'analyse des environnements et des individus. On peut citer par exemple : l'occupation des sols, la biomasse\*, la température de surface, la rugosité\* ou l'humidité. 1, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 30, 34, 63, 66, 88, 89, 91, 102, 138, 149, 153, 164, 167, 169–171, 173, 175, 176, 178, 188–190
- petite oseille** Herbacée\*. Pour une description complète, voir l'annexe Floristique, p. 227. 10, 152, 167
- phénologie** Science qui étudie l'influence des variations climatiques sur certains phénomènes périodiques de la vie des plantes (germination, floraison...) et des animaux (migration, hibernation...)[[CNRTL](#)]. 10, 16, 23, 24, 29, 34, 39, 42, 88, 164, 178



- photogrammétrie** La photogrammétrie\* cherche à retrouver les dimensions et les volumes des objets à partir de clichés photographiques montrant les perspectives de ces objets.[CNRTL]. 4, 13, 15, 63, 73, 78, 102, 104, 107, 159, 164, 169, 188, 189
- photosite** Un photosite est un capteur photosensible élémentaire dont l'assemblage forme le capteur numérique, qui peut être de type CCD\* ou CMOS\*. En première approximation on peut considérer que chaque photosite correspondra à un pixel dans l'image. 25, 27, 35, 58, 77, 82, 185, 189
- plan local tangent** Le plan local tangent ou repère Est-Nord-Haut, illustré à la figure 3.37 p. 136, est un repère cartésien dont le plan formé par les axes Nord et Est approxime la surface terrestre par un plan tangent au point d'origine du repère et dont l'axe Haut est parallèle à la verticale. 66–69, 136, 137, 181
- point d'appariement** Points identifiables dans plusieurs images et qui correspondent au même objet dans le monde réel. Les points d'appariement permettent, par des méthodes d'optimisation de retrouver la géométrie relative des images entre elles. Combinés aux points d'appui\*, ils permettent une meilleure géolocalisation\*. 78, 109, 135, 158, 169
- point d'appui** Points de l'image dont on connaît aussi la position dans l'espace réel. Les points d'appuis permettent, par des méthodes d'optimisation, de retrouver la géométrie de la scène lors de l'acquisition, ce qui permet d'attribuer par la suite des coordonnées géographiques\* à tous les pixels de l'image. 66, 135, 158, 171, 188
- profil** Mesures faites le long d'une ligne et représentant la variation en « coupe » de l'objet mesuré. 11–14
- radar** Basé sur l'acronyme anglophone « RAdio Detection And Ranging », les radars sont des systèmes de télédétection\* actifs, c'est-à-dire qu'ils produisent un signal et déduisent de la rétro-diffusion de ce signal, des informations de distance et de vitesse des objets ou des paramètres de surface\*. 1, 15, 21, 22, 31, 178, 190, 191
- réalité terrain** On parle de réalité terrain ou de vérité terrain pour les mesures effectuées lors des relevés terrain\*, validées en présence du sujet d'étude par l'expertise du spécialiste, et qui servent à évaluer les données de télédétection\*. 3, 11, 13, 15, 16, 173, 183, 189
- récepteur GPS** Capteur qui triangule sa position en mesurant le temps de parcours des messages envoyés par la constellation GPS\*. Son fonctionnement est illustré par la figure 2.32 p. 76. 11, 35, 66, 74, 75, 77, 99, 119, 124, 133, 135–137, 153, 160, 183, 185, 188
- relevé terrain** On parle ici de relevé terrain pour toutes les méthodes d'acquisition de paramètres de surface\* depuis le sol avec la variété d'outils à disposition des chercheurs : appareil photographique, inclinomètre, rugosimètre, spectromètre... et dont les données sont généralement géolocalisées\*, soit sur une grille dont le pas est connu, soit par l'utilisation d'un récepteur GPS\*. 3, 4, 9, 11, 15, 16, 152, 154, 165, 173, 188, 189
- relief** Forme caractéristique de la surface du sol[CNRTL]. Le relief influence fortement les prises de vues aériennes et particulièrement l'empreinte au sol\* des images. Il peut aussi être vu comme la différence entre l'altitude\* et la hauteur sol\* de l'aéronef\*. Le

- relief est enfin un des paramètres de surface\* que l'on cherche à mesurer par télédétection\* ou lors des relevés terrain\*. 73, 138, 185, 186
- résolution** La résolution spatiale d'un capteur ou d'une image, donnée en nombre de pixels, correspond au nombre de photosites\* dont est composé le capteur CCD\* ou CMOS\*. Elle ne doit pas être confondue avec la taille de l'échantillon au sol\* qui permet de déterminer la taille du plus petit objet dans la scène, bien que l'erreur soit très fréquente. 20–22, 24–30, 34–37, 39, 40, 47, 56–59, 61, 62, 77, 85, 108, 111, 142, 190
- RTE** Réalité Terrain Étendue. Méthodologie permettant l'acquisition de données de réalité terrain\*, comme les paramètres de surface\* biophysiques et géophysiques à l'échelle\* des individus\*, en utilisant les techniques avancées d'imagerie. Elle mêle les avantages des pratiques de relevés terrain\* et de télédétection\* : absence de doute lors de l'analyse des données, aspect quantitatif des paramètres biophysiques et géophysiques observés, souplesse d'adaptation aux conditions extérieures, capacité à capturer un instantané de la scène au moment de l'acquisition — permettant une analyse différée ou comparée —, automatisation des traitements photogrammétriques\* et simplification des processus autorisant une réduction des coûts humains et une augmentation des surfaces étudiées. 3, 4, 11, 15, 16, 77, 88, 91, 92, 129, 149, 160, 178, 180
- rugosité** La rugosité des sols peut être vue comme le caractère non-lisse ou non-rectiligne de la surface du sol. C'est un paramètre de surface\* géophysique essentiel car il influence la rétro-diffusion des signaux électromagnétiques, comme les ondes radars. 4, 10, 12–14, 22, 187
- sensibilité** La sensibilité du capteur définit sa capacité à réagir à une faible quantité de lumière. Plus la sensibilité est grande et plus le rapport signal sur bruit du capteur est petit, générant des artefacts dans l'image. 80, 82, 83
- SIG** Système d'Information Géographique. 65, 137, 164
- signature spectrale** En traitement d'image, la signature spectrale d'un objet correspond à son émission électromagnétique caractéristique en fonction de la longueur d'onde. Chaque matériaux ayant une signature spectrale sensiblement différente, cette propriété est généralement utilisée pour l'analyse d'images. 3, 11, 17, 18, 20, 22, 24, 88, 102, 182, 185, 187
- station sol** La station sol est un élément essentiel des systèmes de drones\* (UAS\*) qui a pour rôle de gérer le flux de données continu entre le drone et les opérateurs au sol. Elle est généralement composée d'un ordinateur portable, d'une liaison de données et d'une suite logicielle qui permettent de suivre ou de contrôler le vol de l'aéronef\*. 77, 89, 97, 99–101, 124, 125, 128–132, 143, 145, 148, 154, 155, 157, 173, 191
- stéréorestitution** Technique consistant à utiliser des capteurs pour acquérir, à l'image des yeux et du cerveau humain, la même scène sous deux points de vue et à reconstituer la notion de distance par les différences perçues entre les deux images. 22, 79, 109, 167, 169–171, 174, 175, 178–180
- taille de l'échantillon au sol** La taille de l'échantillon au sol, appelée GSD\* par les anglophones, correspond à la taille de la surface vue par un photosite\* du capteur. Souvent

appelée à tort *résolution au sol* du capteur car elle dépend de la résolution\* en pixel du capteur et de la fauchée\*, elle peut servir à estimer la taille du plus petit objet distinguable dans l'image qui vaut en général entre 5 et 10 fois la taille de l'échantillon au sol. 18, 24–29, 34, 35, 39, 40, 56–58, 77, 79, 80, 83, 85–89, 102, 111, 154–157, 160, 164, 169, 174, 184, 185, 189, 190

**télé-détection** La télé-détection désigne, dans son acceptation la plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. On fait souvent appel à des instruments tels que les appareils photographiques, LiDARs\*, radars\*, sonars, sismographes ou gravimètres. La télé-détection moderne intègre normalement des traitements numériques mais peut tout aussi bien utiliser des méthodes non numériques. Dans ce mémoire, on distingue la télé-détection spatiale\*, la télé-détection aéroportée\* et la télé-détection basse altitude\*. 2–4, 9, 11, 13, 15, 16, 23, 27, 31, 39, 58, 160, 173, 178, 187–190

**télé-détection aéroportée** La télé-détection\* aéroportée utilise des moyens de transport aériens classiques comme les avions et les hélicoptères pour transporter les différents capteurs servant à déterminer les caractéristiques des paramètres de surface\* de la zone survolée. Grâce à une hauteur de vol variant entre 500 mètres et 3000 mètres, la télé-détection aéroportée permet un compromis entre la taille de l'échantillon au sol\* (détail) et la fauchée\* des images acquises et une plus grande souplesse opérationnelle que la télé-détection spatiale\* (plus de choix dans la date et l'heure du survol). Son principal défaut se situe dans le coût élevé des missions d'acquisition. 9, 31, 34, 38, 40, 55, 63, 89, 103, 158, 190

**télé-détection basse altitude** La télé-détection\* basse altitude rassemble l'ensemble des moyens techniques permettant de prendre des clichés depuis le ciel à une altitude\* inférieure à 150 mètres, afin de déterminer les caractéristiques des paramètres de surface\* de la zone étudiée. Elle englobe la prise de vue par ballon captif, par cerf-volant, par dirigeable, par modèle réduit ou par drone\*. Généralement lancés depuis le site même que l'on désire observer, les outils de la télé-détection basse altitude s'adaptent plus facilement que la télé-détection spatiale\* ou la télé-détection aéroportée\* aux contraintes de temps et de lieu des utilisateurs mais ne peuvent couvrir d'aussi grandes étendues de terrain. 4, 16, 31, 41, 42, 51, 52, 54, 57, 86, 88, 91, 100, 102, 112, 129, 134, 137, 138, 148, 154, 157, 167, 169, 170, 173, 190

**télé-détection spatiale** La télé-détection\* spatiale cherche à déterminer les caractéristiques des paramètres de surface\* à partir de satellites situés dans la haute atmosphère et dans l'espace. La télé-détection spatiale se caractérise par une grande diversité de capteurs et une large fauchée\* mais souffre de fortes contraintes opérationnelles liées aux lois physiques qui régissent le mouvement des satellites. 3, 4, 9, 10, 31, 40, 63, 89, 158, 190

**télé-mètre** Instrument qui permet de mesurer la distance séparant un observateur d'un point éloigné par des procédés optiques, acoustiques ou radioélectriques[[CNRTL](#)]. 70, 71, 73, 74, 138, 186

**texture** En traitement d'image, la texture illustre la relation entre un pixel et son voisinage.

- La description de cette relation peut être exacte (cas de motifs périodiques) ou statistique (cas des images radar\* par exemple). L'analyse des textures est une composante essentielle de l'analyse d'images. 3, 169, 182
- tri-caméras** On parle de système tri-caméras pour un système multi-caméras\* composé de trois optiques. 102–105, 118, 127, 145, 148, 154, 155
- UAS** Unmanned Aerial System. Acronyme anglophone désignant l'ensemble du système de drones\* comprenant le véhicule, sa charge utile\* et sa station sol\*. 44, 97, 183, 189
- UAV** Unmanned Aerial Vehicle. Acronyme anglophone désignant les aéronefs\* inhabités, appelés drones\* en français. 44, 183
- vitesse d'obturation** La vitesse d'obturation détermine le temps d'ouverture\* du diaphragme de l'appareil photographique et donc l'exposition\* du capteur. Une vitesse d'obturation trop lente augmente le risque de flou de filé\*. 80, 83, 102
- VTOL** Vertical Take-Off and Landing. Acronyme anglophone décrivant les aéronefs\* à décollage vertical comme les hélicoptères, les multi-rotors\* et certains avions à propulseurs verticaux. 92
- ZNIEFF** Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique. Zones du territoire national où des éléments remarquables du patrimoine naturel ont été identifiés. Les ZNIEFF de type I sont de petites surfaces caractérisées par leur richesse écologique, celles de type II correspondent à de grands ensembles naturels homogènes. 7
- zone phytogéographique** Les zones biogéographiques sont un découpage spatial défini sur des critères de répartition géographique des espèces vivantes. Les zones phytogéographiques concernent en particulier la répartition géographique de la flore. 7, 9, 10, 12–14, 29, 151–153



# Bibliographie thématique

---

## Drones

---

### — Documentation générale —

- J.R. Martnez de DIOS, L. MERINO, A. OLLERO, L.M. RIBEIRO et X. VIEGAS : *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Berlin / Heidelberg, 2007a.
- H. EISENBEISS : A mini unmanned aerial vehicle (UAV) : system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W1), 2004.
- L.R. NEWCOME : *Unmanned Aviation : A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles*. AIAA (American Institute of Aeronautics & Ast, 2004.
- OFFICE OF THE SECRETARY OF DEFENSE : *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030*, 2005.
- K.P. VALAVANIS et M. KONTITSIS : *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, chapitre A Historical perspective on Unmanned Aerial Vehicle, pages 15–46. Springer, 2007.
- P. van BLYENBURGH : *Unmanned Aircraft Systems - The current situation*. EASA UAS Workshop, 2008.
- Peter van BLYENBURGH : UAS, Unmanned Aircraft Systems, The Global Perspective. Rapport technique, UVS International, 2009.
- Yves VANDEWALLE et Jean-Claude VIOLLET : Rapport d'information de MM. Yves Vandewalle et Jean-Claude Viollet déposé en application de l'article 145 du règlement, par la commission de la défense nationale et des forces armées, en conclusion des travaux d'une mission d'information sur les drones. Rapport technique, Assemblée Nationale, 2009.
- LA YOUNG, E.W. AIKEN, J.L. JOHNSON, R. DEMBLEWSKI, J. ANDREWS et J. KLEM : New concepts and perspectives on micro-rotorcraft and small autonomous rotary-wing vehicles. *In AIAA 20th Applied Aerodynamics Conference, St Louis, MO*, 2002.

