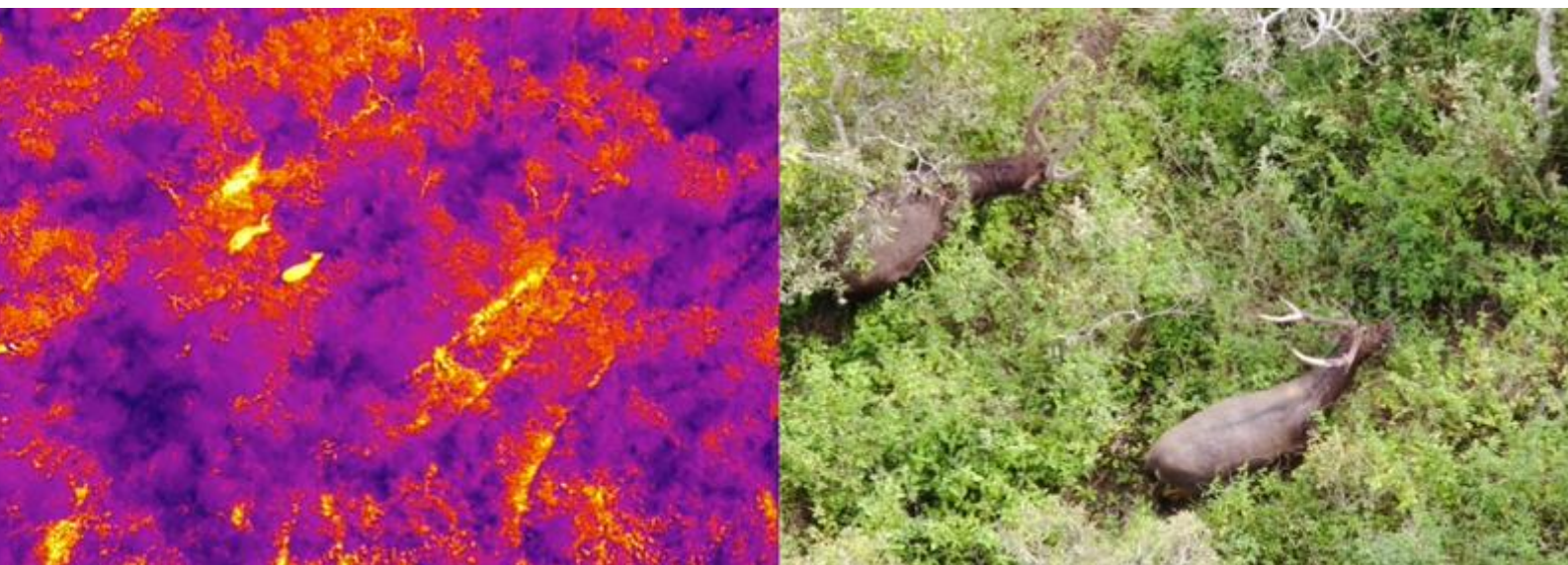




Étude de faisabilité d'un indice aérien d'abondance cerfs par drone avec capteur thermique.

Phases 1, 2 et 3

Romain ALLIOD
Naseur CHERIF

Et avec la collaboration scientifique de Stanislaw Pagacz et Julia Witczuk

Version 5 du 04/06/2022



ECOTONE NC SARL
RIDET N° 1 285 956.001
8 rue du capitaine bois Nouville Plaisance 98800 Nouméa
Tel: 987777
Email: ecotone.nc@gmail.com



Commanditaire

- Conservatoire d'Espaces Naturels de Nouvelle-Calédonie
- Dans le cadre projet régional européen PROTEGE dans le Pacifique, et financée par l'Agence Rurale

Contact (s) interne (s) :

- Carole WEMA (Animatrice PROTEGE CEN)
- Géraldine BIDAUD (Assistante PROTEGE CEN)
- Maxime LEBOUTEILLER (Technicien PROTEGE CEN)
- Patrick BARRIERE (Coordinateur PEE CEN)

Participation à l'étude :

- Romain ALLIOD (Prestataire Droniste)
- Naseur CHERIF (Expert Géomathématicien)
- Julia WITCZUK et Stanislaw PAGACZ (experts dans le suivi des cervidés en Pologne – chercheurs du Musée et Institut de Zoologie de l'Académie Polonaise des Sciences)

Rédacteurs du rapport :

- Romain ALLIOD
- Naseur CHERIF

Dates clés :

Version 1 Phase 1

- Date de soumission initiale : 26/08/2021
- Date retour client : 10/12/2022
 - Personnel (s) du client ayant commenté le rapport : Équipe PROTEGE et PEE CEN

Version 2 Phase 1 + Version 1 Phase 2

- Date de soumission initiale : 08/01/2022
- Date retour client : 21/02/2022
- Personnel (s) du client ayant commenté le rapport : Équipe PROTEGE/PEE CEN

Version Finale Phase 1 + Version 2 Phase 2 + Version 1 Phase 3

- Date de soumission initiale : 28/02/2022
- Date retour client : 21/03/2022
- Personnel (s) du client ayant commenté le rapport : Équipe PROTEGE/PEE CEN/GT OE (amendements demandés au GT seulement sur la phase 1 et 2, mail envoyé le 01/03/2022, amendements attendus avant le 18/03/2022)

Version Finale Phase 1 + Version 3 Phase 2 + Version 2 Phase 3

- Date de soumission initiale : 04/04/2022
- Date retour client : 25/04/2022
- Personnel (s) du client ayant commenté le rapport : Équipe PROTEGE et PEE CEN

Version Finale Phase 1 + Phase 2 + Phase 3 + [Fiche IAAD](#)

- Date de soumission initiale : 09/05/2022
- Date retour client : 31/05/2022
- Personnel(s) du client ayant commenté le rapport : Équipe PROTEGE/PEE CEN/GT OE
- Date de dernière soumission : 05/06/2022
- Date de validation par le client : 07/06/2022

Remerciements

Nos remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de cette étude, dans le cadre du projet régional européen PROTEGE Thème 4 « Espèces Exotiques Envahissantes » en Nouvelle-Calédonie, et notamment :

- Le commanditaire : le Conservatoire d'espaces naturels de Nouvelle-Calédonie dont les agents du Pôle Espèces Envahissantes et notamment l'équipe PROTEGE m'ont accompagné tout au long des 3 phases de cette étude par leur expertise technique, la mise à disposition de références bibliographiques, l'appui logistique, la relecture des différentes versions du rapport et de la fiche technique, et la concertation auprès des populations des zones prioritaires du projet ;
- Le financeur principal : l'Agence Rurale ;
- L'ensemble des membres du Groupe Technique Ongulés Envahissants ;
- Les structures et/ou propriétaires qui m'ont accueilli pour la réalisation des différents tests en vol : La SEM Mwé Ara sur le Domaine de Déva (Bourail), le Parc Provincial des Grandes Fougères (Farino), Philippe BOURGINE sur sa ferme de chasse la Cotonnière (Boulouparis), Charly et Cédric AKINAGA à La Foa, la propriété ETS CHEVAL à Nassandou (Païta) et les autorités coutumières de la tribu de Koua à Thio.
- Giovanni MOINDOU, animateur de terrain PROTEGE, pour sa contribution au balisage des différents sites de Thio en perspective des vols drone ;
- Les services de l'Etat et la Direction de l'Aviation Civile pour l'attribution des autorisations de vol ;
- Julia WITCZUK et Stanislaw PAGACZ pour leur expertise sur le suivi aérien des cervidés en Pologne, leur importante contribution à la réalisation de la phase de mise en œuvre et de traitement des données du protocole test de l'IAAD-NC.
- Kate STEFFENS et Souad BOUDJELAS, du Département de la Conservation de Nouvelle-Zélande, pour la transmission de références bibliographiques.

Sommaire

1	Synthèse des suivis de la faune sauvage par drone	1
1.1	Intérêt du suivi des espèces sauvages	1
1.2	Techniques de suivi et avancées technologiques	1
1.3	Le drone dans les suivis des espèces.....	3
1.4	Avantages et inconvénients des suivis par drone	4
2	Suivi des populations de cerfs par drone thermique, une perspective pour la Nouvelle Calédonie	8
2.1	Intérêt d'une bonne estimation de l'abondance relative des populations.....	8
2.2	Les différentes approches d'indice d'abondance des cerfs.....	9
2.3	Comptage des cerfs par drone thermique :	11
2.3.1	Principe.....	11
2.3.2	Avantages et inconvénients.....	13
2.3.2.1	Avantages	13
2.3.2.2	Inconvénients.....	13
2.3.3	En résumé.....	14
2.4	Acquisition, traitement et analyse des données drone en thermique.....	15
2.4.1	Importance de la méthode de suivi et de comptage	15
2.4.1.1	Orthophotos VS vidéos.....	15
2.4.1.2	Hauteur de vol, impact sur l'empreinte au sol et le comportement des animaux	17
2.4.1.3	Angle caméra	19
2.4.1.4	Plan de vol (par quadra/blocs ou bande de transect).....	19
❖	Exemple de plan de vol drone par quadras/blocs (balayage de zone).....	20
❖	Exemple de plan de vol drone par bande de comptage/strip transects	22
2.4.2	Traitement et analyse des données : intérêt et limite du comptage automatisé	23
3	Pré-étude pour la mise en place d'un indice aérien d'abondance par drone thermique sur le territoire calédonien (Phase 2 de calibration).....	26
3.1	Selection du type de drone	26
3.1.1	Ailes volantes:	26
3.1.2	Multirotors	27
3.2	Matériel utilisé pour l'étude.....	28
3.2.1	Le drone : Matrice 300 RTK homologué S2 et S3 (Prix : 1 900 000 cfp)	28
3.2.2	Le capteur : Zenmuse H20T (Prix : 1 600 000 CFP)	29
3.3	Essais opérés sur zones tests	29
3.3.1	Zones prospectées.....	29
3.3.2	Démarches réglementaires.....	31
3.3.2.1	Généralité.....	31
3.3.2.2	Démarches réalisées.....	32
3.3.3	Prise de connaissance du capteur H20T sur animaux sauvages.....	34
3.3.3.1	Test des palettes de couleur	34
3.3.3.2	Test de détection du cerf rusa et définition des signatures thermiques avec le capteur	35
❖	Signatures thermiques cerfs rusa versus chevaux	37
❖	Signatures thermiques cerfs rusa versus vaches	38
❖	Signatures thermiques cochons sauvages.....	38
3.3.4	Test de nuit du comportement des cerfs face au drone et observation de l'activité journalière (24h)/saisonnalité	39
3.3.4.1	Perturbations sur le comportement.....	39
3.3.4.2	Activité nocturne et saisonnière	41
❖	Pour résumé :	42

3.3.5	Hauteur et angle caméra optimum pour la mise en place du protocole de vol de l'acquisition de la donnée	43
3.3.5.1	Les contraintes (règles) liées à l'utilisation de l'algorithme	43
3.3.5.2	Optimum théorique	44
3.3.5.3	Tests pratiques sur le terrain	49
3.3.5.4	Définition des paramètres de vol (angle et hauteur) à partir des données théoriques et pratiques (terrain)	51
3.4	Calibration pour traitement de la donnée, compatibilité entre le format vidéo du capteur H20T et les logiciels de géomatiques/SIG.....	52
3.4.1	Arcpro ESRI FMV	53
❖	Échantillon vidéo issu du drone DJI capteur H20T	53
3.4.2	QGIS FMV	55
3.4.2.1	Compatibilité vidéo H20T et QGIS FMV	55
3.4.2.2	Les tests de positionnement	56
❖	Méthode	56
❖	Le déroulé	56
3.4.3	Format et contenu des métadonnées (fichier SRT) du capteur H20T	57
3.4.4	Résultat du traitement de l'acquisition vidéo géoréférencée par QGIS FMV	58
4	Mise en place du protocole d'échantillonnage et de l'indice aérien d'abondance (Phase 3)	61
4.1	Optimisation/création des plans de vol automatisés d'une mission type et tests en réalité terrain	62
4.1.1	Période d'échantillonnage	62
4.1.2	Zones d'étude	63
4.1.3	Phase de prospection	65
4.1.4	Démarches règlementaires	65
4.1.5	Edition/paramétrage des plans de vol automatisés et tests sur le terrain ...	66
4.1.5.1	Balayage/scan de zone	66
4.1.5.2	Espacement des lignées et vitesse de vol pour le balayage de zone	67
❖	Espacement des lignées (transects)	67
❖	Vitesse de vol	68
4.1.6	Présentation des différentes missions	68
4.1.7	Informations générales des missions opérées selon les différents plans de vol programmés sur chaque zone d'étude	72
4.2	Résultats des tests du protocole d'acquisition de la donnée par missions automatisés	72
4.2.1	Premières observations	72
4.2.2	Réajustement des paramètres de vol pour les zones à dénivelés importants (zones prioritaires)	74
4.2.2.1	Angle caméra	74
4.2.2.2	Hauteur de vol	77
4.2.2.3	Espacement des lignées	78
4.2.2.4	Contraintes des paramètres réajustés sur le protocole général de l'indice d'abondance cerf	78
4.2.3	Bilan du protocole d'acquisition de la donnée par balayage de zone	78
4.2.3.1	Protocoles, caractéristiques et données techniques	78
➤	Protocole 1 : adapté en zone plane et ouverte	79
➤	Protocole 2 : adapté en zones à fort dénivelé et/ou à végétation arbustives/arborée plus ou moins dense (cas des zones prioritaires)	79
4.2.3.2	Efficacité du protocole d'acquisition de la donnée et perspectives pour l'indice aérien d'abondance cerfs par drone en zone prioritaires	80
❖	Sur le Domaine de Déva	80
❖	Sur la zone prioritaire de Thio (Koua)	82
4.2.3.3	Limites du protocole d'échantillonnage en conditions réelles de terrain	84
4.2.3.4	Les zones d'accès	84
4.2.3.5	L'autonomie du drone	86

4.2.3.6	Période d'échantillonnage et caractéristique du sol.....	87
4.2.3.7	La végétation, recouvrement végétal.....	90
❖	Détection possible dans seulement certains cas de recouvrement végétal	90
4.3	Modalités de détection-dénombrement	93
4.3.1	Dénombrement par comptage manuel.....	93
4.3.2	Dénombrement par comptage automatisé (Algorithme de détection automatique des cervidés).....	93
4.3.3	La création de la base de connaissance.....	94
4.3.4	L'algorithme d'apprentissage.....	95
4.3.5	Les résultats des modèles	96
4.3.6	La détection automatique par points chauds	97
4.3.6.1	Extraction des objets présentant un fort contraste par rapport à l'environnement	97
4.3.6.2	Le calcul des caractéristiques-images des objets extraits.....	97
4.3.6.3	La recherche d'un profil-type.....	97
4.3.7	La détection automatique duale modèle et points chauds.....	97
4.3.7.1	La discrimination des zones	98
4.3.7.2	La recherche d'éléments dans les zones.....	98
4.3.7.3	L'extraction des caractéristiques et propriétés des éléments	98
4.3.7.4	Le "suivi" des animaux détectés pour limiter le double comptage.....	98
4.3.8	Validation de l'algorithme VS comptage manuel/opérateur.....	99
4.4	Synthèse des différentes étapes de mise en œuvre de l'indice aérien d'abondance Cerf rusa par drone thermique en Nouvelle Calédonie sur zone prioritaire	101
4.4.1	Protocole général de la définition de la zone d'étude	101
4.4.1.1	Etape 1 : Définition de la zone d'étude et des superficies théoriques possibles à couvrir par drone thermique	101
4.4.1.2	Etape 2 : définition des zones de survol réelles selon les possibilités techniques et logistiques	102
4.4.1.3	Etape 3 : Sélection des secteurs de vol dans la grille selon les différentes contraintes	107
❖	Sélection volontaire.....	107
❖	Sélection aléatoire.....	107
4.4.2	Autorisations réglementaires et coutumières pour les vols de nuit sur la zone	108
4.4.3	Edition des missions et redondance/reproductibilité du protocole mise en place sur zone	109
4.4.4	Lancement des vols selon protocole et paramètres bien définies et acquisition de la donnée.....	110
4.4.5	Traitement de la donnée sur QGIS, comptage manuel ou par algorithme semi-automatique (P2)/automatique (P1).....	112
4.4.6	Synthèse des avantages, inconvénients/limites de l'indice.....	114
4.5	Coûts des différentes étapes de mise en œuvre de l'indice aérien d'abondance Cerf rusa sur zone prioritaire.....	116
5	Recommandations.....	119
6	ANNEXES	120
6.1	Annexe 1	120
6.2	Annexe 2	122
6.3	Annexe 3	123
6.4	Annexe 4	124
6.5	Annexe 5	125
7	Bibliographie.....	126

Tableaux

Tableau 1 : Synthèse des dates, du nombre d'heures réalisé pour les étapes d'autorisations/réglementation et de prospection/logistique, ainsi que le nombre de vols opérés en drone avec capteur thermique sur les différentes propriétés au cours de la phase 2 (calibration) de l'étude.	30
Tableau 2 : Données relatives à la saisonnalité du climat végétation cerf et optimal de régulation et suivi, CEN 2021	42
Tableau 3 : Exemple de calculs des différentes variables à partir des données fournis par Burke et al. 2018 sur les projections géométriques et distances au sol selon la hauteur de vol et l'angle de caméra de notre capteur thermique H20T... ..	47
Tableau 4 : Champ des métadonnées ArcPro FMV et informations utilisées dans le fichier SRT donnée par le capteur pour renseigner les champs de ArcPro FMV... ..	54
Tableau 5 : Mesures et vérification des positions entre la valeur GPS et la valeur de positionnement donnée par QGIS-FMV.....	57
Tableau 6 : Différences (en rouge) entre les fichiers de métadonnées SRT pour les vidéos échantillons et cibles générées par le capteur thermique H20T.	58
Tableau 7 : Synthèse des dates, du nombre d'heures réalisé pour les étapes d'autorisations/réglementaires et de prospection/logistique, ainsi que le nombre de vols opérés et les superficies prospectées en drone, avec capteur thermique, sur les différentes propriétés étudiées au cours de la phase 3.....	72
Tableau 8 : Paramètres et caractéristiques des plans de vol du protocole d'échantillonnage en zones planes, peu boisées à totalement ouvertes.	79
Tableau 9 : Paramètres et caractéristiques des plans de vol du protocole d'échantillonnage en zones arbustives/arborée plus ou moins dense et/ou dénivelé important.	79
Tableau 10 : Paramètres des plans de vol selon le protocole d'échantillonnage P1 (en zones planes, peu boisées à totalement ouvertes) et P2 (en zones arbustives/arborée plus ou moins dense et/ou dénivelé important).	109
Tableau 11 : Synthèse des conditions météorologiques favorables ou non pour la réalisation des vols drone en toute sécurité selon les limitations machine du drone utilisé au cours de cette étude.	111
Tableau 12 : Caractéristiques techniques de vol avec le protocole d'échantillonnage P1 (en zones planes, peu boisées à totalement ouvertes) et P2 (en zones arbustives/arborée plus ou moins dense et/ou dénivelé important) pour le drone Matrice 300 RTK avec capteur thermique H20T.....	111
Tableau 13 : Synthèse générale des avantages et inconvénients (limites) de l'IAAD-NC.....	114
Tableau 14 : Synthèse générale des avantages et inconvénients (limites) de l'IAAD-NC (suite)	115
Tableau 15 : Exemple des coûts des différentes étapes et de la globalité pour la mise en place de l'IAAD-NC sur 600 ha de la zone prioritaire de Thio (Partie A, côté tribu de Koua) selon 2 scénarios (externalisation et internalisation de l'étude).	117
Tableau 16 : Temps d'amortissement (en nombre de suivis) de l'acquisition par le gestionnaire (internalisation) du protocole de l'IAAD sur sa globalité (matériel,	

logiciel, algorithmes compris), simulation de 600 ha sur la zone prioritaire de Thio	118
Tableau 17 : Exemples de suivi de différentes espèces sauvages par drone en Australie, Europe et Amérique (Source Mangewa et al. 2019).....	120
Tableau 18 : Exemples de suivi de différentes espèces sauvages par drone en Asie et Afrique (Source Mangewa et al. 2019).....	121
Tableau 19 : Synthèse des heures de vol opérées en drone avec capteur thermique réalisées sur les différentes propriétés lors de la phase 2 (calibration) de l'étude.	122
Tableau 20 : Détails des dates et heures de vol réalisées au cours de la phase 3 de l'étude sur chacune des zones prospectées.....	123

Figures

Figure 1 : Illustration du champ de vision d'un capteur thermique divisé en une grille pour représenter les pixels dans le détecteur. Le champ de vision contient une cible d'intérêt (cercle bleu), un obscurcissant l'objet comme un arbre par exemple (étoile brune) et l'arrière-plan (blanc) (Source Burke et al 2019).	12
Figure 2 : Images d'une vidéo démontrant la détection d'animaux masqués par la canopée des arbres dans une forêt de conifères. Les signatures visibles sont marquées par des cercles en trait plein, les cercles en pointillés marquent l'emplacement des animaux masqués. Hauteur 150 m, forêt de pins avec couvert végétal modéré (Witczuk et al. 2018).....	17
Figure 3 : Quelques exemples de signatures thermiques des animaux sous différents angles et hauteurs d'un capteur thermique (Source : Meyer et al. 2019)	19
Figure 4 : Exemple de trajectoire de vol en balayage de zone tiré de l'étude de Maxwell C.Ott, 2020, sur l'utilisation des drones avec un capteur thermique pour cartographier et compter des populations de cerf.	20
Figure 5 : Exemple de trajectoires de vol en balayage/scan au-dessus de 2 zones A et B (Parc national de Drawieński, Pologne, avril 2015) tiré de l'étude de Witczuk et al. 2017. Les symboles pour le cerf, le sanglier, le chevreuil et les espèces inconnues indiquent les emplacements approximatifs des animaux détectés. Le nombre à côté du symbole indique le nombre d'animaux dans le groupe.....	21
Figure 6 : Exemple de Trajectoire de vol (lignes blanches) en blocs (balayage de zone en forme de polygone) et transects parcourus (surlignés en jaune et étiquetés) tiré de l'étude de Beaver et al. 2020 pour des relevés thermiques par drones sur le cerf de Virginie.....	21
Figure 7 : Exemple de trajectoire de vol en bande de comptage (Strip transect) tiré de l'étude de Maxwell C. Ott, 2020, sur l'utilisation des drones avec un capteur thermique pour cartographier et compter les populations de cerf (En (A) trajectoire de vol simple et (B) trajectoire de vol avec la surface au sol couverte par le vol/capteur).....	22
Figure 8 : Exemple de trajectoire de vol en bande de comptage (Strip transect) tiré de l'étude de Maxwell C.Ott, 2020, sur l'utilisation des drones avec un capteur thermique pour cartographier et compter les populations de cerf (En (A) trajectoire de vol simple et (B) trajectoire de vol avec la surface au sol couverte par	

le vol/capteur). Le chemin étrange emprunté dans la partie supérieure gauche du chemin est dû à l'observation d'un groupe de cerfs, qui ont été suivis pendant une courte période.....	22
Figure 9 : Aile volante (à gauche) et hexacopter (à droite).....	26
Figure 10 : Limites des différentes zones d'étude pour la phase 2 de l'étude.	30
Figure 11 : Délimitation (en jaune) de la zone de vol de la propriété ETS Cheval en plein dans la zone d'influence de l'aéroport de Tontouta (couloirs aériens contrôlés = CTR, en rouges).....	33
Figure 12 : Délimitation (en jaune) de la zone de vol du domaine de Déva avec la partie EST sous l'influence de l'aérodrome de Poé (couloirs aériens contrôlés = CTR, en rouges).....	33
Figure 13 : Capture d'écran d'une vidéo prise en drone thermique en lisière de forêt sur la propriété de Mr Bourguine (La Cotonnière) à 18h le 30/05/21.....	41
Figure 14 : Mensurations moyennes des différentes classes de Cerf rusa (document fourni par le CEN).....	45
Figure 15 : (a) Schéma montrant les distances et les projections géométriques d'un capteur monté sur un drone avec la définition des différentes variables. (b) Schéma montrant le champ de vision de la caméra projeté au sol avec la définition des différentes variables. Source Burke et al 2018.	46
Figure 16 : Graphiques représentant, selon l'angle de caméra (de -50 à -90 °) et la hauteur du drone (70 à 110 m), le nombre de pixel structurant un cerf de 1 m de long et la superficie (en m ²) couverte par l'image.....	48
Figure 17 : Capture d'écran illustrant l'outil complémentaire Full Motion Vidéo d'ESRI utilisé pour identifier et géoréférencer les individus (ou groupes d'animaux) détectés lors de vols aériens de drones thermiques (Source Beaver et al. 2020). Les lignes jaunes indiquent la trajectoire de vol programmée de l'avion et les transects et les lignes violettes indiquent la trajectoire de vol réelle de l'avion. Les points colorés indiquent des observations marquées des cerfs de Virginie détectés.	53
Figure 18 : Capture d'écran illustrant l'outil complémentaire Full Motion Vidéo de QGIS adapté avec nos données drones acquises directement sur le terrain dans le but d'identifier et géoréférencer les individus (ou groupes d'animaux) détectés lors de nos vols en drones thermiques. La fenêtre de droite représente l'extension FMV. La vidéo du drone est visionnée à ce niveau. Des animaux (3 individus) sont bien identifiables sur cette dernière. La fenêtre de gauche permet d'indiquer la trajectoire de vol réelle de l'avion et voir les transects réalisés en même temps que le visionnage de la vidéo. Le polygone bleu représente l'empreinte au sol de la vidéo.....	59
Figure 19 : Capture d'écran illustrant l'outil complémentaire Full Motion Vidéo de QGIS avec un exemple de pointage des animaux identifiés sur la vidéo dans l'extension FMV (fenêtre de droite). Les individus pointés sont matérialisés par un point numéroté sur la vidéo et sont en même temps directement géoréférencés et numérotés dans la fenêtre de gauche de la plateforme SIG (croix rouges).	60
Figure 20 : Zones prospectées pendant le confinement pour la mise en place du protocole d'échantillonnage pendant le séjour des scientifiques Polonais (Stanislaw Pagacz et Julia Witczuk) pour la phase 3 de l'étude.	64

Figure 21 : Zones prospectées après le confinement pour la mise en place et validation du protocole d'échantillonnage lors de la phase 3 de l'étude.	65
Figure 22 : Exemple d'un plan de vol réalisé sur le Domaine de Déva en mode balayage de zone et suivi de terrain.	67
Figure 23 : Exemple d'un plan de vol réalisé sur Koua en mode balayage de zone et suivi de terrain.	67
Figure 24 : Exemple d'un plan de vol réalisé sur le Domaine de Déva en mode balayage de zone et suivi de terrain avec un espacement des lignées de 80 m	68
Figure 25 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur la propriété de la ferme de chasse La Cotonnière (Boulouparis).	69
Figure 26 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur le Domaine de Déva (Bourail).	69
Figure 27 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur le Parc des Grandes Fougères (Farino).	70
Figure 28 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur la propriété ETS Cheval (Nassandou).	70
Figure 29 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur la partie Sud-Ouest de la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua).	71
Figure 30 : Extrait d'une acquisition vidéo du drone avec caméra thermique sur QGIS FMV en mission de vol à hauteur de 70 m et angle caméra de - 50° sur le Domaine de Déva dans une zone avec des variations de dénivelé importantes. Sur cette acquisition 9 cerfs sont notables au loin dans la vallée derrière la crête sur un bout de piste.	73
Figure 31 : Schéma explicatif du biais de l'empreinte au sol du capteur thermique avec un angle caméra de -50° sur une zone présentant des variations importantes de dénivelé. Exemple de mission pris de l'étude réalisée sur le Domaine de Déva.	74
Figure 32 : Simulation des empreintes au sol durant une mission pour un angle caméra de -50° et une hauteur de vol de 70 m dans une partie plane (en vert) et une partie à fort dénivelé (en rouge).	75
Figure 33 : Simulation des empreintes au sol durant une mission pour un angle caméra de -90° et une hauteur de vol de 70 m dans une partie plane (en vert) et une autre à fort dénivelé (en bleu).	75
Figure 34 : Simulation des empreintes au sol lors d'un passage du drone dans de la végétation arbustive ou arborée avec des animaux (cerfs) pour un angle caméra de -50° et une hauteur de vol de 70 m. En rouge est représenté l'angle de vue avec des animaux (ou partie d'animaux) caché par cette végétation.	76
Figure 35 : Simulation des empreintes au sol lors d'un passage du drone dans de la végétation arbustive ou arborée avec des animaux (cerfs) pour un angle caméra de -90° (à la verticale) et une hauteur de vol de 70 m. En rouge est représenté l'angle de vue avec des animaux (ou partie d'animaux) caché par cette végétation.	77

Figure 36 : Capture d'écran d'un exemple du protocole d'acquisition et du traitement de la donnée avec QGIS FMV sur une mission réalisée sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua). Dans cet exemple 5 cerfs sont identifiés et comptabilisés dans la végétation arbustive. 80

Figure 37 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone d'une superficie de 85 ha prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. La zone concernée se situe sur le Domaine de Déva dans une vallée en majorité plane avec essentiellement une végétation du type arbustive (Vert foncé) et herbacée (vert clair). Les zones en rouge représentent la végétation du type arborée. 81

Figure 38 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone sur 2 parties du Marée Fournier du domaine de Déva (MF1 et MF2), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. Zone plane avec essentiellement une végétation du type arborée (en rouge) et arbustive (vert foncé), avec quelques zones herbacées (vert clair). 82

Figure 39 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone (MT1) sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. Zone avec dénivelé important et dominée par une végétation du type arborée (en rouge), et avec quelques zones arbustive (vert foncé) et herbacées (vert clair) notables. 83

Figure 40 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone (MT2) sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. Zone avec dénivelé important et avec une végétation essentiellement du type herbacée (vert clair) et quelques zones arbustives (vert foncé). 83

Figure 41 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV des cerfs identifiés (points en jaune) sur l'ensemble des 2 missions (MT1 et MT2) sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. 84

Figure 42 : Cartes de l'accessibilité des parties A et B de la zone prioritaire de Thio. Les pistes et routes accessibles en véhicule sont représentées en vert. Sur la zone A, deux petits bouts de chemin accessibles seulement à pied (en rouge) ont été renseignés et observés lors de cette étude. 86

Figure 43 : Extrait d'image d'une acquisition vidéo thermique de nuit d'un cerf sur une partie de revêtement du sol encore bien chaud (saison estivale) de la propriété ETS Cheval révélant la signature thermique de l'animal plus prononcée que le sol, malgré son rayonnement thermique. 90

Figure 44 : Exemple de définition de la zone d'étude et des superficies théoriques sur la partie A de la zone prioritaire de Thio avec en rouge la strate arborée, en vert foncé la strate arbustive et en vert clair la strate herbacée. Données récupérées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (<https://georep.nc/explorateur-cartographique>). 102

Figure 45 : Accessibilité de la partie A de la zone prioritaire de Thio établie à partir des bases de données routières et de la prospection terrain. 104

Figure 46 : Cellules accessibles sur la partie A de la zone de Thio par drone d'un rayon d'action de 1100 m et en tenant compte des différents accès (véhicule et à pieds).....	105
Figure 47 : Intervisibilité depuis un point particulier en crête de la partie A de la zone prioritaire de Thio.	106
Figure 48 : Exemple d'obstruction de la ligne de visée par le relief (vallée).....	106
Figure 49 : Intervisibilité sur le site de Thio (partie A). Les paramètres sont : une distance entre le télépilote et le vecteur de 1,1km maximum et une hauteur de vol du vecteur de 90m.....	106
Figure 50 : Cellules accessibles sur le site de Thio (partie A) en tenant compte de l'ensemble des contraintes.....	107
Figure 51 : Sélection aléatoire des cellules par groupes de (3*3) partie A de la zone prioritaire de Thio	108
Figure 52 : Représentation des différents plans de vol de la partie A de la zone prioritaire de Thio. Missions éditées à l'aide de l'application de programmation de plan de vol automatisé et basées sur l'emplacement théorique de sélection aléatoire.....	110
Figure 53 : Exemple du traitement, à l'aide de QGIS FMV, de la vidéo acquise par drone avec capteur thermique.	113
Figure 54 : Carte de l'occupation du sol de la végétation sur le Parc des Grandes Fougères avec en rouge la strate arborée, en vert foncé la strate arbustive et en vert clair la strate herbacée. Données récupérées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (https://georep.nc/explorateur-cartographique).....	124
Figure 55 : Carte de l'occupation du sol de la végétation sur la partie A de la zone prioritaire de Thio avec en rouge la strate arborée, en vert foncé la strate arbustive et en vert clair la strate herbacée. Données récupérées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (https://georep.nc/explorateur-cartographique).....	124

Planches Photos

Planche photos 1 : Exemples de palettes de couleur du capteur H20T testées de nuit sur un groupe de cerf rusa (Ferme de chasse la Cotonnière).....	35
Planche photos 2 : Observation de nuit de cerfs rusa par drone thermique à une hauteur entre 70 et 100 m.	36
Planche photos 3 : Observation des différences de signatures thermiques de nuit par drone thermique entre cheval et cerfs à hauteur de vol et angle caméra similaires.....	37
Planche photos 4 : Observation des différences de signatures thermiques de nuit par drone thermique entre vaches et cerfs à hauteur de vol et angle caméra similaires.....	38
Planche photos 5 : Observation des signatures thermiques de nuit par drone thermique de cochons sauvages.	38
Planche photos 6 : Captures d'images d'acquisitions vidéo effectuées de nuit par drone thermique à basse altitude sur des cerfs afin de tester leur comportement face aux nuisances générées par l'aéronef.....	40

Planche photos 7 : Exemple de tests d'angle caméra réalisés à une hauteur de 100 m par drone thermique sur un groupe de cerf rusa.....	50
Planche photos 8 : Exemple de tests d'angle caméra réalisés à une hauteur de 70 m par drone thermique sur un groupe de cerf rusa.....	51
Planche photos 9 : Exemple d'acquisition d'image en thermique de nuit sur la zone prioritaire de Koua dans des zones avec des cailloux, rochers qui ont emmagasinés la chaleur de la journée et entraînant un biais dans la détection des cerfs.	88
Planche photos 10 : Différents extraits d'images d'une acquisition vidéo thermique de nuit sur un cerf dans une zone de cailloux/rochers encore chauds de la zone prioritaire de Thio révélant le mouvement de l'individu ainsi que sa signature thermique plus prononcée que les cailloux/rochers aux alentours.	89
Planche photos 11 : Visualisation de différentes images drone en thermique de nuit au-dessus de zones de forêt denses impénétrables (strate arborée) dans la zone prioritaire de Koua où des animaux à sang chaud comme le cerf pourraient être présents mais indétectables à cause de la forte densité de canopée fermée.	91
Planche photos 12 : Exemples de situation en vol drone de nuit et avec capteur thermique sur des zones de forêt du Domaine de Déva (zone du Marée Fournier) classées en strate arborée mais présentant sur le terrain une structure de canopée semi-ouverte, permettant de distinguer des points chauds (animaux) au travers.	92
Planche photos 13 : Représentation de l'intégration dans le maillage de l'occupation du sol sur la partie A de la zone prioritaire de Thio.....	103
Planche photos 14 : Visualisation de différentes images drone en thermique de nuit au-dessus de zones de forêt (strate arborée), avec un couvert végétal semi-ouvert, de la propriété ETS Cheval, permettant de distinguer des points chauds (animaux) au travers.	125
Planche photos 15 : Visualisation de différentes images drone en thermique de nuit au-dessus de zones de forêt (strate arborée), avec un couvert végétal semi-ouvert, de la zone prioritaire de Thio (mission MF1), permettant de distinguer des points chauds (animaux) au travers.	125



1 Synthèse des suivis de la faune sauvage par drone

1.1 Intérêt du suivi des espèces sauvages

Les activités humaines, qu'elles soient directes ou indirectes, créent des conditions/modifications environnementales qui engendrent des menaces et/ou des opportunités pour les espèces faunistiques et floristiques. En retour, ceci crée des enjeux et des défis majeurs pour les gestionnaires en charge de la conservation du patrimoine et des espaces naturelles.

Cependant, certaines espèces ont bénéficié des actions anthropiques comme par exemple les espèces qualifiées d'invasives du fait de leur introduction, volontairement ou involontairement, par l'homme. La dispersion de ces espèces, du fait de leur plasticité biologique, a permis leur prolifération dans de nombreux milieux naturels. Ces dernières sont devenues pour la plupart envahissantes et néfastes pour l'environnement (Cas du cerf en Nouvelle-Calédonie, sujet de l'étude).

Un des premiers principes du management des populations sauvages qu'elles soient envahissantes ou non est que les informations d'abondance et de suivi décrivent avec précision l'état ou la tendance actuelle de ces populations.

De par ces constats, le suivi écologique des espèces sauvages est devenu aujourd'hui essentiel pour comprendre la dynamique des populations.

Un suivi rigoureux favorise la gestion et les prises de décisions des gestionnaires. L'efficacité de ces prises de décisions est souvent dépendante de la précision et de l'exactitude des données écologiques, sur lesquelles les décisions seront fondées. Les avancées, améliorations et optimisation des méthodes de collecte de données peuvent donner des résultats plus pertinents pour les mesures de gestion.

Dans cet optique, les technologies émergentes sont de plus en plus adoptées par les écologistes afin d'améliorer la collecte des données mais aussi dans le but de recenser d'éventuelles nouvelles données.

L'expérimentation et l'adoption de nouvelles méthodes qui fournissent des estimations rigoureuses et précises de la taille des populations sont non seulement pertinentes, mais nécessaires pour une gestion éclairée des populations de nombreuses espèces (Williams et al. 2002, Collier et al. 2013). Cependant, encore à l'heure d'aujourd'hui, la taille réelle des populations pour la plupart des populations sauvages reste inconnue et indéterminable (Yoccoz et al. 2001, Hodgson et al. 2016).

À moins qu'une méthode d'enquête n'ait été testée sur une population de taille connue, il n'est pas possible d'évaluer directement l'exactitude d'une méthode de dénombrement, d'où la nécessité de mettre en place des indices d'abondances pertinents avec des méthodes d'inventaires les plus significatives possibles.

1.2 Techniques de suivi et avancées technologiques

Dans la littérature, de nombreuses techniques de suivi des espèces sauvages sont renseignées à plus ou moins d'avantages et d'inconvénients (Forsyth *et al.* 2022).

Traditionnellement, l'identification et le comptage des animaux dans les zones reculées étaient effectués manuellement (Kellenberger et al. 2018), en utilisant des méthodes d'inventaires à partir par exemple :

- D'observations visuelles en aéronefs habités (avion, hélicoptère) (Babyliss et Yeomans 1989, Norton-Griffiths, 1978, Garel et al. 2015),
- De pièges photographiques (Silver et al. 2004),
- D'observations visuelles à pied,
- Ainsi que d'autres méthodes manuelles... (Jachmann, 1991).

Pendant longtemps, de telles campagnes d'études ont été les seuls moyens d'obtenir des estimations approximatives de l'abondance des animaux, néanmoins ces méthodes présentent des défauts non négligeables (Kellenberger et al. 2018) comme :

- Des risques importants pour les opérateurs en contact direct par exemple de braconniers armés et/ou d'animaux sauvages, cas de blessures au cours des déplacements en pleine nature, etc...
- Des coûts très importants du fait que ces méthodes, très chronophages, requièrent beaucoup d'heure de surveillance par les opérateurs mais aussi du matériel très coûteux (comme des avions, hélicoptères, etc...)
- Des problèmes de précision en raison des étendues limitées qui peuvent être surveillées, ou des altitudes de vol plus élevées que celles qui pourraient être idéales pour observer les animaux (Wich and Koh, 2018).

Remarques : Certaines techniques comme les pièges photographiques ont des coûts aujourd'hui moindre mais nécessitent un effort important des installations et des maintenances avec les risques associés au terrain en milieu isolé (Nazir et al. 2017) et ne sont pas adaptées à toutes les espèces ou populations animales.

Par conséquent les méthodes traditionnelles entraînent généralement des coûts élevés et/ou soulèvent des problèmes de sécurité.

Les évolutions dans les techniques de collecte de données, de par leurs avancées technologiques (Technologies émergentes), ont apportées de nouvelles perspectives pour les écologistes (Hodgson et al. 2018).

Comme par exemple le progrès des techniques en génétiques qui a permis la mise en place d'applications utilisant l'ADN environnemental pour la détection d'espèces menacées et d'espèces envahissantes, les pièges photographiques et les enregistreurs acoustiques qui sont devenus des outils indispensables pour déterminer si une espèce est présente sur un site et estimer la densité de la population (Marques et al. 2013, Rowcliffe et Carbone, 2008).

De plus les dispositifs de suivi animal par télémétrie (balises GPS, capteurs ou autres) ont révolutionné la compréhension des mouvements des animaux, y compris leurs interactions avec l'environnement et la distribution des espèces (Hussey et al. 2015, Kays et al. 2015).

Ces technologies ont été essentielles pour faire progresser la compréhension de la faune et répondre à des questions fondamentales, telles que l'abondance et la dynamique des populations (Hodgson et al. 2018).

Le drone, technologie récente dans le domaine de l'écologie et dotée d'un large spectre d'utilisation et d'applications, fait aujourd'hui partie intégrante des nouvelles méthodes de suivis de la faune sauvage et apporte une complémentarité aux méthodes déjà existantes (Forsyth *et al.* 2022).

1.3 Le drone dans les suivis des espèces

Lorsque le couvert végétal le permet, les suivis aériens à l'aide d'aéronefs habités du type avion, hélicoptère sont considérés dans la littérature comme les plus efficaces en termes de dénombrement des populations. Ils s'avèrent tout particulièrement efficaces pour les gros mammifères et tout spécialement sur de vastes zones (Caughley 1974, Jachmann 1991, Garel *et al.* 2015, Linchant *et al.* 2015, Lethbridge *et al.* 2019, Beaver *et al.* 2020).

Remarque : Un couvert végétal, appelé aussi couverture végétale ou couvert par ellipse, désigne la végétation, toutes strates confondues, recouvrant dans un espace donné, le sol de manière permanente ou temporaire. Cette couverture cache, selon la densité des végétaux présents, partiellement ou complètement les objets et animaux présents au sol.

Les relevés aériens par aéronefs habités (avions, hélicoptères) fournissent des estimations de taille des populations plus fiables que ceux opérés au sol (Naugle *et al.* 1996, Beaver *et al.* 2014) en raison des taux de détection plus élevés (Bernatas and Nelson 2004, Millette *et al.* 2011). Leur capacité à échantillonner aléatoirement à travers le paysage évite les biais indissociables des échantillonnages au sol utilisant la plupart du temps les axes routiers des pistes ou des parcours bien définis liés aux contraintes de l'environnement au sol (Diefenbach 2005, Drake *et al.* 2005, Kissell and Nimmo 2011, Beaver *et al.* 2014, Beaver *et al.* 2020).

Ce type de suivis aériens a couramment été utilisé sur de nombreuses espèces et dans de nombreux pays pour déterminer la densité, distribution et abondance des espèces natives ou invasives (Lethbridge *et al.* 2019).

Cependant ces relevés aériens par avion ou hélicoptère sont réalisés essentiellement par détection visuelle humaine. D'après plusieurs auteurs (Hodgson *et al.* 2018, Kellenberger *et al.* 2018, Lethbridge *et al.* 2019, Beaver *et al.* 2020), ils sont :

- logistiquement difficiles à mettre en place,
- Très coûteux,
- Dépendent d'opérateurs humains qui peuvent être en désaccord et qui introduisent des erreurs d'estimation (biais dans les comptages) (Schlossberg *et al.* 2016, Bouché *et al.* 2012, Jones *et al.* 2006),
- Impose un risque au niveau de la sécurité des opérateurs (parfois mortel du fait de vol à basse altitude). Aux États Unis les accidents en avion sont la première cause de mortalité au travail des biologistes spécialistes de la faune sauvage (Beaver *et al.* 2020).

Depuis peu, la technologie du drone (aussi connu sous le nom d'aéronef non-habité, Unmanned aerial vehicles/systems UAV/S, ou remotely piloted aircraft RPA) est apparue dans les suivis aériens.

Au départ, cette technologie avait été développée et était utilisée principalement par l'armée. Les progrès des dernières décennies ont permis de miniaturiser cette technologie et de la rendre aujourd'hui accessible au grand public de par des coûts de fabrication de plus en plus abordables.

La démocratisation de cet outil et son utilisation dans une vaste gamme d'applications est aujourd'hui bien notable en écologie et tout particulièrement dans la recherche et la gestion des espèces sauvages. Sa constante progression dans le milieu de l'écologie, et tout particulièrement du suivi des espèces sauvages, est documentée dans un nombre de plus en plus croissant de publications scientifiques (Anderson and Gaston 2013, Vermeulen et al. 2013, Chabot and Bird 2015, Linchant et al. 2015, Christie et al. 2016, Christiansen et coll. 2016, Evans et coll. 2016, Borrelle and Fetcher 2017, Fiori et al. 2017, Mustafa et al. 2018, Rees et al. 2018, Hodgson et al. 2018, Kellenberger et al. 2018, Johnston 2019, Lethbridge et al. 2019, Beaver et al. 2020, McCarthy et al. 2021, Forsyth et al. 2022).

De par ces nombreux intérêts le drone est utilisé aujourd'hui dans de nombreux pays pour le suivi de nombreuses espèces sauvages à la fois marines et terrestres comme par exemple :

- Surveillance de nombreux mammifères terrestres comme les ours (Ditmer et al. 2016), les éléphants (Vermeulen et al. 2013), les koalas (Gonzales et al. 2016), Kangourous (Lethbridge et al. 2019),
- Surveillance de mammifères marins ainsi que de reptiles comme dugongs (Hodgson et al. 2013), tortues marines (Bevan et al. 2015)
- Détection des nids de reptiles et de mammifères arboricoles (Evans et al. 2016, Wich et al. 2016)
- Comptage de troupeaux et de colonies (Chabot and Bird 2012, Chabot and Bird 2015, Ratcliffe et al. 2015, Witczuk et al. 2017, Gooday et al. 2018, Hodgson et al. 2018).

Dans leur étude, Mangewa et al. 2019 donne plusieurs exemples synthétisés d'espèces sauvages suivies par drone sur les différents continents (CF Tableau 17 et Tableau 18 en Annexe 6.1, repris de leur étude).

1.4 Avantages et inconvénients des suivis par drone

L'utilisation du drone aujourd'hui dans de nombreux domaines de l'écologie s'explique en partie du fait des risques et des coûts associés beaucoup plus faibles en comparaison aux aéronefs habités du type avions, hélicoptères (Watts et al. 2010, Seymour et al. 2017, Beaver et al. 2020).

De plus, l'attrait pour cette technologie se renforce par la miniaturisation et le développement de nombreux capteurs ou modules spécifiques pouvant être embarqués sur les drones, comme :

- Des capteurs permettant des prises de vues dans le spectre visible (Capteur RGB de haute définition) mais aussi dans le hors spectre visible (thermiques, LIDAR ou multi-spectrales par exemple).

- Des modules de prélèvements d'échantillons (gaz, eau, plantes, ...), de largages de matériels, etc.

A ceci s'ajoute l'altitude de vol. En effet, le drone peut voler à des altitudes beaucoup plus basses que les avions et hélicoptères tout en restant en sécurité vis-à-vis des risques de collisions avec le sol.

Cette miniaturisation des capteurs avec des hauteurs de vol pouvant être à des altitudes plus basses qu'en avion/hélicoptère/satellites permet donc de collecter des données à une résolution spatiale (en dessous du mètre) et temporelle (heures, jours) extrêmement fine, parfaitement adaptée aux applications en écologie.

Il est important aussi de souligner que la technologie des drones permet une logistique et une manipulation beaucoup plus facile que les aéronefs habités et d'éviter les perturbations associées aux relevés effectués à partir du sol (Linchant et al. 2015, Hodgson et al. 2018) ou par avions/hélicoptères.

Comparativement à un avion ou un hélicoptère, l'utilisation des petits drones, utilisés aujourd'hui dans les suivis, ne nécessite pas de compétences très particulières et relativement peu de formation est nécessaire. Cependant, les compétences techniques fondamentales et de base sont inévitables pour assurer des opérations en toute sécurité et un traitement des images le plus robuste possible afin de générer des informations permettant d'atteindre les objectifs attendus (Mangewa et al. 2019).

Ces avantages ont conduit de nombreux utilisateurs (Scientifiques) à qualifier les drones de puissant outil pour l'écologie de la faune (Chabot et Bird 2012, Linchant et coll. 2015, Christie et coll. 2016, Seymour et al. 2017).

Pour certains, la précision des capteurs montés sur ces derniers, pouvant être couplé à des algorithmes de détection, permettrait même de mieux compter que l'humain (observation visuelle directe). En effet, d'après Hodgson et al. 2017, leur étude montre que les données de dénombrements relevés par le drone sont plus précises que leur méthode de collecte de données traditionnelle. Les conclusions de leur étude affirment que le drone est un outil très bénéfique pour les écologistes. De par la précision des données de recensement, le drone peut fournir aux écologistes une plus grande confiance sur l'estimation des populations sauvages à partir desquelles des décisions de gestion pourront être prises. De plus la précision supérieure des dénombrements à partir des images et/ou vidéos drone augmente la puissance statistique pour détecter les tendances de la population. Le suivi des espèces par drone offre également la possibilité de collecter des données sur la population sans entrer dans les zones de reproduction ou les zones écologiquement sensibles, évitant ainsi les perturbations associées aux relevés à partir du sol.

Cependant cette méthode d'échantillonnage a aussi ses inconvénients et ses limites non négligeables du type :

- ❖ Technologique comme :
 - capacité des batteries qui influence le temps de vol (30-40 min pour un multirrotor classique) et donc de la taille de la zone pouvant être prospectée,

- capacité d'emport : par exemple un drone professionnel de taille moyenne comme le DJI matrice 300 RTK (d'envergure de 90 cm et d'un poids de 6,3 kg avec batteries) a une capacité d'emport maximale de 2,7 kg, soit 40 % de sa masse.

- ❖ Pratique comme :
 - Sensibilité à la météo (vent, pluies). Différentes conditions météorologiques ont différents niveaux de gravité de l'impact sur les performances de vol des drones. La couverture nuageuse, le brouillard, la brume et le verglas ont un impact modéré, tandis que le vent et les turbulences, la pluie, la température, l'humidité, la neige et les tempêtes solaires ont des impacts négatifs (Mangewa et al. 2019).
 - L'heure de la journée. Les heures de la journée sont à prendre en compte pour les photographies d'animaux et de végétation. Comme par exemple, l'heure à laquelle le soleil est au zénith (vers midi en général) permet d'éviter les effets d'ombre lors du traitement des orthomosaïques (Mangewa et al. 2019).
 - L'importance de relever et résoudre tous problèmes techniques bien à l'avance avant de piloter un drone. Une planification et l'exécution appropriées des missions de vol sont cruciales (Mangewa et al. 2019).

- ❖ Complexités des données acquises :
 - Données lourdes à traiter selon le capteur et nécessitant parfois des connaissances approfondies en traitement de données/géomatique,
 - Obtenir des images de qualité et entreprendre un traitement photogrammétrique ou autres pour des études de suivi et de conservation (Mangewa et al. 2019). Par exemple, les positions précises et les hauteurs ou altitudes de vol, pour tout drone utilisé, influencent la précision du capteur et des mesures obtenues. Les traitements des images captées par drone pour de la photogrammétrie ou d'études de suivis par vidéo peuvent être également difficiles en raison des variations de différents facteurs :
 - Niveaux de chevauchement des images et du changement du relief selon les hauteurs de vol attribués aux différences de relief topographique dans les paysages.
 - Certains petits drones à faible coût ont tendance à avoir des limitations de précision GNSS (Global Navigation Satellite System), qui nécessite des points de contrôle au sol pour assurer la précision du traitement des images.
 - Un chevauchement insuffisant lors de l'acquisition d'images peut entraîner une déformation du modèle numérique de terrain (MNT), nécessitant l'utilisation

d'une planification de mission de vol, d'une acquisition d'images, d'un logiciel et d'algorithmes appropriés.

Remarque : L'utilisation aujourd'hui de la Cinématique temps réel sur certains drones (Real Time Kinematic, en anglais ou RTK : technique de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de la phase des ondes porteuses des signaux émis par les systèmes GPS, GLONASS ou Galileo) permet de solutionner ces problèmes de précision GPS. En effet, une station de référence au sol fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre.

- ❖ Réglementaire : législation de plus en plus restrictive et protocolaire afin de limiter au maximum tous risques au sol et dans les aires. Aspect qui peut être très limitant selon les zones (militaires, d'habitations, proches d'aéroport et aérodrome, propriétés privées, touristiques et de loisirs, etc...).

De plus en plus utilisé de nos jours au niveau mondial, la technologie du drone apporte de nouvelles perspectives dans les suivis écologiques et le suivi des espèces sauvages, dont celui des populations de Cervidés.

2 Suivi des populations de cerfs par drone thermique, une perspective pour la Nouvelle Calédonie

2.1 Intérêt d'une bonne estimation de l'abondance relative des populations

Pour la gestion des espèces sauvages comme les cervidés, la dynamique des populations et les facteurs qui les renforcent doivent être évalués (Iijima et al. 2013). De telles évaluations permettent d'évaluer les efforts de chasse et d'abattage appropriés pour réduire l'abondance actuelle des cerfs et permettent la mise en place de plans de gestion efficaces pour supprimer les facteurs (tels que la disponibilité d'un habitat pour l'alimentation) qui améliorent les taux de croissance des populations de cerfs.

Cependant, la collecte de données applicables à l'analyse de cohorte consomme beaucoup de temps, d'argent et d'efforts humains car un grand nombre de cerfs doivent être capturés et leur âge doit être déterminé sur de nombreuses années. De plus, l'analyse de cohorte ne peut être utilisée que lorsqu'il est possible de supposer que la population ciblée est fermée (pas de migration ; Ueno et al. 2010). Cette exigence est difficile à satisfaire dans la gestion pratique de la faune, en particulier dans les régions où les populations de cerfs se sont récemment étendues et en forte densité comme la Nouvelle-Calédonie. Des méthodes peu coûteuses et moins restrictives pour estimer la dynamique des populations de cerfs sont donc nécessaires.

Le cerf Rusa ou de Java (*Rusa timorensis russa*), introduite sur le territoire à la fin du XIX^e siècle (1870), comme cadeau du gouverneur Hollandais de l'île de Java à la femme de son homologue calédonien, est aujourd'hui est aujourd'hui considérée d'espèce envahissante et néfaste pour la biodiversité calédonienne. Cependant malgré son caractère envahissant, elle fait partie intégrante de la culture locale dorénavant (fêtes locales). Elle est même devenue emblématique avec des billets et logos de communes à son effigie.

D'après Barrière et Fort 2021, le Cerf Rusa, ou de Java, est présent sur la Grande-Terre et quelques îlots. Il s'est particulièrement bien adapté au contexte calédonien. Il constitue la plus grande population au monde pour cette espèce (250 000 et 370 000 individus ; Barrière 2008). Espèce exotique envahissante (EEE) majeure sur la Grande Terre, au vu de sa répartition et de ses impacts, le Cerf de Java compte parmi les sept EEE de priorité 1 de la stratégie territoriale de lutte (CEN 2017, 2018).

Cette espèce a des effets néfastes importants sur la flore insulaire, par consommation directe d'espèces végétales ou plus indirectement, comme le piétinement, le compactage des sols, le développement de végétaux envahissants (Barrière et Fort 2021). Un appauvrissement et des transformations parfois considérables des communautés végétales sont localement remarquables sur le territoire calédonien. Des répercussions indésirables sont de ce fait générées sur la faune indigène associées à cette flore impactée, comme les invertébrés, les reptiles ou certains oiseaux. Par leurs actions sur la couverture végétale et la mise à nus des sols, ils favorisent par ailleurs l'érosion des sols ainsi que le ruissellement de l'eau dans les bassins versants, avec un impact sur la qualité de l'eau en aval, l'engrèvement des captages et des creeks et des apports terrigènes jusqu'au lagon.

Par conséquent, le contrôle de cette espèce est important, non seulement d'un point de vue écologique mais aussi d'un point de vue humain (abondance dans les propriétés, ravages sur les plantations et parcelles agricoles ou sylvicoles, nécessité de clôturer les propriétés, champs, etc...).

Depuis 1990, le Cerf de Java à l'état sauvage a été le sujet de nombreuses études sur le territoire calédonien, et tout particulièrement dans le cadre de différents projets de recherche (Barrière et Fort, 2021).

2.2 Les différentes approches d'indice d'abondance des cerfs

Plusieurs techniques d'évaluation de l'abondance de la faune sauvage ont été élaborées au fil des décennies et utilisent des méthodes de plus en plus sophistiquées. Les données recueillies par ces techniques permettent d'avoir une estimation du nombre d'individus sur une surface donnée. Cependant, au vu des coûts, investissement humain et matériel, des contraintes de chaque méthode ainsi que du temps nécessaire à l'application de celles-ci, il n'est pas possible de les appliquer sur de grandes surfaces afin d'estimer l'abondance réelle des populations sauvages et d'autant plus pour les grands mammifères qui ont des aires de distribution très vaste (de quelques hectares à centaines voire milliers d'hectares).

En effet, bien que des recherches intensives aient été menées depuis plus d'un demi-siècle sur la conception et le développement de méthodes de recensement, l'estimation de la taille des populations d'ongulés prend du temps, beaucoup d'efforts humains et donc de l'argent (Vincent et al. 1991) et pour certaines populations comme le cerf, il en ressort de l'impossible au vu de leur abondance et de leurs habitats très vastes. Avoir une donnée précise de l'abondance réelle des populations est donc très difficile voir quasi nulle.

Ainsi des approches par indice ont été développées pour simplifier la faisabilité et la représentativité. Ces indices d'abondance des populations ont été élaborés pour évaluer la dynamique des populations de cerfs. Ils ont l'avantage de pouvoir apporter une réponse rapide aux fluctuations de l'abondance des cerfs et une collecte de données relativement peu coûteuse (Iijima et al. 2013).

Parmi ces indices d'abondance, on retrouve par exemple :

- Le nombre de cerfs observé par unité d'effort (SPUE),
- Les captures par unité d'effort (CPUE ; Mysterud et al. 2007),
- Le dénombrement des groupes de fèces (Forsyth et al. 2007, Rønnegård et al. 2008, Acevedo et al. 2010),
- Le dénombrement par blocs (ou dénombrement au sol ; Daniels 2006),
- Le comptage des vocalisations,
- Les comptages au projecteur (Progulske et Duerre 1964),
- Les méthodes de capture-marquage-recapture (Schwarz et Seber 1999),
- L'enquête spot (Uno et al. 2006),
- Le recensement aérien (DeYoung et al. 1989, Pettorelli et al. 2007).

Cependant, ces indices ne peuvent pas montrer directement l'abondance absolue des cerfs, et ils contiennent de grandes erreurs associées à la variabilité des compétences des chercheurs, de la météo, de l'équipement et de la visibilité sur le site de recherche (Iijima et al. 2013). L'importance de collecter de multiples indices

d'abondance pour les estimations de population a été mentionnée à plusieurs reprises dans la littérature (Uno et al. 2006, Morellet et al. 2007, Kaji et al. 2010).

D'après Iijima et al. 2013, malgré des développements méthodologiques de longue durée, l'estimation de l'abondance des populations de grands herbivores en liberté reste particulièrement difficile. Le choix d'une méthode particulière doit être fait en fonction de l'objectif de l'étude, du besoin d'estimations de densité ou de suivi de l'abondance relative dans le temps, de l'exactitude et de la précision requises et de la biologie de l'espèce cible (Pellerin et al., 2017). Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre dépendra de la quantité de ressources disponibles pour mener la collecte de données en termes de main-d'œuvre ou d'argent.

Pour les grands herbivores, les comptages au projecteur (Progulske et Duerre 1964) ou les pelottes fécales (Putman 1984), qui sont plus faciles et moins coûteux à mettre en œuvre que les méthodes de capture-marquage-recapture ou les transects linéaires (Gill et al. 1997, Focardi et al. 2005), se sont avérés populaires parmi les biologistes et les gestionnaires de la faune pour surveiller l'abondance des populations (Pellerin et al., 2017).

Du fait des nombreux avantages, déjà détaillés précédemment dans ce rapport, sur l'utilisation du drone thermique dans le comptage et le suivi des populations des ongulés sauvages et tout particulièrement le cerf, des indices aériens par drone thermique se développent depuis quelques années dans la littérature scientifique (Beaver et al. 2020 ; Ott 2020 ; Witczuk et al. 2018) et semble de plus en plus utilisés et appréciés par les scientifiques/biologistes.

Afin d'estimer l'abondance relative de populations de cerfs en NC, plusieurs indices d'abondance ont déjà fait l'objet de tests ponctuels (Roques Rogery 2008) ou de mise en œuvre dans un contexte de gestion opérationnelle comme l'Indice Nocturne d'Abondance (INA) déployé depuis plus de 10 ans sur le domaine de Déva (CEN NC 2022). En revanche, aucun indice aérien d'abondance n'a jusque-là été testé et la présente prestation constitue une première étude de faisabilité sur le territoire Calédonien. La présente étude sur sa faisabilité en Nouvelle-Calédonie va permettre de tester la pertinence d'un tel indice sur le territoire.

Remarques : la validation de tout indice d'abondance est d'une importance primordiale car les indices d'abondance peuvent ou non varier avec la densité de population (Pellerin et al. 2017). Cette validation des indices d'abondance reste difficile et est souvent négligée dans les pratiques de gestion du fait que la véritable densité de population des populations sauvages est généralement inconnue (Franke et al. 2012, Valente et al. 2014).

Par conséquent, avant toute mise en œuvre générale et recommandation aux gestionnaires de la faune, les méthodes basées sur des indices doivent être validées à l'aide d'estimations robustes de la taille de la population (ou de la densité). Une telle validation est particulièrement nécessaire lors du dénombrement des animaux dans des habitats forestiers où la visibilité limitée et spatialement hétérogène conduit à amplifier la difficulté d'obtenir des estimations fiables de la taille ou de la densité de la population (Pellerin et al. 2017, Forsyth et al. 2022).

2.3 Comptage des cerfs par drone thermique :

Comme il a été mentionné plus haut dans cette synthèse bibliographique, les méthodes de comptage par drone sont aujourd'hui très utilisées et ont fait leurs preuves au sein de la communauté scientifiques afin d'estimer les populations de nombreux animaux sauvages au niveau internationale.

Les drones actuels peuvent emporter une multitude de capteurs dont le capteur RVB classique d'un appareil photo pour effectuer des photos ou vidéos très haute définition (HD, 4K). Ce dernier est le plus couramment utilisé.

Mais, depuis quelques années, l'apparition des caméras thermiques sur les drones a engendré une avancée majeure dans cette méthode de comptage et tout particulièrement dans les suivis des mammifères (animaux endothermes, à sang chaud).

Cette technologie récente apparaît, d'après la littérature, de plus en plus répandue dans les suivis des espèces sauvages et tout particulièrement sur les pour lesquels de nouvelles potentialités méthodologiques (Forsyth et al. 2022). En effet, cet engouement pour cette technique réside du fait d'après Beaver et al. 2020 que les relevés, comptages, par drones thermiques autonomes fournissent une méthode précise, rapide et hautement reproductible pour estimer l'abondance de populations des cerfs.

Néanmoins, d'après nos renseignements et nos recherches bibliographiques, aucune étude de comptage d'animaux sauvages utilisant cette technologie dans des zones de typologie de climat, végétation et de relief similaire aux zones prioritaires de l'étude (zone de forêt tropicale et humide d'altitude) n'a été recensée à l'heure d'aujourd'hui.

2.3.1 Principe

Le rayonnement infrarouge (IR) ou thermique est un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière visible et qui permet le transport de chaleur. Toutefois, ses longueurs d'onde sont trop grandes pour être visibles par l'œil humain, limité à une très petite portion du spectre électromagnétique. Ce rayonnement est donc invisible pour l'homme

Tout corps dont la température excède le zéro absolu (-273.15 °C) émet un rayonnement électromagnétique.

Tous les objets de la vie quotidienne émettent de l'énergie thermique, y compris les glaçons. Plus un sujet est chaud, plus il émet d'énergie thermique. Cette énergie thermique émise est appelée une « signature thermique ». Ainsi, deux objets placés côte à côte peuvent présenter de subtiles différences au niveau de leurs signatures thermiques.

Certains sujets, comme les animaux, les moteurs et les machines par exemple, créent leur propre chaleur, de façon biologique ou mécanique. D'autres objets, comme la terre, les pierres, la végétation, absorbent la chaleur du soleil en journée et la renvoient durant la nuit

Un corps qui reçoit un rayonnement électromagnétique peut en réfléchir une partie et absorber le reste. L'énergie absorbée est alors convertie en énergie thermique et contribue à l'augmentation de la température de celui-ci.

Une caméra infrarouge (le récepteur) détecte l'énergie infrarouge (l'émetteur), la chaleur émise par la scène observée, et la convertit en un signal électronique, lequel

est ensuite traité pour produire une image. Celle-ci convertit les données reçues en une représentation colorée de l'environnement. La chaleur captée par une caméra infrarouge peut être quantifiée, ou mesurée, de façon très précise, ce qui permet non seulement de contrôler les performances thermiques, mais aussi d'identifier la gravité relative des problèmes associés à la chaleur. Plus la température d'un corps ou d'un objet est élevée, plus le rayonnement est important.

Étant donné que différents matériaux absorbent et renvoient l'énergie thermique à des vitesses différentes, une zone dont la température semble en apparence uniforme est en fait constituée d'une mosaïque de subtiles différences thermiques. Du fait de mon expertise et expérience en drone thermique, la résolution est un facteur important à prendre en compte, suivant le secteur d'activité et les besoins de précision nécessaires. Dans le secteur de la maintenance industrielle où les pièces à vérifier sont imposantes et le contraste thermique assez grand, une caméra infrarouge thermique à basse résolution spatiale (à partir de 60×60 pixels) sera amplement suffisante. Alors que pour des études plus poussées ou pour observer de petits détails avec un faible écart de température, l'utilisation d'une caméra avec une plus grande résolution spatiale (à partir de 640×480 pixels) sera nécessaire

Remarque importante : Comme ce type de caméra mesure l'émissivité de la scène observée, elle ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle comme un arbre (Figure 1). Elle reproduit tout simplement la température emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.

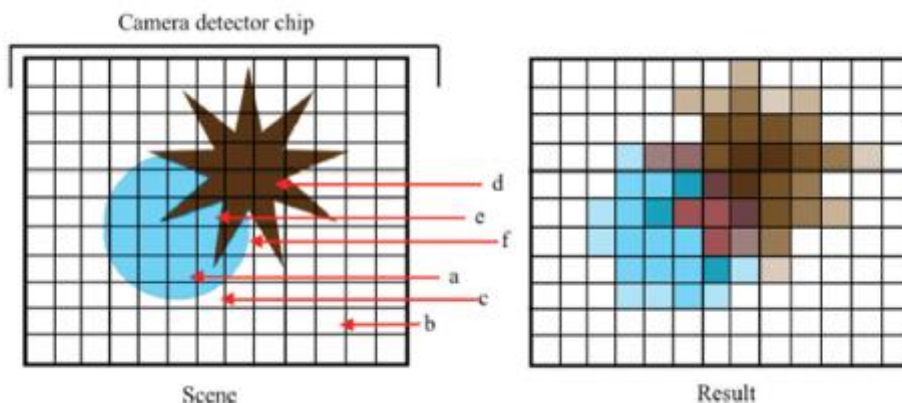


Figure 1 : Illustration du champ de vision d'un capteur thermique divisé en une grille pour représenter les pixels dans le détecteur. Le champ de vision contient une cible d'intérêt (cercle bleu), un obscurcissant l'objet comme un arbre par exemple (étoile brune) et l'arrière-plan (blanc) (Source Burke et al 2019).

Scène : le pixel étiqueté (a) contient la luminosité provenant uniquement de la source cible. Le pixel (b) contient la luminosité de seulement l'arrière-plan. Le pixel (c) contient à la fois la cible et l'arrière-plan, donc la luminosité, et donc la température enregistrée dans ce pixel, sera un mélange de celui de la source cible et de l'arrière-plan. Le pixel (d) contient de la luminosité de l'objet obscurcissant uniquement. Le pixel (e) contient la luminosité de la cible et de l'objet obscurcissant, et la température enregistrée sera un mélange de celle des deux. Le pixel (f) contient la luminosité de la cible, de l'objet obscurcissant et de l'arrière-plan, et la température enregistrée sera le résultat du mélange de la luminosité des trois.

Résultat : une illustration de l'image résultante telle qu'elle serait enregistrée et visualisée dans les données acquises par le capteur compte tenu du mélange de sources.

2.3.2 Avantages et inconvénients

2.3.2.1 Avantages

Plusieurs résultats d'étude indiquent que l'utilisation des drones équipés avec un capteur RGB et thermique à la fois dans le suivi des espèces sauvages peut être une alternative aux méthodes de terrains classiques (Christie et al. 2016, Seymour et al. 2017, Hodgson et al. 2018, Linchant et al. 2018, Witczuk et al. 2018) malgré que les comparaisons directes des populations sauvages estimées par drone avec les populations réellement présentes restent non étudiées (Beaver et al. 2020).

Il est bien identifié dans la littérature que l'imagerie thermique (infrarouge) est beaucoup plus efficace pour détecter les animaux en comparaison à l'imagerie RGB classique du spectre visible (Chrétien et al. 2015, Gonzales et al. 2016, Chrétien et al. (2016), Seymour et al. 2017).

Ce type de capteur fournit une méthode qui permet de distinguer les signatures thermiques des animaux, tout spécifiquement les espèces endothermes (à sang chaud, comme les mammifères), très contrastées par rapport à l'environnement qui les entoure (Stark et al. 2014, Burke et al. 2019) et qui permet la détection des animaux la nuit et en conditions de faible luminosité. Ceci est un avantage par rapport aux caméras conventionnelles dans le visible du type RGB (Israel 2011, Witczuk et al. 2018).

D'après Witczuk et al. (2018), il est possible de distinguer visiblement les grandes espèces (comme le cerf élaphe sujet de leur étude) avec une résolution au sol d'environ 10 cm et d'atteindre un bon niveau de couverture de la zone. D'après eux, les cervidés présents en Europe peuvent être détectés avec cette technique, au cours de relevés hivernaux (forêts caducifoliées d'Europe avec des arbres à feuilles caduques, qui tombent à la fin de l'automne), dans tous les principaux types de végétation (forêt de feuillus, mixtes et de certains conifères, zones ouvertes).

Selon l'expérience de l'observateur et du comportement des animaux lors du survol drone (possibilité en cas de doute de descendre à basse altitude), il est possible de distinguer les signatures thermiques spécifiques de différentes espèces (entre un cerf et une vache par exemple).

L'utilisation d'un capteur thermique radiométrique permet de fixer des seuils de température. L'échange thermique entre les animaux et leur environnement est bien identifiable (Porter et Gates 1969), et l'utilisation d'un seuil thermique du capteur radiométrique, adapté aux propriétés radiatives estimées du ou des organismes d'intérêt peut augmenter considérablement le contraste thermique entre l'animal et le terrain et peut améliorer probablement la précision de cette technique d'après Burke et al. 2019.

2.3.2.2 Inconvénients

Le moment des relevés est un élément essentiel dans les études utilisant l'imagerie thermique, et nécessite parfois des facteurs de correction. En effet, l'émission de chaleur n'est pas constante tout au long d'une journée complète de 24h (Felton et al. 2010) et peut fluctuer en fonction de divers facteurs tels que les conditions météorologiques (par exemple, la température ambiante, la couverture nuageuse ; Burke et al. 2019) et l'environnement (couverture terrestre, aspect ; Franke et al. 2012, Chrétien et al. 2016, Witczuk et al. 2018, Burke et al. 2019).

Ce paramètre ainsi que la complexité topographique peuvent entraîner un réchauffement inégal des zones (encombrement thermique) engendré par l'exposition au soleil (c'est-à-dire que le rayonnement thermique de fond varie à travers le paysage), et devient particulièrement important dans les zones avec des objets à forte inertie thermique, tels que des blocs ou des rochers, le sol ou zones humides du type flaque d'eau, rivières, lacs... (Burke et al. 2019).

Witczuk et al. (2018) souligne dans leur étude (Forêt d'Europe) que le contraste entre les arbres et le sol peut influencer la capacité à détecter les animaux dans les zones forestières, et ont constaté que pendant les vols matinaux, certains troncs et branches d'arbres exposés au soleil commençaient tout juste à se réchauffer, entraînant un encombrement thermique et un faible contraste. A contrario, les vols du soir révèlent des images avec un fond plus homogène de sorte que les signatures animales ressortent avec suffisamment de contraste pour une détection relativement facile. Ceci s'expliquerait du fait que la chaleur résiduelle captée pendant la journée par la végétation permet une meilleure distinction du feuillage dans les habitats forestiers lors des vols du soir, rendant la signature au sol relativement plus fraîche.

La précision des données collectées lors des vols en soirée révèle (Beaver et al 2020) qu'un facteur de correction n'est pas nécessaire lorsque les conditions de vol sont optimisées pour une zone et une heure particulière.

Un autre inconvénient de l'imagerie thermique est qu'elle ne peut mesurer que la température de la surface. Elle ne peut pas voir à travers la canopée, donc cette technique est très vite limitée en milieu forestier fermé.

De plus cette technologie nécessite des observateurs humains avec une certaine expérience pour détecter les signatures thermiques. La grande quantité de données et le besoin de plusieurs observateurs pour minimiser les biais potentiels des observateurs sont souvent décrits comme un inconvénient important de l'utilisation de drones pour les relevés de la faune (Linchant et al. 2015). Cependant, Linchant et al. (2018) et Beaver et al 2020 ont noté que les observateurs expérimentés avaient une cohérence à la fois dans le temps d'observation des cerfs et dans les estimations de densité résultantes de leurs analyses vidéo respectives. D'après leur étude, il s'avère que pour estimer la population totale des cervidés étudiés, des facteurs de correction plus petits sont notables pour des observateurs expérimentés en comparaison à des observateurs avec une faible expérience et où les estimations convergent très rapidement.

Autre inconvénient, les relevés par drones thermiques et RVB peuvent rapidement emmagasiner des informations très détaillées et complexes (Linchant 2015), créant potentiellement des situations où le temps et le coût du traitement manuel des images à partir des relevés aériens peuvent devenir exorbitants.

2.3.3 En résumé

La technologie du drone avec capteur thermique semble très appropriée au comptage du cerf Rusa en Nouvelle-Calédonie d'autant que cette espèce a une activité de nuit prédominante en zones ouvertes (Barrière et Fort, 2021).

Cependant, n'ayant pas de saison exclusivement hivernale avec chutes des feuilles en Nouvelle-Calédonie, le couvert végétal des forêts humides sempervirentes

semble être une limite à cette technique pour un suivi au niveau du sous-bois forestier, car elle ne permet pas de passer à travers la végétation. En revanche elle apparaît tout à fait adaptée au contexte des savanes incluses ou périphériques aux blocs forestiers, d'autant plus que ces savanes constituent les zones de gagnage nocturne privilégiées.

Pour que les relevés aériens par drones thermiques soient utilisés correctement dans un but de gestion et de conservation de la faune sauvage, plusieurs aspects de ces relevés doivent être pris en compte.

1. Premièrement, la qualité des données sera fonction de la couverture végétale, de la topographie et du contraste thermique, et les interactions de ces variables changeront selon la saison, l'heure de la journée et la région.
2. Deuxièmement, le biais et l'expérience des observateurs doivent être pris en compte lors de l'analyse des données. Il est impératif d'avoir une compréhension adaptée de l'environnement (paysage) thermique d'une zone d'étude et de la façon dont ces variables influencent le contraste vidéo thermique pour toute mission utilisant cette technique.
3. Enfin, la taille de la zone d'étude influence la réussite de la collecte de données en raison des limites technologiques des drones. Actuellement, les petits drones sont limités à des vols de plusieurs minutes à quelques heures selon le modèle et la charge utile, obligeant les gestionnaires à adapter la zone de couverture avec la résolution minimale pour l'identification des animaux. Cependant, une extension de la couverture des suivis à de plus grandes zones est à prévoir dans un avenir proche, de par les réglementations relatives à l'utilisation civile des drones ainsi que la technologie des batteries qui est en constante et rapide évolution

À mesure que les relevés par drones s'étendent à de plus grandes zones, la masse de travail en traitement et d'analyse des images devient de plus en plus importante d'où l'utilisation de plus en plus de systèmes/plateformes (algorithmes) de comptage semi-automatisé (Fang et al 2016, Ott, 2020, Beaver et al. 2020).

2.4 Acquisition, traitement et analyse des données drone en thermique

2.4.1 Importance de la méthode de suivi et de comptage

2.4.1.1 Orthophotos VS vidéos

Dans la littérature, deux types d'acquisition de donnée pour le comptage d'animaux sauvages par drone thermique sont principalement opérées soit :

- L'orthophoto et
- La vidéo.

Les orthophotos, utilisées depuis plusieurs dizaines d'années dans les comptages d'animaux, ressort comme la méthode d'acquisition en aérien de la donnée la plus répandue dans la littérature.

Néanmoins, le développement récent d'extensions (FMV= Full Motion Vidéo) dans les plateformes SIG du type ARCGis ou QGis, en parallèle de l'évolution des capteurs thermiques et des drones, permet de travailler sur de l'acquisition vidéo géoréférencée. L'arrivée de cette nouvelle utilisation de la vidéo commence à faire

ses preuves dans les études récentes sur le suivi des espèces sauvages par drone thermique et semble de plus en plus appréciée par les biologistes (Fang et al 2016 ; Beaver et al. 2020) car elle présente plusieurs avantages comparés au orthophotos. En effet, d'après notre expérience, les publications récentes (Ott, 2020, Beaver et al. 2020) et des échanges directs de mails et de discussions avec certains scientifiques (comme Stansilaw Pagacz et Julia Witczuk), les principales raisons sont que :

- La vidéo fonctionne sans besoin de réaliser un chevauchement des images pour avoir le rendu final de l'acquisition. En effet, la vidéo est une succession de plusieurs images à la seconde. Contrairement, l'orthophoto nécessite un chevauchement important des images afin de reconstituer à la fin une image complète de la zone prospectée - cela engendre un temps de mission pouvant être très long pour une faible surface de vol couverte du fait de la limitation des batteries (Ott, 2020). Au cours d'une mission, ce type d'acquisition de donnée couvre donc une zone bien inférieure par rapport à l'enregistrement vidéo, qui se fait sans chevauchement.
- Du fait qu'aucun chevauchement n'est nécessaire, l'utilisation de la vidéo diminue considérablement les biais pouvant être liés au double comptage. En effet, le chevauchement élevé des images dans l'orthophoto augmente le risque de double comptage des animaux – si un individu se déplace ne serait-ce que de quelques mètres au niveau du chevauchement des photos, cela peut conduire à un double comptage (Faux positif). Il peut y avoir aussi un étalement/modification de la signature thermique par superposition en cas de déplacement ce qui peut poser problème aussi dans le comptage car la forme de la signature thermique ne ressemble pas à un cerf (Faux négatif).
- Avec la vidéo, les chances de détecter les animaux cachés dans les zones arborées sont beaucoup plus élevées car 30 images par seconde sont enregistrées à partir de différents endroits et angles le long de la trajectoire de vol (voir la Figure 2 ci-dessous). Sur l'orthophoto, certains animaux peuvent rester non détectés, cachés derrière les arbres -
- La vidéo met en évidence le mouvement des animaux et permet de détecter les réactions potentielles des animaux face au drone. Ceci est important pour l'évaluation du risque de double comptage des animaux. Contrairement avec l'orthophoto les animaux sont figés dans une seule position à un instant t.

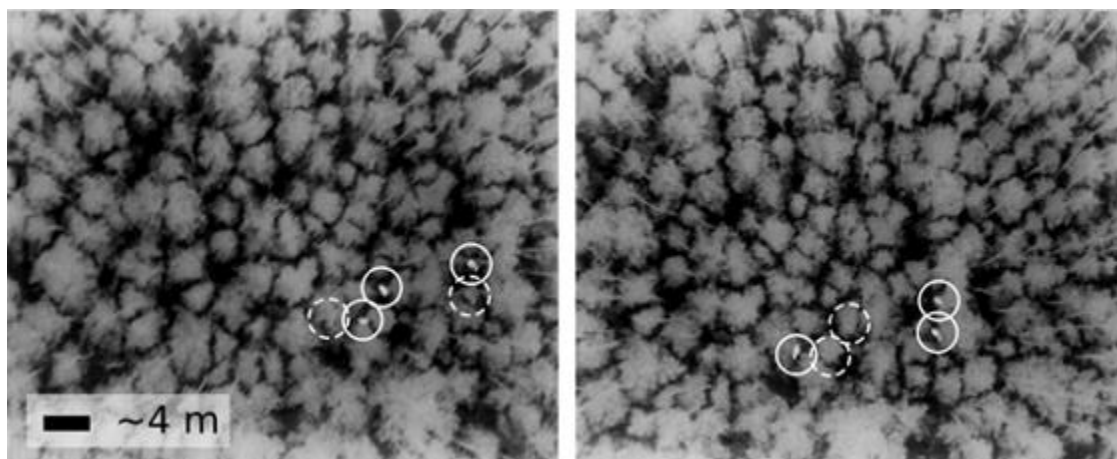


Figure 2 : Images d'une vidéo démontrant la détection d'animaux masqués par la canopée des arbres dans une forêt de conifères. Les signatures visibles sont marquées par des cercles en trait plein, les cercles en pointillés marquent l'emplacement des animaux masqués. Hauteur 150 m, forêt de pins avec couvert végétal modéré (Witczuk et al. 2018)

Pour résumer, l'acquisition en drone par vidéo dans le suivi des espèces sauvages (et tout particulièrement le cerf) est plus viable et performante que l'acquisition par photos (orthophotos).

Remarque : La vidéo est un gain de temps sur l'acquisition de la donnée pour du comptage d'animaux sauvages cependant elle génère énormément de données (fichiers très lourds selon le nombre de vidéos acquises) et de temps pour l'analyse d'où l'intérêt du « deep learning » = intelligence artificielle par création d'algorithme pour de la détection automatisée. Ceci apparaît comme la seule contrainte de la vidéo que nous avons pu recensée (versus orthophoto).

2.4.1.2 Hauteur de vol, impact sur l'empreinte au sol et le comportement des animaux

Que ce soit pour des orthophotos ou les vidéos, la hauteur de vol influe sur l'empreinte au sol couverte par le capteur thermique. Plus le drone est haut et plus la qualité et donc la définition de l'image sont altérées selon le type de capteur. Cependant plus le drone est haut et plus il va pouvoir couvrir de surface au sol en un seul vol.

Il est donc important avant de lancer toute mission d'acquisition de donnée par drone de définir l'optimum entre la hauteur de vol et la définition de l'image nécessaire selon le projet d'étude demandé et surtout ce que l'on cherche à voir (comptage de population ou de cohortes par exemple avec des paramètres de vol optimum qui seront très différents).