## — Conception —

- E. ALTUG, J.P. OSTROWSKI et R. MAHONY : Control of a quadrotor helicopter using visual feedback. *In Proceedings- IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 72–77. Citeseer, 2002.
- Samir BOUABDALLAH et Roland SIEGWART : Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005*.
- Pedro CASTILLO, Roger LOZANO et Alejandro E. DZUL : *Modelling and Control of Mini-Flying Machines*. Springer, 2005.
- Austin JENSEN, Norman WILDMANN, YangQuan CHEN et Holger VOOS : In-situ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sensor calibration to improve automatic image orthorectification. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010, 2010*.
- A. NOTH : *Design of solar power airplanes for continuous flight*. Thèse de doctorat, ETH Zürich, 2008.
- P. POUNDS, R. MAHONY, P. HYNES et J. ROBERTS : Design of a four-rotor aerial robot. *In Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*, volume 27, page 29, 2002.
- David VISSIÈRE, Pierre-Jean BRISTEAU, Pierre MARTIN et Nicolas PETIT : Experimental autonomous flight of a small-scaled helicopter using accurate dynamics model and low-cost sensors. *In The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008*.

## — Applications —

- G. ASTUTI, D. LONGO, C. D. MELITA, G. MUSCATO et A. ORLANDO : Hil tuning of uav for exploration of risky environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(4):419–424, 2008.
- H. BENDEA, F. CHIABRANDO, F.G. TONOLO et D. MARENCHINO : Mapping of archaeological areas using a low-cost uav the augusta bagienorum test site. *In XXI International CIPA Symposium, 2007*.
- J.A.J. BERNI, P.J. ZARCO-TEJADA, L. SUÁREZ et E. FERERES : Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3):722–738, 2009.
- V.I. BINENKO, V.I. ANDREEV et R.V. IVAROV : Remote sensing of environmen on the base of the microaviation. *In International Symposium of Remote Sensing, 2005*.
- A. BOUVET, E. LANGLOIS, N. LAVAL et D. MAUDET : Drone d'Observation et De Détection en Milieu Urbain. Mémoire de D.E.A., ESTACA, 2008.

- Manuel CARBALLEDA et Christophe LEROUX : Gestion de missions de sécurité civile incluant un micro-uav : projet udrones. *In WISG'09 — Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale, Troyes, 2009.*
- J.R. Martínez de DIOS, L. MERINO, A. OLLERO, L.M. RIBEIRO et X. VIEGAS : *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles*, chapitre Multi-UAV Experiments : Application to Forest Fires, pages 207–228. Springer Berlin / Heidelberg, 2007b.
- François DERKX et Jean-Luc SORIN : Inspection des ouvrages d'art par drone. bilan et perspectives des travaux du lcpc. *LCPC - Bulletin des Ponts et Chaussées*, (273):39–56, December 2008.
- J. EVERAERTS : The use of unmanned aerial vehicles(uavs) for remote sensing and mapping. *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVII, pages 1187–1191, 2008.
- GJ GRENZDÖRFFER, A. ENGELB et B. TEICHERTC : The Photogrammetric Potential of Low-Cost UAVS in Forestry and Agriculture. *In The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, XXXVII. Part B*, volume 1, pages 1207–1213, 2008.
- I.K. JUNG et S. LACROIX : High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery. *In International Conference of Computer Vision*, 2003a.
- P.H. LIN et C.S. LEE : Fly into typhoon haiyan with uav aerosonde. *In 12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, 2003.
- Z. LIN : Uav for mapping - low altitude photogrammetry survey. *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVII, pages 1183–1186, 2008.
- N. METNI et T. HAMEL : A uav for bridge inspection : Visual servoing control law with orientation limits. *Automation in construction*, 17(1):3–10, 2007.
- R.R. MURPHY, S. TADOKORO, D. NARDI, A. JACOFF, P. FIORINI, H. CHOSSET et A.M. ERKMEN : *Springer Handbook of Robotics*, chapitre Search and rescue robotics, pages 1151–1173. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- S. NEBIKERA, A. ANNENA, M. SCHERRERB et D. OESCHC : A light-weight multispectral sensor for micro uav oppportunities for very high resolution airborne remote sensing. *In International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008.
- K. RO, J.-S. OH et L. DONG : Lessons learned : Application of small uav for urban highway traffic monitoring. *In 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2007.
- A. SATO : Civil UAV Applications in Japan and Related Safety & Certification, 2003.
- P.J. ZARCO-TEJADA, JAJ BERNI, L. SUÁREZ et E. FERERES : A new era in remote sensing of crops with unmanned robots. *SPIE Newsroom*, 2008.



Y. ZHANG : PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF LOW ALTITUDE IMAGE SEQUENCES BY UNMANNED AIRSHIP. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 2008.

— **Législation** —

Michel ASECIO : L'utilisation civile des drones : problèmes techniques, opérationnels et juridiques. Rapport technique, Fondation pour la Recherche Stratégique, 2008.

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY : *Policy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) certification*. European Aviation Safety Agency, 2005.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION : *Instrument Flying Handbook*, 2007. FAA-H-8083-15A.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION : *Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations and Policies*, 2009.

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 10 octobre 1957 relatif au survol des agglomérations et des rassemblements de personnes ou d'animaux, 1957.

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 1er août 2007 relatif aux conditions d'insertion et d'évolution dans l'espace aérien des aéronefs civils ou de la défense non habités, 2007a. NOR : DEVA0755921A.

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 21 mars 2007 relatif aux aéronefs non habités qui évoluent en vue directe de leurs opérateurs, 2007b. NOR : EQUA0700564A.

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 21 décembre 2009 relatif aux conditions d'insertion et d'évolution dans l'espace aérien des aéronefs civils ou de la défense non habités, 2009. NOR : DEVA0927039A.

---

## Téledétection

---

— **Documentation générale** —

R. COMER, G. KINN, D. LIGHT et C. MONDELLO : Talking digital. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(12):1139–1142, 1998.

J.R. JENSEN : *Remote sensing of the environment : an earth resource perspective*. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall, 2007.

— **Basse altitude** —

D. WUNDRAM et J. LÖFFLER : Kite Aerial Photography in High Mountain Ecosystem Research. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Band43, S*, pages 15–22, 2007.

## — Vérité Terrain —

HDV BÖHM et F. SIEGERT : Remote Sensing verification by Aerial Surveys and Ground Truth Campaigns 1997 and 1998 in Central Kalimantan, Indonesia-Peat Swamp Forest, Mega-Rice-Project and Fires. *In Workshop on Tropical Forest and Remote Sensing, the*, 1999.

Y. MINEKAWA, T. EDANAGA, K. UTO, Y. KOSUGI et K. ODA : Development of a low-altitude hyperspectral imaging system for measuring ground truth in agricultural fields. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference*, pages 2052–2055. IEEE, 2007.

J. NOGAMI, D. PHUON et M. KUSANAGI : Field Observation using flying platforms for remote sensing education. *In Asian Conference of Remote Sensing*, 2002.

## — Biomasse —

RA HOUGHTON, D. BUTMAN, AG BUNN, ON KRANKINA, P. SCHLESINGER et TA STONE : Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories. *Environmental Research Letters*, 2:045032, 2007.

D. LU : The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7):1297–1328, 2006.

C. MILESI, A. SAMANTA, H. HASHIMOTO, K.K. KUMAR, S. GANGULY, P.S. THENKABAIL, A.N. SRIVASTAVA, R.R. NEMANI et R.B. MYNENI : Decadal Variations in NDVI and Food Production in India. *Geophysical Research Letters*, 37:L05401, 2010.

P. MUUKKONEN et J. HEISKANEN : Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data : A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107(4):617–624, 2007.

## — Classification de la végétation —

K. BERGEN, S. GOETZ, R. DUBAYAH, G. HENEGBRY, M. IMHOFF, R. NELSON, G. PARKER et V. RADELOFF : Remote sensing of vegetation 3D structure for biodiversity and habitat : review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research*, 114(null), 2009.

J. BOSSU : *Segmentation d'images pour la localisation d'adventices. Application à la réalisation d'un système de vision pour une pulvérisation spécifique en temps réel*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, soutenue le 4 décembre 2007, Université de Bourgogne, 2007.

Jean-Guy BOUREAU : *Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges - Application aux milieux forestier et naturels*. Inventaire forestier national, 2008.

TF BURKS, SA SHEARER, JR HEATH et KD DONOHUE : Evaluation of neural-network classifiers for weed species discrimination. *Biosystems Engineering*, 91(3):293–304, 2005.

B. DE MEZZO, G. RABATEL et C. FIORIO : Weed leaf recognition in complex natural scenes by model-guided edge pairing. *Precision Agriculture*, pages 141–147.

- C. GÉE et L. ASSÉMAT : Techniques innovantes pour le contrôle des mauvaises herbes. *In Vingtième conférence du Columa - Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes*. AFPP, 2007.
- IFN : *La cartographie forestière - version 2 - de l'Inventaire forestier national*, Mai 2010a.
- IFN : *L'image proche infrarouge : une information essentielle*. *L'IF*, 2010b.
- Troy Arnold JENSEN : *Using a Remotely Controlled Platform to Acquire Low-Altitude Imagery for Grain Crop Mapping*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, soutenue en Novembre 2008, University of Southern Queensland, 2008.
- D. LU, M. BATISTELLA, E.E. de MIRANDA et E. MORAN : A Comparative Study of Landsat TM and SPOT HRG Images for Vegetation Classification in the Brazilian Amazon. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 74(3):311, 2008.
- R.E. MCROBERTS et E.O. TOMPPA : Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 110(4):412–419, 2007.
- M.D. NELSON, K.T. WARD et M.E. BAUER : Forest-Cover-Type Separation Using RADARSAT-1 Synthetic Aperture Radar Imagery. *Notes*, 2009.
- J-N. PAOLI, C. GÉE, J-P. GUILLEMIN, F. TRUCHETET et J-B. VIOIX : Dispositifs d'imagerie multi-spectrale pour la détection et le contrôle des adventices. *In Vingtième conférence du Columa - Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes*. AFPP, 2007.
- A. PIRON, V. LEEMANS, O. KLEYNEN et M.F. DESTAIN : Determination of plant height for weed detection in stereoscopic images. 2008.
- L.J. QUACKENBUSH, Y. KE et C.N. KROLL : Investigating New Advances in Forest Species Classification : Establishing a Baseline. *In Proceedings of 2006 ASPRS Annual Conference*, pages 1–5, 2006.
- F. ROVIRA-MÁS, Q. ZHANG et JF REID : Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoimages. *Biosystems engineering*, 90(3):251–259, 2005.
- DC SLAUGHTER, DK GILES et D. DOWNEY : Autonomous robotic weed control systems : A review. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1):63–78, 2008.
- G. SOHN et I. DOWMAN : Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(1):43–63, 2007.
- JB VIOIX : *Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2004.
- E. VRINDTS : *Automatic Weed Detection with Optical Techniques as a Basis for Site-Specific Herbicide Application*. Thèse de doctorat, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.