De plus, la hauteur de vol a aussi un impact direct sur les animaux. En effet, le drone, du fait de ses nuisances sonores, bien que largement réduites par rapport à un aéronef habité, peut entraîner des perturbations (effets négatifs et risque d'effarouchement) sur le comportement des animaux et donc sur le suivi et le comptage des individus selon la hauteur à laquelle il vole (Brunton et al., 2019). Ceci révèle l'importance de la méthode et du protocole de suivi et de comptage à mettre en place en amont selon la zone géographique considérée et les espèces sauvages à l'étude.

D'après les conclusions de l'étude de Brunton et al., 2019, leur recherche fournit des informations intéressantes sur les réponses comportementales des grands mammifères aux suivis menés par drone. En raison des implications potentielles sur le comportement animal, ces résultats suggèrent que les drones devraient être pilotés à une hauteur minimale de 60 m au-dessus des animaux cibles.

Malgré que des perturbations à basse altitude sur le comportement peuvent être notables selon les espèces, le drone est néanmoins suggéré dans cette étude comme une technique beaucoup plus efficace dans les suivis des espèces sauvages comparée aux comptages aux sols, qui pour certains peuvent être très perturbants.

Il sera donc important de déterminer, durant la présente étude, la réponse du cerf rusa et le potentiel impact du suivi par drone de cette espèce en évaluant selon la hauteur :

- Les actes de vigilances,
- Les comportements d'évitement, voire de fuite,
- Les facteurs environnementaux et
- Les facteurs logistiques susceptibles d'influencer la réponse comportementale du cerf envers le drone (comme le déplacement sur la zone de décollage, mise en place du matériel, détection de la présence humaine à plusieurs centaines de mètre suivant le vent, ...).

Au cours de la phase de calibration de l'étude, il va donc falloir trouver le meilleur compromis entre différents points comme:

- Hauteur et vitesse de vol,
- Angle du capteur,
- Qualité/définition de l'image,
- Comportements des animaux.

D'après notre expertise, un autre point important est aussi à prendre en considération. Les études de comptage sur le cerf et autres animaux, recensées dans la littérature, se déroulent essentiellement sur de vastes zones généralement très planes (Witczuk et al. 2017, Beaver et al. 2020, Ott 2020). Cependant, sur une grande majorité du territoire Calédonien et tout particulièrement des zones prioritaires de la chaîne centrale, les dénivelés importants rencontrés sur de faible surface va nous contraindre à développer un protocole/plan d'échantillonnage à une hauteur constante tout au long du vol malgré la topographie.

Une variation de hauteur au cours d'une mission de vol engendre une empreinte au sol différentes et donc des données biaisées avec possibilité de :

- Faux positifs lorsque la hauteur en vol par rapport au sol est supérieure à hauteur prédéfinie de mission. Possibilités de doubles comptages liés à superposition de l'empreinte (hauteur entre drone et sol trop importante par rapport aux distances horizontales des transects préprogrammés en début de mission selon hauteur de vol retenue),
- Faux négatifs lorsque la hauteur en vol par rapport au sol < à hauteur prédéfinie de mission. Il peut dans ce cas avoir des ratées dans la détection d'individu du fait d'une empreinte au sol réduite par rapport aux distances horizontales des transects préprogrammés en début de mission selon hauteur de vol retenue.

La mise en place d'un protocole avec un suivi du terrain sera donc primordiale à la robustesse des résultats obtenus, comme éviter le double comptage (point important de l'étude détaillé en phase 3 qui est en cours de rédaction, paragraphe 4.1.5.1).

2.4.1.3 Angle caméra

L'angle de la caméra est aussi un des paramètres à prendre en considération et à définir/tester en amont de l'acquisition de la donnée et de la mise en place du protocole définitif de comptage.

En effet, selon l'angle de la caméra la signature thermique des animaux apparaît différente. Plus la caméra est inclinée (son angle diminue) et plus les détails de profil, comme les pattes, ressortent en thermique et peuvent donner des indications plus précises pour une détection plus aisée des espèces sauvages et tout particulièrement des cerfs (Figure 3).

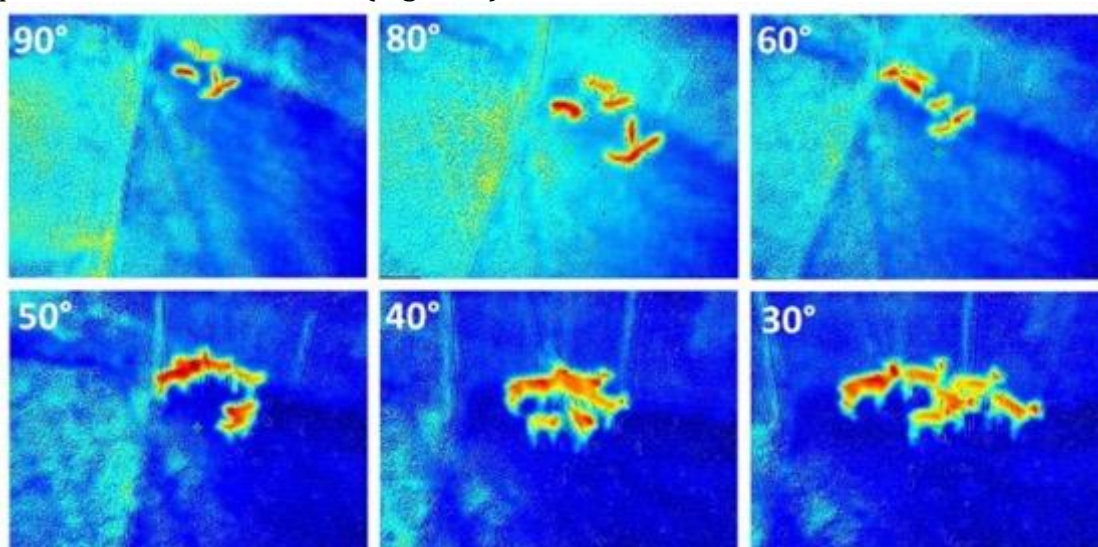


Figure 3 : Quelques exemples de signatures thermiques des animaux sous différents angles et hauteurs d'un capteur thermique (Source : Meyer et al. 2019)

2.4.1.4 Plan de vol (par quadra/blocs ou bande de transect)

L'étude des structures spatiales et leur prise en compte dans les protocoles d'échantillonnage est courante en écologie végétale et animale (Chessel et Gautier, 1984 ; Chessel et Debouzie, 1984 ; Michel, 2000). Dans les dénombrements de grands mammifères sauvages et domestiques, l'hétérogénéité spatiale de la répartition des individus peut avoir des conséquences importantes sur la pertinence des données collectées (Michel, 2000).

Dans le cas d'un comptage d'animaux présents sur une aire sélectionnée donnée, il est nécessaire que toute la surface soit prospectée et que les animaux soient dénombrés précisément et en une seule fois (Norton-Griffiths, 1978).

Le principal inconvénient des dénombrements en aérien est le risque de sous-estimer l'effectif. En effet, même si toute la surface de comptage est explorée et tous les animaux visibles dénombrés, les animaux sous abri ou stationnant sous le couvert végétal restent inaccessibles (non identifiable) aux observateurs (Michel, 2000).

Ce problème se rencontre aussi avec le drone équipé d'une caméra thermique du fait que le rayonnement infrarouge (thermique) ne peut pas traverser un obstacle

comme un couvert végétale dense de végétation (expliqué auparavant dans ce rapport paragraphe 2.3.1).

La stratégie de couverture de l'aéronef (Plan de la mission de vol) prend donc une place importante dans la méthodologie.

Plusieurs exemples de plans de vol sont proposés dans la littérature (Norton-Griffiths, 1978, Chrétien, 2016, Witczuk et al. 2017, Beaver et al. 2020, Ott 2020) et 2 grands types de plan de vol sont utilisés :

➤ Les quadras et blocs (par balayage/scan de zone) :

Les quadras sont généralement délimités par des rectangles ou des carrés, alors que les blocs sont des polygones variables déterminés selon des caractéristiques du milieu (Norton-Griffiths M., 1978.). Les animaux sont alors dénombrés dans les unités choisies.

Afin de parcourir avec le drone toute la surface du quadra ou du bloc choisis, un balayage (scan) de la zone en va-et vient et en lignes (transects) parallèles sans recouvrement est réalisé (voir Figure 4, Figure 5, Figure 6 ci-après)

❖ Exemple de plan de vol drone par quadras/blocs (balayage de zone)



Figure 4 : Exemple de trajectoire de vol en balayage de zone tiré de l'étude de Maxwell C.Ott, 2020, sur l'utilisation des drones avec un capteur thermique pour cartographier et compter des populations de cerf.

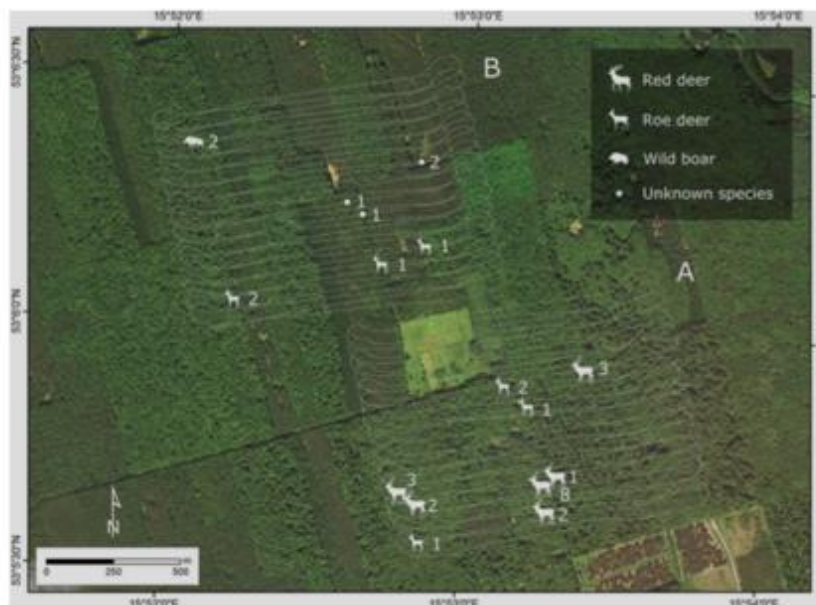


Figure 5 : Exemple de trajectoires de vol en balayage/scan au-dessus de 2 zones A et B (Parc national de Drawieński, Pologne, avril 2015) tiré de l'étude de Witczuk et al. 2017. Les symboles pour le cerf, le sanglier, le chevreuil et les espèces inconnues indiquent les emplacements approximatifs des animaux détectés. Le nombre à côté du symbole indique le nombre d'animaux dans le groupe.

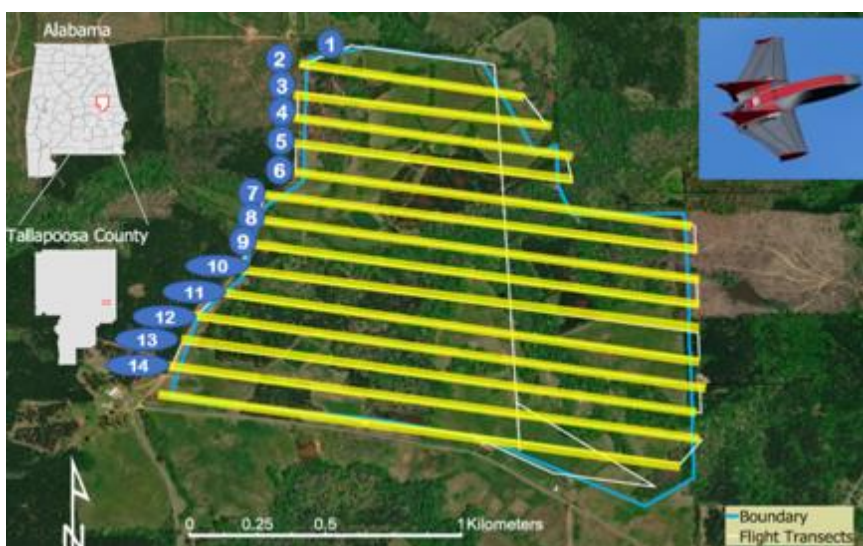


Figure 6 : Exemple de Trajectoire de vol (lignes blanches) en blocs (balayage de zone en forme de polygone) et transects parcourus (surlignés en jaune et étiquetés) tiré de l'étude de Beaver et al. 2020 pour des relevés thermiques par drones sur le cerf de Virginie

➤ Les bandes de comptage (strip transects):

Ces unités d'échantillonnage sont des bandes, de largeur constante ou variable, reposant sur une ligne traversant la zone de comptage (voir Figure 7 et Figure 8 ci-après). Généralement cette largeur dépend de l'empreinte au sol du champ de vision des observateurs ou du capteur (caméra) utilisé lors des comptages aériens. Pour des observateurs à bord d'un aéronef, elle est déterminée par la visibilité des animaux.

Classiquement, l'orientation de la bande doit être, dans la mesure du possible, perpendiculaire aux lignes d'isodensité des animaux à dénombrer,

donc aux axes de déplacement des animaux et à tous les facteurs de milieu pouvant être liés à leur comportement (Michel, 2000).

❖ Exemple de plan de vol drone par bande de comptage/strip transects

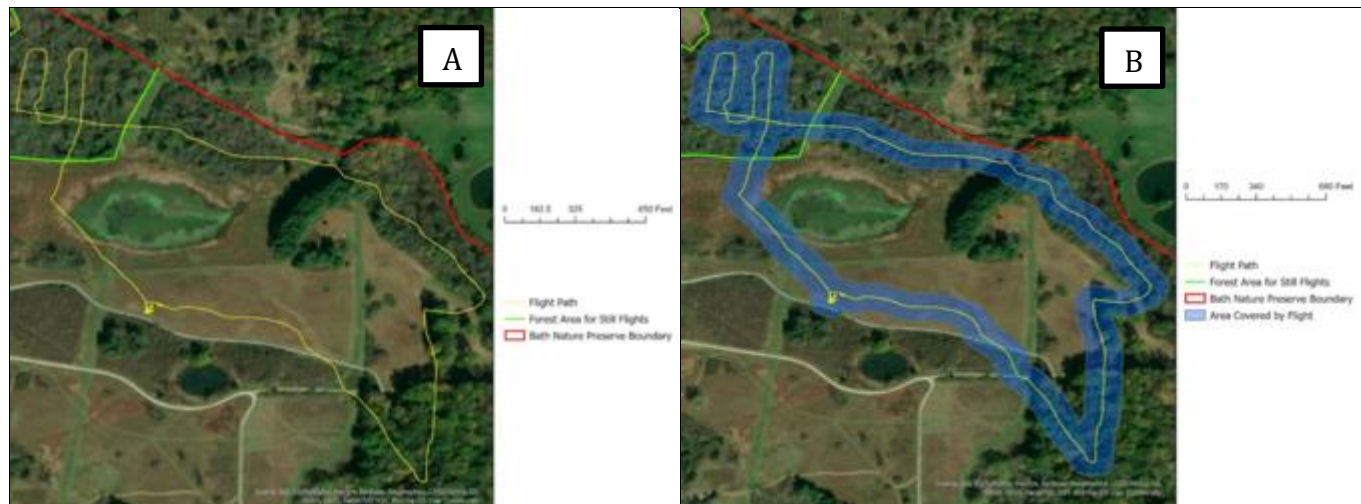


Figure 7 : Exemple de trajectoire de vol en bande de comptage (Strip transect) tiré de l'étude de Maxwell C. Ott, 2020, sur l'utilisation des drones avec un capteur thermique pour cartographier et compter les populations de cerf (En (A) trajectoire de vol simple et (B) trajectoire de vol avec la surface au sol couverte par le vol/capteur).

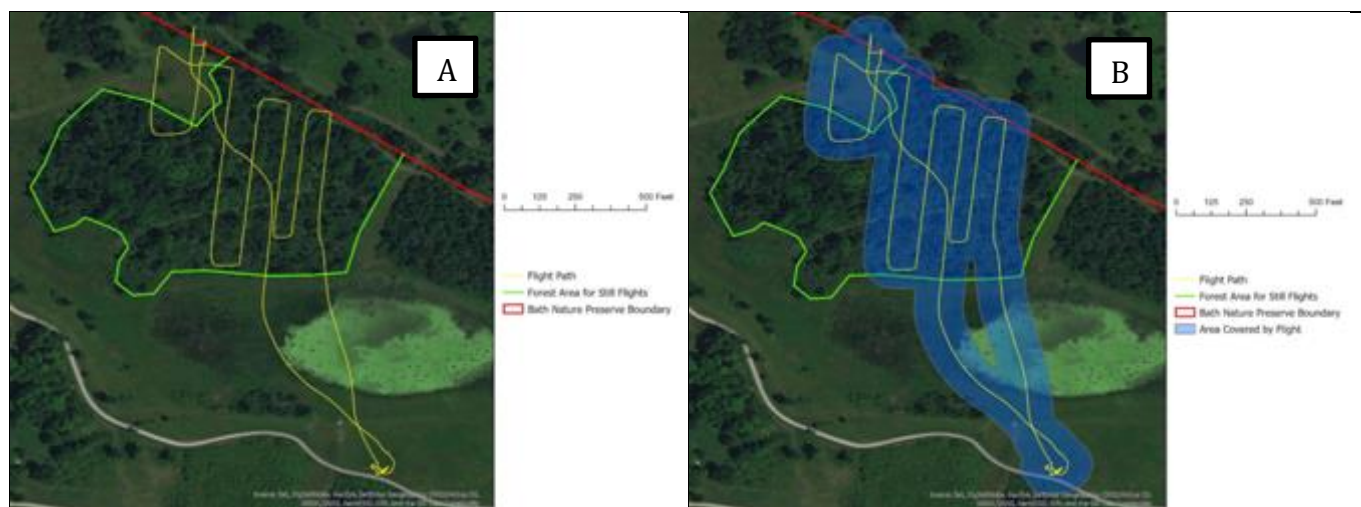


Figure 8 : Exemple de trajectoire de vol en bande de comptage (Strip transect) tiré de l'étude de Maxwell C. Ott, 2020, sur l'utilisation des drones avec un capteur thermique pour cartographier et compter les populations de cerf (En (A) trajectoire de vol simple et (B) trajectoire de vol avec la surface au sol couverte par le vol/capteur). Le chemin étrange emprunté dans la partie supérieure gauche du chemin est dû à l'observation d'un groupe de cerfs, qui ont été suivis pendant une courte période.

Avant l'arrivée des drones dans ce type d'étude, le strip transect était quasiment la seule technique utilisée pour les comptages aériens par avions car beaucoup plus simple à mettre à place avec ce type d'appareil (Norton-Griffiths M., 1978.). Les temps morts sont minimisés et la navigation nettement plus facile. De plus, la gamme couverte des habitats et des groupes d'animaux est plus importante que pour les quadrats (généralement plus compacts). D'après Michel 2000, les principales difficultés de l'utilisation des bandes résident dans la matérialisation,

le contrôle et la précision de la mesure de la surface réellement couverte, mais aussi dans la localisation et le comptage rapide et fiable des animaux présents dans la zone balayée par le transect puisque le survol est unique pour chaque session.

Le transect n'est cependant pas toujours la meilleure technique à adopter (Michel 2000). Si le terrain est très accidenté ou si la végétation est dense, Norton-Griffiths 1978, préconise l'utilisation de quadras ou de blocs, ou même un comptage exhaustif sur toute la zone, ce qui n'est pas toujours réaliste.

D'après d'autres auteurs (Pojar et al. 1995), les quadras sont identifiés comme des protocoles bien meilleurs que les transects pour un usage aérien et la technologie du drone permet d'optimiser cette procédure grâce à son automatisation.

Dans le cadre de notre étude afin d'évaluer l'abondance relative du cerf dans les zones prioritaires, des échanges personnels en visio-conférence, avec les deux experts scientifiques Julia Witczuk et Stanislaw Pagacz, ont permis de conforter notre choix sur la meilleure technique à utiliser. En effet, leur expertise, suite à différents tests de méthode depuis plusieurs années, en conclue que le balayage de zone (quadras, blocs) en va et vient sans recouvrement (lignes parallèles), avec un espacement entre ligne suffisant pour éviter le double comptage apparait bien comme la technique la mieux adaptée pour ce genre d'étude.

2.4.2 Traitement et analyse des données : intérêt et limite du comptage automatisé

Que ce soit pour les acquisitions par orthophotos ou par vidéo (malgré son gain de temps), le comptage manuel des animaux dans les images de télédétection prend du temps et est souvent sujet à des erreurs humaines (Erwin, 1982; Harris & Lloyd, 1977). De plus, à mesure que le volume et la disponibilité des images aériennes augmentent, le développement de méthodes automatisées d'analyse d'images présente un réel avantage (Terletzky & Ramsey, 2016). D'après McCarthy et al 2021, les techniques de classification basées sur l'apprentissage automatique sont de plus en plus utilisées en écologie, y compris dans la surveillance/suivi des populations (Dell et al., 2014; Tabak et al., 2019; Valletta et al., 2017; Yanget al., 2015).

En effet, des zones d'étude vastes avec des ensembles de données complexes nécessitent une reconnaissance d'objets et une classification d'images ou vidéos automatisées. Ceci permet d'économiser du temps et les coûts associés à l'analyse de l'observateur humain.

Par conséquent, lorsque le nombre de sujets est important ou que des répétitions sont nécessaires à différents moments, l'investissement en main-d'œuvre nécessaire pour le comptage manuel peut être important et l'incorporation de capacités d'apprentissage automatique devient d'une très grande aide (Chabot et Francis 2016, Chabot et al., 2018, Burke et al. 2019).

D'après Chabot et al, 2018, le temps requis pour une analyse automatisés sur des échantillons d'images d'oiseaux ne représente que 5 % environ de celui requis pour compter manuellement tous les individus. Ils soulignent que le gain de temps réel dans une enquête plus large dépendrait de la proportion d'images avec différentes conditions et densités d'oiseaux. Même si le ratio serait d'après eux plus proche de 10 %, l'utilisation de la procédure semi-automatisée permet de réduire

considérablement le temps-personne typique requis pour analyser un relevé aérien.

De plus le temps passer sur l'écran par l'observateur engendre une fatigue importante à la longue et va entraîner des erreurs dans le comptage et l'analyse de la donnée. Contrairement, grâce à un algorithme de détection généré dans celui-ci, un ordinateur va pouvoir traiter l'information en continue pendant des heures, voir des jours selon la quantité de données.

Néanmoins, le développement de ces technologies n'en est qu'à ses débuts et ces approches sont d'une utilité limitée si la classification automatisée des images doit être réutilisée pour de nouveaux ensembles de données ou nécessite une configuration étendue (par exemple, Seymour et al. 2017). De plus, Hodgson et al. (2018) ont montré que les comptages manuels peuvent tout aussi bien fonctionner, en comparaison aux comptages semi-automatisés par algorithmes.

D'après Fang et al 2016, les vidéos aériennes collectées par les UAV (véhicules aériens sans pilote) pour identifier et compter la faune sauvage constituent une excellente méthode si elles sont combinées à des techniques de détection automatique appropriées.

La détection et le suivi d'objets sont développés depuis des décennies dans le domaine de la vision par ordinateur. Cependant, les algorithmes proposés depuis plusieurs années ont des restrictions basées sur des occurrences bien spécifiques (par exemple pour la reconnaissance faciale : individu de face sans mouvement). La détection d'objets en mouvement avec les caméras fixes et un arrière-plan constant est facilement gérée aujourd'hui. Une grande quantité de traqueur a été développée en utilisant différentes méthodes, telles que les méthodes de modélisation d'arrière-plan (Stauffer et Grimson, 1999) et les méthodes d'estimation d'état (Bhat et al. 2000).

Seulement, la détection d'animaux en mouvement par de tels algorithmes et à partir de vidéos aériennes n'est pas encore développée et utilisée largement. D'après notre expertise, ceci s'explique par le codage qui est beaucoup plus difficile à mettre en place. Le contexte dans lequel nous nous trouvons dans la présente étude est totalement différent des applications classiques telles que la gestion du trafic (Zhou et al. 2015 ; Moranduzzo et al. 2014), la surveillance civile (Se et al. 2015 ; Prokaj et al, 2014) ou les opérations militaires (Parameswaran et al. 2014). En effet, contrairement aux objets (comme les véhicules et engins militaires), les animaux n'ont pas un contour stable et différent suivant l'espèce, ainsi qu'une orientation et une vitesse de mouvement cohérentes, qui sont généralement supposées dans la détection de véhicules. En outre, l'arrière-plan dynamique et le camouflage naturel des animaux rajoute des difficultés.

De nos jours, plusieurs algorithmes spécifiques pour un type d'animal (espèce) sont recensés dans la littérature à partir de photos ou orthophotos (comme Chabot et Francis 2016, Witczuk et al 2017, Chabot et al., 2018, Burke et al. 2019). Cependant, aucun de ces algorithmes ne concerne un traitement de l'image à partir de vidéos acquises à l'aide capteur en mouvement et en aérien. Tout l'environnement est en mouvement ce qui amplifie considérablement la difficulté du codage et de la détection.

Aucun algorithme spécifique au cerf rusa (sujet de l'étude) n'a pour le moment été recensé dans la littérature. Un des gros challenges de la présente étude est l'élaboration et le test d'un tel algorithme, avec toutes les difficultés notifiées juste

avant dans ce paragraphe. Il va donc devoir être créée et testé au cours de cette étude de faisabilité afin, si possible, de faciliter et diminuer en temps le traitement de la donnée et ainsi réduire les coûts.

3 Pré-étude pour la mise en place d'un indice aérien d'abondance par drone thermique sur le territoire calédonien (Phase 2 de calibration)

D'après notre expertise et la phase de bibliographie que nous avons réalisé, il s'avère que plusieurs paramètres primordiaux sont à prendre en considération et à tester avant d'effectuer l'acquisition de la donnée sur le terrain pour du comptage d'animaux sauvages par drone thermique. Ces paramètres peuvent fluctuer suivant le type de drone et de capteur thermique utilisés.

Dans cet optique, plusieurs tests initiaux ont été réalisés dans cette phase dite de « calibration » soit :

- Le choix du type de drone à utiliser dans le contexte calédonien,
- Le capteur thermique,
- La palette de couleur thermique,
- La hauteur optimale de vol,
- La prise en compte du comportement, activité et saisonnalité des individus populations de cerfs en Nouvelle-Calédonie,
- L'angle du capteur thermique,
- L'intégration de la donnée dans une plateforme SIG.

Cette phase de calibration et de test est essentielle. Elle va permettre de partir sur des bases solides afin de mettre en place toute la méthodologie du suivi du cerf rusa par drone thermique, la mieux adaptée au contexte calédonien et ainsi tester la faisabilité d'un indice aérien d'abondance à l'aide de cet outil.

3.1 Selection du type de drone

Deux grands types de drone existent sur le marché civil soit :

- Les ailes volantes (fixwind, Figure 9) 10% du marché du drone civils
- Les multicopters (quadricopter: 4 moteurs, Hexacopter: 6 moteurs, octocopter: 8 moteurs) 90% du marché du drone civil (Figure 9).

Ces deux types de drone ont chacun leurs avantages et inconvénients.



Figure 9 : Aile volante (à gauche) et hexacopter (à droite)

3.1.1 Ailes volantes:

Avantages:

- Grande autonomie (plusieurs heures) grâce à leur voilure qui permet de couvrir d'importantes surfaces ;
- Maniable;

- Compacte et léger.

Inconvénients:

- Nécessite une piste d'atterrissage la plus plane possible et de plusieurs dizaines de mètres au risque de détériorer le matériel lors de l'atterrissage. Des systèmes de parachutes existent mais très difficile à prévoir la zone exacte de chute donc nécessité d'une zone d'atterrissage assez large. Des filets peuvent être aussi utilisés pour attraper le drone à l'atterrissage ce qui ne nécessite pas de longue piste d'atterrissage mais ceci est très complexe à mettre en place selon la zone ;
- Sensibilité accrue au vent;
- Ne peut pas faire de stationnaire et donc ne peut pas entreprendre de grande variation d'altitude au cours de sa mission ;
- Nécessite des autorisations et procédures très spécifiques au niveau de la législation lorsque des vols sur de grande distance (plusieurs kilomètres) sont opérés. En effet, ce genre de vol sort des scénarios de vol classiques (S1, S2 et S3) et nécessite un pilote formé au scénario S4. Il s'agit d'un vol hors vue (sans limite de distance horizontale) hors zone peuplée et limité à 150 m de hauteur. Le poids du drone ne doit pas être supérieur à 2 kg, ce qui peut très vite être une contrainte selon le poids du capteur embarqué. Ce scénario nécessite une formation spécifique supplémentaire du type PPL (Licence de Pilote Privée) et une autorisation de vol spécifique préalable de la DGAC suite à analyse d'un dossier répondant à plusieurs critères de sélection et validation.

3.1.2 Multirotors

Avantages :

- Facile à piloter
- Grande stabilité et vol en stationnaire auto-stabilisé qui facilite le pilotage et qui permet de suivre le terrain et donc de travailler à une même altitude en milieu avec de forts dénivelés,
- La zone de décollage et d'atterrissage très réduite (de l'ordre du m²). Selon les drones, peut être décollé et atterri à la main.
- Capacité d'emport qui peut être importante selon le type de machine (plusieurs Kg)

Inconvénients:

- Limité en autonomie en comparaison à une aile volante (Quelques dizaines de minutes selon le type de drone) et donc recouvre beaucoup moins de surface en un seul vol selon la machine utilisée.
- Leur poids, lié aux batteries et aux nombreux composants (plusieurs moteurs, train d'atterrissage, etc...) qui est beaucoup plus important que les ailes volantes (à taille équivalente). Les multirotors professionnels passent très vite au-dessus des limites de poids obligeant des autorisations et des dérogations spécifiques pour les vols (exemple si poids >2 kg limité à 500 m de distance horizontale).

Remarque : La législation française de l'espace aérien est très contraignante pour les drones. Comparée aux autres pays, elle apparaît comme la plus restrictive et avec le plus de formalité à effectuer auprès de divers services (Haut-commissariat, Mairies, protocole d'accord avec aéroports/aérodromes, procédures de vol à mettre en place avec les tours de contrôle, etc...).

Le comptage des animaux sauvages par drone nécessite d'après notre expertise de rester à une hauteur constante et donc de suivre le terrain. Les fortes variations de la topographie du sol en Nouvelle-Calédonie et tout particulièrement dans les zones d'intervention du projet PROTEGE, font du quadricoptère l'outil idéal dans ce contexte. De plus dans ces milieux naturels, il est très difficile de trouver des zones dégagées, planes sur plusieurs dizaines de mètres comme piste d'atterrissage. Dans le contexte calédonien et du projet PROTEGE (en milieu naturels avec de forts dénivelés), les multicopters apparaissent comme l'outil le plus approprié et ont donc été retenus pour cette étude (beaucoup plus adapté aux contraintes terrains) malgré qu'ils ne puissent couvrir en un seul vol de grandes surfaces en comparaison des ailes volantes.

3.2 Matériel utilisé pour l'étude



3.2.1 Le drone : Matrice 300 RTK homologué S2 et S3 (Prix : 1 900 000 cfp)

Le DJI Matrice 300 RTK est le tout dernier drone conçu par le leader mondial du drone DJI (drone inspiré des systèmes d'aviation modernes).

Ce quadricoptère permet de mener à bien tout type de missions, quel que soit le domaine : topographie, audiovisuel, photogrammétrie, inspection, BTP, surveillance, etc...

Au vu de ses caractéristiques, le DJI Matrice 300 RTK est considéré par beaucoup comme le meilleur drone professionnel à l'heure actuelle.

Il est robuste, agile, puissant... mais surtout, il possède une polyvalence encore inégalée. Il intègre des systèmes de multiport de nacelles, ce qui lui permet de se spécialiser dans divers domaines, en fonction de l'utilisation de ce dernier.

En effet, ce drone est un appareil capable d'emporter avec lui plusieurs types de charges utiles : des nacelles-caméras infrarouges (thermique), illuminateur IR, capteurs photogrammétriques, LIDAR, systèmes de largage, RADAR, etc...

Le Matrice 300 RTK est un appareil professionnel aux performances incomparables. Il possède une autonomie de vol de 40 minutes maximum. La redondance de ses composants est sa grande force faisant de lui l'un des appareils les plus sûrs du marché.

En plus d'être très sécurisé en raison de la redondance, le drone est robuste. Le DJI Matrice 300 RTK est certifié IP45 ce qui signifie qu'il possède des matériaux ainsi qu'une conception lui permettant de résister à des projections de poussière, ou bien à de légères projections d'eau. Il fonctionnera correctement et sera capable de réaliser des vols dans des températures comprises en -20° et 50°C.

3.2.2 Le capteur : Zenmuse H20T (Prix : 1 600 000 CFP)

La zenmuse H20T de chez DJI est une caméra hybride avec 4 capteurs puissants développée à la base pour la sécurité et l'inspection.

Soit 3 capteurs photographiques et un télémètre laser :

- 1 capteur 1/2.3 pouce grand angle de 12 Mpx.
- 1 **caméra thermique radiométrique** (640 x 512 pixels).
- 1 caméra zoom (zoom optique x23; capteur 1/1.7 pouce de 20 Mpx).
- 1 télémètre laser (distance 1200 m).



3.3 Essais opérés sur zones tests

3.3.1 Zones prospectées

Pour cette phase, les essais terrains ont été opérés sur 4 propriétés privées où l'activité du cerf était bien connue afin de faciliter les différents tests que nous avions à effectuer en amont.

Les zones tests (chassées ou non/perturbées ou non) ont été les suivantes (Figure 10) :

- Propriété de Mr Bourguine, Ferme de chasse la cotonnière, Boulouparis (phase terrain du 28 au 31 mai 2021) : Forte pression de chasse sur partie Est de la propriété ;
- Le Domaine de Déva, parc provincial, Bourail (du 27 au 30 juillet 2021) : Forte pression de chasse par endroit du domaine ;
- Propriété de Mr Akinaga, La Foa (le 4 et 12 juin 2021) : Faible pression de chasse, seuls les propriétaires chassent de temps en temps au besoin ;
- Propriété ETS Cheval de 1100 ha, Nassandou (du 20 au 22 décembre 2021): propriété à l'abandon depuis une dizaine d'année avec aucune pression de chasse (hormis du braconnage potentiel) et aucune activité humaine ni de passage sur la très grande majorité de la propriété.



Figure 10 : Limites des différentes zones d'étude pour la phase 2 de l'étude.

Le Tableau 1 ci-après synthétise les dates, les nombres d'heures réalisés pour les étapes d'autorisations/réglementations et de prospection/logistique, ainsi que le nombre de vol avec fréquence et superficie (si déterminable) que nous avons pu réaliser sur chacune des propriétés pour cette étape.

Les heures de vol détaillées sont données dans le Tableau 19 en annexe 6.2.

Tableau 1 : Synthèse des dates, du nombre d'heures réalisé pour les étapes d'autorisations/réglementation et de prospection/logistique, ainsi que le nombre de vols opérés en drone avec capteur thermique sur les différentes propriétés au cours de la phase 2 (calibration) de l'étude.

Zone d'étude	Date	Nbre d'heures demandes d'autorisations et réglementaires	Nbre heures prospection du site/logistique	Nbre de vol	Mission avec plan de vol	Fréquence des vols	Superficie (en ha)
Ferme de chasse la Cotonnière (Philippe Bourguine)	Du 28/05/21 au 3/05/21	2	2	43	Non car tests en vols aléatoires	ND*	ND*
Propriété de Mr Akinaga	Le 4/06/21 et le 12/06/21	2	24	13	Non car tests en vols aléatoires	ND*	ND*
Domaine de Deva	Du 27/07/21 au 29/07/21	5	24	37	Non car tests en vols aléatoires	ND*	ND*
Propriété ETS Cheval	Du 20/12/21 au 22/12/21	4	26	31	oui	1 mission/plan de vol	1080 ha

*ND= Non Déterminable

3.3.2 Démarches réglementaires

3.3.2.1 Généralité

Dans le cadre de cette étude qui consiste à suivre les populations de cerfs rusa par drone, il est impératif de respecter la réglementation drone en vigueur sur le territoire.

La réglementation distingue trois régimes : l'aéromodélisme (loisir et compétition), l'expérimentation (développement et mise au point d'appareils) et les « activités particulières » pour toutes les autres utilisations.¹

Afin d'appréhender cette réglementation et les droits d'un télépilote drone pour chaque régime d'activité, plusieurs documents bien détaillés sont accessibles directement en ligne comme :

- Piloter un drone : règles à respecter:
<https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F34630>
- Modèles réduits et drones de loisir :
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/modeles-reduits-et-drones-loisir>
- Drones - Usages professionnels :
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/drones-usages-professionnels>
- Drones – activités particulières :
https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/sites/default/files/Guide_drone_s_activites_particulieres.pdf

Une fois en connaissance de la réglementation, les activités particulières comme cette étude peuvent sortir de ces différents cadres mais nécessitent très souvent dans ce cas d'autorisations spécifiques et de dérogations à cette législation drone. Par exemple :

- L'utilisation d'un capteur thermique nécessite une autorisation spécifique d'acquisition d'images hors spectre visible (demande à effectuer auprès de la DGAC),
- Les vols de nuit à une hauteur supérieure à 50 m est interdite. Afin de pouvoir voler au-dessus de cette limite (comme dans la présente étude), les intervenants doivent systématiquement se trouver dans le cadre des « activités particulières » (et non des drones de loisir) et doivent transmettre et faire valider aux autorités compétentes (DGAC) une dérogation spécifique de vol de nuit.
- La réglementation limite la distance entre le drone et le télépilote à 1000 m pour les vols hors zones peuplées et hors vus(scénario dit S2), une dérogation de la distance horizontale peut être demandée
- Etc...

Ces dérogations doivent être transmises pour validation auprès des autorités compétentes minimum 2 à 3 semaines avant les interventions drones.

¹ Voir aussi le dossier « drones » paru en 2019 dans le numéro 65 la revue Espaces naturels, à télécharger sur le lien <http://www.espaces-naturels.info/espaces-naturels-65>

Par ailleurs, bien qu'elle ne soit pas toujours prise en compte, l'utilisation d'un drone, même à des fins scientifiques, peut être réglementée dans des zones protégées. Pour des suivis envisagés dans des réserves naturelles, des parcs nationaux, des parcs naturels marins, des sites bénéficiant d'un arrêté de protection de biotope, des zones Natura 2000, il peut s'avérer nécessaire de respecter un certain nombre de restrictions ou de recommandations en vigueur sur le site. Certains pays ont même interdit leur usage dans les sites sensibles suite à de nombreux dérangements constatés (Islande ; Scher 2019).

Le site Géoportail de Nouvelle-Calédonie (Georep NC) propose d'ailleurs une cartographie des zones ouvertes à la pratique du drone de loisirs en Nouvelle-Calédonie <https://georep.nc/explorateur-cartographique>.

Remarque : L'intérêt de faire appel à un prestataire professionnel pour réaliser un suivi par drone est qu'il maîtrise parfaitement toute la partie administrative relative aux autorisations de survol et au dossier à déposer pour les obtenir. À défaut, il faut veiller à bien respecter la réglementation (voir sites internet cités ci-dessus).

3.3.2.2 Démarches réalisées

Pour cette phase de l'étude, plusieurs démarches règlementaires, soumises à validation auprès de Direction de l'aviation civile DGAC et des gestionnaires de zones contrôlées, ont été nécessaires afin de procéder aux vols drone sur les différentes zones, soit :

- Une autorisation de vol hors spectre visible pour l'acquisition de données en thermique (infrarouge) ;
- Une dérogation pour voler à une hauteur sol jusqu'à 120 m en vol et 250 m en cas de perte de communication (RTH : Return To Home). Pour rappel, les vols de nuit en drone supérieurs à 50 m sont interdits et soumis à dérogation ;
- Une dérogation de distance horizontale pour pouvoir voler à 1800 m entre le drone et le télépilote dans le but de couvrir en un point une surface optimum selon la topographie et la surface d'étude du site ;
- Procédures spécifiques avec la tour de contrôle de l'aéroport de Tontouta et l'aérodrome de Poé (CF Figure 11 et Figure 12 ci-après) afin de voler en toute sécurité et éviter tout accident avec les autres usagers aériens pouvant circuler dans l'espace contrôlé de ces zones (CTR = Zone de Contrôle qui définit un espace contrôlé débutant à la surface du sol et s'étendant jusqu'à une altitude spécifiée). Ces procédures ont été mises en place, validées et scrupuleusement respectées durant toute les missions de vol (comme des appels téléphoniques en début et fin de vol, en écoute radio VHF sur la fréquence aérienne de la zone, très attentif et à l'écoute en cas d'entrée dans la zone d'un aéronef, etc...) ;
- Une information aéronautique (NOTAM : Notice to AirMen « messages aux navigants aériens ») a été émise durant toute la phase de l'étude afin que tous les usagers de l'espace aérien soient en connaissance directe de l'activité drone sur la zone et qu'ils aient un moyen de communication avec le télépilote (coordonnées téléphoniques) en cas de nécessité ;

- Autorisations des gestionnaires ou propriétaires des zones d'étude pour l'accès ;
- Pour les zones pouvant accueillir du public (Domaine de Déva et la ferme de chasse La cotonnière de Mr Bourguine) des procédures pour éviter le risque sol et tout particulièrement les tierces personnes ont dû être rédigées et validées par les autorités compétentes.

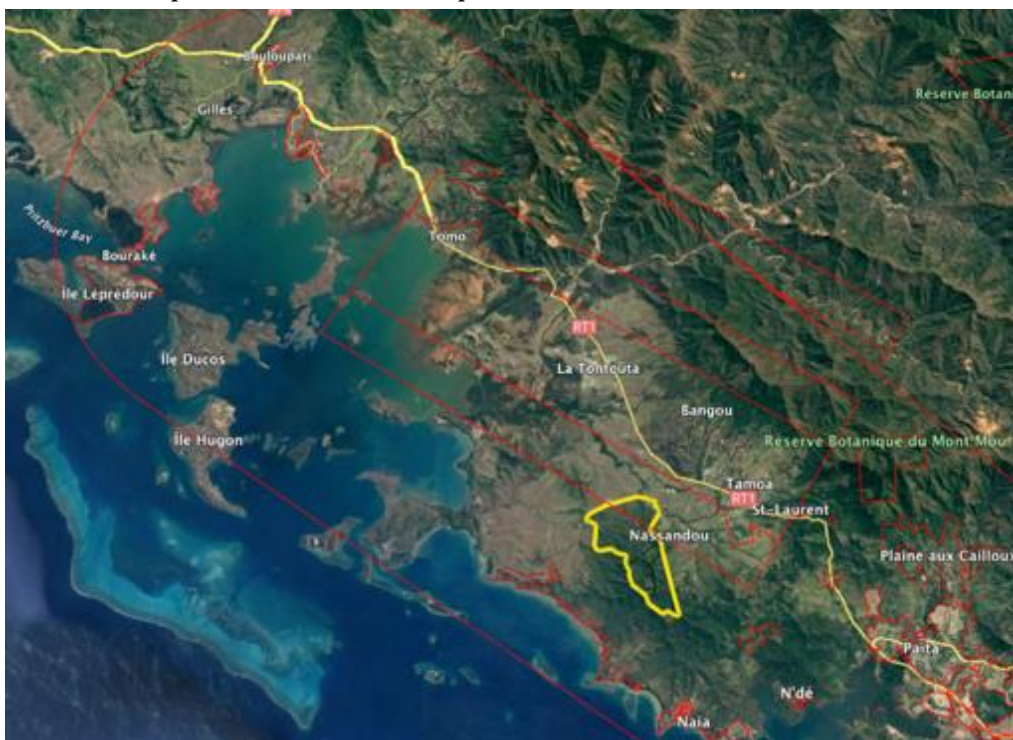


Figure 11 : Délimitation (en jaune) de la zone de vol de la propriété ETS Cheval en plein dans la zone d'influence de l'aéroport de Tontouta (couloirs aériens contrôlés = CTR, en rouges).



Figure 12 : Délimitation (en jaune) de la zone de vol du domaine de Déva avec la partie EST sous l'influence de l'aérodrome de Poé (couloirs aériens contrôlés = CTR, en rouges).

3.3.3 Prise de connaissance du capteur H20T sur animaux sauvages

D'après notre expérience en drone, chaque capteur, qu'il soit optique, thermique ou autres, possède sa propre définition selon sa qualité, sa marque et son usage pour lequel il a été conçu. Dans notre cas, le capteur H20T sortie très récemment par le fabricant DJI (début 2021) a été développé à la base pour les services de la sécurité civile pour la recherche de personnes, l'aide dans la lutte contre les feux, ainsi que pour l'inspection de structure.

D'après notre synthèse bibliographique, aucune étude sur des animaux sauvages utilisant ce capteur thermique H20T de chez DJI n'a été recensée. Avant toute chose, il a donc été important de connaître ses capacités et limites dans la détection d'animaux sauvages et tout spécifiquement sur le cerf rusa.

3.3.3.1 Test des palettes de couleur

La capteur H20T permet de choisir entre plusieurs palettes de couleur selon le rang de température soit :

- White Hot ;
- Black Hot;
- Rainbow 1 ;
- Iron Red ;
- Arctic ;
- Fulgurite ;
- Hot Iron ;
- Rainbow 2 ;
- Tint ;
- Medical ;

La Planche photos 1 ci-dessous présente quelques images effectuées de nuit sur un groupe de cerfs rusa de la ferme de chasse la Cotonnière avec différentes palettes de couleur du capteur thermique H20T.

Le choix de la palette va dépendre de la situation pour laquelle le capteur est utilisé. Dans notre cas, nous sommes en situation similaire à celle rencontrée pour de la recherche de personne disparue en milieu naturel (corps chaud dans environnement plus froid). Pour ce genre d'utilisation, les palettes White Hot, Iron Red ou Fulgurite sont généralement utilisées.

Suite à notre expertise et nos tests en différentes conditions de terrain, et tout en tenant compte des fonctionnalités de l'algorithme de détection automatique, il s'avère que la palette Iron Red soit un bon compromis pour l'identification et le comptage des individus. En effet, le contraste entre l'environnement (violet, bleu foncé car plus froid) et les animaux (jaune orange rouge selon la gamme de chaleur détectée) ressort beaucoup mieux. De plus les couleurs jaune, orange, rouge sont plus assimilés à une zone chaude pour un observateur (comme la couleur du feu). De ce fait cette palette a été retenue pour la suite de l'étude.

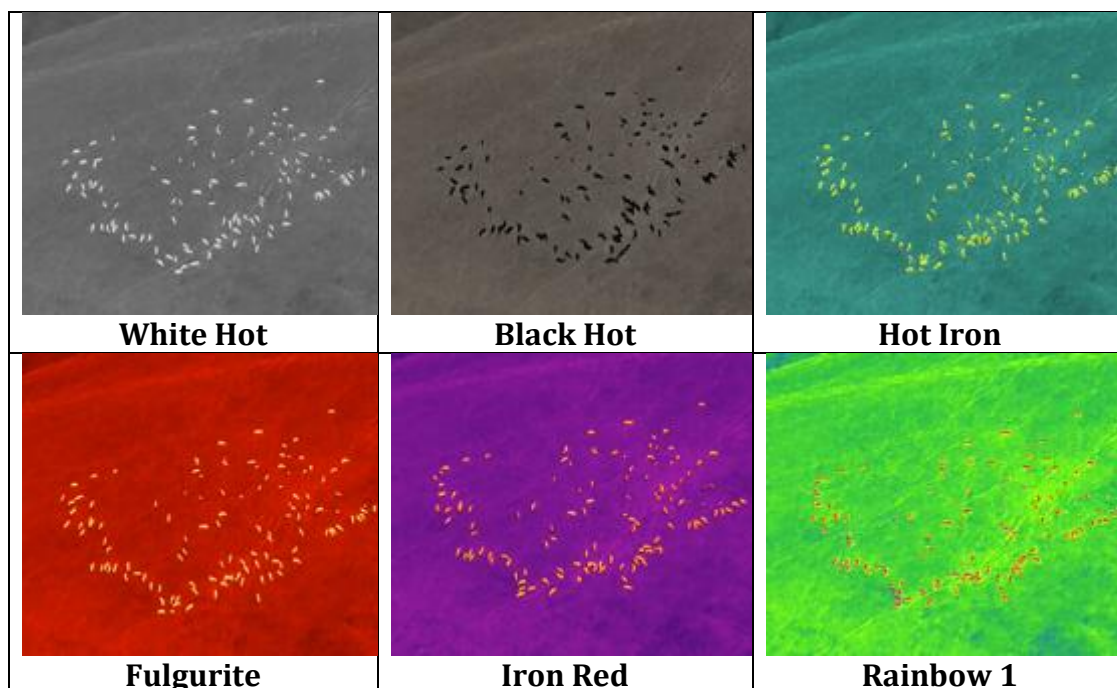


Planche photos 1 : Exemples de palettes de couleur du capteur H20T testées de nuit sur un groupe de cerf rusa (Ferme de chasse la Cotonnière).

3.3.3.2 Test de détection du cerf rusa et définition des signatures thermiques avec le capteur

Nos premiers tests du capteur H20T sur des animaux et tout particulièrement le cerf rusa ont été très concluant. Avec ce capteur, les animaux à sang chaud de moyenne taille comme le cerf rusa peuvent être repérés très distinctement à plusieurs centaines de mètres dans les zones ouvertes (CF Planche photos 2 ci-après).

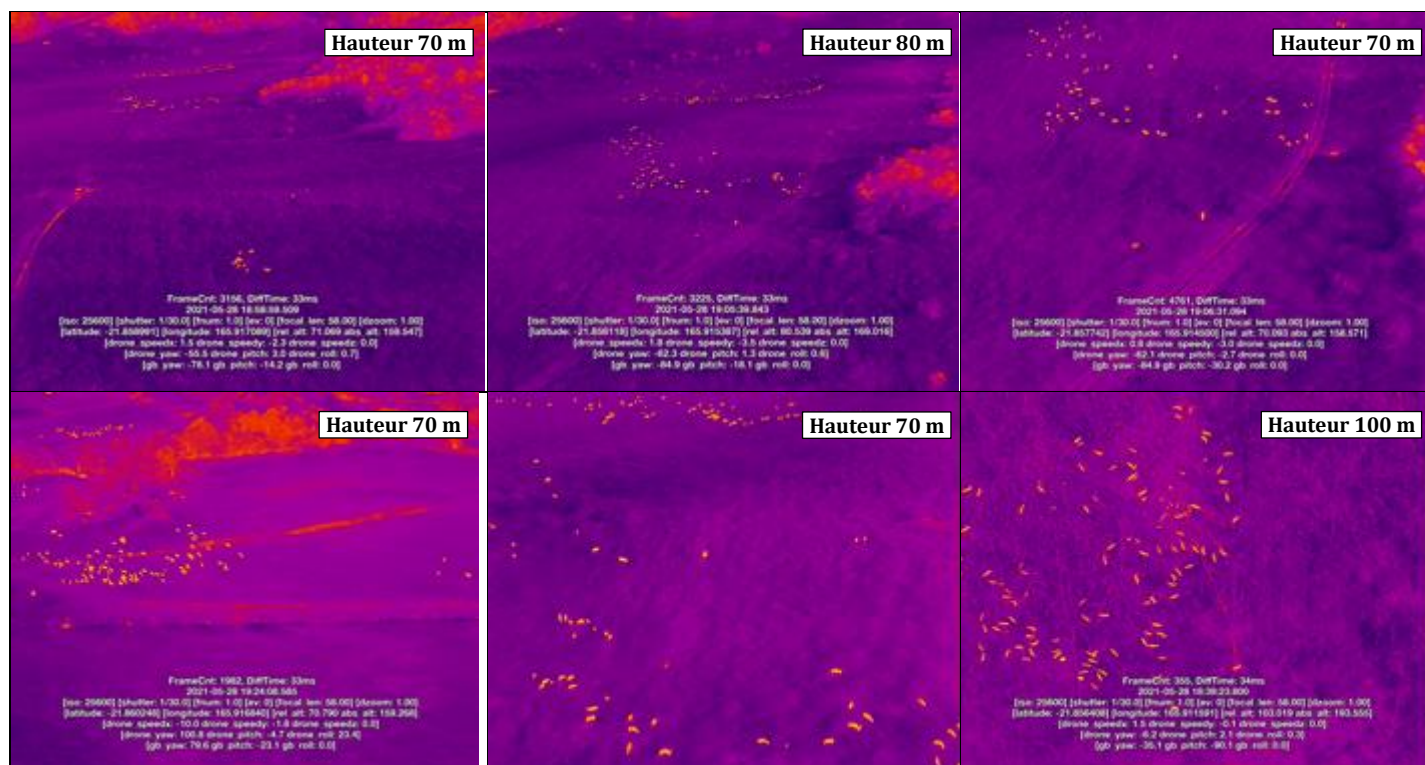


Planche photos 2 : Observation de nuit de cerfs rusa par drone thermique à une hauteur entre 70 et 100 m.

A une hauteur test entre 70 et 90 m, la bonne définition du capteur permet d'identifier et de différencier la signature thermique du cerf rusa par rapport à celle d'autres animaux comme les chevaux, les vaches ou cochons sauvages (CF planches photos ci-après). Ce point est intéressant pour les situations où ces différentes espèces peuvent se retrouver sur le même site d'étude et éviter ainsi de les confondre et donc de fausser les investigations de dénombrement.

❖ Signatures thermiques cerfs rusa versus chevaux

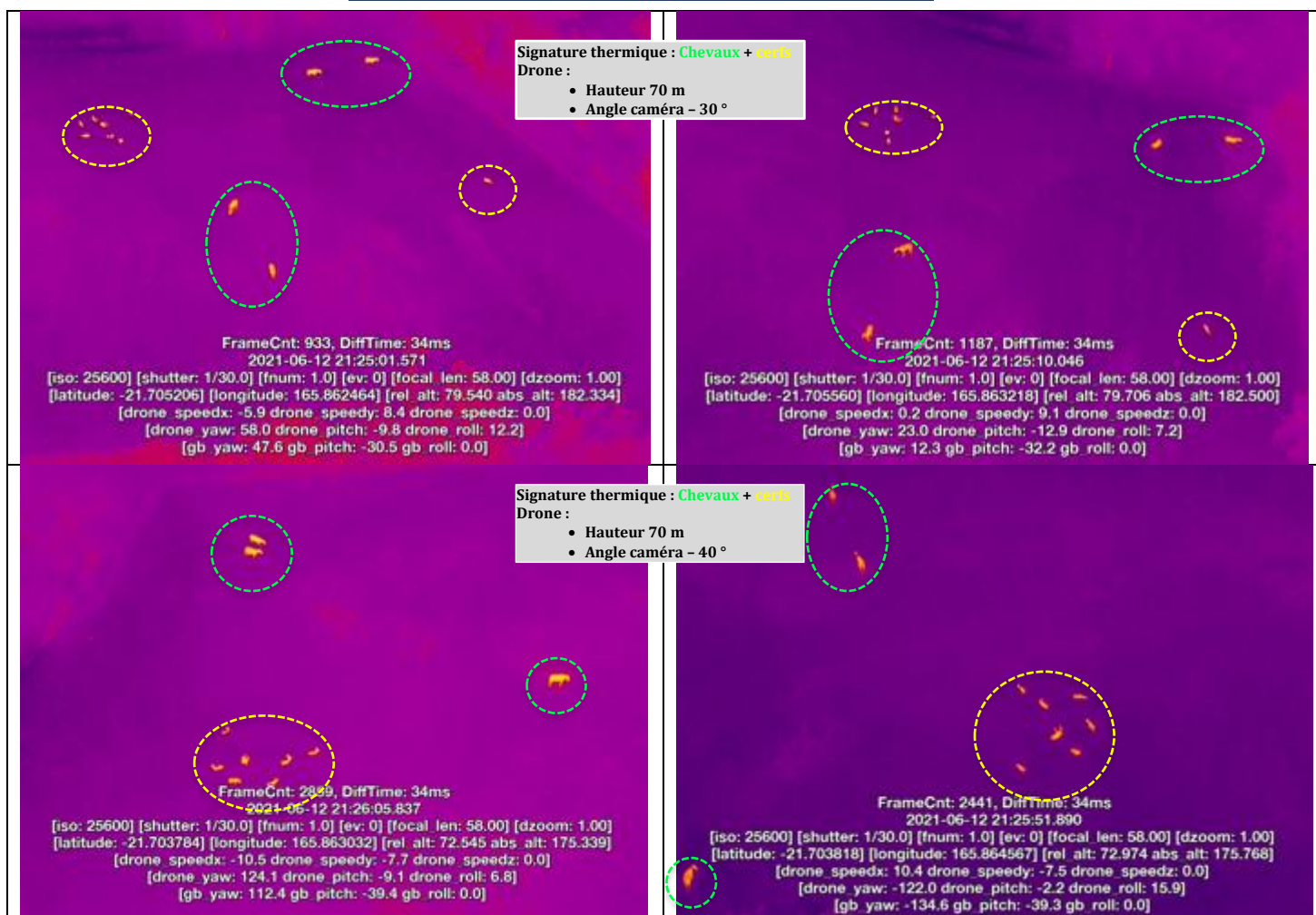


Planche photos 3 : Observation des différences de signatures thermiques de nuit par drone thermique entre cheval et cerfs à hauteur de vol et angle caméra similaires.

❖ Signatures thermiques cerfs rusa versus vaches

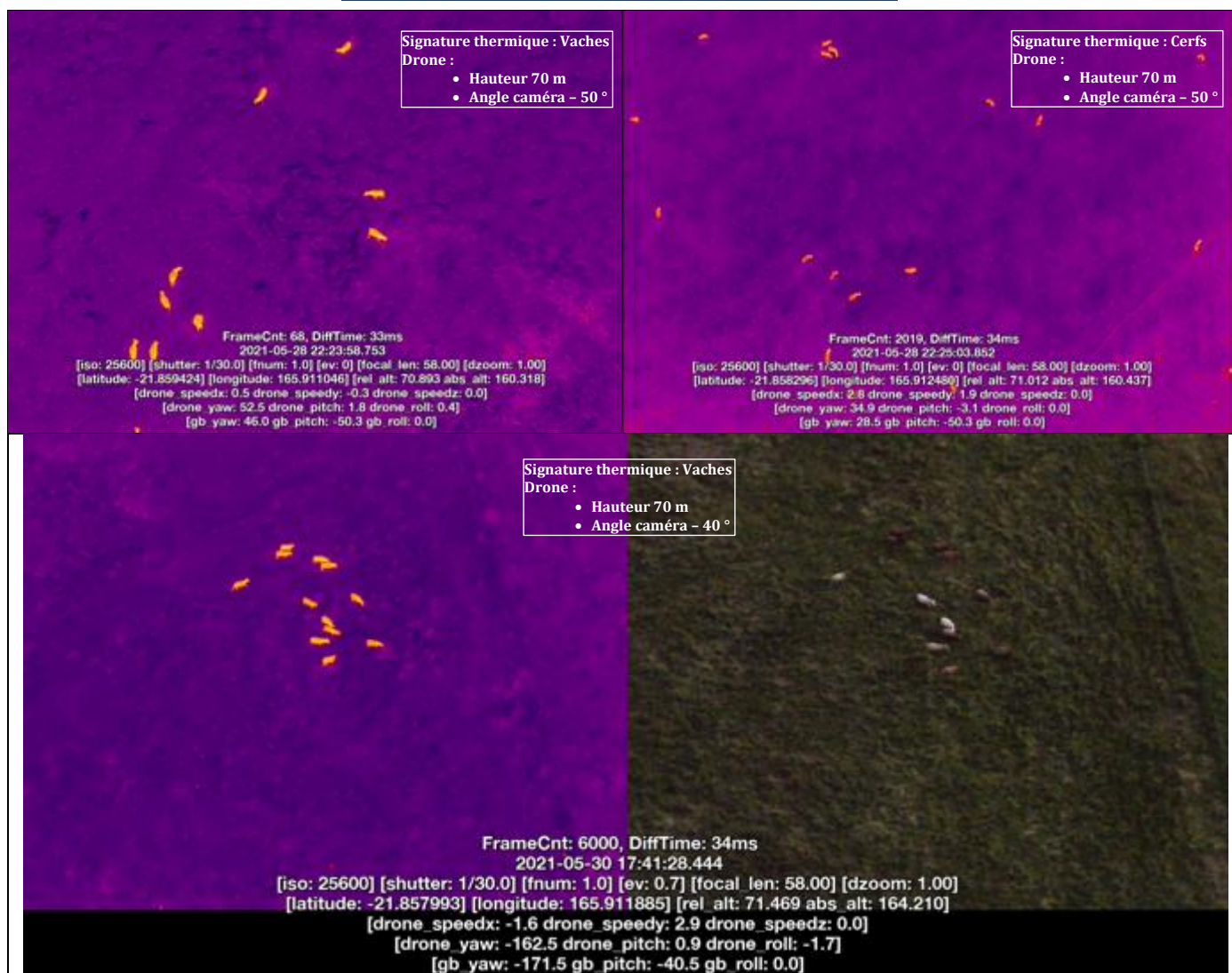


Planche photos 4 : Observation des différences de signatures thermiques de nuit par drone thermique entre vaches et cerfs à hauteur de vol et angle caméra similaires.

❖ Signatures thermiques cochons sauvages

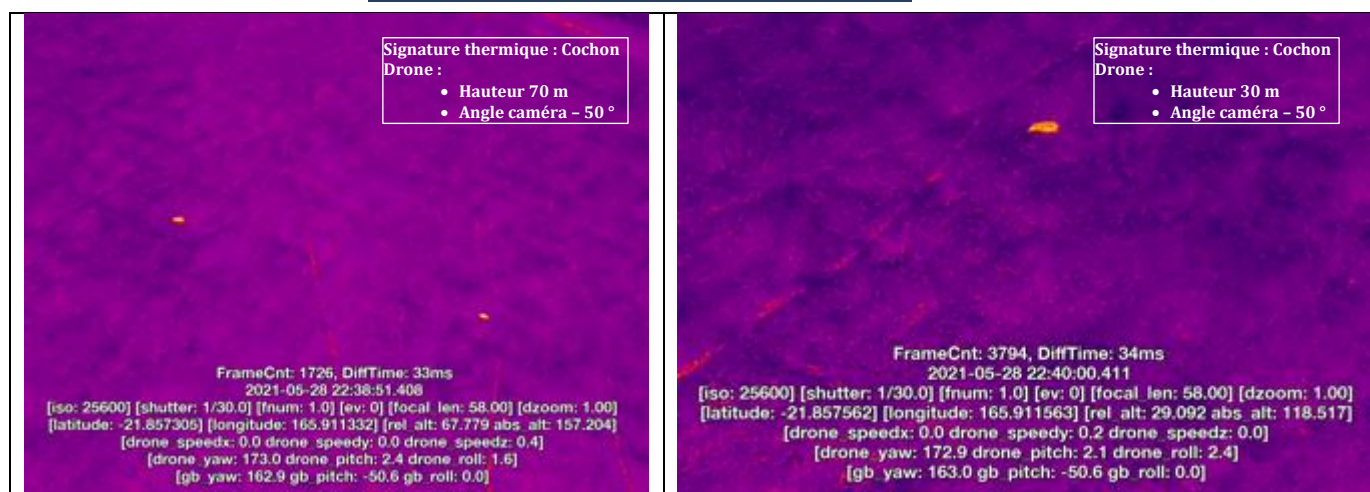


Planche photos 5 : Observation des signatures thermiques de nuit par drone thermique de cochons sauvages.

3.3.4 Test de nuit du comportement des cerfs face au drone et observation de l'activité journalière (24h)/saisonnalité

3.3.4.1 *Perturbations sur le comportement*

Sur les différentes zones prospectées pour cette phase de calibration de la méthodologie, des tests à différentes heures de la nuit et selon la pression de chasse et de l'activité humaines ont été opérés durant cette phase de l'étude afin de déceler les réactions du cerf rusa (mouvements, fuites) face au drone, pouvant ainsi perturber l'acquisition et créer des biais dans le comptage.

Sur l'ensemble des zones tests, quelque soit la pression de chasse : +/- forte selon la partie de la propriété (Ferme de chasse La Cotonnière, Domaine de Deva), faible (propriété de Mr Akinaga) ou quasi-nulle hormis du braconnage probable (Propriété ETS Cheval), il s'est avéré que le drone de nuit perturbe très faiblement le cerf et uniquement lorsque le drone se trouve à une dizaine de mètres (environ 20 - 40 m selon la zone) au-dessus de l'animal.

Dans les zones très chassées (partie la plus à l'Est de la ferme de chasse la Cotonnière, certaines zones du domaine de Déva), un léger comportement de fuite est parfois remarquable à moyenne altitude 40-50 m.

Dans les zones très peu chassées, aucun comportement de fuite n'est notable de nuit à une hauteur de plus de 20 m. Les individus apparaissent dérangés par le bruit et le vent que génère le drone seulement quand il se trouve à environ 10-20 m au-dessus des individus. Certains individus comme des mâles, moins craintifs, ont pu être survolés à 6 m seulement avant de voir une réaction (déplacement).

Du fait que naturellement aucun danger ne vienne des airs et d'autant plus de nuit, les cerfs ne semblent pas effrayés malgré les nuisances engendrées par le drone (bruit, vent). Ils continuent dans l'ensemble leur activité (repos, nourrissage, ...) sans prêter attention au drone à une hauteur supérieure ou égale à 50 m (Cf. Planche photos 6).

Un comportement de perturbation plus marqué à basse altitude 20-30 m est néanmoins notable parfois sur les femelles avec un petit que ce soit en milieu perturbé (chassé) ou non.

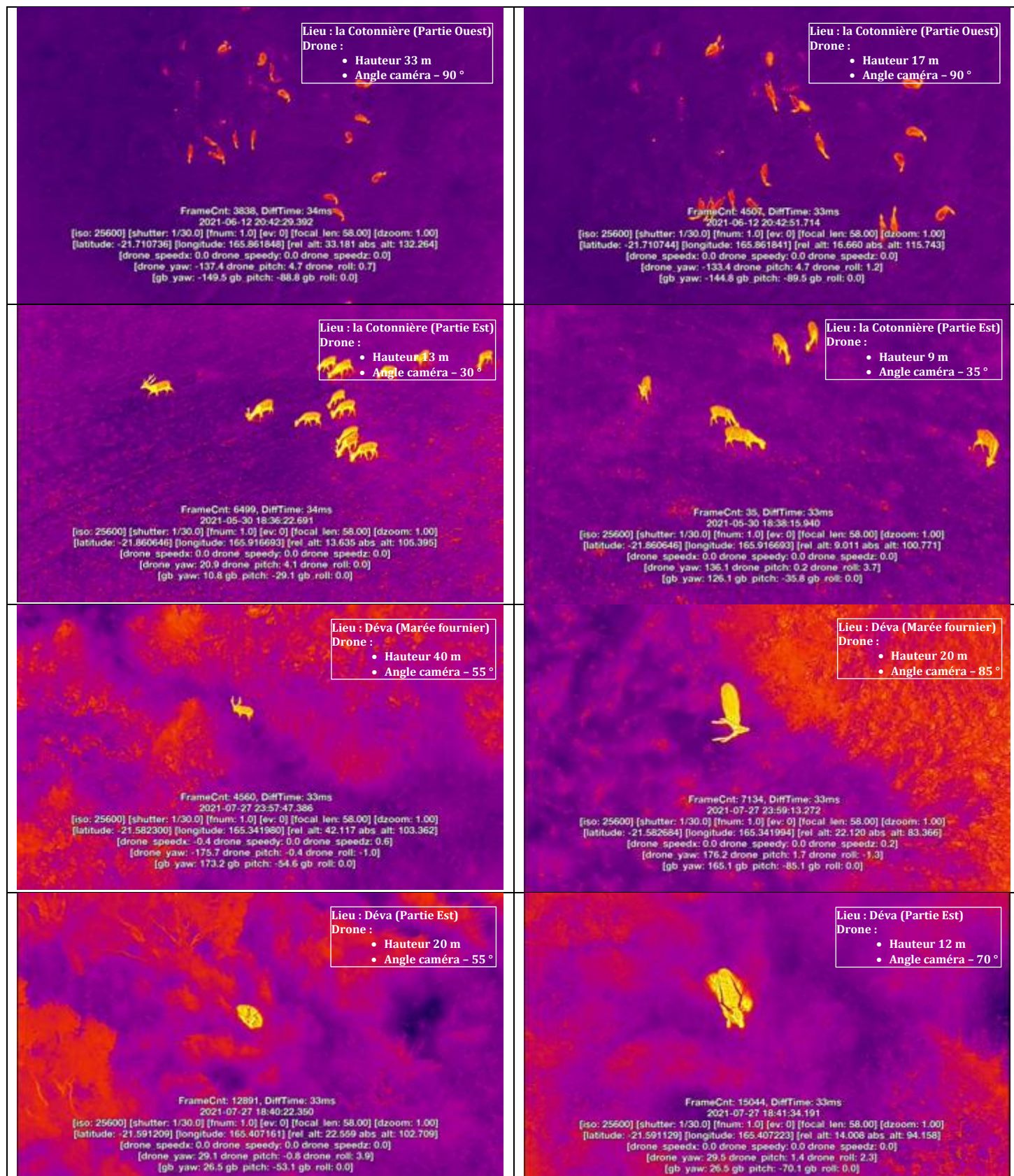


Planche photos 6 : Captures d'images d'acquisitions vidéo effectuées de nuit par drone thermique à basse altitude sur des cerfs afin de tester leur comportement face aux nuisances générées par l'aéronef.

3.3.4.2 *Activité nocturne et saisonnière*

Sur la base de nos observations limitées à 62 heures entre mai et décembre 2021, l'activité observée du cerf durant les tests de nuit s'est avérée être optimale à la tombée de la nuit, juste avant le coucher du soleil. Un comportement de sortie en lisière de forêt pour aller en plaine est bien notable dans les zones prospectées (exemple Figure 13). Les individus se concentrent sur les zones dégagées du type prairies/ zone avec de l'herbe durant quelques heures afin de s'alimenter et éventuellement boire sur les plans d'eau pouvant être présents à proximité.

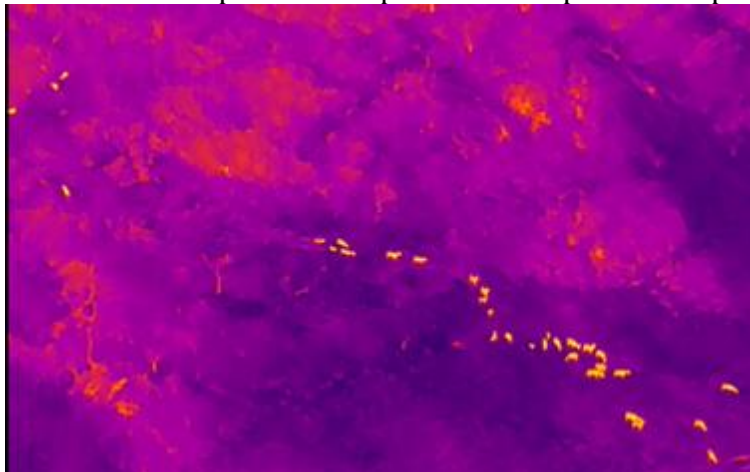


Figure 13 : Capture d'écran d'une vidéo prise en drone thermique en lisière de forêt sur la propriété de Mr Bourguine (La Cotonnière) à 18h le 30/05/21.

En milieu de nuit, une fois que les cerfs se sont nourris pendant quelques heures (2-3 h), l'activité se réduit et les animaux se dispersent de plus en plus et/ou se reposent (individus couchés). Certains semblent prospecter d'autres zones éventuelles de nourrissage et d'autres commencent à retourner en forêt (zone arborée).

Vers 2-3 h du matin, de moins en moins d'individus sont visibles en plaine et au petit matin (au levé du jour, entre 6-7 h au moment des observations) une grande majorité des individus est déjà retournée en zone arborée pour passer la journée. D'après nos observations et des échanges avec des chasseurs du territoire, l'activité nocturne du cerf semble être optimale en début de nuit pour cette étude en drone thermique. Ce créneau pourrait être privilégié même si pour le drone thermique, le petit matin, juste avant et quelques dizaines de minute après le lever du soleil, est plus propice à la détection d'animaux à sang chaud du fait que l'environnement ambiant présente à ce moment les températures les plus basses sur une journée complète. Les suivis opérationnels permettront de préciser cette préférence.

Rappelons aussi que d'après Witczuk et al. (2018) leur étude souligne que les vols du soir révèlent des images avec un fond plus homogène de sorte que les signatures thermiques des animaux ressortent avec suffisamment de contraste pour une détection relativement facile.

Rappelons que la période d'échantillonnage (Saison) est aussi très importante. En effet, l'hiver, avec des températures de l'environnement plus fraîches, permet de déceler plus facilement les individus à sang chaud et est préféré pour ce genre d'étude par drone thermique. De plus certains artéfacts sur les zones emmagasinant la chaleur de la journée comme les rochers/blocs, cailloux, sable, terre et autres sont moins présents. Ceci permet une meilleure détection des

animaux. Ce point est discuté plus loin en phase 3 dans les limites de la méthodologie.

La saisonnalité du cerf rusa est relativement bien connue sur le territoire (Barrière et Fort, 2021). Elle passe par divers stades de reproduction qui influe sur les comportements.

D'après un calendrier édité par le CEN (Tableau 2), si on tient compte du climat selon la saisonnalité (températures relativement basses entre mai et octobre ; faibles pluies entre mai et octobre), du stade de développement de la végétation (disponibilité alimentaire moindre entre juin et Novembre), et de la reproduction des cerfs (période de rut entre juillet et octobre), la période optimale de suivi par drone peut être considéré pour la Nouvelle-Calédonie entre les mois de juin et novembre avec un optimal en juillet-octobre (Tableau 2).

En effet, à cette période :

- Les températures ambiantes sont les plus fraîches de l'année et favorisent la détection thermique,
- Les pluies réduites facilitent l'accès et les vols drones,
- La fermeture de canopée est moins marquée en raison d'un faible développement végétatif et d'une défoliation pour certaines espèces,
- Le rut réunit les cerfs de toutes classes d'âge et de sexe (les cerfs mâles étant particulièrement discrets en période de « velours »).

Tableau 2 : Données relatives à la saisonnalité du climat végétation cerf et optimal de régulation et suivi, CEN 2021

Conservatoire d'espaces naturels Nouvelle-Calédonie		Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
CERF RUSA		Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Météo-Végéta	Saison	chaude	chaude	chaude	sèche	sèche	fraîche	fraîche	fraîche	sèche	sèche	sèche	chaude
	Pluviométrie	175,3	179,7	205,3	104,3	80,7	90,4	64,9	64,4	36	46	76,5	117,1
	Température	26,2	26,6	25,9	24,2	21,9	20,4	18,9	19,1	20,4	22,1	23,6	25,4
	Disponibilité alim / Cerfs												
	Repos végétatif						R	R	R				
Cerf	Trophée Cerfs Mâles	Velours	Velours	Velours	Velours	Rubans	Dur	Dur	Dur	Dur	Dur	Dur	Poilet
	Rut Cerfs Mâles							Rut	Rut	Rut	Rut		
	Déplacement des Mâles	cachés	cachés	cachés	cachés								cachés
	Hardes mixtes (M + F)							Group	Group	Group	Group		
	Repro Biches (8m10j)	Gestat*	Gestat*	Gestat*	Mise bas	Mise bas	Mise bas	Mise bas	Gestat*	Gestat*	Gestat*	Gestat*	Gestat*
	Lactation Faons (2 mois)				Faons	Faons	Faons	Faons	Faons				
Régul	Visibilité en sous-bois							forte	forte	Max	Max	Max	
	Attractivité des savanes							forte	forte	Max	Max	Max	
Suivi	Accessibilité / pluies					Moy	Moy	Moy	Moy	Max	Max	Max	
	Visibilité Impact Cerfs							Moy	Moy	Max	Max	Max	
	Période optimale de suivi							Drone	Drone	Drone	Drone	Drone	

❖ Pour résumé :

La hauteur de vol du drone, face au potentiel problème de fuite des individus, n'est finalement pas un facteur limitant dans notre cas, comparativement à d'autres études citées en partie 1 de ce rapport (synthèse bibliographique). Une hauteur supérieure à 50 m sera tout de même privilégiée par sécurité.

En ce qui concerne les heures de vol, le début de nuit (du coucher du soleil au milieu de nuit) sera retenu dans la suite de l'étude (Phase 3) pour l'acquisition de la donnée aux vues de l'activité nocturne observée lors de nos vols de calibration.

Pour la saisonnalité, les contraintes du rendu de l'étude pour le commanditaire ne nous permettent pas d'attendre la saison fraîche de l'année prochaine pour réaliser le terrain. De ce fait ce test de faisabilité de l'indice s'effectuera en condition non optimale en termes de détection mais permettra tout de même de conclure sur la robustesse ou non de cette technique d'acquisition de la donnée et de la mise en place de l'indice.

3.3.5 Hauteur et angle caméra optimum pour la mise en place du protocole de vol de l'acquisition de la donnée

Comme vu précédemment, la hauteur de vol n'entraîne pas de réelles perturbations sur le comportement du cerf (comportement de fuites importants qui pourrait entraîner des biais dans le dénombrement des animaux par double comptage). À partir d'une hauteur supérieure à 50 m, les animaux n'ont aucune réaction introduisant un risque avéré d'échec de la captation et donc du comptage.

Notre recherche de hauteur optimale va donc se focaliser sur une hauteur minimale de 60 m avec une marge de sécurité de l'ordre de 10 m, soit 70 m et s'étendre pour différentes hauteurs jusqu'en limite de détection pour le capteur, l'œil humain et l'algorithme. A partir de chacune des hauteurs tests, un angle de caméra optimum sera étudié.

D'après notre expertise, l'algorithme est le plus contraignant dans le choix de ces paramètres afin d'avoir une détection la plus robuste possible (paragraphe 3.3.5.1). L'altitude de vol ainsi que l'angle de caméra, à définir et à caler définitivement pour la mise en place de la méthodologie de l'indice va principalement reposer sur les contraintes liées à l'utilisation de l'algorithme de comptage, la surface couverte par l'empreinte au sol du capteur ainsi que sa résolution (définition) de l'image optimale.

3.3.5.1 Les contraintes (règles) liées à l'utilisation de l'algorithme

Pour être caractérisée par rapport à l'environnement, une forme doit être couverte par au moins 10 pixels*10pixels.

La caméra thermique capte la chaleur émise par les objets, chaque pixel du capteur couvre une zone et c'est le rayonnement thermique de l'ensemble des objets de la zone qui va être converti en valeur de température. Si un pixel couvre plus d'un corps alors le rayonnement perçu et la température calculée et enregistrée sera une combinaison du rayonnement des corps. Les pixels partagés entre le corps d'intérêt (le cerf) et les corps avoisinants ont un impact sur la détermination des températures et donc sur la morphologie de l'animal (nombre de pixels déterminant la forme de l'animal).

Afin de limiter ces effets de bord, il faut s'assurer que pour chaque corps d'intérêt le nombre de pixels couvrant ce corps soit supérieur au nombre de pixels partagés. On estime que pour un objet circulaire le nombre de pixels nécessaires pour réduire ces effets est d'environ 10 pixels. C'est à partir de cette valeur que le nombre de pixels couvrant le corps d'intérêt est supérieur au nombre de pixels partagés entre ce corps et d'autres sources thermiques. (Source : Burke et al. 2018).

- Les médias (vidéos) doivent comporter le moins d'artefacts et défauts

possibles : filés, flous, distorsions...

Pour éviter ces biais, les mouvements du capteur doivent être fluides sans accélérations ou rotations brutales.

- L'algorithme utilise les techniques de l'intelligence artificielle (apprentissage profond) pour analyser les différentes images de la vidéo et détecter les cerfs.

Afin de différencier les cerfs des autres corps chauds (dont les autres animaux) les objets captés doivent avoir une forme caractéristique. Pour exemple, il sera très difficile de créer un modèle de reconnaissance pour une prise de vue au nadir (à la verticale sous le capteur), les corps vus du dessus perdent une partie de leurs caractéristiques morphologique (hauteur, taille des pattes...) donc on dispose de moins d'éléments pour distinguer un cerf d'une autre espèce.

Une vue de « profil » est préférable car on disposera alors d'avantage de caractéristiques morphologiques pour la reconnaissance par le modèle.

Cette orientation ne peut pas être arbitraire. En fonction de l'angle de prise de vue (orientation par rapport au nadir), la scène captée est déformée.

L'empreinte au sol de l'image n'occupe pas un espace carré ou rectangulaire, elle prend la forme d'un trapèze dont la base la plus large est la plus éloignée du drone. L'effet de perspective provoque une déformation géométrique des pixels et les pixels les plus éloignés du capteur ont une taille au sol supérieure à celles des pixels les plus proches du capteur.

Afin que l'algorithme puisse analyser les médias dans des conditions correctes, il convient de minimiser (dans la mesure du possible) ces déformations géométriques.

De plus les contraintes de superficie couverte en une mission par le drone sont à prendre en considération selon le domaine vital (aire de répartition) des animaux ainsi que de l'autonomie du drone. Le but sera de couvrir le maximum de surface possible en seul vol (en fonction de l'autonomie du drone). Ce point sera détaillé dans la suite de l'étude (phase 3) lorsque la méthodologie définitive retenue aura pu être testée sur le terrain directement.

Si l'on résume ces contraintes dans un tableau, on obtient les éléments suivants.

Contraintes	
Hauteur :	>60 m (par rapport aux dérangements pour le cerf)
Corps couverture :	10*10 pixels
Surface à couvrir :	Maximum possible
Angle de prise de vue :	Suffisant pour une prise de vue de profil en minimisant les déformations géométriques des pixels

Avec ces paramètres et les données morphologiques du cerf rusa en Nouvelle Calédonie, il est donc possible de déterminer la taille au sol du pixel pour respecter la contrainte d'une couverture de 10 pixels*10pixels / animal et rechercher dans cet optique l'optimum théorique pour la hauteur de vol et l'angle caméra.

3.3.5.2 Optimum théorique

D'après les données morphologiques et physiologiques transmises par le CEN (Figure 14), la longueur totale d'un cerf rusa mâle se situe en moyenne entre

127,5cm (Daguet) et 170cm (Grand male). Pour pallier les déformations géométriques relatives à la topographie fine des lieux (la topographie fine n'est pas représentée dans les données d'altitudes disponibles), l'intervalle retenu pour la longueur de l'animal est compris entre 1 et 2m.

Données morphologiques

Données corporelles **métriques** (Le Bel 1999)



Attention : Données moyennes pouvant varier en fonction des sites, de la disponibilité alimentaire et donc de la croissance individuelle. Les classes de sexe-âge pourront être précisées sur la base des premières vidéos en tenant compte de l'aspect morphologique global et du comportement des animaux (ex : déplacement ou position au sein d'une harde en déplacement) qui varient en fonction de ces classes.

Tableau 2 : Mensurations moyennes des différentes classes de Cerf rusa

	L cm (Longueur totale)	C cm (Périmètre thoracique)	Longueur thorax approx cm (calculée à partir de C)
Faon (0-12 mois)	NP	NP	NP
Bichette (femelle 1 an)	131,5-134,5	80,5-83,5	26-27
Daguet (mâle 1 an)	127,5-130,5	80-82	25-26
Biche (femelle > 2ans)	143,5-144,5	83-85	26-27
Méris (mâle jeune)	144-146	95-97	30-31
Grand mâle	156-170	105,5-108,5	34-35

Simplification à retenir pour information initiale

	L cm	C cm	Longueur thorax approx cm
Faon (0-12 mois)	NP	NP	NP
Daguet-Bichette (1an)	127,5-134,5	80-83,5	25-27
Biche	143,5-144,5	83-85	26-27
Mâle	145-170	95-108,5	30-35

Figure 14 : Mensurations moyennes des différentes classes de Cerf rusa (document fourni par le CEN).