## — Phénologie —

- N. DELBART, T. LE TOAN, L. KERGOAT et V. FEDOTOVA : Remote sensing of spring phenology in boreal regions : A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sensing of Environment*, 101(1):52–62, 2006.
- J.T. MORISETTE, A.D. RICHARDSON, A.K. KNAPP, J.I. FISHER, E.A. GRAHAM, J. ABATZOGLOU, B.E. WILSON, D.D. BRESHEARS, G.M. HENEGBRY, J.M. HANES *et al.* : Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change : phenological research in the 21st century. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(5):253–260, 2008.
- B.C. REED, M.D. SCHWARTZ et X. XIAO : Remote sensing phenology. *Phenology of Ecosystem Processes*, pages 231–246, 2009.
- A.D. RICHARDSON, B.H. BRASWELL, D.Y. HOLLINGER, J.P. JENKINGS, S.V. OLLINGER et FS USDA : Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. 2009.
- Ivan SIVADON : Modélisation et Cartographie des risques phytosanitaires. *In 4èmes Rencontres Nationales de l'Agrométéorologie, CTIFL Balandran*. CIRAME, 2008.
- B.N. WILFONG, D.L. GORCHOV et M.C. HENRY : Detecting an invasive shrub in deciduous forest understories using remote sensing. 2009.
- NE ZIMMERMANN, TC EDWARDS JR, GG MOISEN, TS FRESCINO et JA BLACKARD : Remote sensing-based predictors improve distribution models of rare, early successional and broadleaf tree species in Utah. *Journal of applied ecology*, 44(5):1057–1067, 2007.

## — Agriculture de précision —

- Y. LAN, Y. HUANG, DE MARTIN et WC HOFFMANN : Development of an airborne remote sensing system for crop pest management : system integration and verification. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(4):607–615, 2009.
- J. ROUSSEAU, S. DUPIN, C. ACEVEDO-OPAZO, B. TISSEYRE et H. OJEDA : L'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et oenologiques. *Bulletin de l'OIV 81 (932, 933(934):506–517*, 2008.

## — Cartographie rapide —

- RB HAARBRINK et E. KOERS : Helicopter UAV for photogrammetry and rapid response. *In International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Workshop of Inter-Commission WG I/V, Autonomous Navigation, Antwerp, Belgium*, 2006.
- P. TATHAM : An investigation into the suitability of the use of unmanned aerial vehicle systems (UAVS) to support the initial needs assessment process in rapid onset humanitarian disasters. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 13(1):60–78, 2009.

---

## Caméras

---

### — Télédétection aéroportée —

G. PETRIE et A.S. WALKER : Airborne digital imaging technology : a new overview. *Photogrammetric Record*, 22(119):203–225, 2007.

Gordon PETRIE : Les caméras numériques aéroportées. *Géomatique Expert*, pages pp. 50–61, Février-Mars 2005.

Gordon PETRIE : Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Cameras. *In VIII International Scientific & Technical Conference “From Imagery to Map : Digital Photogrammetric Technologies”*. Univ. of Glasgow, 2008. September 15-18, 2008 – Porec, Croatia.

Gordon PETRIE : Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pages pp. 102–107, Février 2009.

Charles TOTH : The State-of-the Art in Airborne Data Collection Systems – Focused on LiDAR and Optical Imagery. *In Tutorial Phowo 2009*, 2009.

### — Appareils photos numériques —

J.H. CHANDLER, JG FRYER et A. JACK : Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *Photogrammetric Record*, 2005.

A. HABIB et M. MORGAN : Stability Analysis and Geometric Calibration of off-the-shelf digital cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(6):733–741, 2005.

T. LÄBE et W. FÖRSTNER : Geometric stability of low-cost digital consumer cameras. *International Archives of ISPRS, Nummer XXXV. Istanbul*, pages 528–535, 2004.

F. REMONDINO et C. FRASER : Digital camera calibration methods : considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5):266–272, 2006.

MR SHORTIS, CJ BELLMAN, S. ROBSON, GJ JOHNSTON et GW JOHNSON : Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006.

### — Imagerie oblique —

J. HÖHLE : Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, pages 7–14, 2008.

K. JACOBSEN : Geometry of vertical and oblique image combinations. 2008.

M. LEMMENS, C. LEMMEN, M. WUBBE *et al.* : Pictometry : Potentials for Land Administration. 2008.

Adena SCHUTZBERG et Joe FRANCICA : Microsoft's msn virtual earth : The map is the search platform. *Directions Magazine*, May 2005.

Y. WANG, S. SCHULTZ et F. GIUFFRIDA : Pictometry's proprietary airborne digital imaging system and its application in 3d city modelling. *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVII-B1, pages 1065–1070, 2008.

---

## Capteurs

---

### — Centrale inertielle —

K.J. WALCHKO et P.A.C. MASON : Inertial Navigation. *In Conference on Recent Advances in Robotics, Florida*, 2002.

### — GPS —

Paul CORREIA : *Guide pratique du GPS*. Eyrolles, Paris, 2ème éd. édition, 2001. ISBN 9782212092790.

Françoise DUQUENNE : *GPS : localisation et navigation par satellites*. Hermès science publications, Paris, 2e éd. rev. et augm. édition, 2005. ISBN 9782746210905.

### — Altimètre barométrique —

OACI : Manual of the ICAO Standard Atmosphere. 1964.

W. TANG, G. HOWELL et Y.H. TSAI : Barometric altimeter short-term accuracy analysis. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 20(12):24–26, 2005.

### — Flux optique —

J. CONROY, G. GREMILLION, B. RANGANATHAN et J.S. HUMBERT : Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation. *Autonomous Robots*, 27(3):189–198, 2009. ISSN 0929-5593.

M. DILLE, B. GROCHOLSKY et S. SINGH : Outdoor downward-facing optical flow odometry with commodity sensors. *In Field and Service Robotics*, pages 183–193. Springer, 2010.

S. DONCIEUX et A. ANGELI : *Objets volants miniatures : modélisation et commande embarquée*, chapitre Navigation des drones par flux optique, pages 305–328. Hermes-Lavoisier, 2007.

S. HRABAR et GS SUKHATME : Vision-based 3d navigation for an autonomous helicopter. *Center for Robotics and Embedded Systems, University of Southern California, CRES-06-001*, 2006.

T. KANADE, O. AMIDI et Q. KE : Real-time and 3D vision for autonomous small and micro air vehicles. *In 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004. CDC*, volume 2, 2004.

- J. KELLY, S. SARIPALLI et G. SUKHATME : Combined visual and inertial navigation for an unmanned aerial vehicle. *In Field and Service Robotics*, pages 255–264. Springer, 2008.
- J. STOWERS, A. BAINBRIDGE-SMITH, M. HAYES et S. MILLS : Optical Flow for Heading Estimation of a Quadrotor Helicopter. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1 (4):229–239, 2009. ISSN 1756-8293.
- K.E. WENZEL, P. ROSSET et A. ZELL : Low-cost visual tracking of a landing place and hovering flight control with a microcontroller. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 57(1):297–311, 2010. ISSN 0921-0296.

— Géoréférencement —

- H. EUGSTER et S. NEBIKER : Geo-registration of video sequences captured from mini-UAVs - Approaches and accuracy assessment. *In Mobile Mapping Technologies Symposium MMT*, 2007.

---

## Traitement d'images

---

— Vision par ordinateurs —

- Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN : *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, March 2004. ISBN 0521540518.

— Stéréorestitution —

- H. BAY, A. ESS, T. TUYTELAARS et L. VAN GOOL : Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3):346–359, 2008.
- M. LELOGLU, M. ROUX et H. MAÎTRE : Dense urban DEM with three or more high-resolution aerial images. *In ISPRS Symposium on GIS-Between Visions and Applications*. Stuttgart, Germany, 1998.
- D. ORAM : Rectification for any epipolar geometry. *In Proc. British Machine Vision Conf*, pages 653–662, 2001.
- Benoît PETITPAS, Laurent BEAUDOIN, Michel ROUX et Jean-Paul RUDANT : Roughness measurement from multi-stereo reconstruction. *In PCV*, 2010b.
- Modèles Numériques de Terrain —
- H. EISENBEISS et L. ZHANG : Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5*, 90e96, 2006.
- I.K. JUNG et S. LACROIX : High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery. 2003b.
- S. LACROIX, I.K. JUNG et A. MALLET : Digital elevation map building from low altitude stereo imagery. *Robotics and Autonomous systems*, 41(2-3):119–127, 2002.

---

— Classification —

P. DATA, L. CSATÓ et M. DATA : Maximum Likelihood Estimation. *Probabilistic Data Mining*, 2008.

S. LLOYD : Least squares quantization in PCM. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 28(2):129–137, 2002.

— Photogrammétrie —

M. KASSER et Y. EGELS : *Digital photogrammetry*. CRC, 2002.

JM RUBIO, JG LAHOZ, DG AGUILERA et JF CODES : Imap3d : low-cost photogrammetry for cultural heritage. *In Proceedings of the CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy. Camera and Imaging Products Association*, 2005.

---

**Autres domaines**

---

— Histoire des sciences —

L. PASTEUR : *Le budget de la science*. Gauthier-Villars, 1868.

— Biodiversité —

P. AGUESSE : *Clefs pour l'écologie*. Seghers, 1971.

N.E. HELLER et E.S. ZAVALA : Biodiversity management in the face of climate change : a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142(1):14–32, 2009.

A. JACQUARD : Structures génétiques des populations. *Population (French Edition)*, 24(6):1155–1160, 1969.

J. MCNEILL, F.R. BARRIE, H.M. BURDET, V. DEMOULIN, D.L. HAWKSWORTH, K. MARHOLD, DH NICOLSON, J. PRADO, P.C. SILVA, J.E. SKOG *et al.* : International code of botanical nomenclature (Vienna Code). 2006.

ONF : Étude écologique d'une lande de platière. Non publié, 2000.

Brigitte THOMAS : Biodiversité, Espace et préservation des espèces. *CNES Mag*, (46):38–55, Juillet 2010.

— Taxonomie —

T.F. STUESSY : *Plant taxonomy : the systematic evaluation of comparative data*. Columbia Univ Pr, 2009.

— Géodésie —

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL : Changement de système géodésique, 1995.

PORTLAND STATE AEROSPACE SOCIETY : Conversion of Geodetic coordinates to the Local Tangent Plane, 2007.



---

## Rapports internes

---

### — Mémoire de Master 2 —

Florent MAINFROY : Travaux préparatoires à la mise en place d'une chaîne de traitement d'images basse altitude. Mémoire de master 2 science de l'information géographique, Université Paris-Est, 2009.

### — Mémoire de fin d'étude ingénieur —

Corentin CHÉRON : Électronique embarquée pour l'automatisation d'un drone quadrirotor. Mémoire de fin d'étude, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2010.

Antoine GADEMER : Analyse multirésolution par ondelettes pour l'étude des sols agricoles. Mémoire de fin d'études, ESIEA, 2005.

Florent MAINFROY : Création d'outils open source pour l'imagerie aérienne d'urgence. Mémoire de fin d'études, ESIEA, 2008.

Sébastien MONAT : Etude et réalisation d'un système drone automatisé. Mémoire de fin d'études, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2009.

Benoit PETITPAS : Création d'un outil open source pour le développement d'une solution de stéréorestitution au sein du laboratoire atis. Mémoire de fin d'études, ESIEA, 2007.

### — Rapport de stages —

Bachir BELBOUAB : Reconstruction de trajectoire à partir d'une centrale inertielle. Mémoire de master 1 physique appliquée, Université d'Orsay, 2006.

Corentin CHÉRON : Électronique embarquée et algorithme temps réel pour la stabilisation d'un quadricoptère. Rapport de stage technique, Laboratoire ATIS, ESIEA, July 2008.

Jean-Marie EDI : Contrôle attitude et géopositionnement d'un capteur : principe du système de navigation inertielle et gps. Mémoire de master 2 capteurs systèmes Électronique et robotique, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2007.

Sébastien MONAT : Réalisation et mise en place de solutions embarquées pour la réalisation d'un drone basé sur une architecture quadricoptère. Rapport de stage technique, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2008.

Clément POUILAILLEAU : Asservissement d'un drone quadricoptère. Rapport de stage technique, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2008.

### — Rapport de projets —

Loïca AVANTHEY et Vincent GERMAIN : Préparateur de mission pour le drone faucon noir. Rapport de projet de recherche, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2009.

Loïca AVANTHEY, Vincent GERMAIN et Arnaud TORA : Head-up display appliqué à un quadri-rotor. Rapport de projet de 4ème année, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2009.

Corentin CHÉRON, Sébastien MONAT, Cédric CAMENEN, Clément POULAILLEAU, Florian BOUGEOIS, Alexis FERREIRA, Émeric FROTTIER, Yann HANTUSCH, Ludovic JUBENOT, Laurent SIGOIGNE et Damien PLAINCHAULT : Projet faucon noir. Rapport de projet de 4ème année, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2008.

— Non publiés —

Antoine GADEMER : Choix d'un appareil photo pour l'acquisition d'image à partir de drone. Étude interne ESIEA, 2008.

Samira MOBAIED et Bernard RIERA : Synthèse des données acquises à fontainebleau par le drone du laboratoire atis - apport pour la gestion de la réserve biologique dirigée de la mare au joncs. Étude interne CNRS UMR MNHN 7179, 2010.