Afin d'être sûr de recenser la majorité des individus une base minimale de 1m a donc été retenue par sécurité.

De ce fait, pour détecter un animal de 1m de longueur, sa signature thermique sur sa longueur doit être couverte par au moins 10 pixels, ou en d'autres termes que chaque pixel représentant l'animal de 1 m doit faire au maximum 10 cm.

Pour nous aider dans notre recherche sur cet optimum (hauteur, angle et définition pixel), nous avons établi un tableur Excel (exemple Tableau 3) avec calculs automatisés à partir des données théoriques fournis dans Burke et al 2018 sur les différentes caractéristiques/paramètres de l'empreinte au sol d'un capteur en aérien en fonction de sa hauteur et son angle.

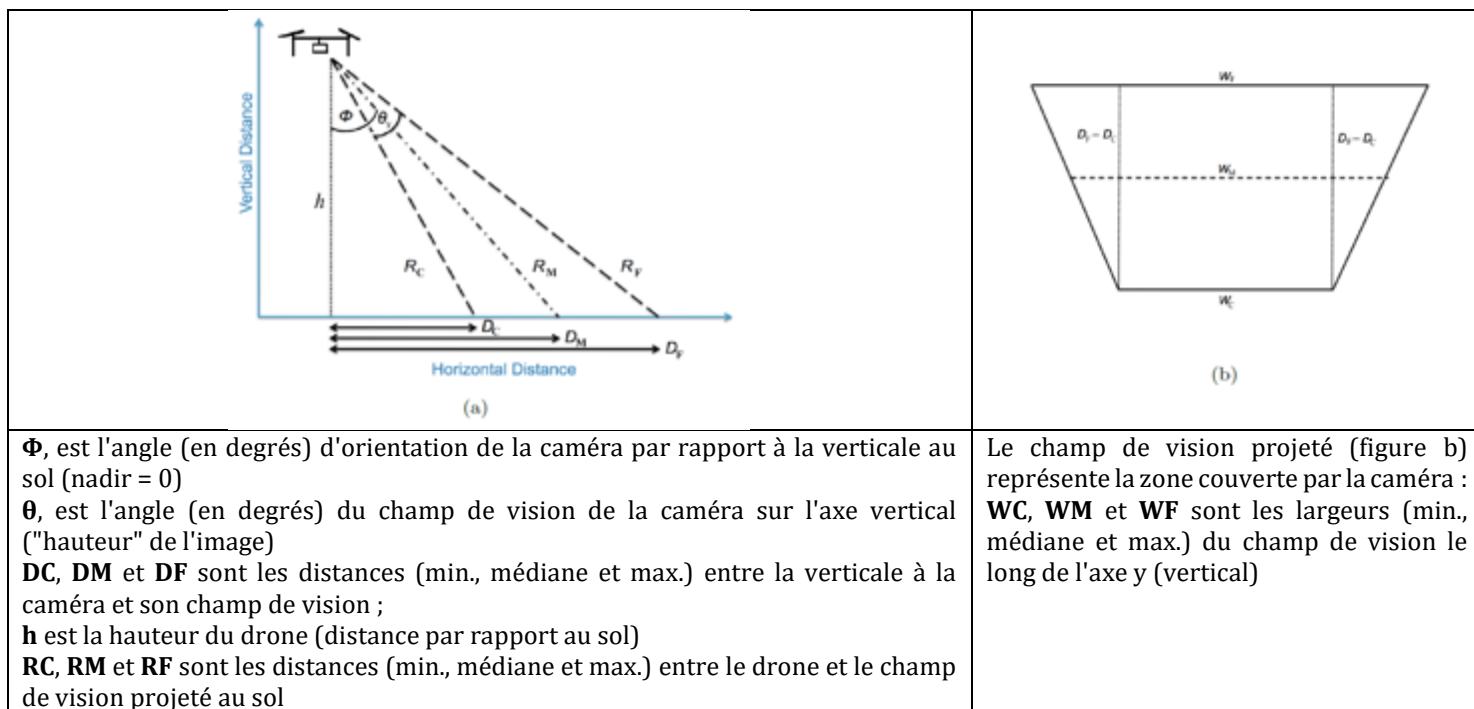


Figure 15 : (a) Schéma montrant les distances et les projections géométriques d'un capteur monté sur un drone avec la définition des différentes variables. (b) Schéma montrant le champ de vision de la caméra projeté au sol avec la définition des différentes variables. Source Burke et al 2018.

Tableau 3 : Exemple de calculs des différentes variables à partir des données fournis par Burke et al. 2018 sur les projections géométriques et distances au sol selon la hauteur de vol et l'angle de caméra de notre capteur thermique H20T.

VALEURS A MODIFIER			VALEURS FIXES		CALCULS										
Hauteur du capteur (h en mètres)	Caméra orientation (Φ en degrés)	Angle caméra selon axe horizontal (angle en degrés donné par le capteur)	Caméra angle de champ vertical (θ en degrés)	Caméra angle de champ horizontal (en degrés)	DC (en m)	DF (en m)	DM (en m)	RM (en m)	« taille » du pixel Axe horizontal (en mètres)	« taille » du pixel Axe vertical (en mètres)	« Hauteur » de l'image (en mètres)	« Largeur de l'image » (base étroite du trapèze [WC]) (en mètres)	« Largeur de l'image » (médiane du trapèze [WMI]) (en mètres)	« Largeur de l'image » (base large du trapèze [WFI]) (en mètres)	Image Surface couverte (en m²)
70	40	50	26	32	35.667	92.893	58.737	91.379	0.080	0.081	57.226	45.055	56.919	66.705	3197.824
70	30	60	26	32	21.401	65.276	40.415	80.829	0.071	0.072	43.875	41.979	48.863	54.890	2125.061
70	20	70	26	32	8.595	45.459	25.478	74.492	0.065	0.066	36.864	40.446	44.312	47.867	1627.759
70	10	80	26	32	-3.669	29.713	12.343	71.080	0.062	0.063	33.382	40.199	41.940	43.611	1398.875
70	0	90	26	32	-16.161	16.161	0.000	70.000	0.061	0.062	32.322	41.200	41.200	41.200	1331.658
80	40	50	26	32	40.762	106.164	67.128	104.433	0.091	0.093	65.402	51.491	65.050	76.235	4176.750
80	30	60	26	32	24.458	74.601	46.188	92.376	0.081	0.082	50.143	47.976	55.843	62.732	2775.590
80	20	70	26	32	9.823	51.953	29.118	85.134	0.074	0.075	42.130	46.224	50.642	54.705	2126.052
80	10	80	26	32	-4.193	33.958	14.106	81.234	0.071	0.072	38.151	45.942	47.931	49.841	1827.102
80	0	90	26	32	-18.469	18.469	0.000	80.000	0.070	0.071	36.939	47.086	47.086	47.086	1739.308
90	40	50	26	32	45.857	119.434	75.519	117.487	0.103	0.104	73.577	57.928	73.182	85.764	5286.199
90	30	60	26	32	27.516	83.926	51.962	103.923	0.091	0.092	56.411	53.973	62.824	70.573	3512.857
90	20	70	26	32	11.051	58.447	32.757	95.776	0.084	0.085	47.396	52.002	56.972	61.543	2690.785
90	10	80	26	32	-4.717	38.203	15.869	91.388	0.080	0.081	42.919	51.685	53.923	56.072	2312.426
90	0	90	26	32	-20.778	20.778	0.000	90.000	0.079	0.080	41.556	52.972	52.972	52.972	2201.312
100	40	50	26	32	50.953	132.704	83.910	130.541	0.114	0.116	81.752	64.364	81.313	95.294	6526.171
100	30	60	26	32	30.573	93.252	57.735	115.470	0.101	0.102	62.678	59.969	69.804	78.415	4336.860
100	20	70	26	32	12.278	64.941	36.397	106.418	0.093	0.094	52.662	57.780	63.303	68.381	3321.956
100	10	80	26	32	-5.241	42.447	17.633	101.543	0.089	0.090	47.688	57.428	59.914	62.302	2854.847
100	0	90	26	32	-23.087	23.087	0.000	100.000	0.087	0.089	46.174	58.858	58.858	58.858	2717.669
110	40	50	26	32	56.048	145.975	92.301	143.595	0.125	0.127	89.927	70.801	89.444	104.823	7896.667
110	30	60	26	32	33.630	102.577	63.509	127.017	0.111	0.113	68.946	65.966	76.785	86.256	5247.601
110	20	70	26	32	13.506	71.435	40.037	117.060	0.102	0.104	57.929	63.558	69.633	75.219	4019.567
110	10	80	26	32	-5.765	46.692	19.396	111.697	0.097	0.099	52.457	63.171	65.906	68.532	3454.365
110	0	90	26	32	-25.396	25.396	0.000	110.000	0.096	0.097	50.791	64.743	64.743	64.743	3288.380
120	40	50	26	32	61.143	159.245	100.692	156.649	0.137	0.139	98.102	77.237	97.576	114.352	9397.687
120	30	60	26	32	36.688	111.902	69.282	138.564	0.121	0.123	75.214	71.963	83.765	94.098	6245.078
120	20	70	26	32	14.734	77.929	43.676	127.701	0.111	0.113	63.195	69.336	75.963	82.057	4783.617
120	10	80	26	32	-6.289	50.937	21.159	121.851	0.106	0.108	57.226	68.913	71.897	74.762	4110.979
120	0	90	26	32	-27.704	27.704	0.000	120.000	0.105	0.106	55.408	70.629	70.629	70.629	3913.444

Remarques sur le tableau :

- Les angles de vue (horizontal et vertical) de la caméra sont fixes et dépendent des spécifications techniques du capteur. Pour le capteur H20T en thermique les valeurs sont de 32° et 26° (angle de vision horizontal et vertical)
- Les hauteurs sont définies avec un pas de 10 m, une définition plus fine multiplierait les calculs et ne serait pas forcément compatible avec les paramètres de vol. Le choix est donc de rester dans une résolution de hauteur relativement lâche pour disposer d'une certaine marge de manœuvre lors des vols.

Dans le cadre de toute étude impliquant une captation par des moyens aéroportés, comme vu précédemment dans ce rapport deux variables principales interviennent dans la détermination des paramètres de vol :

1. La surface couverte par l'acquisition,
2. Le niveau de détail (résolutions).

L'analyse de ces deux variables va permettre de dégager des métriques pour les paramètres de vol, à savoir une hauteur de vol par rapport à la cible et une orientation du capteur. Ce sont ces deux points qui vont déterminer la surface couverte et le niveau de détail lors de la captation (détection) qu'elle soit humaine ou par intelligence artificielle (algorithme).

Pour la détermination d'un indice d'abondance des cerfs, cette analyse doit prendre en considération plusieurs paramètres du type technologique, technique et biologique soit :

1. La surface totale recouverte par l'acquisition sur l'ensemble du vol (que nous verrons en phase 3, lorsque le plan d'échantillonnage globale sera définie suite à cette phase de calibration);
2. La solution retenue pour la comptabilisation automatique d'individus consiste en un algorithme de détection/reconnaissance de cerfs. Des fichiers (vidéo et métadonnées) issus de la captation constituent les données d'entrées pour l'algorithme qui va analyser ces fichiers et renvoyer un résultat à l'utilisateur. Les données d'entrée doivent être interprétable par l'algorithme, pour garantir cela les données doivent se conformer à certaines règles ;
3. L'aire de répartition des populations. Plusieurs centaines d'hectares pour le cerf rusa.

Les missions de captation devront couvrir un espace représentatif de ces aires afin que les données recueillies permettent de déterminer un indice d'abondance.

Le rayon d'action du drone et son autonomie de vol ; ces éléments doivent aussi être pris en compte afin de s'assurer qu'une mission permette de couvrir une superficie suffisante pour l'acquisition de données et sera détaillée dans la phase 3 de l'étude.

Ces différents aspects vont permettre de définir les contraintes qu'il faudra appliquer aux paramètres de vol.

Afin de simplifier le tableau et notre expertise, les meilleurs compromis entre hauteur (>70 m), angle (< - 50°), définition/nombre de pixel représentant un cerf de 1 m (>10) et la surface couverte (en m²) sont représentés sur la Figure 16 ci-après :

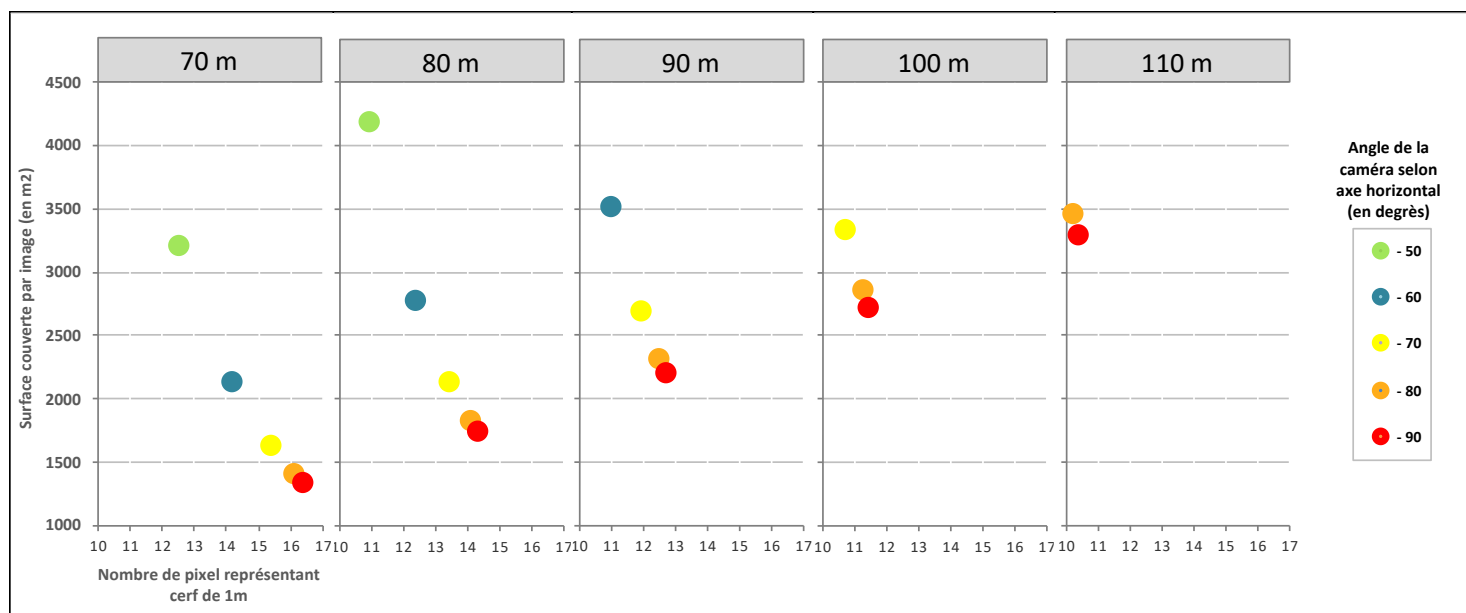


Figure 16 : Graphiques représentant, selon l'angle de caméra (de -50 à -90 °) et la hauteur du drone (70 à 110 m), le nombre de pixel structurant un cerf de 1 m de long et la superficie (en m²) couverte par l'image.

Remarque : Au-dessus de 110 m, la représentation d'un cerf de 1 m est en dessous de 10 pixels quelques soit l'angle de caméra, les graphiques pour ces hauteurs n'ont donc pas été représentés sur la figure ci-dessus.

En tenant compte de la finesse des données topographiques disponibles sur le territoire (tous les 10 m), il est important de prendre en compte un nombre de pixel suffisant sur une plage de hauteur de plus ou moins 10 m.

Au vu de l'altitude minimale retenue de 70 m, une hauteur supérieure ou égale à 80 m est à privilégier. Si on regarde la Figure 16 ci-dessus, à 80 m un angle de - 50 est en limite de détection et si la hauteur augmente de 10 m (90 m) le nombre de pixels passe en dessous de 10. Cet angle est donc à éviter dans notre cas.

En tenant compte de ces contraintes (variation de + ou - 10 m), on note que tous les autres angles de caméra (de - 60 à -90) pour une hauteur de vol de 80 m permettent d'avoir une représentation suffisante (supérieure à 10 pixels) pour un individu de 1 m. Néanmoins la surface couverte reste assez faible (inférieure à 2000 m²) pour les angles important (- 80 et - 90).

D'après notre expérience afin d'optimiser les vols drone (surface totale couverte en un vol, au regard de l'autonomie batteries), il serait intéressant que la surface couverte au sol par l'image soit au-dessus de 2000 m².

D'après les graphiques ci-dessus, une hauteur de 90 m serait à privilégier avec un angle de caméra inférieur à -60 °, soit - 70 ; - 80 ou -90 °. Contrairement à l'angle de -60°, ces 3 valeurs d'angle caméra restent dans l'optimum des pixels et de superficie à 90 m en tenant compte d'une variation de hauteur possible de +/- 10 m.

Afin de trancher sur une hauteur et un angle de caméra fixes et attester ou non la théorie, des vols en conditions réelles ont été opérés afin de valider ces paramètres de vol.

3.3.5.3 Tests pratiques sur le terrain

Plusieurs tests initiaux ont été effectués directement sur le terrain afin de valider l'optimal de hauteur de vol et d'angle de caméra pour la suite de l'étude.

Pour cela, différents vols ont été réalisés au-dessus d'un groupe de cerfs selon, à chaque fois, une contrainte de hauteur et d'angle différente. Les hauteurs testées sur le terrain se sont calquées sur les hauteurs optimales théoriques définies dans le paragraphe précédent soit : 70, 80, 90, 100 et 110 m. Des exemples de tests réalisés au cours de cette phase sont présentés sur la Planche photos 7 et la Planche photos 8 ci-dessous. Pour chaque hauteur de vol programmée au-dessus des cerfs, les angles de caméra suivant 90, 80, 70, 60 et 50 degrés ont été testés. Rappelons qu'à 90 degrés, les signatures sont vues directement du dessus, donc généralement les pattes des animaux sont invisibles (voir les figures ci-dessous). Avec des angles plus faible (50, 60 degrés), les animaux sont vus un peu de côté (sur le flanc), ainsi les pattes sont généralement visibles, ce qui peut faciliter la détection et l'identification.

Comme vu précédemment dans ce rapport, plus l'altitude de vol est élevée, plus la couverture de la zone est élevée et plus le risque de réponse des animaux au drone est faible, mais plus les détails (résolution) des images sont faibles. Un compromis doit être trouvé pour assurer une couverture de zone adéquate et des détails d'image permettant une détection facile des animaux, tout en minimisant en même temps la réponse des animaux au drone.

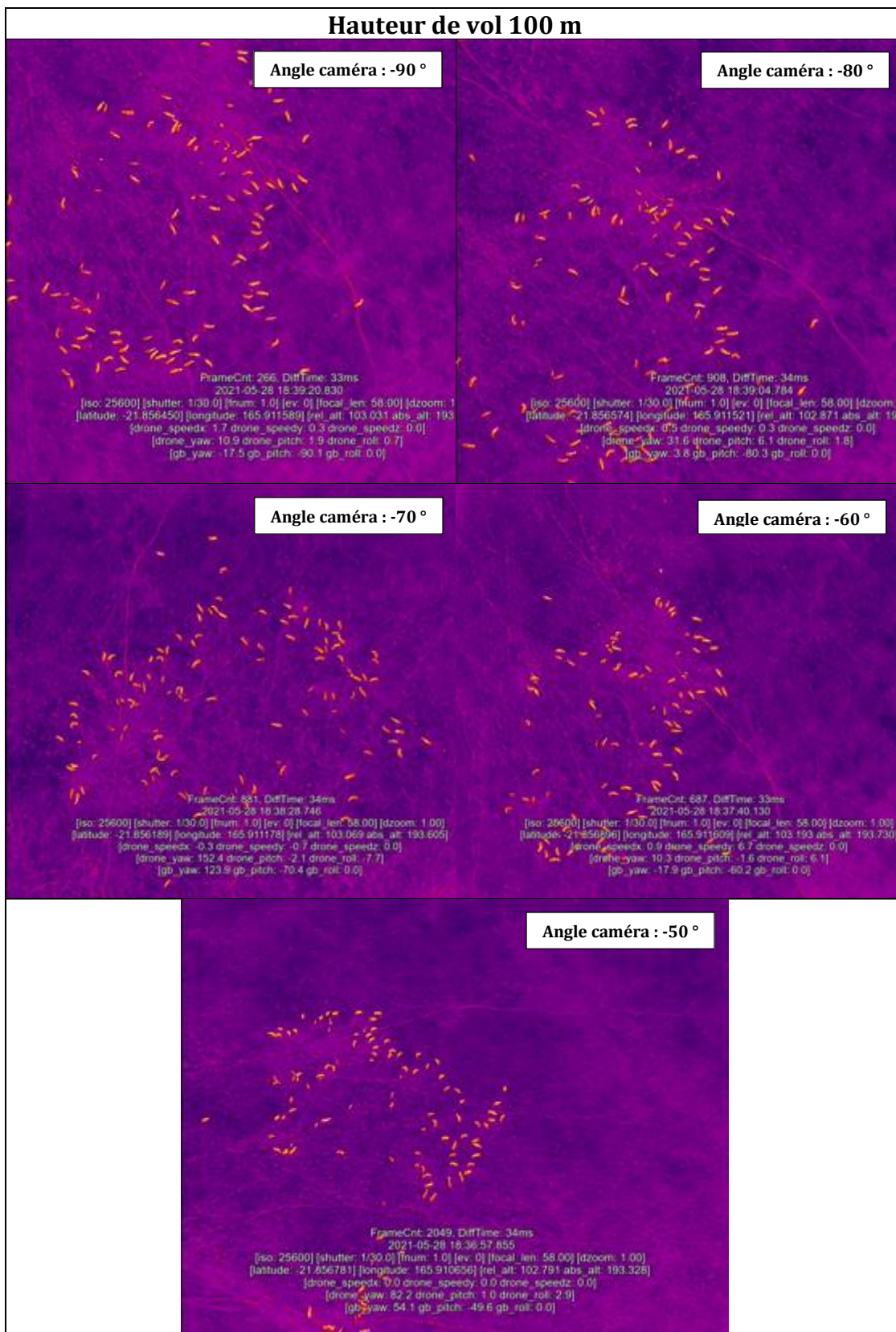


Planche photos 7 : Exemple de tests d'angle caméra réalisés à une hauteur de 100 m par drone thermique sur un groupe de cerf rusa.

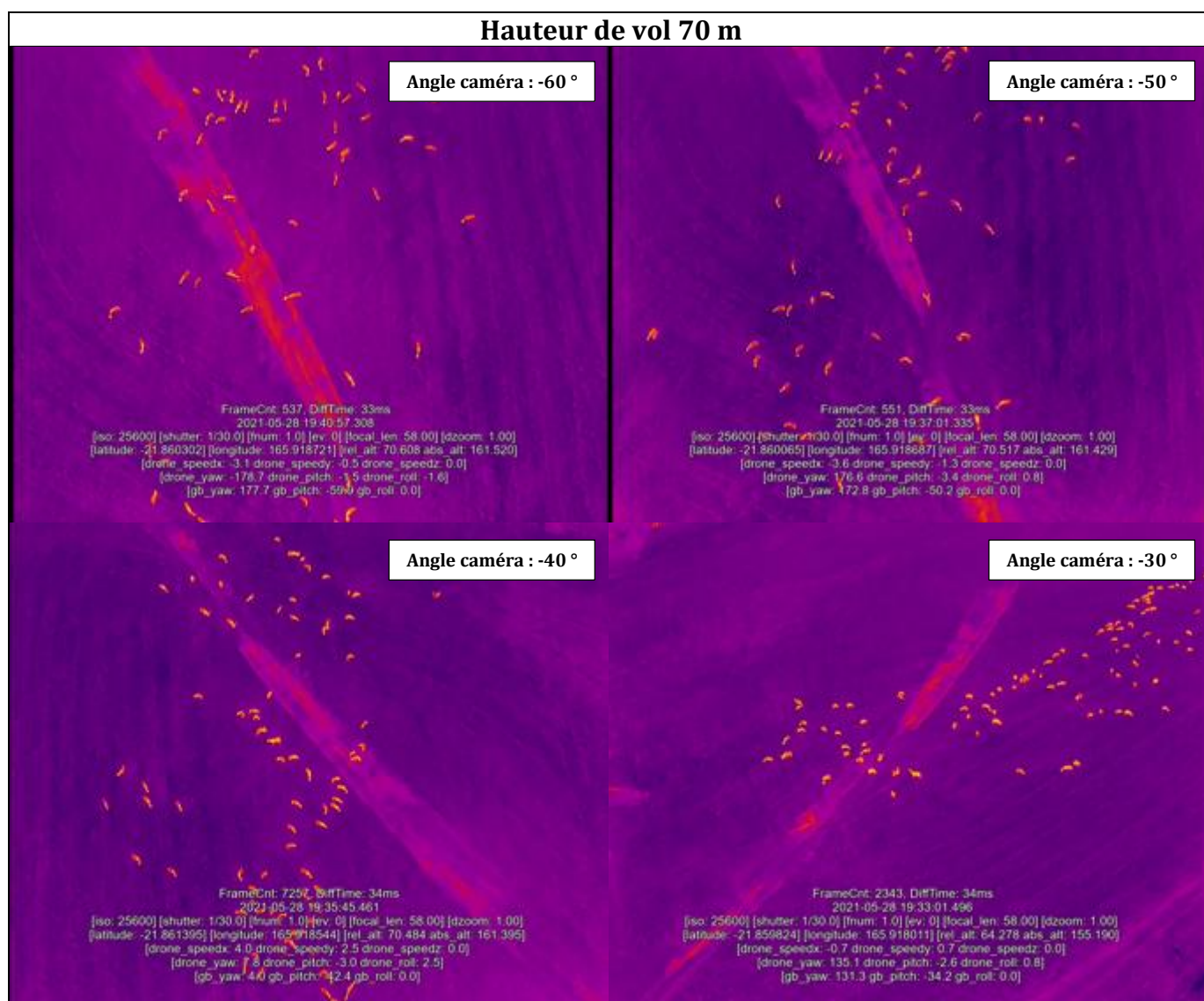


Planche photos 8 : Exemple de tests d'angle caméra réalisés à une hauteur de 70 m par drone thermique sur un groupe de cerf rusa.

3.3.5.4 Définition des paramètres de vol (angle et hauteur) à partir des données théoriques et pratiques (terrain)

Un angle caméra de -50, -60 ° et une hauteur de 70-80 m serait à privilégier en tenant compte à la fois de nos résultats théoriques et pratiques. En effet, la définition des individus (vision de flanc avec pattes prononcée) ainsi que la surface couverte sur le terrain, pour cette hauteur et cet angle caméra, reflètent les attentes théoriques (voir paragraphe 3.3.5.2) et apparaissent idéales pour une détection optimisée de l'algorithme suite aux données de terrain mais aussi pour du comptage manuel.

Il est important de prendre en compte que ces tests initiaux ont été réalisés dans des zones planes sans végétation du type herbacée ou avec végétation du type arbustive mais très éparse. D'après notre expertise, ces 2 types d'habitat rencontrés en majorité sur nos zones tests sont considérés comme idéales pour la détection du cerf.

Cependant, ils ne sont pas représentatifs de l'habitat principal du cerf rusa sur le territoire calédonien et tout particulièrement des zones prioritaires sur lesquelles l'indice est prévu d'être expérimenté en phase 3. En effet, ces zones présentent une topographie et une végétation pouvant très différer de cet habitat idéal pour la détection du cerf en drone thermique. Comme expliqué précédemment dans ce rapport (synthèse bibliographique), les signatures thermiques se dégradent très rapidement quand la végétation se densifie, jusqu'à devenir indétectables en végétation très dense du type arborée. Ceci a bien été observé lors de nos vols tests. De plus la topographie semble avoir aussi une influence non négligeable sur la détection d'après nos observations.

Cependant, afin d'attester ou non ces paramètres de vol optimums pour la détection du cerf dans différents type de végétation et de topographie et d'en voir les limites, il est important dans un premier temps que le protocole de vol en balayage de zone avec le suivi de terrain soit bien défini et calé.

Dans cet optique, une fois ce protocole opérationnel, des tests spécifiques plus poussés sont prévus en phase 3 dans diverses conditions de végétation/habitat ainsi que de topographie des zones prioritaires.

3.4 Calibration pour traitement de la donnée, compatibilité entre le format vidéo du capteur H20T et les logiciels de géomatiques/SIG

Un des points structurant pour lesquels une solution technique doit être proposée dans les domaines de la géomatique et de la télédétection est à la base la compatibilité entre une vidéo acquise par un capteur thermique sur drone (ici DJI H20T) et les logiciels de géomatiques (plateformes de géotraitement).

Comme vu précédemment dans ce rapport, l'acquisition de la donnée par vidéo géoréférencée, en complément d'outil SIG, semble la méthode la plus appropriée pour le comptage d'animaux et semble se répandre de plus en plus au sein de la communauté scientifique du fait de son utilité et ses nombreux avantages.

Suite à notre expertise, cette méthode a donc été retenue du fait de son utilité pour l'indice cependant sa mise en opération nécessite l'utilisation de plateformes de géotraitement qui prennent en charges de la vidéo géoréférencée (FMV : Full Motion Vidéo).

Pour cette étude, 2 logiciels SIG très connus ont été testés, soit :

- Un payant « Full motion vidéo (FMV) de la suite Arcpro d'ESRI » (3 600 000 cfp) et
- Un gratuit « Full motion vidéo (FMV) du logiciel libre QGIS ».

Un exemple de traitement avec ARCGIS pro FMV est présenté sur la Figure 17 ci-dessous.

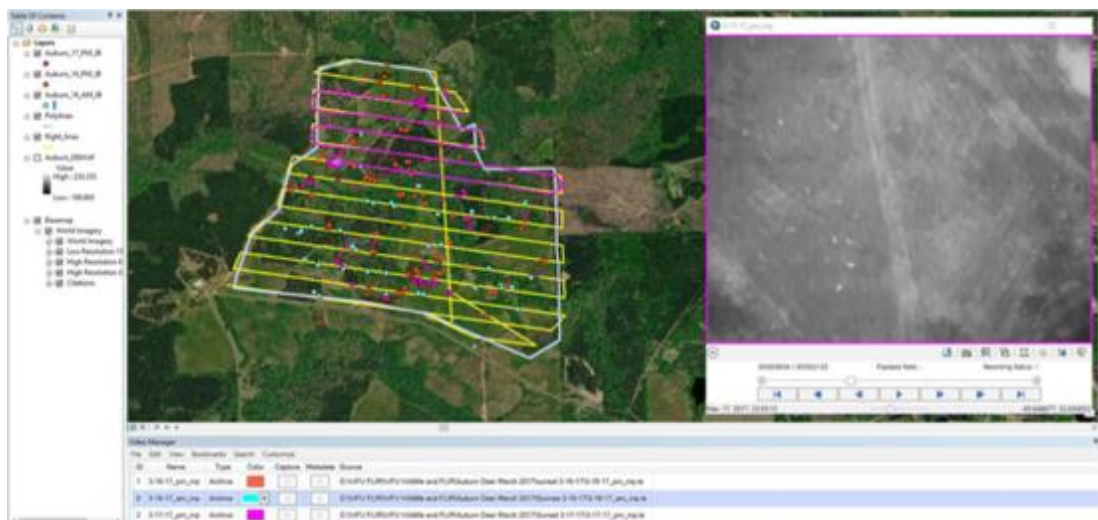


Figure 17 : Capture d'écran illustrant l'outil complémentaire Full Motion Vidéo d'ESRI utilisé pour identifier et géoréférencer les individus (ou groupes d'animaux) détectés lors de vols aériens de drones thermiques (Source Beaver et al. 2020). Les lignes jaunes indiquent la trajectoire de vol programmée de l'avion et les transects et les lignes violettes indiquent la trajectoire de vol réelle de l'avion. Les points colorés indiquent des observations marquées des cerfs de Virginie détectés.

Les données collectées lors des tests de vol opérés au cours de la phase de calibration ont permis de révéler que les formats vidéo fournis par le capteur H20T du matrice 300 RTK ne sont pas directement compatible avec les logiciels de géomatiques et qu'une phase de conversion de la donnée est nécessaire.

3.4.1 Arcpro ESRI FMV

La vidéo est prise en charge par FMV mais n'est pas géoréférencée car les métadonnées associées ne sont pas conformes au standard MISB (Motion Imagery Standards Board metadata specifications).

❖ Échantillon vidéo issu du drone DJI capteur H20T

L'échantillon² comprend une vidéo captée par le drone dans une zone située en longitude 165.918866 et latitude -21.859568 (en Nouvelle-Calédonie, au niveau de la ferme Bourguine "Lieu-dit La Cotonnière à Boulouparis").

L'échantillon se compose de deux fichiers :

- Un fichier vidéo format MP4 (H264 - MPEG-4 AVC (part 10) (avc1))
- Un fichier de métadonnées au format SRT (SubRip Text Subtitle file)

Ci-dessous la reproduction de l'un des enregistrements du fichier SRT (les numéros de lignes n'apparaissent pas dans l'enregistrement), pour chaque image de la vidéo un enregistrement est généré.

- 1
- 00:00:00,000 --> 00:00:00,033
- FrameCnt: 1, DiffTime: 33ms
- 2021-05-28 19:36:42.988
- [iso: 25600] [shutter: 1/30.0] [fnum: 1.0] [ev: 0] [focal_len: 58.00] [dzoom: 1.00]
- [latitude: -21.859568] [longitude: 165.918866] [rel_alt: 70.519 abs_alt: 161.430]
- [drone_speedx: 0.0 drone_speedy: 0.0 drone_speedz: 0.0]
- [drone_yaw: -175.2 drone_pitch: 0.2 drone_roll: -0.3]
- [gb_yaw: -179.1 gb_pitch: -50.2 gb_roll: 0.0]
- 10.

² /Video Thermique Bourguine/DJI_202105281929_011
Est/DJI_20210528193642_0002_S (70m -50°).MP4

11. 0
12. [ae_meter_md : 0] [dzoom_ratio: 10000, delta:0] [color_md : default] [ct : 5157]
13.
- 14.

Un enregistrement comporte 14 lignes (13 lignes + 1 ligne vide)

Pour utiliser toutes les fonctionnalités de ArcGis Pro FMV, le fichier vidéo doit être accompagné d'un fichier de métadonnées comportant à minima 12 champs (sur les 87 de la spécification MISB) :

- Unix Time Stamp
- Sensor Latitude
- Sensor Longitude
- Sensor Altitude
- Platform Heading
- Platform Pitch
- Platform Roll
- Sensor Relative Roll
- Sensor Relative Elevation
- Sensor Relative Azimuth
- Horizontal Field of View
- Vertical Field of View

Les informations du fichier SRT ont dû être reliées par une matrice de correspondance avec les champs nécessaires au format pris en charge par ArcGis Pro.

Tableau 4 : Champ des métadonnées ArcPro FMV et informations utilisées dans le fichier SRT donnée par le capteur pour renseigner les champs de ArcPro FMV.

Champ de métadonnées ArcPro FMV	Information utilisée dans le fichier SRT pour renseigner le champ
Unix Time Stamp(*)	Calculé à partir de l'information 'datetime' (ligne 4) au format YYYY-MM-DD hh:mm:ss.xxx
Sensor Latitude	[latitude: 46.982152]
Sensor Longitude	[longitude: 5.402512]
Sensor Altitude	[rel_alt: 17.091 abs_alt: 251.667] on utilise rel_alt
Platform Heading	[drone_yaw: -80.7]
Platform Pitch	drone_pitch: 0.0
Platform Roll	drone_roll: -4.2]
Sensor Relative Roll	gb_roll: 0.0]
Sensor Relative Elevation	gb_pitch: -41.5
Sensor Relative Azimuth	[gb_yaw: -82.1
Horizontal Field of View	HFOV Calculé à partir des spécifications du capteur(**)
Vertical Field of View	VFOV Calculé à partir des spécifications du capteur(**)

(*) Unix Time Stamp désigne le nombre de secondes écoulées depuis le 1er janvier 1970 à minuit UTC précise.
Pour le multiplexeur ESRI : "The time reference is Unix Time Stamp (seconds past 1970) multiplied by one million, which is stored as an integer."

(**) Pour le HFOV et le VFOV on obtient respectivement les valeurs 32.22 degrés et 26.02 degrés.

Cette correspondance sera réalisée automatiquement par un script en langage Python selon les modalités suivantes :

1. En entrée : le fichier SRT,
2. En sortie : un fichier de métadonnées conforme au standard MISB au format CSV.

Le script génère très rapidement (de l'ordre de moins d'une seconde) un fichier de métadonnées conforme au standard MISB en traitant les 5890 enregistrements. Dans l'environnement ESRI, on utilise l'outil Video Multiplexer (Image Analyst) pour créer un fichier vidéo qui va synchroniser et associer le fichier vidéo d'origine et le fichier de métadonnées conforme généré par le script. C'est ce fichier vidéo créé par Vidéo Multiplexer qui sera utilisé dans ArcPro FMV.

[Remarque : dans Vidéo Multiplexer on peut ajouter un paramètre 'elevation layer' pour améliorer la précision des calculs [coordonnées des coins de la vidéo]

Dans le but que la méthode soit la plus simple possible, la plus accessible et donc à un coût le plus faible possible, une autre plateforme SIG que ArcGis pro, très coûteuse, a été testée.

Nous nous sommes donc intéressés à QGIS qui est une plateforme de SIG opensource et donc gratuite.

3.4.2 QGIS FMV

3.4.2.1 Compatibilité vidéo H20T et QGIS FMV

L'installation de QGIS et de son extension FMV (Full Motion Video) pour tester la prise en charge des fichiers de l'échantillon issus du capteur H20T n'a pas posé de difficultés majeures (Néanmoins il est à noter qu'il faut gérer les nombreuses dépendances entre les modules Python nécessaires et les librairies logicielles).

Remarque : l'extension QGIS-FMV a été développée uniquement pour les données DJI de la plateforme DJI Mavic Pro qu'il a fallu adapter.

L'extension FMV de QGIS propose de recréer une vidéo compatible avec le standard MISB ('Motion Imagery Standard Board') à partir de deux intrants :

- Un fichier vidéo non conforme au standard MISB
- Un fichier de métadonnées au format CSV ('Comma Separated Value')

Ce fichier CSV doit comprendre 284 champs renseignés ce pour chacun des enregistrements, sachant que l'échantillon H20T comporte 5980 enregistrements il faut renseigner 1 672 730 champs.

Le problème est de renseigner les 284 champs du CSV à partir des informations du fichier SRT créé par le capteur H20T.

Pour apporter une solution un script a été développé en langage Python, il permet de créer un fichier de métadonnées au format CSV conforme à l'attendu QGIS-FMV. Tout comme le script destiné à ArcPro, il prend pour paramètres :

3. En entrée : le fichier SRT
4. En sortie : un fichier de métadonnées conforme au standard MISB au format CSV

Ce script génère très rapidement un fichier de métadonnées conforme au standard MISB et utilisable dans l'environnement QGIS-FMV.

L'étape suivante a été l'évaluation des performances en positionnement des objets perçus par le capteur H20T lorsque les vidéos sont chargées dans QGIS-FMV.

3.4.2.2 Les tests de positionnement

Les données d'entrée consistent en une vidéo d'objets (cibles au sol) dont la position est précisément connue. Dans le détail les données se composent :

- D'un fichier vidéo format MP4 (H264 - MPEG-4 AVC (part 10) (avc1)
- Et d'un fichier de métadonnées au format SRT (SubRip Text Subtitle file) comportant les informations de journal (log) sur les paramètres de vol du drone et du capteur.

La localisation des cibles (coordonnées GPS) :

- Cible 1 :
 - Latitude : 43.612766404
 - Longitude : 7.049176054
- Cible 2 :
 - Latitude : 43.612640820
 - Longitude : 7.048957018

❖ Méthode

On utilise un script Python pour extraire les informations du fichier de métadonnées (SRT) et automatiquement générer un fichier au format CSV. Ce fichier CSV est indispensable pour utiliser QGIS-FMV.

Dans l'environnement QGIS-FMV on va créer une vidéo qui sera conforme au standard MISB.

C'est cette vidéo qui sera géoréférencée lorsque chargée dans QGIS-FMV.

❖ Le déroulé

Une fois la vidéo chargée sous QGIS-FMV on peut noter :

- La position du drone est correctement affichée ;
- La position de l'image au sol n'est pas toujours correctement affichée (parfois l'image est incorrectement calée, on le remarque notamment lorsque la trace de l'image au lieu de former un trapèze forme une espèce de sablier Σ) ;
- Les mesures de distances prises ne semblent pas aberrantes à la condition de les relever lorsque la position de l'image au sol est correctement calée.

En relevant les coordonnées des deux cibles dans QGIS-FMV on va remarquer que les coordonnées données par QGIS-FMV sont moins "précises".

- La localisation des cibles est connue avec une précision de 9 chiffres après la virgule.

- La localisation des cibles relevées dans QGIS-FMV se fait à 5 chiffres après la virgule (c'est inhérent à l'extension FMV qui ne relève que 5 chiffres après la virgule).

Ci-dessous, les résultats des mesures de positionnement.

Tableau 5 : Mesures et vérification des positions entre la valeur GPS et la valeur de positionnement donnée par QGIS-FMV.

		Valeurs GPS	Valeurs QGIS-FMV	Différence de position
CIBLE 1	Latitude	43.612766404	43.61281	-4.85m
	Longitude	7.049176054	7.04914	4.01m
CIBLE 2	Latitude	43.612640820	43.61265	-1.02m
	Longitude	7.048957018	7.04892	4.11m

Ce biais peut provenir de plusieurs paramètres :

- Les traitements sont réalisés sans avoir un modèle numérique de terrain très résolu ;
- Ce type de biais est courant lorsque l'on compare des positions émanant de capteurs n'ayant pas la même résolution spatiale.

L'extension FMV pour QGIS est relativement imprécise pour le relevé de coordonnées (seulement 5 chiffres après la virgule dans un référentiel GPS c'est relativement relâché). Le mécanisme de calcul n'a pas été analysé (s'il s'agit d'un arrondi, l'extension surévalue peut-être l'erreur de positionnement).

Globalement on peut estimer qu'en termes de positionnement strict QGIS-FMV a au mieux une performance en planimétrie de l'ordre de +/-5 m.

Du fait de notre expertise et l'utilité que nous allons en faire, cette différence de planimétrie de +/-5 m ne pose pas de problème dans l'utilisation de QGIS-FMV dans cette étude.

En conclusion, suite aux tests très concluant effectués sous QGIS, la solution ESRI a été abandonnée au profit de QGIS (opensource).

3.4.3 Format et contenu des métadonnées (fichier SRT) du capteur H20T

Il y a des différences entre les fichiers de métadonnées SRT (SubRip Text Subtitle file) pour les vidéos "échantillon" et "cibles" (elles sont indiquées en gras et rouge) :

- Dans le nommage des fichiers :
 - Échantillon DJI_20200929082421_0001_**T**.SRT
 - Cibles DJI_20210216175304_0001_**S**.SRT
- Au niveau des informations implémentées (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 6 : Différences (en rouge) entre les fichiers de métadonnées SRT pour les vidéos échantillons et cibles générées par le capteur thermique H20T.

Fichier SRT de l'échantillon DJI_20200929082421_0001_ T .SRT	Fichier SRT "cibles" DJI_20210216175304_0001_ S .SRT
<pre>1 00:00:00,000 --> 00:00:00,033 FrameCnt: 1, DiffTime: 33ms 2020-09-29 08:24:21.971 [fnum: 1.0] [focal_len: 58.00] [dzoom: 1.00] [latitude: 46.982152] [longitude: 5.402512] [rel_alt: 17.091 abs_alt: 251.667] [drone_speedx: 0.0 drone_speedy: 0.0 drone_speedz: 0.0] [drone_yaw: -80.7 drone_pitch: 0.0 drone_roll: -4.2] [gb_yaw: -82.1 gb_pitch: -41.5 gb_roll: 0.0] 0 [dzoom_ratio: 10000, delta:0] [color_md : default] </pre>	<pre>1 00:00:00,000 --> 00:00:00,033 FrameCnt: 1, DiffTime: 33ms 2021-02-16 17:53:04.956 [iso: 100] [shutter: 1/30.0] [fnum: 1.0] [ev: 0] [focal_len: 58.00] [dzoom: 1.00] [latitude: 43.612839] [longitude: 7.049080] [rel_alt: 7.791 abs_alt: 196.066] [drone_speedx: 0.0 drone_speedy: 0.0 drone_speedz: 0.0] [drone_yaw: 136.8 drone_pitch: 0.3 drone_roll: 0.0] [gb_yaw: 138.9 gb_pitch: -37.2 gb_roll: 0.0] 0 [ae_meter_md : 0] [dzoom_ratio: 10000, delta:0] [color_md : default] [ct : 5457] </pre>

Le fichier SRT avec un peu moins d'information est nommé avec un suffixe **_T** alors que celui un peu plus riche en information a pour suffixe **_S**.
Ce dernier sera celui utilisé pour QGIS FMV en correspondance avec la vidéo associée.

3.4.4 Résultat du traitement de l'acquisition vidéo géoréférencée par QGIS FMV

Les captures d'écran ci-après montrent le résultat de l'acquisition avec le capteur thermique H20T sur QGIS FMV grâce à la mise en conformité des métadonnées (fichier .SRT) que nous avons pu réaliser par la création d'un algorithme simplifié de conversion de ces données.

A partir de cela, l'algorithme de comptage automatisé va pouvoir être créée et testé avec une phase d'apprentissage indispensable pour la mise en œuvre de l'indice aérien d'abondance par drone thermique. Lorsqu'il sera opérationnel et validé, il pourra alors comptabiliser le nombre de cerfs par superficie couverte totale. Cette étape de l'étude est traitée en phase 3.

Avec cette extension FMV de QGIS, la vidéo en mouvement (Figure 18, fenêtre de droite) permet en temps réel d'observer les séquences de vol et l'emplacement du drone le long de la trajectoire de vol (Figure 18, fenêtre de gauche) tout en visualisant la vidéo.

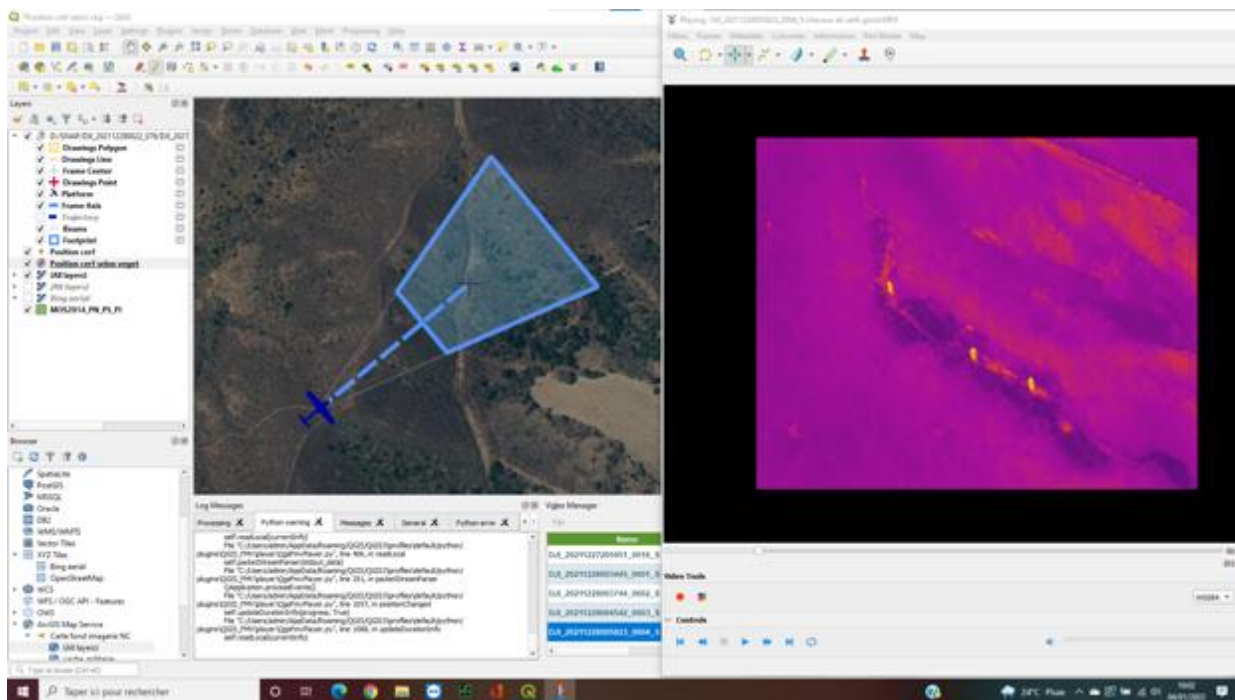


Figure 18 : Capture d'écran illustrant l'outil complémentaire Full Motion Vidéo de QGIS adapté avec nos données drones acquises directement sur le terrain dans le but d'identifier et géoréférencer les individus (ou groupes d'animaux) détectés lors de nos vols en drones thermiques. La fenêtre de droite représente l'extension FMV. La vidéo du drone est visionnée à ce niveau. Des animaux (3 individus) sont bien identifiables sur cette dernière. La fenêtre de gauche permet d'indiquer la trajectoire de vol réelle de l'avion et voir les transects réalisés en même temps que le visionnage de la vidéo. Le polygone bleu représente l'empreinte au sol de la vidéo.

Sur la fenêtre de la vidéo générée par FMV, un pointeur pour dénombrer les individus est disponible et lorsque qu'un clic est effectué sur un individu identifié, ce dernier est matérialisé par un point numéroté et géoréférencé directement sur la vidéo et sur une couche SIG spécifique indépendante (Figure 19). Ce marquage des emplacements de chaque individu identifié permet de cartographier et de comptabiliser les individus et peut servir aussi à des fins de comparaison entre des observateurs (comptage manuel) ou observateurs/algorithmes de comptage automatique.

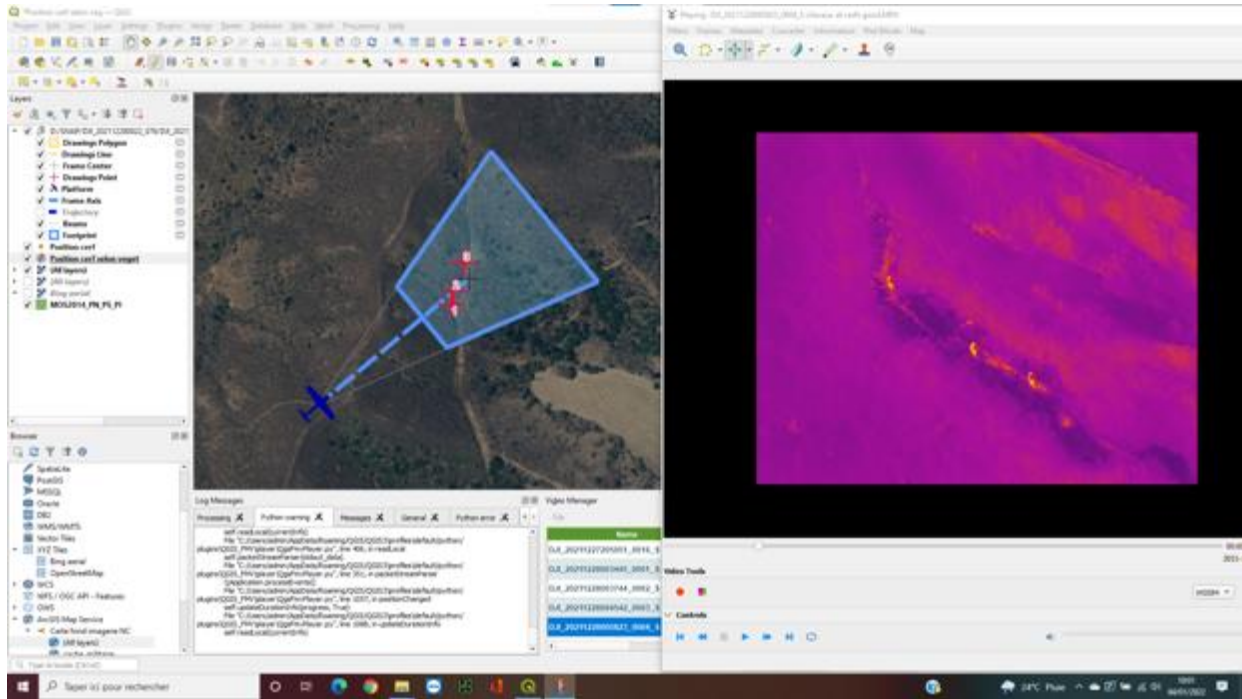


Figure 19 : Capture d'écran illustrant l'outil complémentaire Full Motion Vidéo de QGIS avec un exemple de pointage des animaux identifiés sur la vidéo dans l'extension FMV (fenêtre de droite). Les individus pointés sont matérialisés par un point numéroté sur la vidéo et sont en même temps directement géoréférencés et numérotés dans la fenêtre de gauche de la plateforme SIG (croix rouges).

L'utilisation de cette plateforme est aussi très intéressante car de nombreuses couches sous-jacentes (couche d'occupation du sol avec les types de végétation, images satellites et autres) peuvent être ajoutées et permettre d'apporter de nombreuses informations en live et/ou en post-traitement.

4 Mise en place du protocole d'échantillonnage et de l'indice aérien d'abondance (Phase 3)

D'après la phase précédente de calibration, les contraintes de vol suivantes ont été identifiées soit :

- Une hauteur de vol entre 70 et 110 m
- Un angle caméra de - 50 à - 90°
- Un plan de vol en quadra et ou blocs selon la topologie du milieu
- Un suivi de terrain obligatoire.

Néanmoins, un angle caméra de -50, -60 ° et une hauteur de 70-80 m est apparue dans les zones tests comme l'idéale.

Rappelons que les zones de ces tests ont été choisies du fait de leur conditions idéales pour réaliser et optimiser tous les scénarios nécessaires à la calibration (concentration de cerfs, peu de dénivelé et peu dense en végétation, accès faciles, etc.).

Cependant, elles sont très différentes des zones prioritaires de l'étude (fort dénivelé, accès difficiles, ...). Ces dernières peuvent engendrer des contraintes supplémentaires et donc certains réajustements possibles de certains paramètres.

Cette phase 3 va permettre :

- D'affiner, conforter et/ou réajuster les valeurs des paramètres, retenues en phase 2, dans les conditions de terrain rencontrées en zones prioritaires,
- De mettre en place un protocole d'échantillonnage bien précis en tenant compte d'autres paramètres bien définis et essentiels pour l'élaboration d'un indice d'abondance cerf le plus pertinent possible et adapté aux zones cibles.

Pour cette phase, deux scientifiques, spécialistes dans le suivi des cervidés en Pologne par drone thermique, Stan Pagacz et Julia Witczuk, du Musée et Institut de Zoologie de l'Académie Polonaise des Sciences, ont été sollicités tout spécialement pour cette étape afin d'apporter leur expertise et leur expérience terrain sur la méthodologie que notre bureau d'étude est en train de mettre en place.

Leur venue (du 4 septembre au 17 octobre 2021) a été programmée en Nouvelle Calédonie afin de participer à la phase terrain de cette partie de l'étude. En effet, celle-ci a permis de se rendre compte des contraintes terrains que nous pouvons rencontrer en NC contrairement à leurs études de ce type dans d'autre pays (densité de cerf moindre, climat plus froids, espèces plus grandes, topographie, végétation, bien différents engendrant une adaptation des méthodes voire la création de nouvelles) et ainsi apporter leur aide et expertise dans la robustesse des conclusions de l'étude.

A titre d'information :

Les principaux intérêts de recherche des deux scientifiques polonais sont de développer des outils efficaces de monitoring pour la faune sauvage qui peuvent être utilisés dans la gestion appliquée ainsi que les sciences (Gliwicz et al. 2005 ; Gliwicz et al. 2006 ; Witczuk et al. 2008 ; Pagacz et Witczuk 2010 ; Witczuk et al. 2013 ; Witczuk et al. 2015 ; Pagacz et Witczuk 2016 ; Witczuk et al. 2018 ; Witczuk et Pagacz 2020). Ceci a abouti à

l'exploration de l'utilisation des drones et la technologie infrarouge (thermique) comme outil pour la surveillance (monitoring) de la faune sauvage. En dehors de leurs expériences de la surveillance de la faune sauvage à l'aide de drones, alors qu'ils étaient employés par l'Université du Montana (États-Unis), ils ont conçu un projet à grande échelle et à long terme d'un programme de surveillance de la Marmotte Olympique en déclin dans toute son aire de répartition (mis en œuvre dans l'État de Washington). En Pologne, les deux chercheurs ont réalisé des projets testant des méthodes de surveillance non invasives pour la Loutre.

Les résultats de l'ensemble de leurs travaux sont publiés.

4.1 Optimisation/création des plans de vol automatisés d'une mission type et tests en réalité terrain

Afin d'avoir une stratégie d'échantillonnage bien définie et reproductible, il est impératif pour la réussite de cette étude de mettre en place des plans de vol automatisé avec des paramètres bien définis afin de couvrir un maximum de surface en un seul vol (optimiser l'autonomie de la batterie) en respectant une hauteur de vol et angle caméra constant tout en évitant un double comptage des individus (chevauchement des empreintes au sol).

Étant donné les contraintes de terrain connu sur les zones prioritaires, le pilotage en mode manuel est trop risqué et ne peut en aucun cas donner de bons résultats du fait qu'il est impossible de suivre le terrain manuellement à hauteur constante lorsqu'il y a du dénivelé et de maintenir en vol des lignes bien parallèles pour recouvrir une zone bien définie.

De ce fait, un protocole de vol totalement automatisé avec des paramètres bien déterminés a été mis en place et testé lors de différentes missions dans les conditions pouvant être rencontrés en zones prioritaires.

4.1.1 Période d'échantillonnage

La période d'échantillonnage s'est déroulé, en plusieurs campagnes, du 16 septembre 2021 au 19 janvier 2022 (voir le calendrier des missions en annexe 3 paragraphe 6.3).

Comme il a été vu dans la partie 3.3.4.2, la période optimale en NC pour la détection des cervidés à l'aide d'un drone équipé d'une caméra thermique a été évalué entre le mois de juillet et novembre.

Les missions de vol ont débuté au milieu de cette période. Elles se sont étendues durant la période chaude et humide (Janvier) moins optimale du fait de la saisonnalité du cerf rusa et des conditions climatiques durant cette période (dépressions fortes et nombreuses pouvant engendrer des contraintes logistiques, fortes températures pouvant entraîner des biais dans la détection par caméra thermique).

La prolongation de cette phase jusqu'en janvier s'explique du fait de la crise sanitaire mondiale, liée au Covid 19. Cette crise a engendré de nombreuses contraintes pour la venue des scientifiques (billets d'avion annulé et décalé, vaccination, quatorzaine obligatoire, ...). Leur venue a pu être reportée seulement au mois de septembre (du 4 septembre au 17 octobre).

De plus, un confinement strict en Nouvelle Calédonie, ayant eut lieu début septembre, a engendré des changements dans cette phase de l'étude (voir

paragraphe suivant 4.1.2) qui au départ devait se dérouler sur les zones prioritaires du commanditaire. Malgré ces contraintes, une partie d'une zone prioritaire (Zone prioritaire du Massif Montagneux du Sud, Thio) a pu néanmoins être testée, au mois de janvier (période chaude et humide).

4.1.2 Zones d'étude

Le projet du commanditaire se déroule sur trois zones prioritaires isolées, difficiles d'accès, en forêt humides et à fort enjeux environnementaux tels que la régénération forestière et ressource en eau. Ces trois zones prioritaires définies grâce à une analyse multicritères sont le Massif du Panié, Néaoua Mé-Adép et le Massif Montagneux du Sud (Thio). Comme indiqué dans le paragraphe précédent, du fait de l'arrivée tardive des scientifiques ainsi que des contraintes sanitaires lors de leur présence sur le territoire, il a été décidé avec le commanditaire de modifier les missions prévues.

Les zones d'étude qui ont pu être réalisées sont (Figure 20):

- La ferme de chasse la Cotonnière : zone plane essentiellement avec quelques parties à dénivelé assez important, végétation à dominance herbacée (ouverte) et arbustive (semi-ouverte), 220 ha de cette zone ont été prospectés par drone;
- Le domaine de Déva : zones assez variables selon les secteurs du domaine constituée à la fois de zones planes ouvertes du type herbacées, semi-ouvertes (arbustives) mais aussi arborées (Marée Fournier par exemple) mais aussi de zones non négligeables à dénivelés importants du type herbacées et arborée, 877 ha de cette zone ont été prospectés par drone;
- Le parc des Grandes Fougères : zone avec d'importants dénivelés et essentiellement constitué d'une végétation arborée très dense, 349 ha de cette zone ont été prospectés par drone.

Du fait de la crise sanitaire, des autorisations spécifiques des propriétaires/gestionnaires ont été nécessaires pour chaque zone (autorisation et justification des déplacements) et des protocoles sanitaires stricts ont dû être mis en place et respectés à la lettre afin de pouvoir travailler.



Figure 20 : Zones prospectées pendant le confinement pour la mise en place du protocole d'échantillonnage pendant le séjour des scientifiques Polonais (Stanislaw Pagacz et Julia Witczuk) pour la phase 3 de l'étude.

Après le départ des scientifiques et la levée du confinement strict, une propriété du côté de Nassandou (propriété ETS Cheval, décembre 2021) et une partie d'une des zones prioritaires (Thio, zone de Koua, janvier 2022) ont pu être prospectées (Figure 21).

Ces 2 zones sont essentiellement dominées par de la végétation arbustive et arborée avec néanmoins quelques parties herbacées en proportion non négligeables. Les dénivelés sont importants sur ces zones et tout particulièrement sur Koua. 1080 ha et 934 ha ont respectivement été prospectés par drone.



Figure 21 : Zones prospectées après le confinement pour la mise en place et validation du protocole d'échantillonnage lors de la phase 3 de l'étude.

4.1.3 Phase de prospection

En amont des vols drone, des prospections ont été réalisées, en journée, durant la phase de terrain afin :

- D'étudier les risques air et sol des différentes zones, soit :
 - étude aéronautique : points hauts (antennes de communication, lignes électriques, montagne, hauteur des arbres, ...) zone contrôlées du type helistation ou aéroport, ... ;
 - étude environnement (désagrement à la faune présente comme les nids de chauves-souris, zones tabou, ...)
- De repérer l'accessibilité du site,
- De localiser les zones potentielles de décollage pour le drone (zone plane de 3m X 3m minimum),
- De prévoir l'organisation logistique (recharge des batteries du drone, nécessité de plusieurs véhicules 4x4, zone de campement, etc...),
- D'analyser la topographie du site pour la sécurité des vols (vue directe sur le drone « obligation réglementaire » ainsi que le maintien de la communication avec ce dernier durant les missions de vols).

4.1.4 Démarches réglementaires

Comme pour la phase 2 (Paragraphe 3.3.2), plusieurs démarches réglementaires ont dû être réalisées afin d'être autorisé à voler sur les différentes zones prospectées lors de cette phase 3 et être en accord avec la réglementation aérienne drone en vigueur sur le territoire. Elles ont été les suivantes:

- Dérogation de vol de nuit,

- Dérogation de la hauteur de vol (120 m sol en vol et 250 m sol en cas de return to home=RTH),
- Dérogation de la distance de vol horizontale (1800 m entre le télépilote et le drone),
- Procédure risque AIR avec les aérodrômes concernés et informations aéronautiques mises en place (NOTAM : Notice To AirMen),
- Procédure risque sol (Domaine de Déva, Parc des Grandes Fougères),
- Autorisations provinciales (Domaine de Déva, Parc des Grandes Fougères) ou coutumières (Koua).

Pour les zones pouvant accueillir du public (Domaine de Déva, ou Parc des Grandes Fougères) une procédure pour éviter le risque au sol a dû être rédigée et validée par les autorités de l'aviation civile. Néanmoins le confinement a fait accélérer et faciliter les choses car ces structures étaient au final dans l'interdiction d'accueillir du public durant cette période. Une coordination juste avec de potentiels prestataires (prestataires d'entretien des pistes,...) a du néanmoins être mise en place. Les autorisations de travail ont pu être obtenues assez rapidement (en 4 à 5 jours).

4.1.5 Edition/paramétrage des plans de vol automatisés et tests sur le terrain

Pour cette étape, des logiciels (applications) classiques d'édition et de paramétrage de plan de vol autonome ont été utilisés. Ce type d'applications est disponible directement avec le drone (DJI Go Enterprise pour le Matrice 300 RTK) ou en vente libre (autres développeurs indépendants comme « Litchi »).

4.1.5.1 Balayage/scan de zone

Afin de couvrir un maximum de sections en vol et donc de maximiser la détection des cerfs sur la zone, le paramétrage d'un plan de vol automatisé en mode balayage de zone et avec une hauteur constante/optimale (suivi de terrain) est capital. Pour rappel, le suivi de terrain permet d'avoir un recouvrement de l'empreinte au sol du capteur thermique constant/similaire tout au long du survol de la mission tout particulièrement lorsque les dénivelés de la zone d'étude deviennent importants. A partir de l'application d'édition de mission drone, des plans de vol en balayage de zone ont donc été configurés (Figure 22 et Figure 23) avec les paramètres de hauteur et d'angle caméra optimum retenu dans la phase de calibration (respectivement 70-80 m et -50 -60 °) dans un premier temps, tout en tenant compte de la topographie de la zone (suivi de terrain). Les applications classiques d'édition de mission drone proposent pour la plupart cette fonctionnalité de suivi de terrain. Elle se base sur un modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'intérêt qu'il faut intégrer et paramétrer dans l'application.

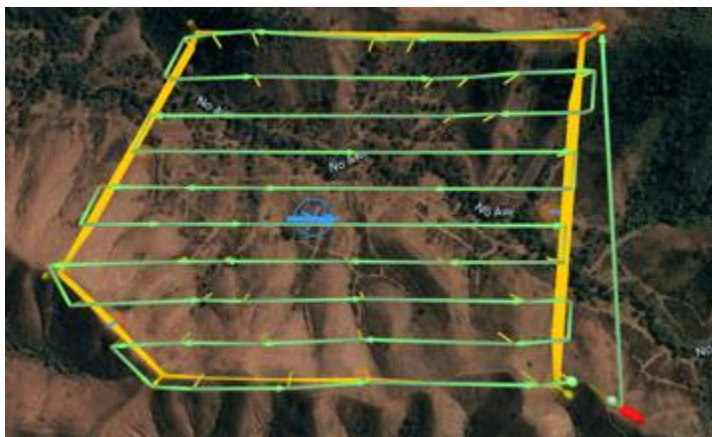


Figure 22 : Exemple d'un plan de vol réalisé sur le Domaine de Déva en mode balayage de zone et suivi de terrain.

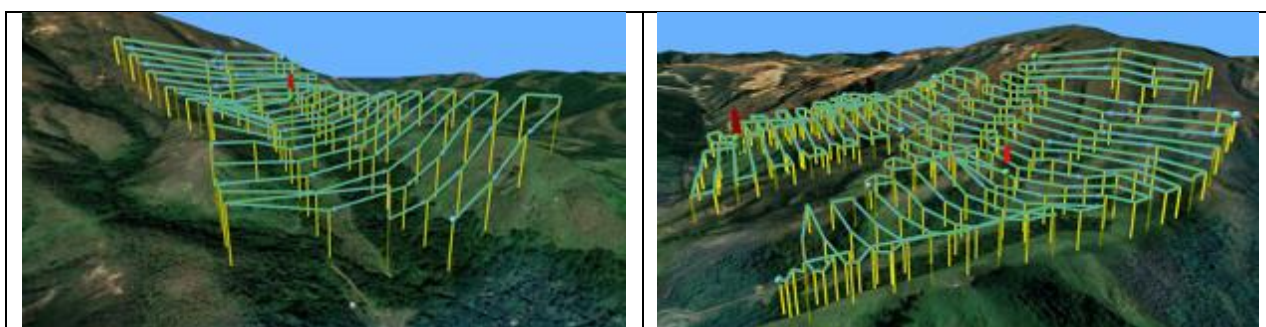


Figure 23 : Exemple d'un plan de vol réalisé sur Koua en mode balayage de zone et suivi de terrain.

La délimitation (périmètre) de chaque mission a tenu compte des limitations terrain (zone de décollage, topographie, ligne de crête, risque sol, etc...), matérielles (autonomie du drone) et réglementaires (dérogations).

Il est important de noter que le périmètre de chaque plan de vol a été défini selon l'autonomie d'un vol (avec un seul jeu de batterie). Ce périmètre va varier selon la distance du plan de vol par rapport à la zone de décollage, mais aussi par rapport à la topographie de la zone à étudier.

De ce fait chaque plan de vol ont une surface qui lui est propre dans le but d'optimiser au mieux la surface pouvant être survolée par le drone.

4.1.5.2 *Espacement des lignes et vitesse de vol pour le balayage de zone*

❖ Espacement des lignes (transects)

Lors de la mise en place de ce protocole d'acquisition de la donnée, il a fallu tenir compte de l'espacement entre chaque ligne (transect). Ce dernier a été paramétré afin qu'il n'y ait pas de recouvrement des emprises au sol et donc un risque de double comptage des individus détectés.

Pour cela, des calculs théoriques de l'espacement des empreintes au sol entre 2 transects voisins ont été réalisés en fonction de la hauteur de vol, l'angle de la caméra et tout en tenant compte d'une marge de sécurité de 15-20 m entre chaque bordure d'empreinte. Cette marge de sécurité a été défini arbitrairement afin d'éviter le risque de double comptage lié à des déplacements légers d'individu en bordure d'acquisition de l'image.

D'après le Tableau 3 du paragraphe 3.3.5.2, la largeur de l'image dans les conditions optimales théoriques définies en phase 2 (hauteur de 70 m avec un

angle de -50°) est de 67 m à la base du trapèze et de 57 m à la médiane, soit en moyenne 62 m. En tenant compte de la marge de sécurité de 15-20 m, un espacement de 80 m des lignées de vol est approprié.

Des exemples de mission programmée pour l'étude avec un espacement de 80 m entre les lignées en mode suivi de terrain sont présentées sur la Figure 24 ci-après.



Figure 24 : Exemple d'un plan de vol réalisé sur le Domaine de Déva en mode balayage de zone et suivi de terrain avec un espacement des lignées de 80 m

❖ Vitesse de vol

Concernant la vitesse de vol, un optimum a dû être défini selon la qualité de la vidéo. En effet, plus le drone va vite, plus il balaye de superficie de la zone en un seul vol, mais plus un flou léger se fait ressentir sur les vidéos et peuvent compromettre la détection manuelle ou semi-automatisé lors du post-traitement (comptage des individus).

Suite à quelques tests avec notre protocole d'acquisition en mode balayage de zone et suivi de terrain, une vitesse de vol entre 8 et 10 m/s (29 – 36 km/h) est apparue comme optimale.

4.1.6 Présentation des différentes missions

Suite à la prospection, à l'étude topographie du site (forts dénivelés sur une grande majorité de la zone), aux contraintes réglementaires de l'espace aérien sur site (zone sous influence des aéroports du territoire) ainsi que des contraintes machines (batteries, perte de communication, etc...), plusieurs missions de vol ont été programmées dans les limites des zones d'étude (propriétés et parcs provinciaux).

Un total de 52 plans de vol a été opéré au cours de cette phase de l'étude, soit :

- 3 à la ferme de chasse la Cotonnière (Mr Bourguine, Boulouparis) ;
- 11 au domaine de Déva (Bourail) ;
- 5 au Parc des Grandes Fougères (Farino) ;
- 17 à la propriété ETS Cheval (Nassandou) ;
- 16 sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua).

Les plans de vol ont été choisis principalement en fonction des accès (optimisation de la logistique) et afin de toucher au maximum les différents habitats et types de végétation présent sur chacune des zones.

Les différents plans de vol programmés et survolés au cours de cette phase sont représentés sur les figures ci-après.

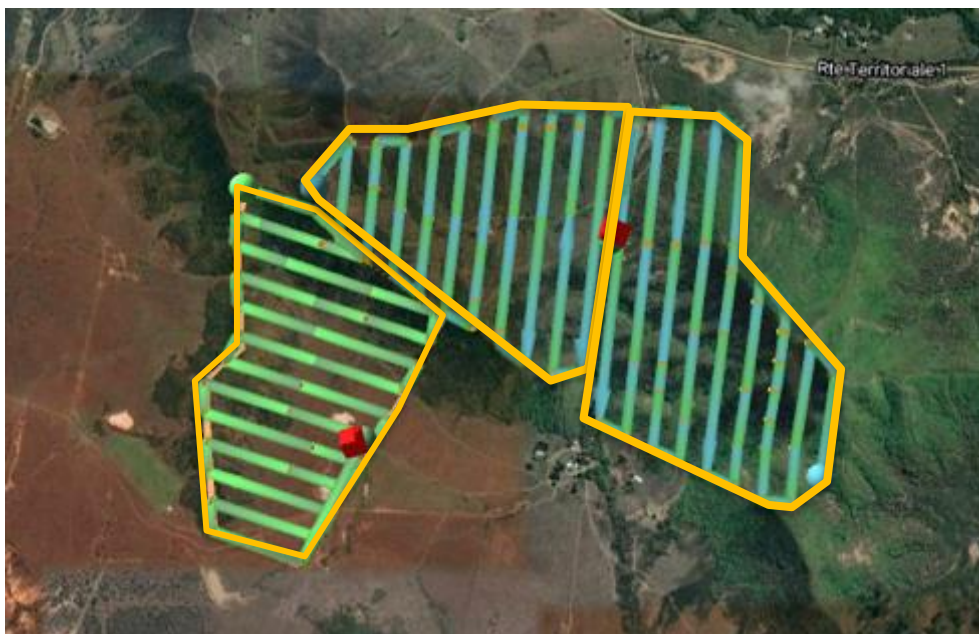


Figure 25 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur la propriété de la ferme de chasse La Cotonnière (Boulouparis).



Figure 26 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur le Domaine de Déva (Bourail).

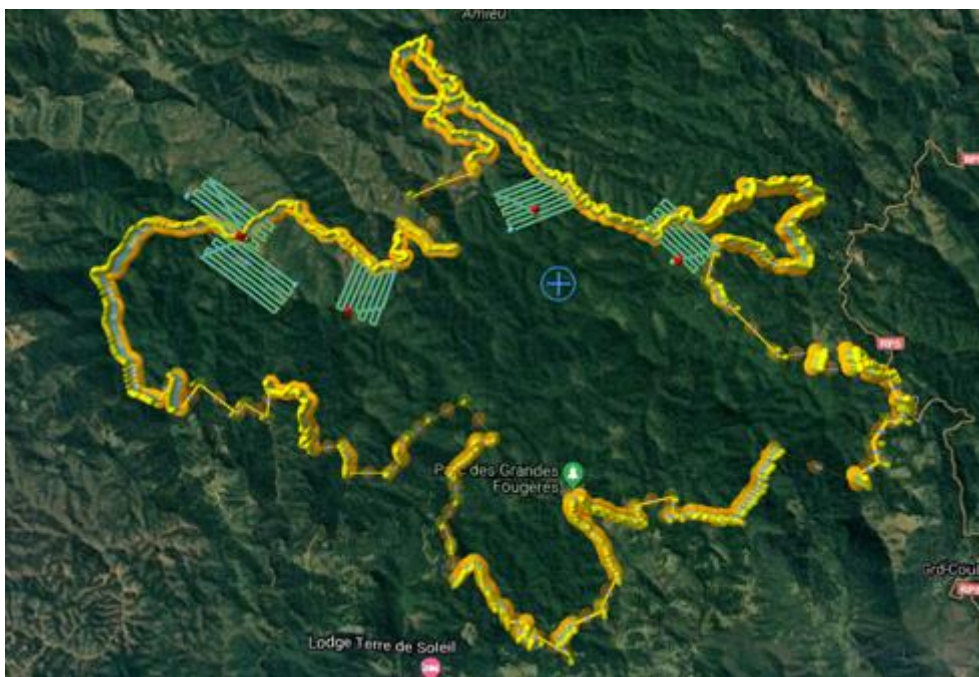


Figure 27 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur le Parc des Grandes Fougères (Farino).



Figure 28 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur la propriété ETS Cheval (Nassandou).

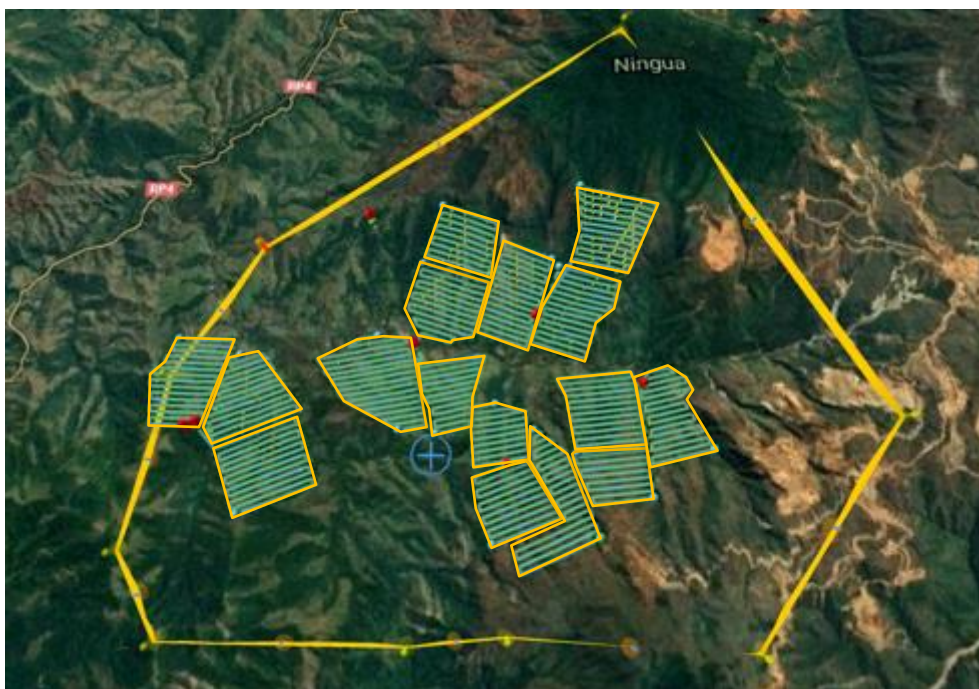


Figure 29 : Ensemble des missions drones avec capteur thermique réalisées au cours de l'étude en mode balayage de zone et suivi de terrain sur la partie Sud-Ouest de la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua).

Pour rappel, chaque plan de vol a été optimisé afin de couvrir le maximum de surface en un seul vol (un seul jeu de batterie) tout en tenant compte des différentes contraintes (accès et zone de décollage, topographie, vent, ...) et en gradant un pourcentage de charge batterie en sécurité de 20 %.

En zone avec peu, voir aucune, contrainte, une surface moyenne de 90 ha a pu être survolée en une seule mission de vol, tout en respectant le protocole.

En milieux avec fortes contraintes, la surface moyenne survolée diminue et se situe en moyenne à 60 ha.

Dans la majorité des zones, plusieurs missions de vol ont été opérées pour chaque plan de vol (voir Tableau 7 du paragraphe 4.1.7, colonne fréquence de vol).

Une mission de vol type se déroule de la manière suivante :

1. Sélection du plan de vol ;
2. Envois de la mission préprogrammée au drone ;
3. Lancement de la mission ;
4. Décollage depuis la zone de decollage-atterrissage ;
5. Déplacement jusqu'au point de départ du plan de vol ;
6. Début du survol du plan de vol en mode balayage de zone et en suivi de terrain selon hauteur, angle et vitesse prédéfinis et lancement de l'enregistrement vidéo en thermique ;
7. Réalisation des différentes lignées de vol en respectant l'espacement prédéfini entre chacune d'elles ;
8. Fin de la mission et de l'enregistrement vidéo ;
9. Retour au point de départ ;
10. Atterrissage.

Hormis pour la propriété ETS Cheval et la zone prioritaire de Thio (Koua) où la méthodologie était bien en place aux dates d'opération, les différents plans de vol ont été opérés plusieurs fois sur les autres propriétés (de 2 jusqu'à 5 missions de vol parfois), dans la même nuit/journée et à des intervalles de temps distincts. Ceci a permis de tester différents paramètres et les limites de la méthodologie dans les conditions de terrains ciblées (zones prioritaires).

4.1.7 Informations générales des missions opérées selon les différents plans de vol programmés sur chaque zone d'étude

Le Tableau 7 ci-après synthétise les dates, les nombres d'heures réalisés pour les étapes d'autorisations/réglementations et de prospection/logistique, ainsi que le nombre de mission de vol, la fréquence et la superficie de différents missions de vol drones qui ont été réalisé sur chacune des propriétés.

Les dates et heures de vol détaillées sont données dans le Tableau 20 en annexe 3 paragraphe 6.3.

Tableau 7 : Synthèse des dates, du nombre d'heures réalisé pour les étapes d'autorisations/réglementaires et de prospection/logistique, ainsi que le nombre de vols opérés et les superficies prospectées en drone, avec capteur thermique, sur les différentes propriétés étudiées au cours de la phase 3.

Zone d'étude	Date	Nbre d'heures demandes d'autorisations et réglementaires	Nbre heures prospection du site/logistique	Nbre de plans de vols automatisés programmés	Superficie (en ha) de l'ensemble des plans de vol	Fréquence des vols	Nombre total de vol (mission) réalisé complètement *	Superficie total (en ha)
Ferme de chasse la Cotonnière (Philippe Bourguine)	Du 16/09/21 au 18/09/21 + 23/10/21	1	1	3	220	4 à 5 missions par plan de vol	13	950
Domaine de Deva	Du 23/09/21 au 26/09/21	1	18	11	877	2 à 3 missions par plan de vol	26	1924
Parc des Grandes Fougères	Du 4/10/21 au 6/10/21	4	2	5	349	2 à 3 missions par plan de vol	12	831
Propriété ETS Cheval	Du 20/12/21 au 22/12/21	1	8	17	1080	1 mission de vol par plan de vol	17	1080
Koua	Du 16/01/22 au 19/01/22	4	29	16	934	1 mission de vol par plan de vol	16	934

4.2 Résultats des tests du protocole d'acquisition de la donnée par missions automatisés

4.2.1 Premières observations

Les plans de vols automatisés ont été testés en premier lieu sur la propriété de Mr Bourguine (Ferme de chasse la cotonnière) et le domaine de Déva. Ces premiers tests se sont focalisés dans des zones présentant une forte variabilité de la topographie (zones de plaine et de forts dénivelé) et/ou de couverture végétale (zones herbacées à arborées denses) afin de se rapprocher au plus des conditions de terrain des zones prioritaires et de voir rapidement les potentielles limites de la méthodologie.

Dès les premiers tests, la méthode de balayage de zone en suivi de terrain s'est avérée efficace et prometteuse.