---

## Publications personnelles

---

— Conférences internationales avec comité de sélection et actes —

L. AVANTHEY, V. GERMAIN, A. GADEMER, L. BEAUDOIN et J.P. RUDANT : Real time detection of forest fires and volcanic eruptions from Meteosat Seconde Generation images using neural network. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, pages 1107–1110, 2010.

L. BEAUDOIN et A. GADEMER : Towards symmetrization of asymmetric air dominance : the potential key role playing by home-made low cost Unmanned Aerial Systems. *In ECIW 2010 -9th European Conference on Information Warfare and Security*, 2010.

L. BEAUDOIN, A. GADEMER, A. AMIR, L. AVANTHEY, V. GERMAIN et A. POCHEAU : Near real time detection of hot spots on Meteosat Second Generation images : from forest fires to volcanic eruptions. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007*, pages 2318–2321, 2007.

A. GADEMER, F. MAINFROY, L. BEAUDOIN, L. AVANTHEY, V. GERMAIN, C. CHÉRON, S. MONAT et J.P. RUDANT : Solutions for near real time cartography from a mini-quadrotor UAV. *In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7478, page 37, 2009a.

A. GADEMER, F. MAINFROY, L. BEAUDOIN, L. AVANTHEY, V. GERMAIN, C. CHÉRON, S. MONAT et J.P. RUDANT : Faucon noir UAV project development of a set of tools for managing, visualizing and mosaicing centimetric UAV images. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 2009b.

A. GADEMER, B. PETITPAS, L. BEAUDOIN, T. TANZI, B. RIERA et J.P. RUDANT : Using centimetric visible imagery obtained from an UAV quadrotor for classification of ERS images. *In ESA Living Planet Symposium*, 2010b.

A. GADEMER, B. PETITPAS, Samira MOBAIED, L. BEAUDOIN, B. RIERA, M. ROUX et J.P. RUDANT : Developing a low cost Vertical Take Off and Landing Unmanned Aerial System

for centimetric monitoring of biodiversity - the Fontainebleau case. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, pages 600–603, 2010c.

— **Conférences internationales avec comité de sélection sans actes** —

A. GADEMER, L. BEAUDOIN, S. MONAT, C. CHÉRON et J.P. RUDANT : Réalisation d'un drone pour des missions de télédétection THR environnementales à la demande. *In XI<sup>ème</sup> journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF*, 2008.

A. GADEMER et C. CHÉRON : A Low Cost Spying Quadrotor for Global security Applications Using Hacked Commercial Digital Camera. *In DefCon 17*, 2009.

A. GADEMER, B. PETITPAS, L. BEAUDOIN, M. ROUX et J.P. RUDANT : Système micro-drone multi-caméras pour l'extraction à la demande de paramètres de surface. *In XIII<sup>ème</sup> journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF*, 2010a.

A. GADEMER, V. VITTORI et L. BEAUDOIN : From Light to Ultralight UAV. *In UAS 2010 - 12th International Conference & Exhibition at Eurosatory, Paris*, 2010d.

B. PETITPAS, A. GADEMER, M. ROUX, B. RIERA et J-P. RUDANT : Nouvelles méthodologies de mesures sur la végétation à partir de reconstructions 3D obtenu à partir de séquences photographiques terrestres ou aériennes. *In Colloque "L'évaluation environnementale pour la gestion des ressources naturelles"*, 2010a.

— **Autres travaux** —

V. CIARLETTI, E. VANNIER et A. GADEMER : A new approach for roughness analysis of soil surfaces. *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) proceedings*, 2006.

---

## Webographie

---

— **Liens** —

Biodiversité 2010. 2010, année de la biodiversité. [www.biodiversite2010.fr](http://www.biodiversite2010.fr).

CNRTL. Centre national de ressources textuelles et lexicales. [www.cnrtl.fr](http://www.cnrtl.fr).

DGA : Mini UAVs challenge 2007-2009. <http://www.minidrones.fr>, 2008.

DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW : Digital Photography Review. <http://www.dpreview.com>.

LES NUMÉRIQUES : Les numériques. <http://www.lesnumeriques.com>.

Natura 2000. Portail Natura 2000. [www.natura2000.fr](http://www.natura2000.fr).

Rapport de l'ONU sur l'évaluation des écosystèmes pour le Millénaire. Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. [www.millenniumassessment.org](http://www.millenniumassessment.org).

SPARKFUN ELECTRONICS : Sparkfun electronics web page. <http://www.sparkfun.com>.

## — Sources —

- Vincent BOCKAERT : Depth of field. [http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Optical/Depth\\_of\\_Field\\_01.htm](http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Optical/Depth_of_Field_01.htm), 2010.
- CCIP : L'exportation temporaire avec le carnet ATA. <http://http://www.entreprises.ccip.fr/web/international/exportation-temporaire>.
- CERF-VOLANT ANCIEN : Cerf-volant ancien. Pierre Picavet. <http://cerfvolantancien.free.fr/picavet/cerf-voliste.htm>, 2004.
- Pierre DAVOUST : Les espaces naturels protégés. <http://ecosociosystemes.fr/espaceprotege.html>, 2010.
- EIONET : Habitats directive - article 17. <http://biodiversity.eionet.europa.eu/article17>.
- GEOSCIENCE AUSTRALIA : Landsat 7 ETM Prices. <http://www.ga.gov.au/remote-sensing/get-satellite-imagery-data/ordering/pricing/landsat7-etm.jsp>, 2010.
- INTERSTICES.INFO : Ontologies informatiques. <http://interstices.info/ontologie>.
- F. JOLI : And now the Flying Robots! <http://cicr.blog.lemonde.fr/2008/04/13/and-now-the-flying-robots/>, 2008.
- Thierry JOUET : Les grandes étapes de la classification des végétaux. <http://thierry.jouet.free.fr/Sommaire/etapesclassification.htm>.
- N. MICHAUD : Trafic grandissant dans l'espace : la télédétection en pleine évolution. *BALIZ-MEDIA.com*, 2008. <http://media.baliz-geospatial.com/fr/article/trafic-grandissant-dans-l-espace-la-teledetection-en-pleine-evolution>.
- PRISMO : Notebook lcd display comparison. <http://www.prismo.ch/comparisons/notebook.php>, 2010.
- SCANEX : Price List for the Remotely Sensed Data Processing. <http://www.scanex.ru/en/data/default.asp?submenu=processing&id=prices>, 2010.
- SPOT : SPOT Commercial Price List - May 2010. [http://www.spot.com/automne\\_modules\\_files/standard/public/p425\\_4590a65924804bb9a6dc1b9ec99e1a3aSPOT\\_Commercial\\_Price\\_List\\_-\\_May\\_2010\\_FINAL1.pdf](http://www.spot.com/automne_modules_files/standard/public/p425_4590a65924804bb9a6dc1b9ec99e1a3aSPOT_Commercial_Price_List_-_May_2010_FINAL1.pdf), 2010.
- TELESPAZIO : GeoEye-1 & IKONOS Introductory Price List. [http://www.telespazio.com/ge\\_docs/ik-ge\\_price\\_list.pdf](http://www.telespazio.com/ge_docs/ik-ge_price_list.pdf), 2010.
- THE-DIGITAL-PICTURE.COM : Canon eos 5d mark ii digital slr camera review. <http://www.the-digital-picture.com/reviews/canon-eos-5d-mark-ii-dslr-digital-camera-review.aspx>, 2009.

WEBAVIATION : Specially Commissioned UK aerial photography prices. <http://www.webbaviation.co.uk/cost.htm>, 2010.

— Spécifications —

BLIP IT PTY LTD : Urbi camera controller with zoom. <http://www.blip.com.au/item.aspx?itemid=14&ref=8>, 2010.

DIGITAL GLOBE : Worldview-2 spacecraft data sheet. <http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/spot.htm>, 2010.

DIMENSION ENGINEERING LLC : Picoswitch radio controlled relay. <http://www.dimensionengineering.com/PicoSwitch.htm>, 2010.

DPC AV : *ShutterBug Pro Digital Camera Controller*, 2007. [http://www.dpcav.com/sbgpro/ShutterBugPro\\_docs.pdf](http://www.dpcav.com/sbgpro/ShutterBugPro_docs.pdf).

DRAGANFLY INNOVATIONS INC : *Draganflyer X4 Specifications*, 2010. <http://www.draganfly.com/pdf/draganflyer-x4/WEBNP-Draganflyer-X4-Config-ALL.pdf>.

DRAGANFLY INNOVATIONS INC. : *Draganflyer X6 Camera specifications*, 2010. <http://www.draganfly.com/pdf/draganflyer-x6/draganflyer-x6-camera-specifications.pdf>.

FLY-N-SENSE : *Seeker FNS 900 Specifications*, 2010. [http://www.fly-n-sense.com/images/stories/fiche\\_produit/DATASHEET\\_FNS\\_900\\_SEEKER\\_FR\\_R\\_V.pdf](http://www.fly-n-sense.com/images/stories/fiche_produit/DATASHEET_FNS_900_SEEKER_FR_R_V.pdf).

MICROSOFT : *UltraCam-Xp Technical Specifications*, 2008. <http://download.microsoft.com/download/8/5/A/85A3648B-B4F5-46D6-80E6-C0698A2EE109/UCXp-Technical/UltraCamXp-Technical.pdf>.

PARROT : *AR Drone Guide utilisateur*, 2010. [http://www.parrot.com/fr/support/guidesutilisateur/ar.drone\\_user-guide-fr.pdf](http://www.parrot.com/fr/support/guidesutilisateur/ar.drone_user-guide-fr.pdf).

RC-CAM : Camman-aiptek - r/c digital camera controller. <http://www.rc-cam.com/camman.htm>, 2009.

SURVEYCOPTER : *Copter 1b spécifications*, 2010. [http://www.surveycopter.fr/images/stories/surveycopter/produit\\_pdf/uas01-copter1b\\_fr.pdf](http://www.surveycopter.fr/images/stories/surveycopter/produit_pdf/uas01-copter1b_fr.pdf).

VTI TECHNOLOGIES : VTI SCP1000 Datasheet. [http://www.symbion.eu/tiki-download\\_file.php?fileId=91](http://www.symbion.eu/tiki-download_file.php?fileId=91), 2007.

Matthew WOOLSEY : *PRISM : Photography Radio-Infrared Shutter Module*. Hexpert Systems, 2005. <http://www.hexpertsystems.com/prism/PrismManual.pdf>.

# Bibliographie alphabétique

P. AGUESSE : *Clefs pour l'écologie*. Seghers, 1971.

E. ALTUG, J.P. OSTROWSKI et R. MAHONY : Control of a quadrotor helicopter using visual feedback. *In Proceedings- IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 72–77. Citeseer, 2002.

Michel ASENSIO : L'utilisation civile des drones : problèmes techniques, opérationnels et juridiques. Rapport technique, Fondation pour la Recherche Stratégique, 2008.

G. ASTUTI, D. LONGO, C. D. MELITA, G. MUSCATO et A. ORLANDO : Hil tuning of uav for exploration of risky environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(4):419–424, 2008.

L. AVANTHEY, V. GERMAIN, A. GADEMER, L. BEAUDOIN et J.P. RUDANT : Real time detection of forest fires and volcanic eruptions from Meteosat Seconde Generation images using neural network. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, pages 1107–1110, 2010.

Loïca AVANTHEY et Vincent GERMAIN : Préparateur de mission pour le drone faucon noir. Rapport de projet de recherche, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2009.

Loïca AVANTHEY, Vincent GERMAIN et Arnaud TORA : Head-up display appliqué à un quadri-rotor. Rapport de projet de 4ème année, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2009.

H. BAY, A. ESS, T. TUYTELAARS et L. VAN GOOL : Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3):346–359, 2008.

L. BEAUDOIN et A. GADEMER : Towards symmetrization of asymmetric air dominance : the potential key role playing by home-made low cost Unmanned Aerial Systems. *In ECIW 2010 -9th European Conference on Information Warfare and Security*, 2010.

L. BEAUDOIN, A. GADEMER, A. AMIR, L. AVANTHEY, V. GERMAIN et A. POCHEAU : Near real time detection of hot spots on Meteosat Second Generation images : from forest fires to volcanic eruptions. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007*, pages 2318–2321, 2007.

Bachir BELBOUAB : Reconstruction de trajectoire à partir d'une centrale inertielle. Mémoire de master 1 physique appliquée, Université d'Orsay, 2006.