Cependant dans les conditions optimales définies en phase 2 (hauteur de 70 m et d'angle caméra – 50° -60 °), on s'est aperçu que l'angle de caméra entraîne un biais (possibilité de double comptage en bordure de l'image, malgré l'espace entre les transects) lorsque le drone se retrouve au-dessus de pentes prononcées (dès une pente >10-20%). En effet, ceci modifie énormément l'angle en descente (vision considérablement élargie ce qui augmente le risque de double comptage de manière importante) et en montée (vision rétrécie ce qui diminue de la superficie prospectée).

La Figure 30 est un extrait d'une acquisition réalisée sur le Domaine de Déva où le drone arrive au niveau d'une ligne de crête suivie d'une forte pente. Sur cet exemple 9 individus sont notables au loin dans la vallée. D'après leur géoréférencement, ces individus se trouvent à plus de 200 m du drone derrière la crête alors que le drone est sur le point de changer de lignée (tracé turquoise sur l'image de gauche). Du fait de l'angle de caméra et de la pente, l'emprise au sol de la caméra se voit considérablement augmentée et peut engendrer des biais dans le comptage.



Figure 30 : Extrait d'une acquisition vidéo du drone avec caméra thermique sur QGIS FMV en mission de vol à hauteur de 70 m et angle caméra de – 50° sur le Domaine de Déva dans une zone avec des variations de dénivelé importantes. Sur cette acquisition 9 cerfs sont notables au loin dans la vallée derrière la crête sur un bout de piste.

La Figure 31 est une illustration de l'emprise au sol (en rouge) observée sur l'extrait d'acquisition de la Figure 30 comparativement à l'emprise théorique sur zone plane (en vert). La différence entre les deux emprises est bien notable et met en avant que lorsque le drone survole des zones avec des pentes prononcées l'emprise au sol augmente considérablement et peut détecter des individus sur de grandes surfaces (lignée suivante ou zone non définie sur le plan de vol) et ainsi engendrer des biais dans le dénombrement et l'estimation de l'abondance de cerfs.

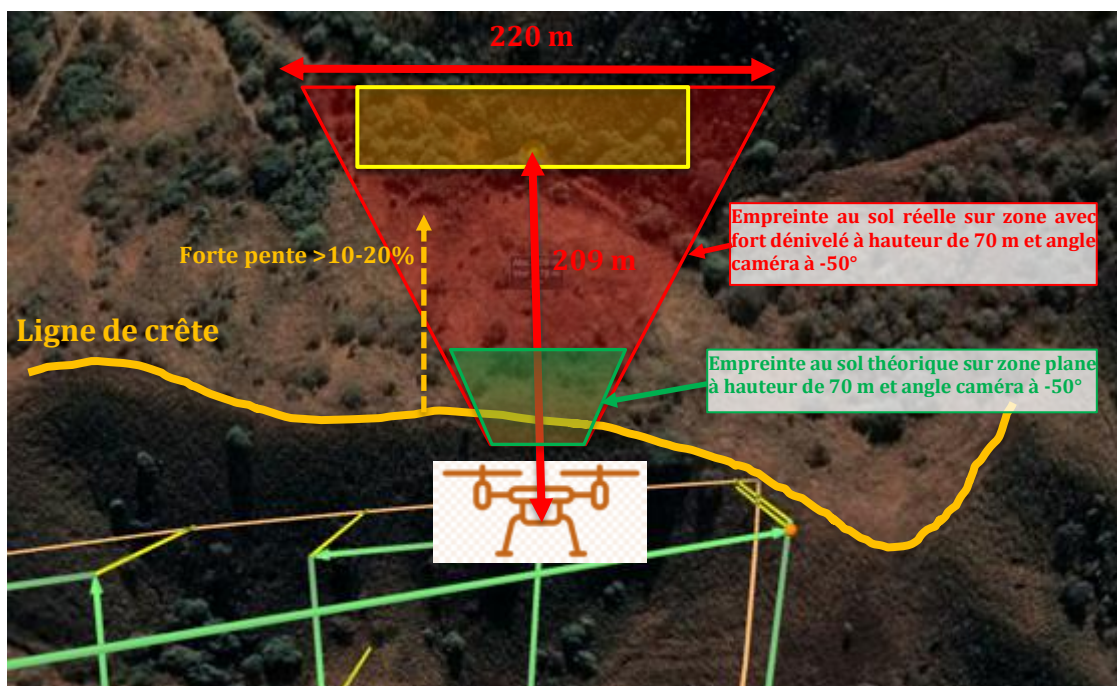


Figure 31 : Schéma explicatif du biais de l'empreinte au sol du capteur thermique avec un angle caméra de -50° sur une zone présentant des variations importantes de dénivelé. Exemple de mission pris de l'étude réalisée sur le Domaine de Déva.

Suite à ces premiers constats, des réajustements ont dû être réalisés pour une application sur les zones prioritaires du projet.

4.2.2 Réajustement des paramètres de vol pour les zones à dénivelés importants (zones prioritaires)

4.2.2.1 Angle caméra

Un angle caméra à la verticale (-90°) est celui qui a le moins d'influence sur l'empreinte de l'image au sol lorsqu'il y a du dénivelé.

En effet, si on simule l'empreinte au sol durant une mission pour un angle caméra de -50° dans une zone plane et une autre à fort dénivelé (Figure 32), pour une même hauteur de vol, on remarque très distinctement que l'empreinte est considérablement surdimensionnée sur la zone avec du dénivelé (matérialisée en rouge) par rapport à celle en zone plane (en vert).

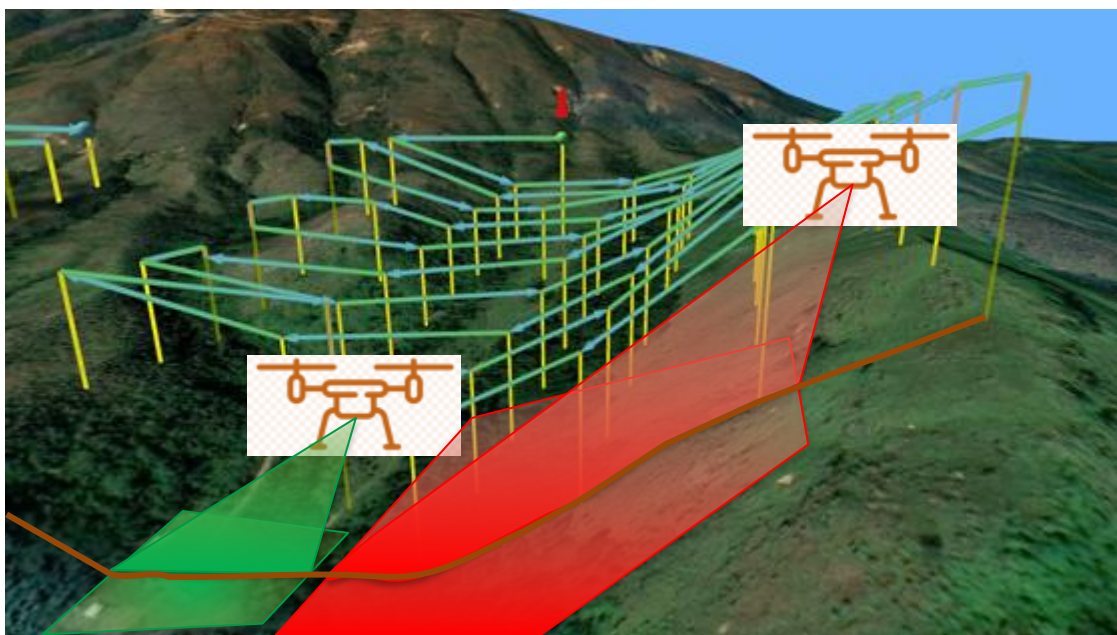


Figure 32 : Simulation des empreintes au sol durant une mission pour un angle caméra de -50° et une hauteur de vol de 70 m dans une partie plane (en vert) et une partie à fort dénivelé (en rouge).

Par comparaison, si on simule la même mission mais pour un angle caméra de -90° (Figure 33), l'empreinte au sol est quasiment inchangée entre la zone plane (en vert) et celle avec un dénivelé important (en bleu).

Le fait de réajuster l'angle de la caméra à -90° pour cette étude évite donc le risque de superposition des images par un surdimensionnement de l'empreinte au sol dans les fort dénivelés et réduit ainsi le risque de double comptage.

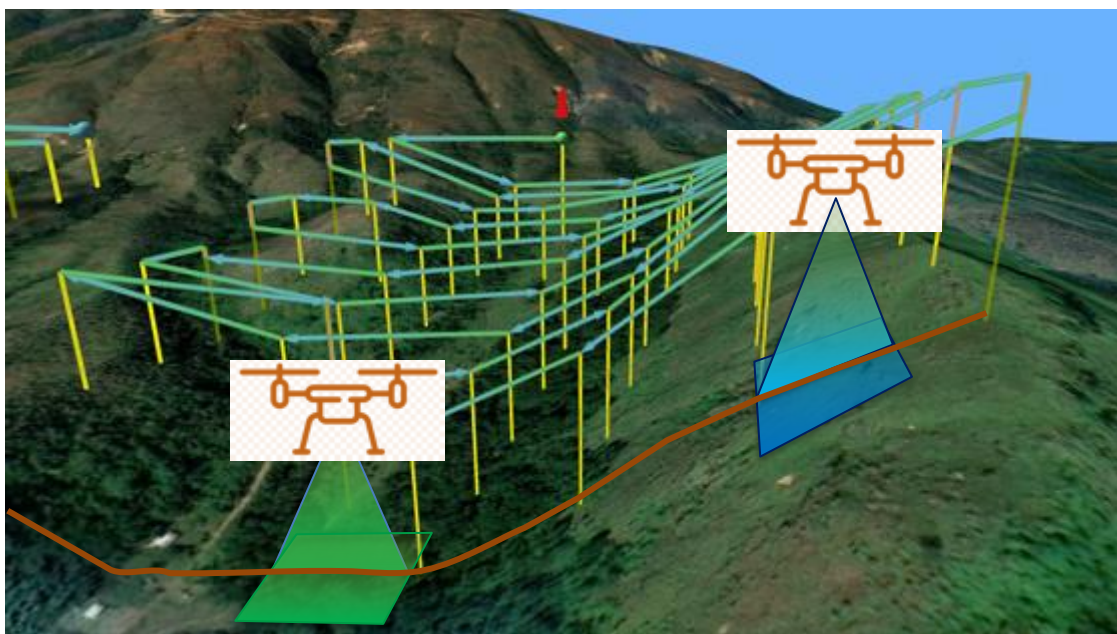


Figure 33 : Simulation des empreintes au sol durant une mission pour un angle caméra de -90° et une hauteur de vol de 70 m dans une partie plane (en vert) et une autre à fort dénivelé (en bleu).

En plus d'éviter le risque de double comptage, le réajustement de ce paramètre de vol s'est avéré aussi très bénéfique pour la détection des animaux quand la végétation devient plus haute et dense (de moins en moins de zone ouverte entre chaque arbre). En effet, lorsqu'on se retrouve en zone arbustive ou arborée avec

une densité d'arbres laissant des trouées dans la canopée, une vue à la verticale (-90°) s'avère plus propice à la détection des animaux (voir Figure 34 et Figure 35 ci-après). Ce constat est exactement le même que ce soit en zone plane ou avec dénivelé.

La Figure 34 et la Figure 35 simulent chacune une mission drone dans une zone de végétation arborée relativement dense avec une hauteur de vol constante par rapport au sol et similaire entre les 2 exemples et avec un angle de caméra à -50° et -90° respectivement. Sur ces deux simulations, 5 cerfs sont représentés dans la végétation arborée.

Avec l'angle caméra de -50° (Figure 34), seul un cerf sur les 5 est détectable en étape 4. Les autres sont, avec cet angle caméra, en permanence masqués par la végétation et donc non visible par le drone (étapes 1, 2, 3).

Contrairement, avec l'angle caméra à -90° (Figure 35), la majorité des cerfs présents est bien discernable malgré la végétation (4 individus sur 5, soit en étape 3 et 4).

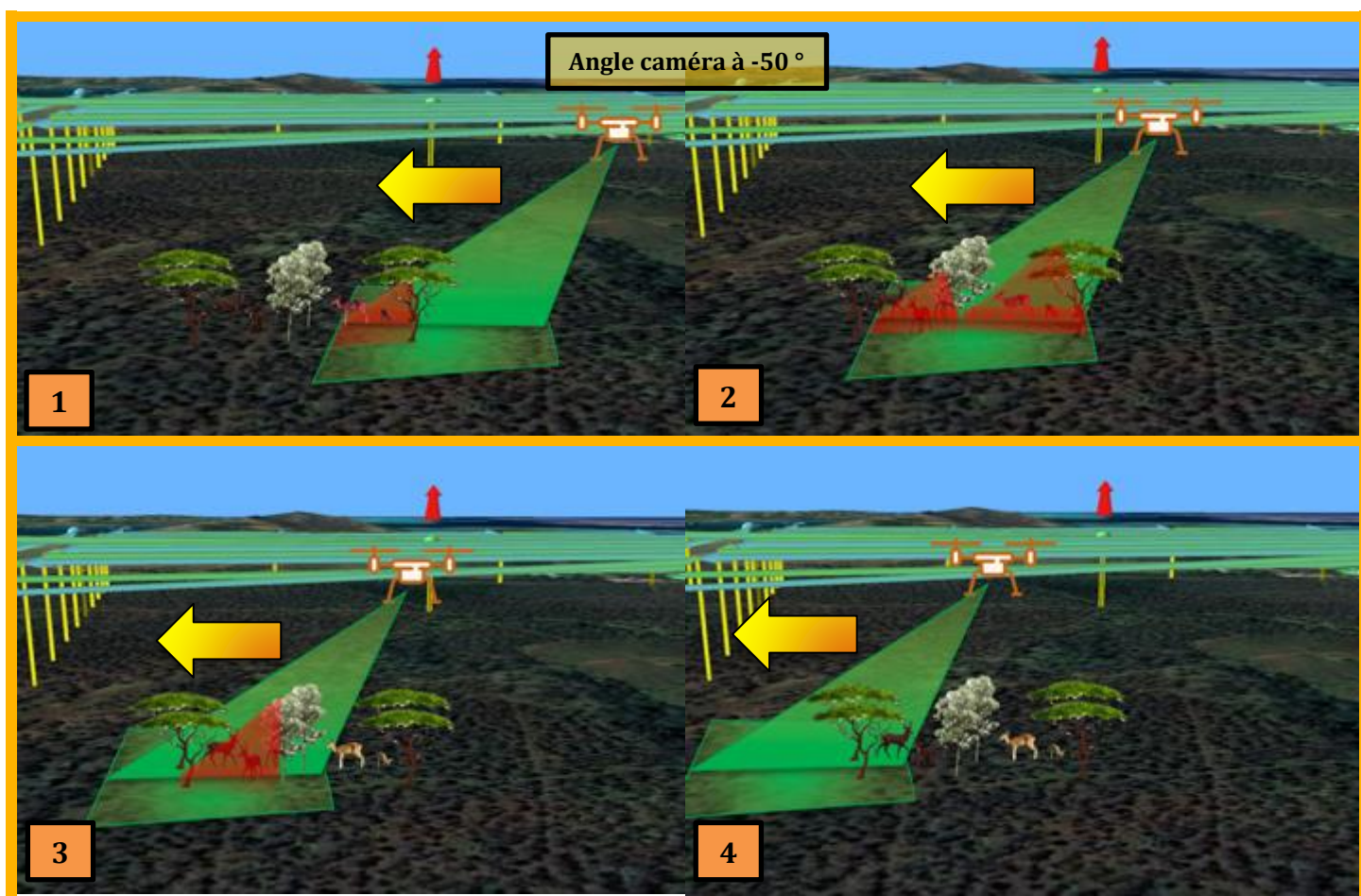


Figure 34 : Simulation des empreintes au sol lors d'un passage du drone dans de la végétation arborée avec des animaux (cerfs) pour un angle caméra de -50° et une hauteur de vol de 70 m. En rouge est représenté l'angle de vue avec des animaux (ou partie d'animaux) caché par cette végétation.

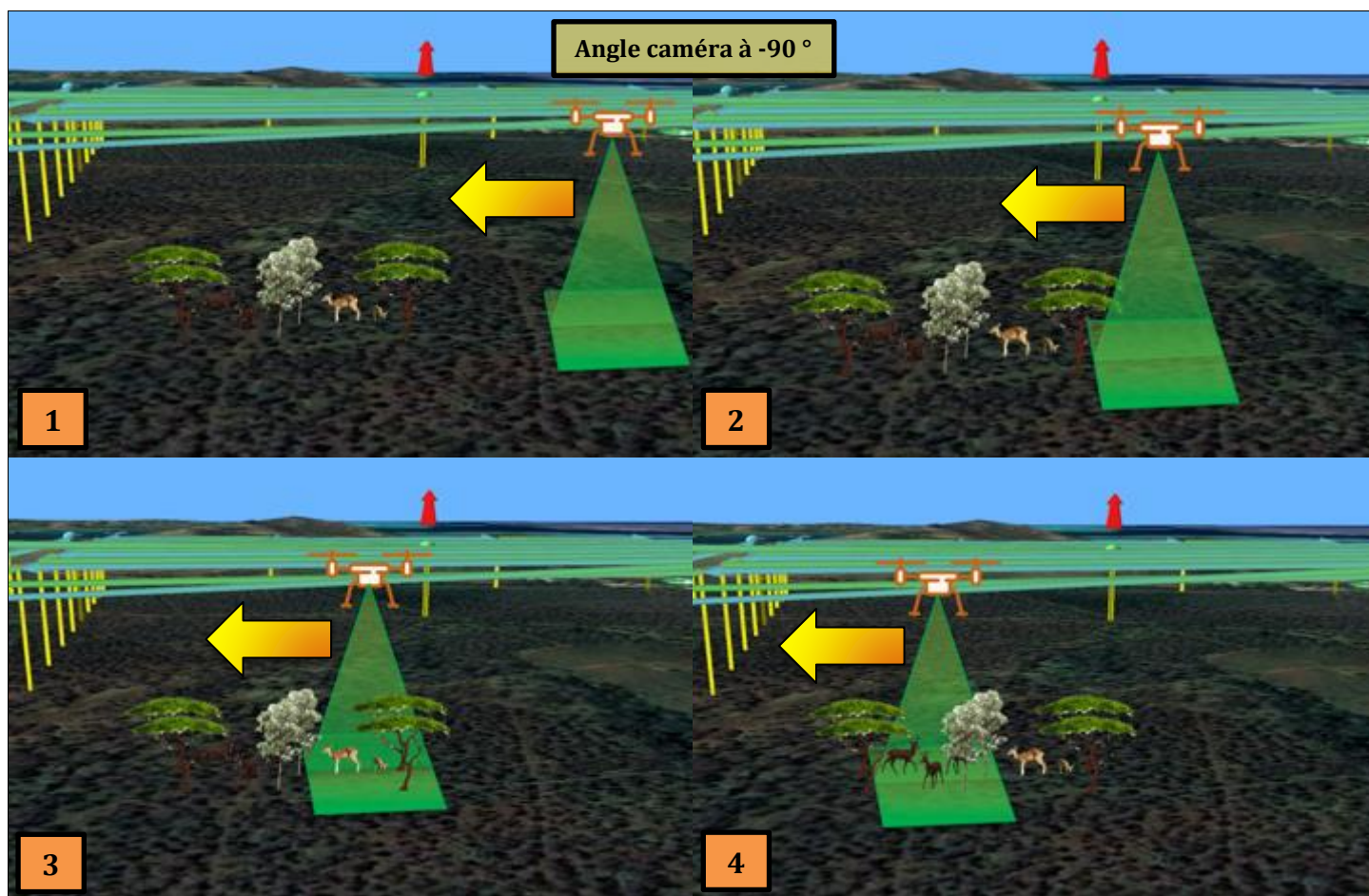


Figure 35 : Simulation des empreintes au sol lors d'un passage du drone dans de la végétation arbustive ou arborée avec des animaux (cerfs) pour un angle caméra de -90° (à la verticale) et une hauteur de vol de 70 m. En rouge est représenté l'angle de vue avec des animaux (ou partie d'animaux) caché par cette végétation.

Pour la suite de l'étude, l'angle caméra de -90° a donc été privilégié afin de se rapprocher au plus des conditions de terrain rencontrées en zones prioritaires (fort dénivelé et végétation arbustive et/ou arborée plus ou moins dense sur leur grande majorité) et réduire les biais associés à l'angle de caméra dans la détection des cerfs.

Le changement de cet angle caméra nous a contraint à réajuster d'autres paramètres soit la hauteur (surface couverte de l'emprise au sol) et l'espacement entre les lignes afin d'optimiser au mieux le protocole d'acquisition de la donnée.

4.2.2.2 Hauteur de vol

D'après nos observations sur le terrain et nos calculs de l'empreinte au sol du capteur (Tableau 3), le réajustement de l'angle à -90° entraîne une diminution importante de cette empreinte (surface prospectée) pour une même hauteur.

Pour une hauteur de 70 m, 3 198 m² sont couverts par l'emprise avec l'angle caméra de -50° contre seulement 1 332 m² avec un angle de -90° , soit près de 2,5 fois moins de surface couverte.

Cependant à -90° , les animaux sont vus de plus près à même hauteur comparativement à un angle de -50° (effet de rapprochement avec le changement d'angle et donc une précision plus fine des pixels, voir Tableau 3).

Afin de pallier la faible superficie couverte de l'empreinte au sol à -90° , au vu du gain de définition, la hauteur de vol peut être augmenté à 90 m avec une définition des individus inchangée (voir taille des pixels, tableau 5).

A cette altitude et cet angle (90 m et -90° respectivement), la superficie couverte par l'empreinte au sol du capteur (2202 m²) reste néanmoins toujours inférieure que dans les conditions optimales définies au départ (70 m et angle de -50°) mais le rapport n'est plus que de 1,4 (au lieu de 2,5 comme vu précédemment).

4.2.2.3 Espacement des lignées

Du fait que l'empreinte au sol soit plus réduite, l'espacement entre les lignées doit être réajusté (réduit) afin de n'avoir pas de trop gros écart entre les lignées de vol et afin de conserver la marge de sécurité fixé au départ de 15-20 m (paragraphe 4.1.5.2). Selon les calculs du tableau 5 avec un angle de -90° à 90 m de hauteur, la largeur de l'empreinte au sol est de 53 m. En tenant compte de la marge de sécurité de 15-20 m, un espacement de 70 m entre les lignées semble optimal pour cet angle caméra. Cette valeur a donc été retenu dans la phase opératoire des différents plans de vol.

4.2.2.4 Contraintes des paramètres réajustés sur le protocole général de l'indice d'abondance cerf

Comme vu précédemment, la définition/résolution des pixels au sol n'est pas altérée par le réajustement de l'angle caméra à -90° et de la hauteur de vol à 90 m. Néanmoins, ce réajustement à un effet notable sur la superficie couverte (empreinte au sol plus faible) et donc sur le temps de mission qui va devoir être rallongé pour couvrir la même surface au sol.

L'augmentation du temps de mission pour couvrir la même surface n'engendre pas une contrainte importante et de modifications majeures dans la stratégie d'échantillonnage.

En effet, pour une mission de 60 ha, la mission va durer seulement 1 min de plus en moyenne. Chaque planification de vol ayant généralement une marge de sécurité batteries de plusieurs minutes, cette minute supplémentaire de vol n'altère en rien la faisabilité de la mission en un seul vol.

Le changement d'angle à -90° va avoir cependant un effet beaucoup plus marqué sur le dénombrement des cerfs lors du post-traitement des données. En effet, une vue des animaux seulement de dessus est moins favorable à la détection automatisée de forme par l'algorithme.

Le réajustement de ce paramètre, pour des besoins d'acquisitions par drone en conditions de végétation dense et/ou de dénivelé important, va engendrer quelques changements dans le protocole de comptage par l'algorithme (voir paragraphe 4.3).

4.2.3 Bilan du protocole d'acquisition de la donnée par balayage de zone

4.2.3.1 Protocoles, caractéristiques et données techniques

D'après les résultats et notre expertise au cours de cette étude, deux protocoles d'acquisition distincts doivent être adaptés aux deux situations environnementales suivantes :

➤ **Protocole 1 : adapté en zone plane et ouverte**

Tableau 8 : Paramètres et caractéristiques des plans de vol du protocole d'échantillonnage en zones planes, peu boisées à totalement ouvertes.

Edition des missions, paramétrage	Type de plan de vol	Balayage de zone en suivi de terrain
	Hauteur	70 m
	Angle caméra	- 50°
	Vitesse de vol	8 -10 m/s
	Espacement des lignes	80 m
	Tolérance de la hauteur de vol	8 m
	Périmètre/forme de la mission	Forme rectangulaire ou carré à privilégier
Caractéristiques techniques	Matériel	Drone Matrice 300 RTK avec capteur thermique H20T
	Temps de vol effectif	30-35 min selon dénivelé et distance de la zone de décollage)
	Superficie moyenne de la mission (avec marge de sécurité batteries 20 %)	80-90 ha (selon condition météo, sans vent, 100 ha sont possible)
	Conditions météorologiques	Pluie légère à moyenne <7 mm/h Vent : 20-25 knts
	Algorithme de détection des individus	Totalement automatisé (reconnaissance de forme possible), présence humaine négligeable

➤ **Protocole 2 : adapté en zones à fort dénivelé et/ou à végétation arbustives/arborée plus ou moins dense (cas des zones prioritaires)**

Tableau 9 : Paramètres et caractéristiques des plans de vol du protocole d'échantillonnage en zones arbustives/arborée plus ou moins dense et/ou dénivelé important.

Edition des missions, paramétrage	Type de plan de vol	Balayage de zone en suivi de terrain
	Hauteur	90 m
	Angle caméra	- 90°
	Vitesse de vol	8 -10 m/s
	Espacement des lignes	70 m
	Tolérance/ finesse de la hauteur de vol	8 m
	Périmètre/forme de la mission	Contour de mission en polygone défini par la topologie du milieu, lignes de crêtes, la communication avec le drone et la réglementation (distance télépilote drone), forme rectangulaire ou carré à privilégier si possible
Caractéristiques techniques	Matériel	Drone Matrice 300 RTK avec capteur thermique H20T
	Temps de vol effectif	20-25 min selon dénivelé et distance de la zone de décollage)
	Superficie moyenne couverte par la mission (avec marge de sécurité batteries 20 %)	50-60 ha
	Conditions météorologiques	Pluie légère à moyenne <7 mm/h Vent : 20-25 knts
	Algorithme de détection des individus	Semi-automatisé (pas de reconnaissance de forme, présence humaine non négligeable dans l'identification)

4.2.3.2 Efficacité du protocole d'acquisition de la donnée et perspectives pour l'indice aérien d'abondance cerfs par drone en zone prioritaires

Le protocole d'acquisition vidéo par drone avec capteur thermique (à adapter selon la typologie) et le traitement des données avec QGIS FMV, mis en place lors de cette étude (paragraphe 3.4.2) s'avère robuste, efficace et simple d'utilisation pour la détection et le dénombrement des cerfs sur le territoire et tout spécifiquement sur les zones prioritaires du projet PROTEGE malgré certaines limites (paragraphe 4.2.3.3). A ce stade de l'étude, les différents tests et la méthodologie présentés dans ce rapport mettent en avant la faisabilité d'un indice aérien d'abondance cerf par drone (IAAD NC) sur les zones cibles.

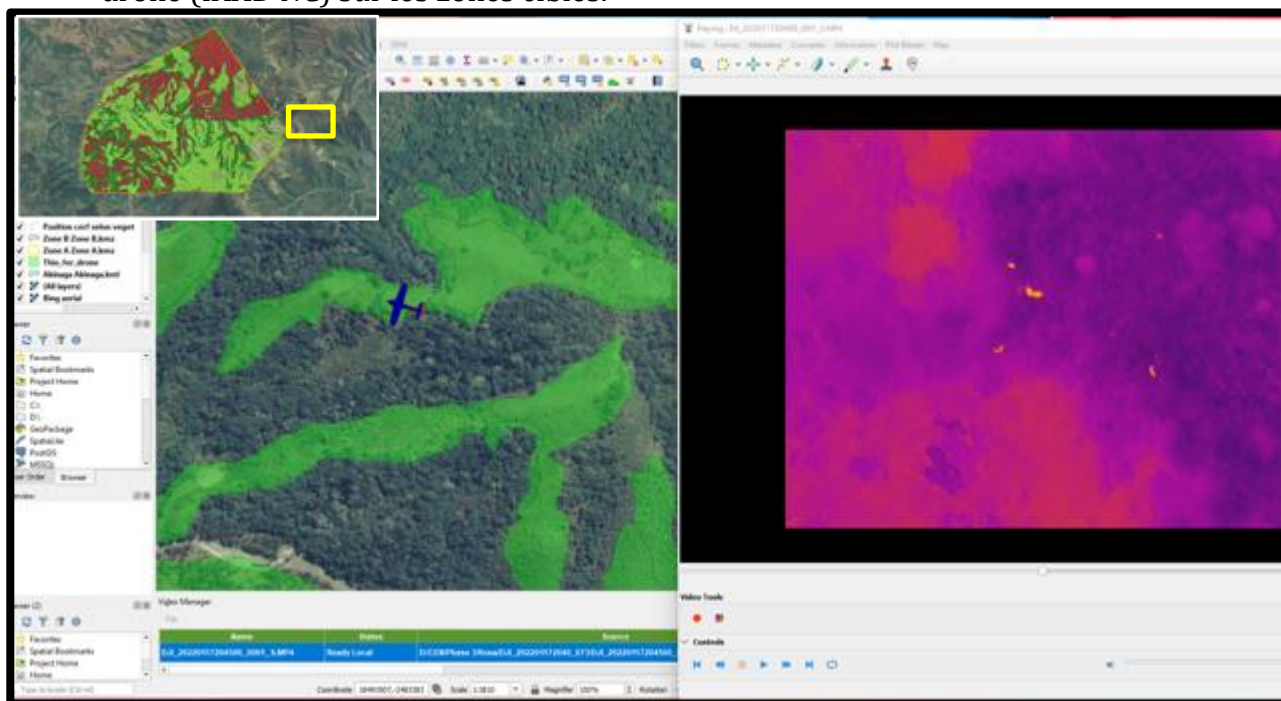


Figure 36 : Capture d'écran d'un exemple du protocole d'acquisition et du traitement de la donnée avec QGIS FMV sur une mission réalisée sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua). Dans cet exemple 5 cerfs sont identifiés et comptabilisés dans la végétation arbustive.

Des exemples de résultats de missions ayant suivi ce protocole de traitement de la donnée et permettant de justifier l'efficacité de ce dernier sont présentés, ci-après :

❖ Sur le Domaine de Déva

La Figure 37 ci-dessous est un exemple de plan de vol réalisée sur une zone du Domaine de Déva (Protocole 1 : 70 m de hauteur et angle caméra à -50 °) dans une vallée en majorité plane avec essentiellement une végétation du type arbustive, majoritairement Niaouli et Bois de fer (vert foncé) et herbacée (vert clair). Les zones en rouge représentant la végétation du type arborée est très faiblement représentée sur cette portion du Domaine.

Le protocole d'acquisition et de traitement de la donnée par simple comptage manuel avec QGIS FMV a été appliqué sur cette portion et a permis d'identifier sur la zone prospectée (soit 85 ha) un nombre de 225 cerfs, soit une densité 2,65 cerfs/ha.

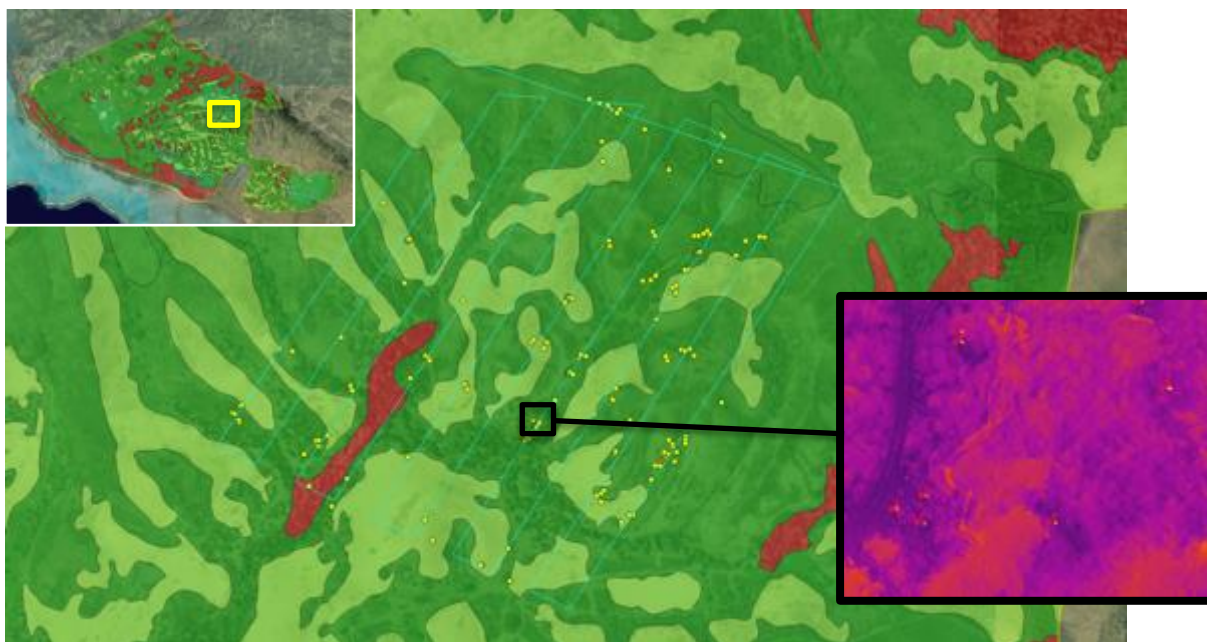


Figure 37 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone d'une superficie de 85 ha prospectée et analysé à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. La zone concernée se situe sur le Domaine de Déva dans une vallée en majorité plane avec essentiellement une végétation du type arbustive (Vert foncé) et herbacée (vert clair). Les zones en rouge représentent la végétation du type arborée.

Un autre exemple d'acquisition et de traitement par comptage manuel sur le Domaine de Déva est notable sur la Figure 38 ci-dessous.

Ce dernier représente 2 plans de vol réalisés selon le protocole 2 (90 m de hauteur et -90° d'angle caméra) de part et d'autre du Marée Fournier (soit MF1 pour Marée Fournier 1 majoritairement en zone arborée de Forêt sèche et MF2 pour Marée Fournier 2, majoritairement en zone arbustive de Niaouli). Sur cette partie du Domaine, le terrain est totalement plat.

Un total de 15 cerfs a été identifié sur MF1 pour une superficie couverte par le drone de 82 ha et 31 individus ont été identifiés sur MF2 pour 85 ha couvert. Les densités s'élèvent respectivement à 0,18 cerfs/ha sur MF1 et 0,38 cerfs/ha sur MF2.

Sur l'ensemble des 2 missions (167 ha), le nombre de cerfs total s'élève à 46 cerfs, soit une densité de 0,28 cerfs/ha.

Dans cet exemple, il est important de préciser que les individus comptabilisés en zone arborée (Zone rouge sur la Figure 38) ont été difficilement détectable et se situent principalement dans des zones où la végétation apparaît moins dense (trouées). Il est très probable qu'un nombre beaucoup plus important de cerfs était présent sur cette zone.



Figure 38 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone sur 2 parties du Marée Fournier du domaine de Déva (MF1 et MF2), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. Zone plane avec essentiellement une végétation du type arborée (en rouge) et arbustive (vert foncé), avec quelques zones herbacées (vert clair).

❖ Sur la zone prioritaire de Thio (Koua)

Les résultats du protocole 2 (Hauteur 90 m et angle caméra de -90°) appliqués sur deux missions (MT1 et MT2) de la zone de Thio sont présentés sur la Figure 39 et la Figure 40 ci-dessous. Pour rappel cette zone prioritaire, de référence pour l'étude, présente de fort dénivelés avec des sections importantes de forêt arborée très dense.

Sur MT1 (Figure 39), 15 cerfs ont pu être identifiés sur une surface prospectée par le drone de 62 ha. La densité sur cette portion de la zone s'élève à 0,24 cerfs/ha.

Comme dans l'exemple précédent, les individus comptabilisés en zone arborée (Zone rouge sur la Figure 39) ont été difficilement détectable et se situent principalement dans des zones où la végétation apparaît moins dense (trouées). Il est très probable qu'un nombre beaucoup plus important de cerfs était présent lors du survol sur cette zone.

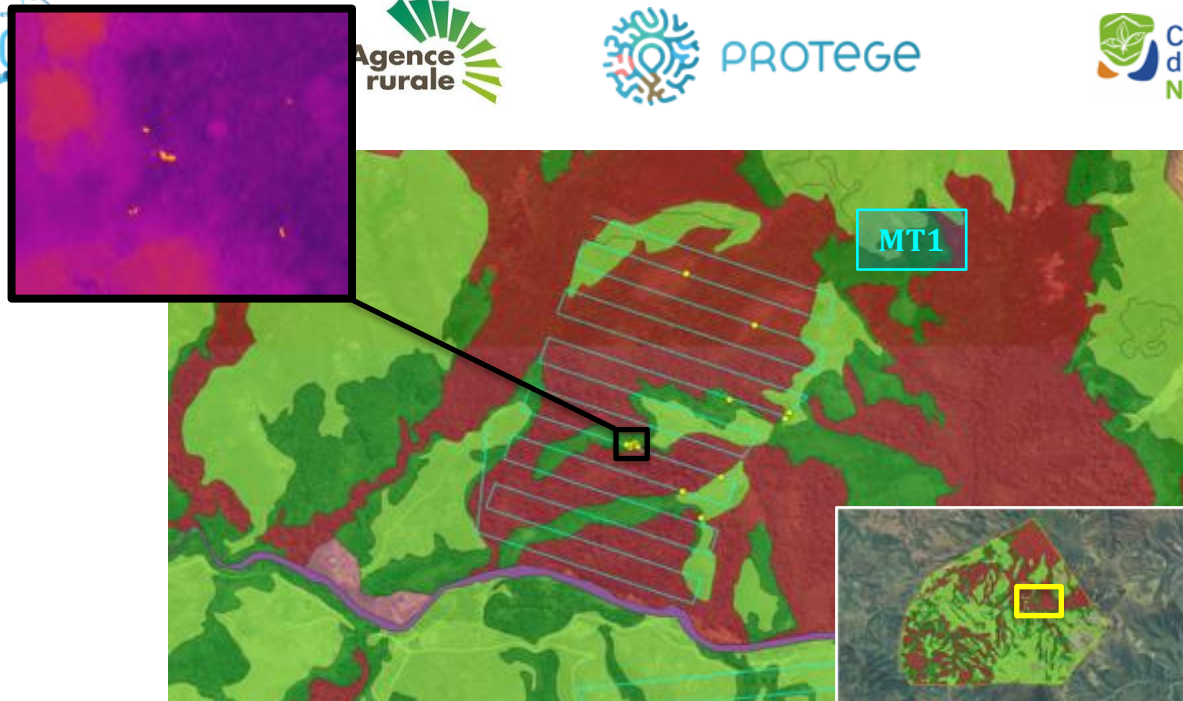


Figure 39 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone (MT1) sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. Zone avec dénivelé important et dominée par une végétation du type arborée (en rouge), et avec quelques zones arbustive (vert foncé et herbacées (vert clair) notables.

Sur MT2 (Figure 40), 16 cerfs sur 72 ha ont été observés à l'aide du protocole mis en place, soit une densité de 0,22 cerfs/ha



Figure 40 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV de l'ensemble des cerfs identifiés (points en jaune) au cours d'une mission drone (MT2) sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua), prospectée et analysée à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude. Zone avec dénivelé important et avec une végétation essentiellement du type herbacée (vert clair) et quelques zones arbustives (vert foncé).

Sur l'ensemble des 2 missions (Figure 41), soit une surface prospectée de 134 ha, un total de 31 cerfs a été comptabilisé ce qui correspond à une densité de 0,23 cerfs/ha.

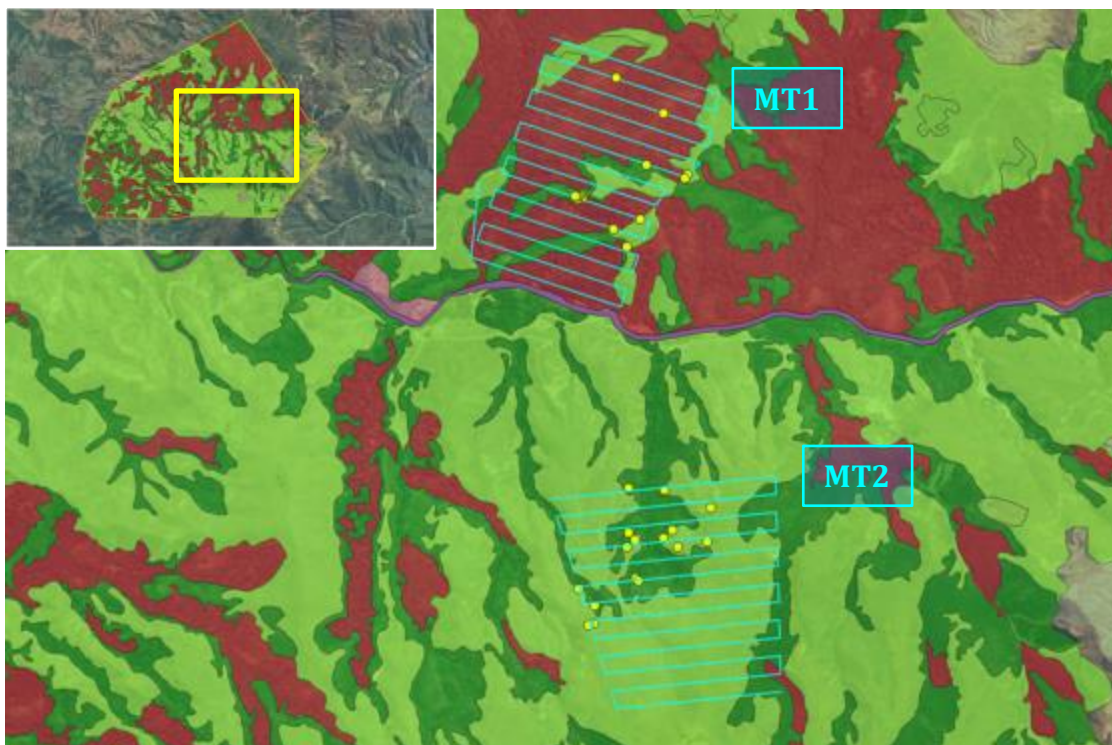


Figure 41 : Résultat du comptage manuel avec QGIS FMV des cerfs identifiés (points en jaune) sur l'ensemble des 2 missions (MT1 et MT2) sur la zone prioritaire de Thio (Tribu de Koua), prospectée et analysé à l'aide du protocole mis en place au cours de cette étude.