- H. BENDEA, F. CHIABRANDO, F.G. TONOLO et D. MARENCHINO : Mapping of archaeological areas using a low-cost uav the augusta bagienorum test site. *In XXI International CIPA Symposium*, 2007.
- K. BERGEN, S. GOETZ, R. DUBAYAH, G. HENEUBRY, M. IMHOFF, R. NELSON, G. PARKER et V. RADELOFF : Remote sensing of vegetation 3D structure for biodiversity and habitat : review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research*, 114(null), 2009.
- J.A.J. BERNI, P.J. ZARCO-TEJADA, L. SUÁREZ et E. FERERES : Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3):722–738, 2009.
- V.I. BINENKO, V.I. ANDREEV et R.V. IVAROV : Remote sensing of environment on the base of the microaviation. *In International Symposium of Remote Sensing*, 2005.
- Biodiversité 2010. 2010, année de la biodiversité. [www.biodiversite2010.fr](http://www.biodiversite2010.fr).
- BLIP IT PTY LTD : Urbi camera controller with zoom. <http://www.blip.com.au/item.aspx?itemid=14&ref=8>, 2010.
- Vincent BOCKAERT : Depth of field. [http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Optical/Depth\\_of\\_Field\\_01.htm](http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Optical/Depth_of_Field_01.htm), 2010.
- J. BOSSU : *Segmentation d'images pour la localisation d'adventices. Application à la réalisation d'un système de vision pour une pulvérisation spécifique en temps réel*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, soutenue le 4 décembre 2007, Université de Bourgogne, 2007.
- Samir BOUABDALLAH et Roland SIEGWART : Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain*, April 2005.
- Jean-Guy BOUREAU : *Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges - Application aux milieux forestier et naturels*. Inventaire forestier national, 2008.
- A. BOUVET, E. LANGLOIS, N. LAVAL et D. MAUDET : Drone d'Observation et De Détection en Milieu Urbain. Mémoire de D.E.A., ESTACA, 2008.
- TF BURKS, SA SHEARER, JR HEATH et KD DONOHUE : Evaluation of neural-network classifiers for weed species discrimination. *Biosystems Engineering*, 91(3):293–304, 2005.
- HDV BÖHM et F. SIEGERT : Remote Sensing verification by Aerial Surveys and Ground Truth Campaigns 1997 and 1998 in Central Kalimantan, Indonesia-Peat Swamp Forest, Mega-Rice-Project and Fires. *In Workshop on Tropical Forest and Remote Sensing, the*, 1999.
- Manuel CARBALLEDA et Christophe LEROUX : Gestion de missions de sécurité civile incluant un micro-uav : projet uadrones. *In WISG'09 — Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale, Troyes*, 2009.

- Pedro CASTILLO, Roger LOZANO et Alejandro E. DZUL : *Modelling and Control of Mini-Flying Machines*. Springer, 2005.
- CCIP : L'exportation temporaire avec le carnet ATA. <http://http://www.entreprises.ccip.fr/web/international/exportation-temporaire>.
- CERF-VOLANT ANCIEN : Cerf-volant ancien. Pierre Picavet. <http://cerfvolantancien.free.fr/picavet/cerf-voliste.htm>, 2004.
- J.H. CHANDLER, JG FRYER et A. JACK : Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *Photogrammetric Record*, 2005.
- Corentin CHÉRON : Électronique embarquée et algorithme temps réel pour la stabilisation d'un quadricoptère. Rapport de stage technique, Laboratoire ATIS, ESIEA, July 2008.
- Corentin CHÉRON : Électronique embarquée pour l'automatisation d'un drone quadrirotor. Mémoire de fin d'étude, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2010.
- Corentin CHÉRON, Sébastien MONAT, Cédric CAMENEN, Clément POULAILLEAU, Florian BOUGEOIS, Alexis FERREIRA, Émeric FROTTIER, Yann HANTUSCH, Ludovic JUBENOT, Laurent SIGOIGNE et Damien PLAINCHAULT : Projet faucon noir. Rapport de projet de 4ème année, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2008.
- V. CIARLETTI, E. VANNIER et A. GADEMER : A new approach for roughness analysis of soil surfaces. *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) proceedings*, 2006.
- CNRTL. Centre national de ressources textuelles et lexicales. [www.cnrtl.fr](http://www.cnrtl.fr).
- R. COMER, G. KINN, D. LIGHT et C. MONDELLO : Talking digital. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(12):1139–1142, 1998.
- J. CONROY, G. GREMILLION, B. RANGANATHAN et J.S. HUMBERT : Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation. *Autonomous Robots*, 27(3):189–198, 2009. ISSN 0929-5593.
- Paul CORREIA : *Guide pratique du GPS*. Eyrolles, Paris, 2ème éd. édition, 2001. ISBN 9782212092790.
- P. DATA, L. CSATÓ et M. DATA : Maximum Likelihood Estimation. *Probabilistic Data Mining*, 2008.
- Pierre DAVOUST : Les espaces naturels protégés. <http://ecosociosystemes.fr/espaceprotege.html>, 2010.
- J.R. Martínez de DIOS, L. MERINO, A. OLLERO, L.M. RIBEIRO et X. VIEGAS : *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Berlin / Heidelberg, 2007a.
- J.R. Martínez de DIOS, L. MERINO, A. OLLERO, L.M. RIBEIRO et X. VIEGAS : *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles*, chapitre Multi-UAV Experiments : Application to Forest Fires, pages 207–228. Springer Berlin / Heidelberg, 2007b.



- B. DE MEZZO, G. RABATEL et C. FIORIO : Weed leaf recognition in complex natural scenes by model-guided edge pairing. *Precision Agriculture*, pages 141–147.
- N. DELBART, T. LE TOAN, L. KERGOAT et V. FEDOTOVA : Remote sensing of spring phenology in boreal regions : A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sensing of Environment*, 101(1):52–62, 2006.
- François DERKX et Jean-Luc SORIN : Inspection des ouvrages d’art par drone. bilan et perspectives des travaux du lcpc. *LCPC - Bulletin des Ponts et Chaussées*, (273):39–56, December 2008.
- DGA : Mini UAVs challenge 2007-2009. <http://www.minidrones.fr>, 2008.
- DIGITAL GLOBE : Worldview-2 spacecraft data sheet. <http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/spot.htm>, 2010.
- DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW : Digital Photography Review. <http://www.dpreview.com>.
- M. DILLE, B. GROCHOLSKY et S. SINGH : Outdoor downward-facing optical flow odometry with commodity sensors. *In Field and Service Robotics*, pages 183–193. Springer, 2010.
- DIMENSION ENGINEERING LLC : Picoswitch radio controlled relay. <http://www.dimensionengineering.com/PicoSwitch.htm>, 2010.
- S. DONCIEUX et A. ANGELI : *Objets volants miniatures : modélisation et commande embarquée*, chapitre Navigation des drones par flux optique, pages 305–328. Hermes-Lavoisier, 2007.
- DPC AV : *ShutterBug Pro Digital Camera Controller*, 2007. [http://www.dpcav.com/sbgpro/ShutterBugPro\\_docs.pdf](http://www.dpcav.com/sbgpro/ShutterBugPro_docs.pdf).
- DRAGANFLY INNOVATIONS INC : *Draganflyer X4 Specifications*, 2010. <http://www.draganfly.com/pdf/draganflyer-x4/WEBNP-Draganflyer-X4-Config-ALL.pdf>.
- DRAGANFLY INNOVATIONS INC. : *Draganflyer X6 Camera specifications*, 2010. <http://www.draganfly.com/pdf/draganflyer-x6/draganflyer-x6-camera-specifications.pdf>.
- Françoise DUQUENNE : *GPS : localisation et navigation par satellites*. Hermès science publications, Paris, 2e éd. rev. et augm. édition, 2005. ISBN 9782746210905.
- Jean-Marie EDI : Contrôle attitude et géopositionnement d’un capteur : principe du système de navigation inertielle et gps. Mémoire de master 2 capteurs systèmes Électronique et robotique, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2007.
- EIONET : Habitats directive - article 17. <http://biodiversity.eionet.europa.eu/article17>.

- H. EISENBEISS : A mini unmanned aerial vehicle (UAV) : system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W1), 2004.
- H. EISENBEISS et L. ZHANG : Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5*, 90e96, 2006.
- H. EUGSTER et S. NEBIKER : Geo-registration of video sequences captured from mini-UAVs - Approaches and accuracy assessment. *In Mobile Mapping Technologies Symposium MMT*, 2007.
- EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY : *Policy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) certification*. European Aviation Safety Agency, 2005.
- J. EVERAERTS : The use of unmanned aerial vehicles(uavs) for remote sensing and mapping. *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVII, pages 1187–1191, 2008.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION : *Instrument Flying Handbook*, 2007. FAA-H-8083-15A.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION : *Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations and Policies*, 2009.
- FLY-N-SENSE : *Seeker FNS 900 Specifications*, 2010. [http://www.fly-n-sense.com/images/stories/fiche\\_produit/DATASHEET\\_FNS\\_900\\_SEEKER\\_FR\\_R\\_V.pdf](http://www.fly-n-sense.com/images/stories/fiche_produit/DATASHEET_FNS_900_SEEKER_FR_R_V.pdf).
- A. GADEMER, L. BEAUDOIN, S. MONAT, C. CHÉRON et J.P. RUDANT : Réalisation d'un drone pour des missions de télédétection THR environnementales à la demande. *In XI<sup>ème</sup> journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF*, 2008.
- A. GADEMER et C. CHÉRON : A Low Cost Spying Quadrotor for Global security Applications Using Hacked Commercial Digital Camera. *In DefCon 17*, 2009.
- A. GADEMER, F. MAINFROY, L. BEAUDOIN, L. AVANTHEY, V. GERMAIN, C. CHÉRON, S. MONAT et J.P. RUDANT : Solutions for near real time cartography from a mini-quadrotor UAV. *In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7478, page 37, 2009a.
- A. GADEMER, F. MAINFROY, L. BEAUDOIN, L. AVANTHEY, V. GERMAIN, C. CHÉRON, S. MONAT et J.P. RUDANT : Faucon noir UAV project development of a set of tools for managing, visualizing and mosaicing centimetric UAV images. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 2009b.
- A. GADEMER, B. PETITPAS, L. BEAUDOIN, M. ROUX et J.P. RUDANT : Système micro-drone multi-caméras pour l'extraction à la demande de paramètres de surface. *In XIII<sup>ème</sup> journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF*, 2010a.

- A. GADEMER, B. PETITPAS, L. BEAUDOIN, T. TANZI, B. RIERA et J.P. RUDANT : Using centimetric visible imagery obtained from an UAV quadrotor for classification of ERS images. *In ESA Living Planet Symposium*, 2010b.
- A. GADEMER, B. PETITPAS, Samira MOBAIED, L. BEAUDOIN, B. RIERA, M. ROUX et J.P. RUDANT : Developing a low cost Vertical Take Off and Landing Unmanned Aerial System for centimetric monitoring of biodiversity - the Fontainebleau case. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, pages 600–603, 2010c.
- A. GADEMER, V. VITTORI et L. BEAUDOIN : From Light to Ultralight UAV. *In UAS 2010 - 12th International Conference & Exhibition at Eurosatory, Paris*, 2010d.
- Antoine GADEMER : Analyse multirésolution par ondelettes pour l'étude des sols agricoles. Mémoire de fin d'études, ESIEA, 2005.
- Antoine GADEMER : Choix d'un appareil photo pour l'acquisition d'image à partir de drone. Étude interne ESIEA, 2008.
- GEOSCIENCE AUSTRALIA : Landsat 7 ETM Prices. <http://www.ga.gov.au/remote-sensing/get-satellite-imagery-data/ordering/pricing/landsat7-etm.jsp>, 2010.
- GJ GRENZDÖRFFER, A. ENGELB et B. TEICHERTC : The Photogrammetric Potential of Low-Cost UAVS in Forestry and Agriculture. *In The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, XXXVII. Part B*, volume 1, pages 1207–1213, 2008.
- C. GÉE et L. ASSÉMAT : Techniques innovantes pour le contrôle des mauvaises herbes. *In Vingtème conférence du Columa - Journées Internationales sur la lutttes contre les mauvaises herbes*. AFPP, 2007.
- RB HAARBRINK et E. KOERS : Helicopter UAV for photogrammetry and rapid response. *In International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Workshop of Inter-Commission WG I/V, Autonomous Navigation, Antwerp, Belgium*, 2006.
- A. HABIB et M. MORGAN : Stability Analysis and Geometric Calibration of off-the-shelf digital cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(6):733–741, 2005.
- Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN : *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, March 2004. ISBN 0521540518.
- N.E. HELLER et E.S. ZAVALETA : Biodiversity management in the face of climate change : a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142(1):14–32, 2009.
- RA HOUGHTON, D. BUTMAN, AG BUNN, ON KRANKINA, P. SCHLESINGER et TA STONE : Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories. *Environmental Research Letters*, 2:045032, 2007.

- S. HRABAR et GS SUKHATME : Vision-based 3d navigation for an autonomous helicopter. *Center for Robotics and Embedded Systems, University of Southern California, CRES-06-001*, 2006.
- J. HÖHLE : Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, pages 7–14, 2008.
- IFN : *La cartographie forestière - version 2 - de l'Inventaire forestier national*, Mai 2010a.
- IFN : L'image proche infrarouge : une information essentielle. *L'IF*, 2010b.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL : Changement de système géodésique, 1995.
- INTERSTICES.INFO : Ontologies informatiques. <http://interstices.info/ontologie>.
- K. JACOBSEN : Geometry of vertical and oblique image combinations. 2008.
- A. JACQUARD : Structures génétiques des populations. *Population (French Edition)*, 24 (6):1155–1160, 1969.
- Austin JENSEN, Norman WILDMANN, YangQuan CHEN et Holger VOOS : In-situ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sensor calibration to improve automatic image orthorectification. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, 2010.
- J.R. JENSEN : *Remote sensing of the environment : an earth resource perspective*. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall,, 2007.
- Troy Arnold JENSEN : *Using a Remotely Controlled Platform to Acquire Low-Altitude Imagery for Grain Crop Mapping*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, soutenue en Novembre 2008, University of Southern Queensland, 2008.
- F. JOLI : And now the Flying Robots! <http://cicr.blog.lemonde.fr/2008/04/13/and-now-the-flying-robots/>, 2008.
- Thierry JOUET : Les grandes étapes de la classification des végétaux. <http://thierry.jouet.free.fr/Sommaire/etapesclassification.htm>.
- JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 10 octobre 1957 relatif au survol des agglomérations et des rassemblements de personnes ou d'animaux, 1957.
- JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 1er août 2007 relatif aux conditions d'insertion et d'évolution dans l'espace aérien des aéronefs civils ou de la défense non habités, 2007a. NOR : DEVA0755921A.
- JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 21 mars 2007 relatif aux aéronefs non habités qui évoluent en vue directe de leurs opérateurs, 2007b. NOR : EQUA0700564A.

- JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE : Arrêté du 21 décembre 2009 relatif aux conditions d'insertion et d'évolution dans l'espace aérien des aéronefs civils ou de la défense non habités, 2009. NOR : DEVA0927039A.
- I.K. JUNG et S. LACROIX : High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery. *In International Conference of Computer Vision*, 2003a.
- I.K. JUNG et S. LACROIX : High resolution terrain mapping using low altitude aerial stereo imagery. 2003b.
- T. KANADE, O. AMIDI et Q. KE : Real-time and 3D vision for autonomous small and micro air vehicles. *In 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004. CDC*, volume 2, 2004.
- M. KASSER et Y. EGELS : *Digital photogrammetry*. CRC, 2002.
- J. KELLY, S. SARIPALLI et G. SUKHATME : Combined visual and inertial navigation for an unmanned aerial vehicle. *In Field and Service Robotics*, pages 255–264. Springer, 2008.
- S. LACROIX, I.K. JUNG et A. MALLET : Digital elevation map building from low altitude stereo imagery. *Robotics and Autonomous systems*, 41(2-3):119–127, 2002.
- Y. LAN, Y. HUANG, DE MARTIN et WC HOFFMANN : Development of an airborne remote sensing system for crop pest management : system integration and verification. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(4):607–615, 2009.
- M. LELOGLU, M. ROUX et H. MAÎTRE : Dense urban DEM with three or more high-resolution aerial images. *In ISPRS Symposium on GIS-Between Visions and Applications. Stuttgart, Germany*, 1998.
- M. LEMMENS, C. LEMMEN, M. WUBBE *et al.* : Pictometry : Potentials for Land Administration. 2008.
- LES NUMÉRIQUES : Les numériques. <http://www.lesnumeriques.com>.
- P.H. LIN et C.S. LEE : Fly into typhoon haiyan with uav aerosonde. *In 12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, 2003.
- Z. LIN : Uav for mapping - low altitude photogrammetry survey. *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVII, pages 1183–1186, 2008.
- S. LLOYD : Least squares quantization in PCM. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 28(2):129–137, 2002.
- D. LU : The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7):1297–1328, 2006.

- D. LU, M. BATISTELLA, E.E. de MIRANDA et E. MORAN : A Comparative Study of Landsat TM and SPOT HRG Images for Vegetation Classification in the Brazilian Amazon. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 74(3):311, 2008.
- T. LÄBE et W. FÖRSTNER : Geometric stability of low-cost digital consumer cameras. *International Archives of ISPRS, Nummer XXXV. Istanbul*, pages 528–535, 2004.
- Florent MAINFROY : Création d’outils open source pour l’imagerie aérienne d’urgence. Mémoire de fin d’études, ESIEA, 2008.
- Florent MAINFROY : Travaux préparatoires à la mise en place d’une chaîne de traitement d’images basse altitude. Mémoire de master 2 science de l’information géographique, Université Paris-Est, 2009.
- J. MCNEILL, F.R. BARRIE, H.M. BURDET, V. DEMOULIN, D.L. HAWKSWORTH, K. MARHOLD, DH NICOLSON, J. PRADO, P.C. SILVA, J.E. SKOG *et al.* : International code of botanical nomenclature (Vienna Code). 2006.
- R.E. MCROBERTS et E.O. TOMPPÖ : Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 110(4):412–419, 2007.
- N. METNI et T. HAMEL : A uav for bridge inspection : Visual servoing control law with orientation limits. *Automation in construction*, 17(1):3–10, 2007.
- N. MICHAUD : Trafic grandissant dans l’espace : la télédétection en pleine évolution. *BALIZ-MEDIA.com*, 2008. <http://media.baliz-geospatial.com/fr/article/trafic-grandissant-dans-l-espace-la-teledetection-en-pleine-evolution>.
- MICROSOFT : *UltraCam-Xp Technical Specifications*, 2008. <http://download.microsoft.com/download/8/5/A/85A3648B-B4F5-46D6-80E6-C0698A2EE109/UCXp-Technical/UltraCamXp-Technical.pdf>.
- C. MILESI, A. SAMANTA, H. HASHIMOTO, K.K. KUMAR, S. GANGULY, P.S. THENKABAIL, A.N. SRIVASTAVA, R.R. NEMANI et R.B. MYNENI : Decadal Variations in NDVI and Food Production in India. *Geophysical Research Letters*, 37:L05401, 2010.
- Y. MINEKAWA, T. EDANAGA, K. UTO, Y. KOSUGI et K. ODA : Development of a low-altitude hyperspectral imaging system for measuring ground truth in agricultural fields. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference*, pages 2052–2055. IEEE, 2007.
- Samira MOBAIED et Bernard RIERA : Synthèse des données acquises à fontainebleau par le drone du laboratoire atis - apport pour la gestion de la réserve biologique dirigée de la mare au joncs. Étude interne CNRS UMR MNHN 7179, 2010.
- Sébastien MONAT : Réalisation et mise en place de solutions embarquées pour la réalisation d’un drone basé sur une architecture quadricoptère. Rapport de stage technique, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2008.

- Sébastien MONAT : Etude et réalisation d'un système drone automatisé. Mémoire de fin d'études, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2009.
- J.T. MORISETTE, A.D. RICHARDSON, A.K. KNAPP, J.I. FISHER, E.A. GRAHAM, J. ABATZOGLOU, B.E. WILSON, D.D. BRESHEARS, G.M. HENEGBRY, J.M. HANES *et al.* : Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change : phenological research in the 21st century. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(5):253–260, 2008.
- R.R. MURPHY, S. TADOKORO, D. NARDI, A. JACOFF, P. FIORINI, H. CHOSET et A.M. ERKMEN : *Springer Handbook of Robotics*, chapitre Search and rescue robotics, pages 1151–1173. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- P. MUUKKONEN et J. HEISKANEN : Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data : A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107(4):617–624, 2007.
- Natura 2000. Portail Natura 2000. [www.natura2000.fr](http://www.natura2000.fr).
- S. NEBIKERA, A. ANNENA, M. SCHERRERB et D. OESCHC : A light-weight multispectral sensor for micro uav oppportunities for very high resolution airborne remote sensing. *In International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008.
- M.D. NELSON, K.T. WARD et M.E. BAUER : Forest-Cover-Type Separation Using RADARSAT-1 Synthetic Aperture Radar Imagery. *Notes*, 2009.
- L.R. NEWCOME : *Unmanned Aviation : A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles*. AIAA (American Institute of Aeronautics & Ast, 2004.
- J. NOGAMI, D. PHUON et M. KUSANAGI : Field Observation using flying platforms for remote sensing education. *In Asian Conference of Remote Sensing*, 2002.
- A. NOTH : *Design of solar power airplanes for continuous flight*. Thèse de doctorat, ETH Zürich, 2008.
- OACI : Manual of the ICAO Standard Atmosphere. 1964.
- OFFICE OF THE SECRETARY OF DEFENSE : *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030*, 2005.
- ONF : Étude écologique d'une lande de platière. Non publié, 2000.
- D. ORAM : Rectification for any epipolar geometry. *In Proc. British Machine Vision Conf*, pages 653–662, 2001.
- J-N. PAOLI, C. GÉE, J-P. GUILLEMIN, F. TRUCHETET et J-B. VIOIX : Dispositifs d'imagerie multi-spectrale pour la détection et le contrôle des adventices. *In Vingtième conférence du Columa - Journées Internationales sur la lutttes contre les mauvaises herbes*. AFPP, 2007.

- PARROT : *AR Drone Guide utilisateur*, 2010. [http://www.parrot.com/fr/support/guidesutilisateur/ar.drone\\_user-guide-fr.pdf](http://www.parrot.com/fr/support/guidesutilisateur/ar.drone_user-guide-fr.pdf).
- L. PASTEUR : *Le budget de la science*. Gauthier-Villars, 1868.
- B. PETITPAS, A. GADEMER, M. ROUX, B. RIERA et J-P. RUDANT : Nouvelles méthodologies de mesures sur la végétation à partir de reconstructions 3D obtenu à partir de séquences photographiques terrestres ou aériennes. *In Colloque "L'évaluation environnementale pour la gestion des ressources naturelles"*, 2010a.
- Benoit PETITPAS : Création d'un outil open source pour le développement d'une solution de stéréorestitution au sein du laboratoire atis. Mémoire de fin d'études, ESIEA, 2007.
- Benoît PETITPAS, Laurent BEAUDOIN, Michel ROUX et Jean-Paul RUDANT : Roughness measurement from multi-stereo reconstruction. *In PCV*, 2010b.
- G. PETRIE et A.S. WALKER : Airborne digital imaging technology : a new overview. *Photogrammetric Record*, 22(119):203–225, 2007.
- Gordon PETRIE : Les caméras numériques aéroportées. *Géomatique Expert*, pages pp. 50–61, Février-Mars 2005.
- Gordon PETRIE : Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Cameras. *In VIII International Scientific & Technical Conference "From Imagery to Map : Digital Photogrammetric Technologies"*. Univ. of Glasgow, 2008. September 15-18, 2008 – Porec, Croatia.
- Gordon PETRIE : Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pages pp. 102–107, Février 2009.
- A. PIRON, V. LEEMANS, O. KLEYNEN et M.F. DESTAIN : Determination of plant height for weed detection in stereoscopic images. 2008.
- PORTLAND STATE AEROSPACE SOCIETY : Conversion of Geodetic coordinates to the Local Tangent Plane, 2007.
- Clément POUILAILLEAU : Asservissement d'un drone quadricoptère. Rapport de stage technique, Laboratoire ATIS, ESIEA, 2008.
- P. POUNDS, R. MAHONY, P. HYNES et J. ROBERTS : Design of a four-rotor aerial robot. *In Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*, volume 27, page 29, 2002.
- PRISMO : Notebook lcd display comparison. <http://www.prismo.ch/comparisons/notebook.php>, 2010.



- L.J. QUACKENBUSH, Y. KE et C.N. KROLL : Investigating New Advances in Forest Species Classification : Establishing a Baseline. *In Proceedings of 2006 ASPRS Annual Conference*, pages 1–5, 2006.
- Rapport de l'ONU sur l'évaluation des écosystèmes pour le Millénaire. Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. [www.millenniumassessment.org](http://www.millenniumassessment.org).
- RC-CAM : Camman-aiptek - r/c digital camera controller. <http://www.rc-cam.com/camman.htm>, 2009.
- B.C. REED, M.D. SCHWARTZ et X. XIAO : Remote sensing phenology. *Phenology of Ecosystem Processes*, pages 231–246, 2009.
- F. REMONDINO et C. FRASER : Digital camera calibration methods : considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5):266–272, 2006.
- A.D. RICHARDSON, B.H. BRASWELL, D.Y. HOLLINGER, J.P. JENKINGS, S.V. OLLINGER et FS USDA : Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. 2009.
- K. RO, J.-S. OH et L. DONG : Lessons learned : Application of small uav for urban highway traffic monitoring. *In 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2007.
- J. ROUSSEAU, S. DUPIN, C. ACEVEDO-OPAZO, B. TISSEYRE et H. OJEDA : L'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et oenologiques. *Bulletin de l'OIV 81 (932, 933(934):506–517*, 2008.
- F. ROVIRA-MÁS, Q. ZHANG et JF REID : Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoimages. *Biosystems engineering*, 90(3):251–259, 2005.
- JM RUBIO, JG LAHOZ, DG AGUILERA et JF CODES : Imap3d : low-cost photogrammetry for cultural heritage. *In Proceedings of the CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy. Camera and Imaging Products Association*, 2005.
- A. SATO : Civil UAV Applications in Japan and Related Safety & Certification, 2003.
- SCANEX : Price List for the Remotely Sensed Data Processing. <http://www.scanex.ru/en/data/default.asp?submenu=processing&id=prices>, 2010.
- Adena SCHUTZBERG et Joe FRANCICA : Microsoft's msn virtual earth : The map is the search platform. *Directions Magazine*, May 2005.
- MR SHORTIS, CJ BELLMAN, S. ROBSON, GJ JOHNSTON et GW JOHNSON : Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006.
- Ivan SIVADON : Modélisation et Cartographie des risques phytosanitaires. *In 4èmes Rencontres Nationales de l'Agrométéorologie, CTIFL Balandran. CIRAME*, 2008.

- DC SLAUGHTER, DK GILES et D. DOWNEY : Autonomous robotic weed control systems : A review. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1):63–78, 2008.
- G. SOHN et I. DOWMAN : Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(1):43–63, 2007.
- SPARKFUN ELECTRONICS : Sparkfun electronics web page. <http://www.sparkfun.com>.
- SPOT : SPOT Commercial Price List - May 2010. [http://www.spot.com/automne\\_modules\\_files/standard/public/p425\\_4590a65924804bb9a6dc1b9ec99e1a3aSPOT\\_Commercial\\_Price\\_List\\_-\\_May\\_2010\\_FINAL1.pdf](http://www.spot.com/automne_modules_files/standard/public/p425_4590a65924804bb9a6dc1b9ec99e1a3aSPOT_Commercial_Price_List_-_May_2010_FINAL1.pdf), 2010.
- J. STOWERS, A. BAINBRIDGE-SMITH, M. HAYES et S. MILLS : Optical Flow for Heading Estimation of a Quadrotor Helicopter. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1(4):229–239, 2009. ISSN 1756-8293.
- T.F. STUESSY : *Plant taxonomy : the systematic evaluation of comparative data*. Columbia Univ Pr, 2009.
- SURVEYCOPTER : *Copter 1b spécifications*, 2010. [http://www.surveycopter.fr/images/stories/surveycopter/produit\\_pdf/uas01-copter1b\\_fr.pdf](http://www.surveycopter.fr/images/stories/surveycopter/produit_pdf/uas01-copter1b_fr.pdf).
- W. TANG, G. HOWELL et Y.H. TSAI : Barometric altimeter short-term accuracy analysis. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 20(12):24–26, 2005.
- P. TATHAM : An investigation into the suitability of the use of unmanned aerial vehicle systems (UAVS) to support the initial needs assessment process in rapid onset humanitarian disasters. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 13(1):60–78, 2009.
- TELESPAZIO : GeoEye-1 & IKONOS Introductory Price List. [http://www.telespazio.com/ge\\_docs/ik-ge\\_price\\_list.pdf](http://www.telespazio.com/ge_docs/ik-ge_price_list.pdf), 2010.
- THE-DIGITAL-PICTURE.COM : Canon eos 5d mark ii digital slr camera review. <http://www.the-digital-picture.com/reviews/canon-eos-5d-mark-ii-dslr-digital-camera-review.aspx>, 2009.
- Brigitte THOMAS : Biodiversité, Espace et préservation des espèces. *CNES Mag*, (46):38–55, Juillet 2010.
- Charles TOTH : The State-of-the Art in Airborne Data Collection Systems – Focused on LiDAR and Optical Imagery. *In Tutorial Phowo 2009*, 2009.
- K.P. VALAVANIS et M. KONTITSIS : *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, chapitre A Historical perspective on Unmanned Aerial Vehicle, pages 15–46. Springer, 2007.
- P. van BLYENBURGH : *Unmanned Aircraft Systems - The current situation*. EASA UAS Workshop, 2008.

- Peter van BLYENBURGH : UAS, Unmanned Aircraft Systems, The Global Perspective. Rapport technique, UVS International, 2009.
- Yves VANDEWALLE et Jean-Claude VIOLLET : Rapport d'information de MM. Yves Vandewalle et Jean-Claude Viollet déposé en application de l'article 145 du règlement, par la commission de la défense nationale et des forces armées, en conclusion des travaux d'une mission d'information sur les drones. Rapport technique, Assemblée Nationale, 2009.
- JB VIOIX : *Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2004.
- David VISSIÈRE, Pierre-Jean BRISTEAU, Pierre MARTIN et Nicolas PETIT : Experimental autonomous flight of a small-scaled helicopter using accurate dynamics model and low-cost sensors. *In The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008*.
- E. VRINDTS : *Automatic Weed Detection with Optical Techniques as a Basis for Site-Specific Herbicide Application*. Thèse de doctorat, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- VTI TECHNOLOGIES : VTI SCP1000 Datasheet. [http://www.symbriion.eu/tiki-download\\_file.php?fileId=91](http://www.symbriion.eu/tiki-download_file.php?fileId=91), 2007.
- K.J. WALCHKO et P.A.C. MASON : Inertial Navigation. *In Conference on Recent Advances in Robotics, Florida, 2002*.
- Y. WANG, S. SCHULTZ et F. GIUFFRIDA : Pictometry's proprietary airborne digital imaging system and its application in 3d city modelling. *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume XXXVII-B1, pages 1065–1070, 2008.
- WEBAVIATION : Specially Commissioned UK aerial photography prices. <http://www.webbaviation.co.uk/cost.htm>, 2010.
- K.E. WENZEL, P. ROSSET et A. ZELL : Low-cost visual tracking of a landing place and hovering flight control with a microcontroller. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 57(1):297–311, 2010. ISSN 0921-0296.
- B.N. WILFONG, D.L. GORCHOV et M.C. HENRY : Detecting an invasive shrub in deciduous forest understories using remote sensing. 2009.
- Matthew WOOLSEY : *PRISM : Photography Radio-Infrared Shutter Module*. Hexpert Systems, 2005. <http://www.hexpertsystems.com/prism/PrismManual.pdf>.
- D. WUNDRAM et J. LÖFFLER : Kite Aerial Photography in High Mountain Ecosystem Research. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung, Band43, S*, pages 15–22, 2007.

- LA YOUNG, E.W. AIKEN, J.L. JOHNSON, R. DEMBLEWSKI, J. ANDREWS et J. KLEM :  
New concepts and perspectives on micro-rotorcraft and small autonomous rotary-wing  
vehicles. *In AIAA 20th Applied Aerodynamics Conference, St Louis, MO, 2002.*
- P.J. ZARCO-TEJADA, JAJ BERNI, L. SUÁREZ et E. FERERES : A new era in remote sensing  
of crops with unmanned robots. *SPIE Newsroom, 2008.*
- Y. ZHANG : PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF LOW ALTITUDE IMAGE SE-  
QUENCES BY UNMANNED AIRSHIP. *The International Archives of the Photogram-  
metry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, 2008.*
- NE ZIMMERMANN, TC EDWARDS JR, GG MOISEN, TS FRESCINO et JA BLACKARD :  
Remote sensing-based predictors improve distribution models of rare, early successional  
and broadleaf tree species in Utah. *Journal of applied ecology, 44(5):1057–1067, 2007.*



# Annexes

## Annexe n°1 : Complément Floristique

### Callune

*Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Calluna vulgaris* Salisb.

- Arbrisseau 20 à 100 cm, fleurs roses rarement blanches. Feuilles sur 4 rangs calice membraneux coloré en rose, corolle très petite cachée par le calice.
- Floraison juin à octobre.
- Flore Bonnier : Sous-arbrisseau de 30 cm. à 1 mètre, glabre, tortueux, diffus, à rameaux nombreux, effilés, dressés, rougeâtres ; feuilles petites, opposées, densément imbriquées sur 4 rangs, linéaires, sessiles et à 2 pointes à la base ; fleurs roses, brièvement pédonculées, penchées, en grappes simples et lâches ; calice pétaloïde, muni à la base de bractées vertes, à 4 lobes oblongs ; corolle de moitié plus courte que le calice, marcescente, en cloche, à 4 lobes ; 8 étamines, incluses ; capsule velue, globuleuse, à cloisons opposées aux sutures des 4 valves.
- Lieux de vie : Landes, bois et coteaux arides des terrains siliceux ; dans toute la France. Europe ; Asie occidentale, Maroc et îles Açores ; Amérique boréale.
- Fiche taxonomique : <http://www.tela-botanica.org/nn12262>



Source : ©MNHN/G. ARNAL

## Bruyère cendrée

*Erica cinerea* L.

- Floraison juin-septembre.
- Flore Bonnier : Sous-arbrisseau de 20-60 cm., à tiges tortueuses, à rameaux dressés, cendrés-pubérulents ; feuilles verticillées par 3, munies à leur aisselle de fascicules de feuilles, longues de 4-6 mm., linéaires-étroites, marquées d'un sillon en dessous, glabres ; fleurs rouges-violacées, comme verticillées, formant des grappes composées, allongées, obtuses ; pédoncules égalant à peine les fleurs ; calice à lobes lancéolés, glabres, égalant le tiers de la corolle ; celle-ci en grelot ovale (5-6 mm.), à dents courtes et réfléchies ; anthères incluses, munies de 2 cornes ; style peu saillant ; capsule glabre.
- Lieux de vie : Landes et bois siliceux de presque toute la France ; rare dans l'Est. Toute l'Europe occidentale et çà et là dans l'Europe centrale.
- Fiche taxonomique : <http://www.tela-botanica.org/nn24745>



Source : ©MNHN/G. ARNAL

## Bruyère des marais

*Erica tetralyx* L.

- Floraison de juin à octobre
- Flore Bonnier : Sous-arbrisseau de 30 à 80 cm, à rameaux hérissés de poils parfois glanduleux. Feuilles petites, d'environ 4 mm, étalées et verticillées par 4, linéaires et oblongues, blanchâtres en dessous, hérissées de cils raides sur les deux faces et enroulées en dessous par leurs bords. 5 à 12 fleurs roses réunies au sommet des rameaux en petites ombelles denses ; pédoncule floral bien plus court que la fleur ; calice 3 à 4 fois plus court que la corolle, à lobes lancéolés munis de longs poils ; corolle en forme de grelot ovale, de 5 à 7 mm de long, à lobes terminaux courts et réfléchis ; 5 étamines incluses, à anthères munies de cornes à leur base ; fruit = une petite capsule subglobuleuse et velue, à 8 carènes longitudinales ;
- Lieux de vie : Landes et pâturages humides des terrains siliceux, dans tout l'Ouest, le Nord et le Centre ; Pyrénées ; nul dans l'Est et le Midi. Europe occidentale et centrale, jusqu'à la Hongrie.
- Fiche taxonomique : <http://www.tela-botanica.org/nn24777>



Source : ©MNHN/G. ARNAL

## Molinie bleue

*Molinia caerulea* (L.) Moench

- Dimension 40 à 160 cm fleurs violettes, bleues ou vertes.
- Floraison mai-août
- Flore Bonnier : Plante vivace de 30 cm. à 1 mètre, glabre, à souche épaisse fibreuse et tenace ; tiges dressées, raides, longuement nues, à noeud unique caché par les gaines basilaires ; feuilles planes, fermes, rudes ; panicule allongée, contractée après la floraison, dressée, étroite, souvent interrompue, violacée ou verdâtre, à rameaux dressés, scabres, multiflores ; épillets lancéolés, à 2-3 fleurs espacées et caduques, à axe glabre ; glumes inégales, uninervées ; glumelle convexe, mutique ou un peu mucronée, à 3-5 nervures ; caryopse oblong-cylindrique.
- Lieux de vie : Bois, landes et prés humides, dans toute la France. Europe ; Asie tempérée ; Afrique et Amérique boréales.
- Fiche taxonomique : <http://www.tela-botanica.org/n42805>



Source : ©MNHN/G. ARNAL

## Petite Oseille

*Rumex acetosella* L. Polygonaceae

- Dimension de 10 à 50 cm, à fleurs rougeâtres et à feuilles hastées (en forme de fer de lance)
- Floraison mai-octobre
- Flore Bonnier : Plante vivace de 10-50 cm., souvent rougeâtre ou un peu glauque, à souche rampante ; tiges dressées ou ascendantes, grêles, simples ou rameuses ; feuilles petites, toutes pétiolées, oblongues ou linéaires-hastées, à oreillettes divergentes ou relevées, souvent bi-trifides ; gaines membraneuses, blanches, déchirées ; fleurs dioïques, petites, en panicule grêle, lâche, nue ; pédicelles courts, articulés sous le périanthe ; valves fructifères petites, herbacées, ovales entières, égalant à peine le fruit, sans granule ni écaille.
- Lieux de vie : Lieux secs et sablonneux, dans toute la France et la Corse. Régions tempérées de tout le globe.
- Fiche taxonomique : <http://www.tela-botanica.org/n58602>



Source : Wikimédia/H. Kallio





## Annexe n°2 : Registres d'échange de la carte dédiée au capteur

### Legend :

R = Readable bit    W = Writable bit    U = Unimplemented bit, read as '0'  
 -n = Value at Reset    '1' = Bit is set    '0' = Bit is cleared

### Registre 1 : FLAG : Status de la carte

Upper byte :							
U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
–	–	–	–	–	–	–	–
bit 15							bit 8

Lower byte :							
U-0	U-0	U-0	R-0	R-0	R-0	U-0	R-0
–	–	–	NEW2	NEW1	NEW0	–	SYNCOK
bit 7							bit 0

- bit 15-5 **Unimplemented** : Read as '0'
- bit 4 **NEW2** : APN2 New Photo Flag  
 1 = APN2 has taken a photo  
 0 = default
- bit 3 **NEW1** : APN1 New Photo Flag  
 1 = APN1 has taken a photo  
 0 = default
- bit 2 **NEW0** : APN0 New Photo Flag  
 1 = APN0 has taken a photo  
 0 = default
- bit 0 **SYNCOK** : Synchronisation Flag  
 1 = Module is synchronised  
 0 = Module is not yet synchronised

### Registre 2 : APN : Ordres d'action

Upper byte :							
RW-0	RW-0	RW-0	U-0	RW-0	RW-0	RW-0	U-0
PWR2	C_DCL2	DCL2	–	PWR1	C_DCL1	DCL1	–
bit 15							bit 8

Lower byte :							
RW-0	RW-0	RW-0	U-0	RW-0	RW-0	RW-0	U-0
PWR0	C_DCL0	DCL0	–	PWRG	C_DCLG	DCLG	–
bit 7							bit 0

- bit 15 **PWR2** : APN2 power on/off order  
 1 = if off, APN2 must power on  
 0 = if on, APN2 must power off
- bit 14 **C\_DCL2** : APN2 continuous mode start/stop order  
 1 = if on, APN2 must start taking photo continuously  
 0 = if on, APN2 must stop taking photo continuously
- bit 13 **DCL2** : APN2 one shot order  
 1 = if on and not in continuous mode, APN2 must take a photo  
 0 = default (once the photo has been taken, the module clear the bit DCL2)
- bit 12 **Unimplemented** : Read as '0'
- bit 11 **PWR1** : APN1 power on/off order  
 1 = if off, APN1 must power on  
 0 = if on, APN1 must power off
- bit 10 **C\_DCL1** : APN1 continuous mode start/stop order  
 1 = if on, APN1 must start taking photo continuously  
 0 = if on, APN1 must stop taking photo continuously
- bit 9 **DCL1** : APN1 one shot order  
 1 = if on and not in continuous mode, APN1 must take a photo  
 0 = default (once the photo has been taken, the module clear the bit DCL1)
- bit 8 **Unimplemented** : Read as '0'
- bit 7 **PWR0** : APN0 power on/off order  
 1 = if off, APN0 must power on  
 0 = if on, APN0 must power off
- bit 6 **C\_DCL0** : APN0 continuous mode start/stop order  
 1 = if on, APN0 must start taking photo continuously  
 0 = if on, APN0 must stop taking photo continuously
- bit 5 **DCL0** : APN0 one shot order  
 1 = if on and not in continuous mode, APN0 must take a photo  
 0 = default (once the photo has been taken, the module clear the bit DCL0)
- bit 4 **Unimplemented** : Read as '0'
- bit 3 **PWRG** : General power on/off order  
 1 = if the bit is set, the PWR0 order send to APN0 are considered general and applicable to all APN  
 0 = if the bit is clear, each APN is controlled separatedly
- bit 2 **C\_DCLG** : General continuous mode start/stop order  
 1 = if the bit is set, the C\_DCL0 order send to APN0 are considered general and applicable to all APN  
 0 = if the bit is clear, each APN is controlled separatedly

- bit 1    **DCLG** : General one shot order  
           1 = if the bit is set, the DCL0 order send to APN0 are considered general  
           and applicable to all APN  
           0 = if the bit is clear, each APN is controlled separately
- bit 0    **Unimplemented** : Read as '0'

### Registre 3 : RTC : Horloge interne

Nombre de millisecondes depuis le démarrage du DsPIC maitre  
 Registre 16bits, RW-0

### Registre 4 : PIT : Valeur de tangage

Orientation générale du porteur selon l'axe de tangage (en °).

$$pitch = PIT \times \frac{360}{2^{16}}$$

Registre 16bits, RW-0

### Registre 5 : HGT : Valeur de hauteur au dessus du sol

Hauteur du porteur au dessus du sol (en cm).  
 Registre 16bits, RW-0

### Registre 6 : CSGx : Valeur de consigne

Valeur de consigne de l'APNx selon l'axe de tangage (en °).

$$consigne = CSGx \times \frac{360}{2^{16}}$$

Registre 16bits, RW-0

Implémentation : CSG0, CSG1, CSG2

### Registre 7 : PRDx : Période entre deux photos

Période entre deux photos prise par l'APNx (en ms)  
 Registre 16bits, RW-0  
 Implémentation : PRD0, PRD1, PRD2

**Registre 8 : DATx : Date de prise de vue**

Date de prise de vue de la dernière photo prise par l'APNx.

Registre 16bits, RW-0

Implémentation : DAT0, DAT1, DAT2

## Annexe n°3 : Licence Creative Commons




FIG. A3.1 Logos de la licence Creative Commons Paternité - Partage des Conditions Initiales à l'Identique (BY-SA) 2.0. Source : [blog.hartwork.org](http://blog.hartwork.org)


Une grande partie des figures, identifiables aux icônes visibles sur la figure A3.1, que j'ai réalisée pour ce document sont placées sous la licence Creative Commons Paternité - Partage des Conditions Initiales à l'Identique (BY-SA) 2.0.

Le texte complet de cette licence est disponible à l'adresse <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/fr/> mais permet de manière générale :

- de reproduire, distribuer et communiquer ces créations au public
- de modifier ces créations

À condition de respecter les conditions suivantes :

 Paternité — Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il vous soutient ou approuve votre utilisation de l'œuvre).

 Partage des Conditions Initiales à l'Identique — Si vous modifiez, transformez ou adaptez cette création, vous n'avez le droit de distribuer la création qui en résulte que sous un contrat identique à celui-ci.



## Annexe n°4 : Productions personnelles

### Prix / Concours

- 3<sup>e</sup>place au Challenge Minidrones, concours organisé par l’Office National d’Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA)\* et la Direction Générale de l’Armement (DGA)\* de 2007 à 2009 pour la réalisation d’un micro-drone\* de petite taille.
- Finaliste du Challenge Humanitech édition 2009, organisé par la Fondation Casques Rouges, qui promouvait les technologies innovantes permettant de faciliter l’action humanitaire avec le concept *Humanidrone*, d’utilisation des micro-drones pour la cartographie rapide lors des catastrophes naturelles.
- Co-lauréat du concours national OSEO d’aide à la création d’entreprises de technologies innovantes 2010, section « en émergence », pour le projet *AOTERRA : Aide à l’Observation de la TERre par des Robots Autonomes* d’aide à l’inspection d’ouvrages d’art à partir de micro-drones.
- Lauréat de la Bourse de la fondation Steria-Institut de France 2010 pour le projet *Praticarte* qui cherche à fournir un nouvel outil de mesure de la praticabilité des chaussées pour alimenter facilement une base de données géographiques spécifique à destination des personnes à mobilité réduite afin de leur permettre, comme pour les personnes valides, de définir le chemin le plus adapté entre deux points en prenant en compte les contraintes spécifiques de leur handicap.

### Colloques exceptionnels

#### Defcon 17

La Defcon est une des plus grosse conférence mondiale de sécurité, regroupant chaque année à Las Vegas (États Unis), des hackers, des agents fédéraux et des professionnels de la sécurité pour des présentations en informatique et en électronique à la pointe de l’innovation. Sa popularité rend la sélection des intervenants extrêmement stricte notamment pour ceux hors des États Unis La présentation orale<sup>6</sup> s’est déroulée devant plus de huit cents experts en session plénière et s’est conclue par une démonstration des capacités de vols et d’acquisition d’image de notre appareil. La Defcon se démarque des colloques de télédétection (IGARSS, SPIE, AUF...) auquel j’ai pu présenter nos travaux par une forte dimension technique et pratique, les auditeurs désirant comprendre et pouvoir réaliser par la suite les manipulations présentées. On trouve des illustrations de notre séjour sur la figure 3.50 p. 147.

6. La présentation en vidéo est disponible à l’adresse suivant : <http://www.defcon.org/html/links/dc-archives/dc-17-archive.html#Gademer>



## Eurosatory

Eurosatory est un salon européen d'exposition des produits du monde de la défense armée : terrestre, aéroterrestre et sécurité. Il se tient tous les deux ans en juin dans les environs de Paris. Cette année le salon abritait la conférence UAS sur les drones\*, qui réunissait des acteurs industriels, de la recherche et des organes étatiques du monde entier. Cette conférence fut notable par la possibilité qui nous fut offerte de faire, en plus de notre présentation orale, une démonstration exceptionnelle de vol en intérieur, illustrée à la figure 3.49(a) p. 146, devant les participants du colloque, regroupant des membres des forces armées, des confrères chercheurs et des spécialistes internationaux sur les drones.

## Publications de recherche

Cette thèse a fait l'objet de douze publications internationales, dont huit en tant que premier auteur et sept dans des conférences publiant des actes : IGARSS, SPIE, ESA Living Planet et ECIW. Les publications ont pris la forme de neuf présentations orales et de trois sessions de posters.

### Conférences internationales avec comité de sélection et actes

L. AVANTHEY, V. GERMAIN, A. GADEMER, L. BEAUDOIN et J.P. RUDANT : Real time detection of forest fires and volcanic eruptions from Meteosat Seconde Generation images using neural network. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, 2010.

L. BEAUDOIN et A. GADEMER : Towards symmetrization of asymmetric air dominance : the potential key role playing by home-made low cost unmanned aerial systems. *In ECIW 2010 -9th European Conference on Information Warfare and Security*, 2010.

L. BEAUDOIN, A. GADEMER, A. AMIR, L. AVANTHEY, V. GERMAIN et A. POCHEAU : Near real time detection of hot spots on Meteosat Second Generation images : from forest fires to volcanic eruptions. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007*, pages 2318–2321, 2007.

A. GADEMER, F. MAINFROY, L. BEAUDOIN, L. AVANTHEY, V. GERMAIN, C. CHÉRON, S. MONAT et JP RUDANT : Solutions for near real time cartography from a mini-quadrotor UAV. *In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7478, page 37, 2009a.

A. GADEMER, F. MAINFROY, L. BEAUDOIN, L. AVANTHEY, V. GERMAIN, C. CHÉRON, S. MONAT et J.P. RUDANT : Faucon noir UAV project development of a set of tools for managing, visualizing and mosaicing centimetric UAV images. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 2009b.

A. GADEMER, B. PETITPAS, L. BEAUDOIN, T. TANZI, B. RIERA et J.P. RUDANT : Using centimetric visible imagery obtained from an UAV quadrotor for classification of ers images. *In ESA Living Planet Symposium*, 2010b.

---

A. GADEMER, B. PETITPAS, Samira MOBAIED, L. BEAUDOIN, B. RIERA, M. ROUX et J.P. RUDANT : Developing a low cost Vertical Take Off and Landing Unmanned Aerial System for centimetric monitoring of biodiversity - the Fontainebleau case. *In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010. IGARSS 2010*, 2010c.

### **Conférences internationales avec comité de sélection sans actes**

A. GADEMER, L. BEAUDOIN, S. MONAT, C. CHÉRON et J.P. RUDANT : Réalisation d'un drone pour des missions de télédétection THR environnementales à la demande. *In XI<sup>ème</sup> journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF*, 2008.

A. GADEMER et C. CHÉRON : A low cost spying quadrotor for global security applications using hacked commercial digital camera. *In DefCon 17*, 2009.

A. GADEMER, B. PETITPAS, L. BEAUDOIN, M. ROUX et J.P. RUDANT : Système micro-drone multi-caméras pour l'extraction à la demande de paramètres de surface. *In XIII<sup>ème</sup> journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF*, 2010a.

A. GADEMER, V. VITTORI et L. BEAUDOIN : From light to ultralight UAV. *In UAS 2010 - 12th International Conference & Exhibition at Eurosatory, Paris*, 2010d.

B. PETITPAS, A. GADEMER, M. ROUX, B. RIERA et J-P. RUDANT : Nouvelles méthodologies de mesures sur la végétation à partir de reconstructions 3D obtenue à partir de séquences photographiques terrestres ou aériennes. *In Colloque "L'évaluation environnementale pour la gestion des ressources naturelles"*, 2010a.