D'après ces différents exemples, les protocoles d'échantillonnage mis en place (P1 et P2), d'identification et de comptage manuel (directement avec QGIS FMV) apparaissent très concluant pour l'évaluation de l'abondance relative d'une zone et tout spécifiquement dans celles concernées par le projet.

Comme on peut le voir sur les figures ci-dessus, le cerf a été identifié dans tous types de dénivelé (fort=Thio à faible=Domaine de Déva) et type de milieu (herbacé, arbustif et arborée) pouvant être rencontrés sur les zones prioritaires.

Néanmoins, ces tests en conditions réelles de terrain ont fait ressortir des limites à la méthodologie dans son ensemble, comme tout spécialement la strate végétale arborée qui selon la densité et le type d'arbre ne permet pas d'avoir une estimation robuste de l'abondance relative (paragraphe 4.2.3.7).

4.2.3.3 Limites du protocole d'échantillonnage en conditions réelles de terrain

4.2.3.4 Les zones d'accès

Bien que les caractéristiques techniques de notre drone soient données pour voler en théorie jusqu'à 15 km du télépilote, les conditions terrains avec fort dénivelé (perte de communication derrière les crêtes) et la réglementation drone du territoire ne permettent pas d'atteindre ces distances.

Les zones d'accès sont donc essentielles pour atteindre une zone de décollage propice au drone et pouvoir survoler les zones d'intérêt reculées en sécurité et selon la réglementation en vigueur.

La délimitation des pistes d'accès et/ou la création de nouveaux accès sont donc primordiales à la bonne réussite de ce type de suivi aérien. Il est préférable d'avoir au niveau logistique des accès véhicules 4x4 (pistes), néanmoins des déplacements

à pieds, de quelques kilomètres, peuvent être envisagés si un tracé de chemin est accessible ou créée pour le suivi.

Afin de se rendre compte de l'importance des accès, une comparaison des zones accessibles sur deux parties de la zone prioritaire de Thio (Partie A et B) est présentée sur la Figure 42 ci-après.

Sur cette figure, les différents accès des deux parties sont matérialisés en vert (images de gauche). Selon les accès et donc les aires de décollages possibles avec le drone, les zones de couverture optimale avec le drone, d'un rayon de 1,5 km (contraintes réglementaires lors de l'étude) sont matérialisées en violet (images de droites).

Comme on peut le voir, les zones de couverture possibles avec le drone sont minimales sur la partie B du fait des accès très limités contrairement à la partie A.

Il est néanmoins important de noter que cette matérialisation de la couverture du drone (Rayon de 1,5 km) ne tient pas compte de l'intervisibilité (communication) entre le drone et le télépilote qui limite encore d'avantage la couverture selon la topographie (perte de communication suite au passage du drone derrière une crête). Ce point est développé dans la partie 4.4.1.3.

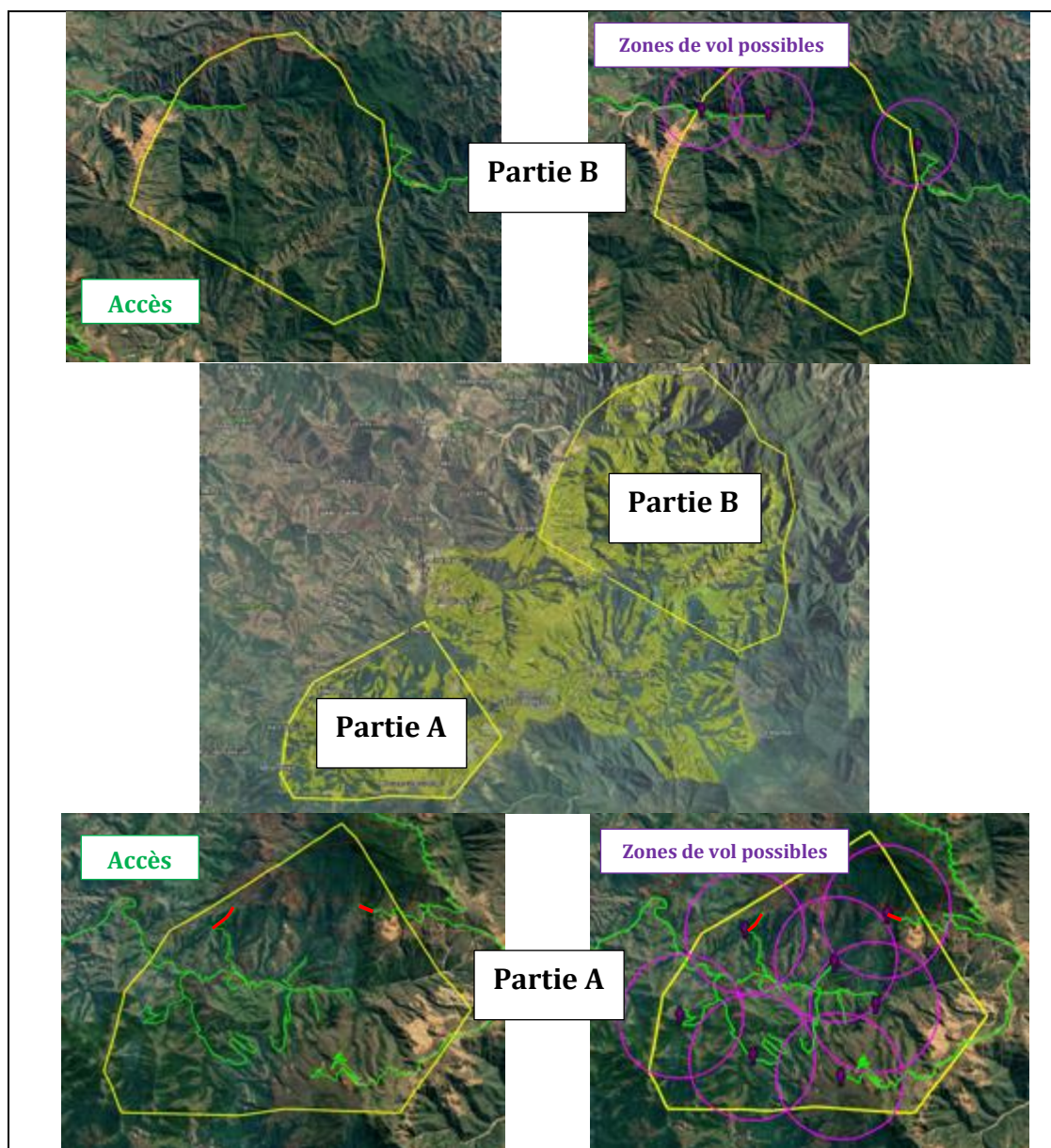


Figure 42 : Cartes de l'accessibilité des parties A et B de la zone prioritaire de Thio. Les pistes et routes accessibles en véhicule sont représentées en vert. Sur la zone A, deux petits bouts de chemin accessibles seulement à pied (en rouge) ont été renseignés et observés lors de cette étude.

4.2.3.5 L'autonomie du drone

Les caractéristiques techniques données par le constructeur pour l'autonomie de notre drone en condition stationnaire et sans aucune perturbation (vent par exemple) sont de 45 min. Cependant en condition de terrain selon les conditions rencontrées, cette autonomie est très rapidement impactée.

En zone optimale pour le vol drone, sans dénivelé (zone plane) ni vent (ou léger), l'autonomie du drone est en moyenne de 35-40 min pour une surface couverte moyenne au sol de 80-90 ha avec l'application du protocole 1.

Pour information, lors de l'étude une surface maximale de 100 ha en un seul vol a pu être couverte avec le protocole d'acquisition (P1) de la donnée mis en place.

Lorsque les conditions de terrain se dégradent pour le drone, soit un dénivelé qui devient très important ainsi que la présence de vent, l'autonomie de la batterie se

retrouve fortement impactée. Elle peut passer de 35-40 min de vol, à 20-25 min, la zone couverte n'étant plus que de 50-60 ha en moyenne avec le protocole 2.

Remarque: un vent fort pour ce type de drone est considéré à partir de 20-25 kts établie (40-50 km/h).

Cependant, cette limite d'autonomie peut être compensée en disposant d'un nombre de batteries plus conséquent sur le terrain afin d'effectuer plus de vol. Nos batteries pesant 1,3 kg chacune, ceci accentue l'intérêt des accès car plus il y a de batteries et plus il y a de poids à transporter sur zone.

Avec notre stock de batterie utilisé durant cette étude (6 paires soit 12 batteries), il nous a été possible de réaliser 6 vols en 3-4 h si un changement de zone de décollage n'était pas nécessaire entre les différentes missions pour atteindre les différentes zones de vol. Ceci nous a permis de couvrir une superficie entre 350 (dénivelés important) à 500 ha (zone plane) en moyenne durant cette période de temps.

Dans les conditions optimale d'accessibilité et de topographie, si une possibilité de charge batterie est possible directement sur la zone (groupe électrogène ou système d'alimentation batterie autonome) ou que les batteries peuvent être chargées sur un lieu avec du courant (220 V) pas trop éloigné de la zone de décollage/atterrissage, 12 vols sont possibles en 7 – 8 h (soit une nuit complète) en tenant compte des déplacements sur les zones de décollages, ce qui représente une zone prospectée entre 700 et 1 000 ha. Pour information, le temps de recharge des 12 batteries est de 1h30 avec nos 2 stations de charges.

Pour le transport et tout particulièrement en zone difficile d'accès (à pied), nous sommes équipés de 2 malettes de transport renforcées et étanches pouvant stocker jusqu'à 6 batteries chacune et les transporter en sécurité. Le coût d'une batterie est de 100 000 cfp/unité.

Ces malettes avec 6 batteries font un poids chacune d'environ 9 kg, soit un total de 18 kg (2 malettes + 12 batteries). Sans recharge possible des batteries, 350 ha (P2) à 500 ha (P1), soit 6 vols, peuvent être opérés sur une zone accessible uniquement à pied.

Si toutes les batteries doivent être emmenées à pied sur zone difficile et sur plusieurs kilomètres, 2 porteurs, en plus de l'opérateur drone, doivent être sollicités.

4.2.3.6 Période d'échantillonnage et caractéristique du sol

Au cours de cette étude, l'identification des signatures thermiques des animaux s'est avérée parfois difficile. Des éléments comme les cailloux, blocs/rochers, l'eau, les zones à nue du type terre, pistes peuvent ressortir chauds par endroits et leur signature thermique (forme) peuvent être confondues avec celles des cerfs (Cf. photos ci-après).

Cette problématique s'est bien fait ressentir lors des relevés drones effectués sur la propriété ETS Cheval et la partie de la zone prioritaire de Thio (Koua, Planche photos 9) qui ont été inspectée en plein été et donc avec des températures ambiantes et un rayonnement solaire très importants durant la journée. Les

différents vols ont été opérés en début de nuit jusqu'en milieu de nuit pour rester dans l'activité optimale du cerf.

Ce rayonnement et donc l'énergie emmagasinée par les différents éléments conducteurs/emmagasineurs de chaleur présents sur la zone sont restitués à la tombée de la nuit et ceci pendant plusieurs heures après le coucher du soleil. Des vols réalisés vers 1 à 2 h du matin pouvaient présenter encore des sources de chaleur non négligeables sur les zones rocheuses.

Afin de rester dans le pic d'activité du cerf en début de nuit tout en limitant l'impact du rayonnement des objets, les missions de vol sur ces zones ont été lancées une à deux heures après le couchés du soleil pour les plans de vol présentant une concentration importante de ces éléments. Cette attente a permis un léger refroidissement des éléments mais diminue la plage de vol optimale.

Ce rayonnement thermique important en été par émissivité des objets peut entraîner majoritairement des biais avec une impossibilité stricte de distinction entre le cerf et ces taches, si l'animal reste totalement immobile lors du passage du drone. Néanmoins lorsque le cerf est en mouvement léger (mouvement de tête par exemple) il est possible de distinguer les individus mais le temps d'identification par l'opérateur peut s'avérer beaucoup plus important.

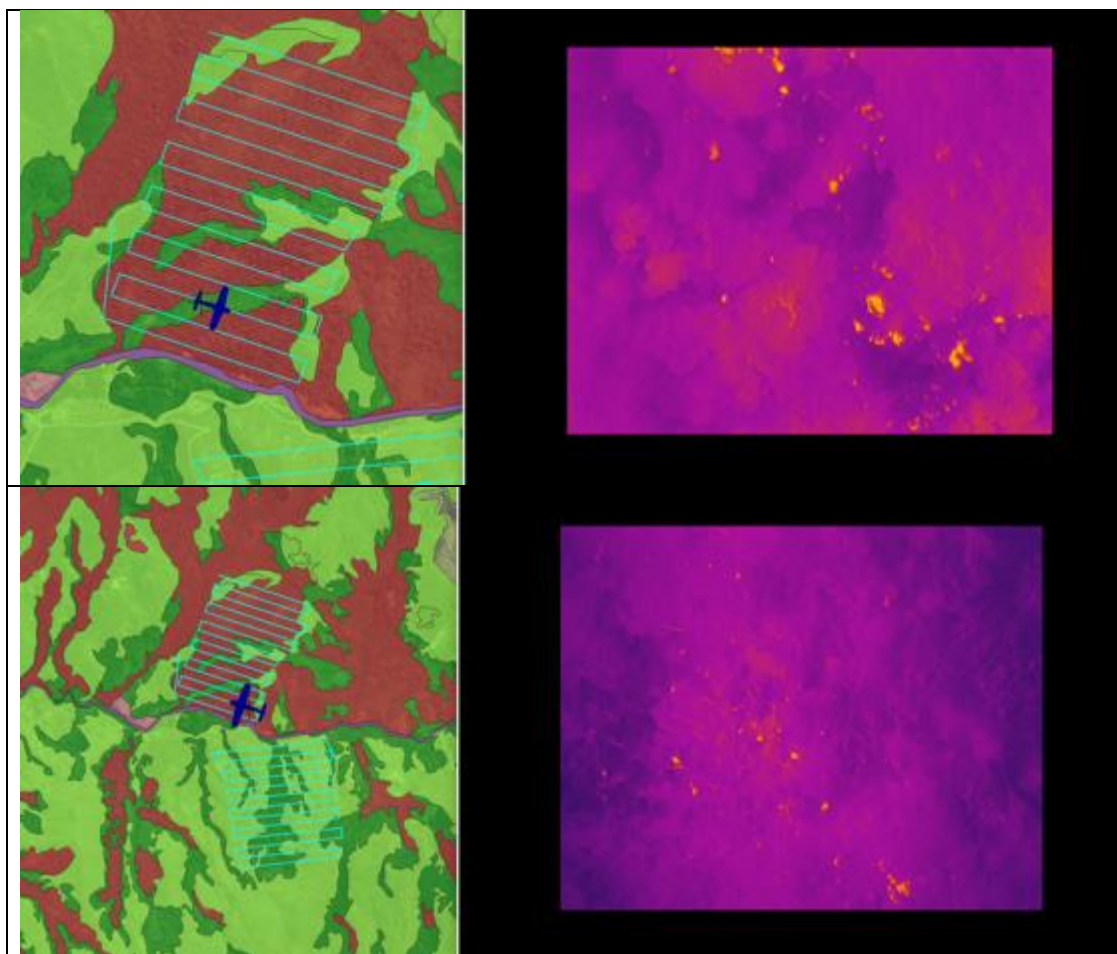


Planche photos 9 : Exemple d'acquisition d'image en thermique de nuit sur la zone prioritaire de Koua dans des zones avec des cailloux, rochers qui ont emmagasinés la chaleur de la journée et entraînant un biais dans la détection des cerfs.

Du fait de l'utilisation de l'acquisition vidéo (mouvement des animaux) et de la signature thermique des animaux tout de même plus marquée que celle des objets non-vivants, des cerfs peuvent néanmoins être identifiés.

➤ Exemple sur la zone prioritaire de Thio, tribu de Koua (Planche photos 10 :

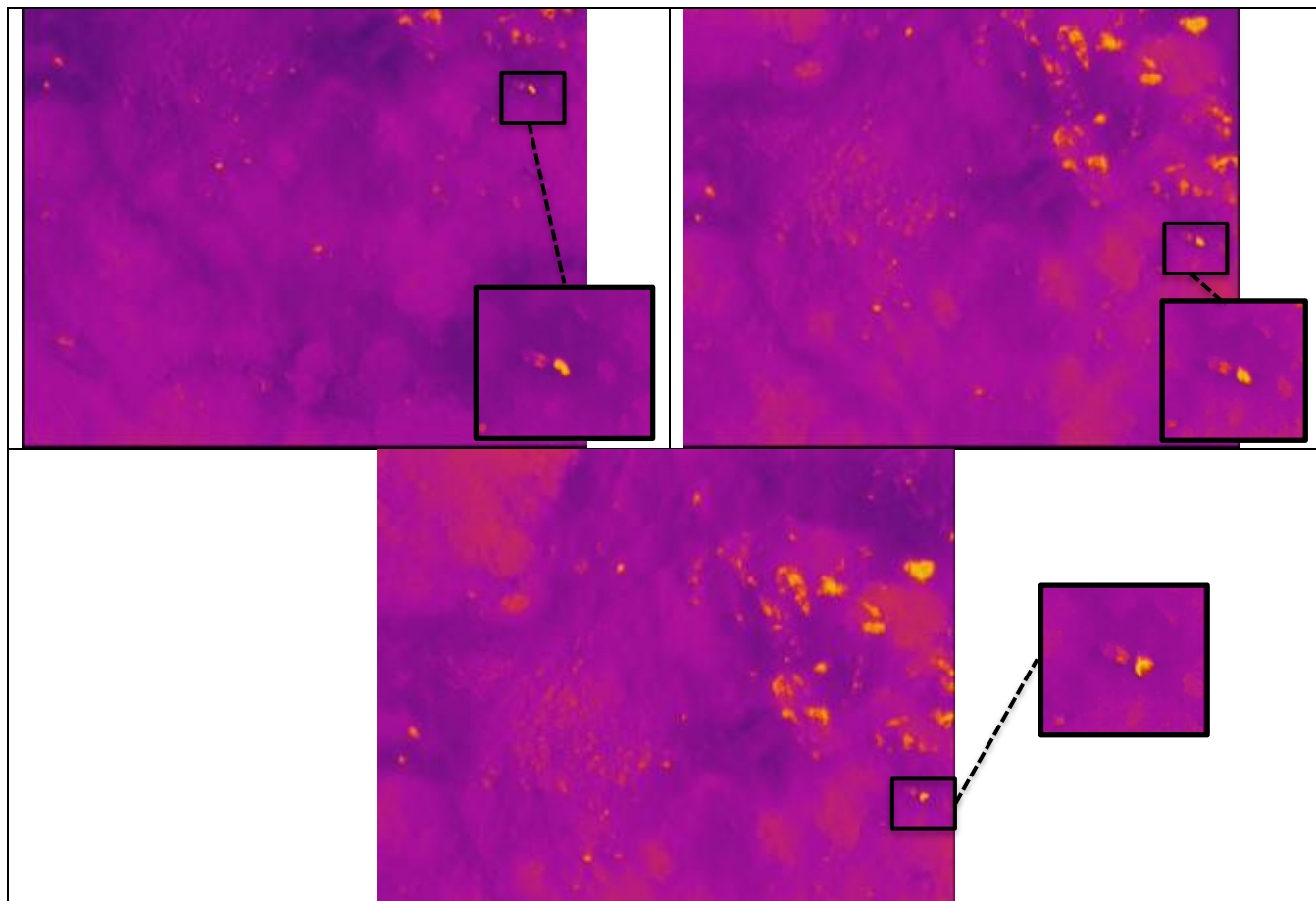


Planche photos 10 : Différents extraits d'images d'une acquisition vidéo thermique de nuit sur un cerf dans une zone de cailloux/rochers encore chauds de la zone prioritaire de Thio révélant le mouvement de l'individu ainsi que sa signature thermique plus prononcée que les cailloux/rochers aux alentours.

- Exemple sur la propriété ETS Cheval (Figure 43) :

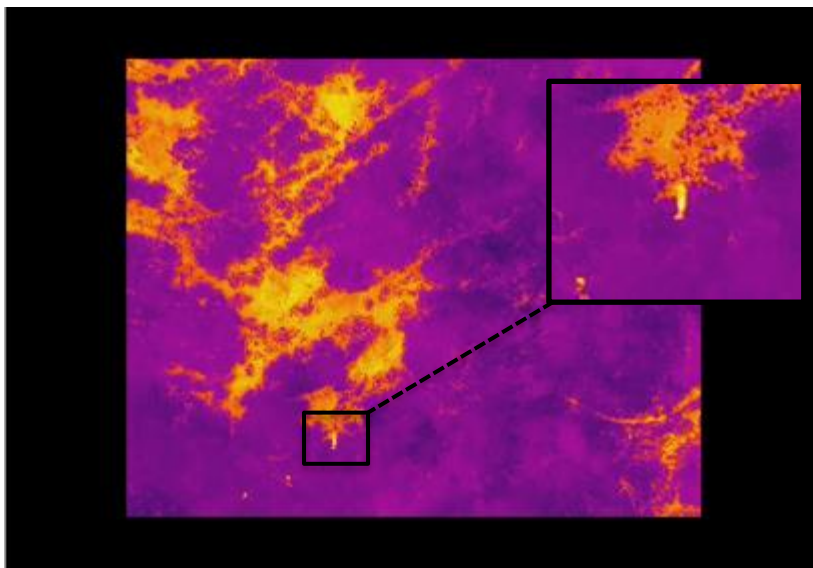


Figure 43 : Extrait d'image d'une acquisition vidéo thermique de nuit d'un cerf sur une partie de revêtement du sol encore bien chaud (saison estivale) de la propriété ETS Cheval révélant la signature thermique de l'animal plus prononcée que le sol, malgré son rayonnement thermique.

4.2.3.7 La végétation, recouvrement végétal

❖ Détection possible dans seulement certains cas de recouvrement végétal

Comme déjà abordé, le rayonnement infrarouge (thermique) ne peut pas passer à travers les objets. Un individu n'est donc pas détectable en thermique sous un couvert végétal dense.

Les figures en annexe 4 (paragraphe 6.4) représentent l'occupation du sol de la végétation sur le Parc des Grandes Fougères (Annexe 4, Figure 54) et sur une partie (partie A) de la zone prioritaire d'intérêt pour le commanditaire (Thio, annexe 4, Figure 55). Ces données ont été tirées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (<https://georep.nc/explorateur-cartographique>).

L'étude du recouvrement végétale sur ces deux zones définies par la BD Topo du Georep NC, les différentes strates végétales présentes sont définies en plusieurs catégories et 3 types principaux dominant sur ces zones, soit la strate:

- Arborée (en rouge),
- Arbustive (vert foncé),
- Herbacée (vert clair).

D'après ces figures on remarque que l'occupation du sol et tout particulièrement la répartition de la strate arborée est très différente entre les 2 zones ce qui va conditionner l'applicabilité du protocole et sa robustesse.

Sur ces deux exemples, quand la strate arborée est présente, celle-ci semble à première vue très dense sur les images satellitaires du Georep NC et donc nous apparaît très limitante sur l'applicabilité du protocole d'échantillonnage par drone.

Les résultats des tests sur le terrain dans différents types de couvert végétal au cours de cette phase de l'étude ont permis de justifier nos observations faites en

amont par images satellitaires. La détection des cerfs s'est bien avérée irréalizable tout particulièrement dans les zones de strate arborée à couverture de canopée fermée (zone de trouées/ouvertes quasi à totalement absente) comme celles présentes sur le parc des Grandes Fougères et Thio.

Des exemples d'acquisitions vidéo réalisées sur le terrain en zones arborées à forte densité (canopée fermée) sur la zone prioritaire de Thio sont présentés sur la Planche photos 11 ci-après. Le sol, le sous-bois et donc les signatures thermiques des cerfs sont totalement indétectable.

Dans les autres strates du type arbustive ou herbacées, le couvert végétal, moins haut et généralement moins dense, rend la détection des cerfs en drone avec capteur thermique très efficace et adapté, contrairement à la strate arborée.

Il est donc important avant d'effectuer un suivi de bien définir les secteurs (et leur surface) sur lesquels le suivi peut être réalisé.

Le secteur du Parc des Grandes Fougères que nous avons prospecté dans le cadre de cette étude n'apparaît donc pas adapté à notre protocole d'acquisition. Les zones significatives sur le parc pour l'application du protocole (en vert sur la Figure 54 en annexe 4) représentent moins de 20 % de la zone d'intérêt.

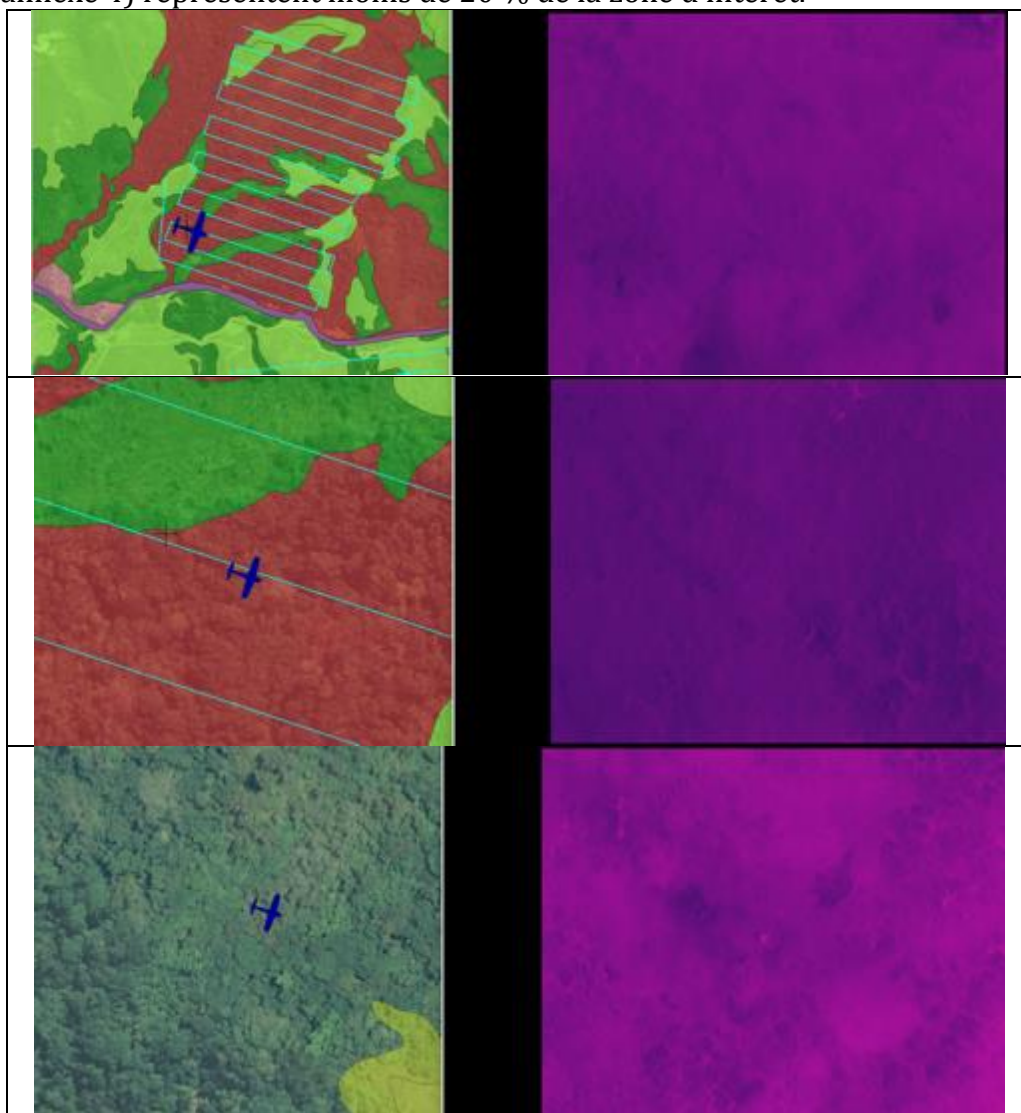


Planche photos 11 : Visualisation de différentes images drone en thermique de nuit au-dessus de zones de forêt denses impénétrables (strate arborée) dans la zone prioritaire de Koua où des animaux à sang chaud comme le cerf pourraient être présents mais indétectables à cause de la forte densité de canopée fermée.

Néanmoins certaines zones de strates arborées, moins denses, peuvent donner de l'information plus ou moins pertinentes sur l'abondance relative. Par exemple le Marée Fournier sur Déva, classé pourtant en zone arborée de forêt sèche, a fait l'objet de plusieurs détections de cerfs (exemples Planche photos 12 ci-dessous).

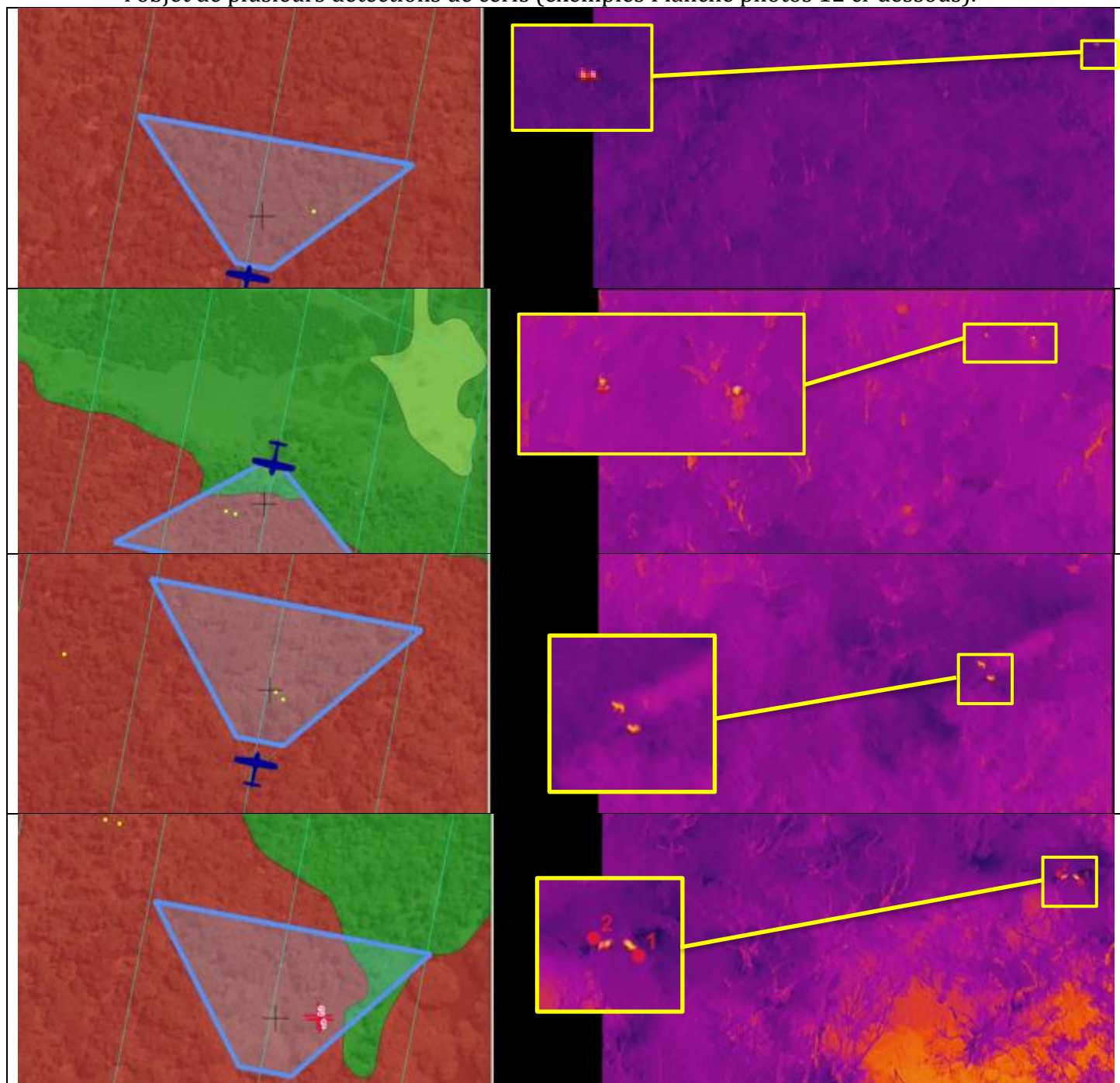


Planche photos 12 : Exemples de situation en vol drone de nuit et avec capteur thermique sur des zones de forêt du Domaine de Déva (zone du Marée Fournier) classées en strate arborée mais présentant sur le terrain une structure de canopée semi-ouverte, permettant de distinguer des points chauds (animaux) au travers.

Ce constat a aussi été fait sur des zones arborées de la propriété ETS Cheval et de la zone prioritaire de Thio (annexe 5 paragraphe 6.5 ; Planche photos 14 et Planche photos 15).

4.3 Modalités de détection-dénombrement

4.3.1 Dénombrement par comptage manuel

La procédure que nous avons établie à l'aide de QGIS FMV facilite le travail de comptage manuel cependant le visionnage des vidéos et la détection/comptage manuel des individus observés est chronophage pour un opérateur. Par exemple pour 25-30 minute de vidéo acquise sur le terrain (soit en moyenne 60 ha) avec une densité de cerf importante (100 à 200 cerfs/ha) comme sur certaines zones du domaine de Déva il faut compter entre 1 h et 1h30 selon l'expérience de l'opérateur et la densité de cerf sur la zone.

En automatisant le comptage à l'aide d'un algorithme de détection automatique, ce temps de comptage va être considérablement réduit et tout spécifiquement dans les zones où le protocole 1, avec application possible de l'algorithme de reconnaissance de forme du cerf, peut être opéré.

4.3.2 Dénombrement par comptage automatisé (Algorithme de détection automatique des cervidés)

Le principe général est de créer une base de connaissances constituée par des données validées (images de référence) représentant des objets d'intérêt dans différentes positions (dans le cas présent, des cerfs de Java de différents sexes et classes d'âge, et dans différentes positions).

Remarque : Les images de référence constituent l'intrant principal pour l'algorithme d'apprentissage, il s'agit de données issues d'images réelles³. Chacune de références comporte nécessairement un animal et la sélection est une opération manuelle relativement chronophage car le degré de fiabilité/performance du modèle est fonction des images utilisées. Celles-ci doivent répondre à des critères tels qu'une résolution du pixel au sol comparable à celle des vidéos des missions, l'animal doit être discriminé par rapport à son environnement (il faut éviter les effets de flous), les différentes images doivent représenter l'animal dans des positions permettant une identification s'appuyant sur les métriques qui seront extraites de l'image (les photos représentant les animaux en position « ramassée » sont à exclure car de nombreux éléments relevés par différenciation radiométriques auront des morphologies comparables)⁴.

Un algorithme d'apprentissage va alors itérer ces données pour créer un modèle de reconnaissance de ce type d'objets.

Une fois le modèle créé, on peut soumettre au modèle des images tierces comportant ou non des objets d'intérêt et si le modèle est performant, il sera capable d'identifier distinctement les objets correspondant au modèle cervidé.

³ Il est précisé que les images sont issues d'une captation car il existe des méthodes permettant de générer automatiquement des images de référence à partir d'une seule image en procédant à des modifications de la géométrie de l'image (rotations, distorsions, zoom...).

⁴ Pour les animaux en position ramassée, on procède différemment en captant les objets répondant à des critères radiométriques, en appliquant des filtres relatifs à la dimension et en suivant l'objet d'images en images pour qualifier (en fonction de la signature qu'il renverra) l'objet en cerf, faux-positifs ou objet à analyser par l'opérateur.

4.3.3 La création de la base de connaissance

La base de connaissance est constituée de plusieurs milliers d'images représentant l'objet d'intérêt. Pour la créer, on dispose de plusieurs méthodes :

- Méthode manuelle : pour créer une image de référence voulue, on affiche une image et on trace un cadre autour de l'objet d'intérêt afin que l'image standard devienne une image de référence.
- Méthode automatique : à partir de la vidéo on identifie les objets qui présentent un contraste fort par rapport à l'environnement, pour chaque objet on crée un cadre pour extraire les imagerie enfin on trie les imagerie contenant les objets en cervidés et non-cervidés (manuellement).

Dans le cadre de cette étude, notre choix s'est porté sur la méthode automatique :

Il faut souligner que toutes les méthodes peuvent être appliquées à un protocole donné. A l'issue des différents tests réalisés, un protocole a été déterminé. A partir de ce protocole des missions d'acquisitions spécifiques sont programmées pour disposer de la matière (données vidéos, photographies) permettant d'appliquer l'une des méthodes.

*Tests > Choix du protocole > Choix d'une méthode > Missions de recueil de données
>> Les données recueillies sont utilisées pour générer l'algorithme de reconnaissance*

Un script a été développé spécifiquement pour l'identification des objets présentant un contraste fort par rapport à l'environnement. Cette méthode présente des avantages et inconvénients suivants par rapport aux autres :

Les avantages :

- Les objets d'intérêt sont dans des positions naturelles (car issus d'une vidéo) au lieu de positions issues de transformations géométriques.
- Il n'est pas nécessaire de créer manuellement un cadre autour de chaque objet d'intérêt.

Les inconvénients :

- Le nombre d'imagerie (cadres d'objets d'intérêt) est extrêmement important. En effet environ 30 images par seconde de vidéo sont traitées et pour chaque image plusieurs imagerie peuvent être collectées. La réduction du nombre d'images traitées est envisageable (1/seconde par exemple) mais cette voie éliminerait potentiellement des imagerie sur lesquelles les objets d'intérêt ont des positions/morphologies distinctes et remarquables.
- Elle nécessite un tri manuel des cadres collectés (visualisation et qualification par un opérateur), cette opération est extrêmement chronophage (il s'agit de trier plusieurs milliers d'imagerie en catégories "cerf rusa" ou "cerf rusa").

Afin d'assister l'opérateur durant la qualification des imagerie, deux analyses statistiques complémentaires ont été menées afin de déterminer des seuils

permettant d'une part de réduire le nombre d'images collectées et d'autre part d'effectuer une pré-qualification (tri) des images.

Les images sont qualifiées d'une part par un processus automatique permettant de filtrer celles comprenant des objets d'intérêt flous et d'autre part par un opérateur qui s'assure que les images représentent bien des cerfs.

Les images douteuses sont systématiquement écartées.

En termes de résultat, pour une vidéo de 3 minutes plus de 17 000 images ont été collectées et le temps de calcul pour cette opération, relativement long, a été de plusieurs heures (la création de fichier consomme beaucoup de ressources et plusieurs milliers de fichiers sont créés/analysés).

4.3.4 L'algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage a pu être alimenté avec cette 'base de données de connaissance' et plusieurs modèles de détection de cervidés ont été créés.

La détermination des paramètres de création d'un modèle doit faire l'objet d'une analyse particulière car le calcul du modèle mobilise les ressources matérielles et logicielles durant une période relativement importante (de plusieurs heures à plusieurs jours de traitement).

Remarque : La durée de vidéo traitée ne constitue pas un indicateur fiable d'évaluation des ressources affectées en tant qu'intrants à la constitution du modèle. Selon les conditions de prise de vue (vecteur, capteur, météo...), les paramètres et les traitements une durée de vidéo relativement longue peut « produire » moins de données d'entrée qu'une vidéo très courte.

De même pour « évaluer » les intrants la valeur brute du nombre d'images utilisées n'est pas pertinente car il est possible de créer un modèle très performant à partir d'un nombre relativement faible d'images (quelques centaines) alors que des modèles comportant plusieurs dizaines de milliers d'images vont parfois produire des résultats peu satisfaisants.

La construction du modèle est intrinsèquement liée à la qualité des données d'entrée et relativement peu par leur quantité (néanmoins un modèle doit comporter une masse critique d'images pour être réalisé [de quelques dizaines – voire moins – pour les structures simples à quelques centaines pour les structures particulières]).

Les différents tests sont particulièrement chronophages car chaque test (ou presque) nécessite de construire son propre modèle de reconnaissance.

Quasiment chaque test réalisé en mission est réalisé à partir de modalités de prise de vue différente (hauteur, angle, environnement). Pour évaluer la pertinence du test au regard de l'objectif poursuivi, différents modèles de reconnaissance ont été établis (un pour les prises de vue à une hauteur de 70 m et un angle de prise de vue de -50°, un pour les hauteurs de 90m et un angle de -90°...).

Donc un test d'acquisition donne lieu à une ou plusieurs bases de connaissances qui chacune donne lieu à la création d'un modèle de détection qui sera utilisé par l'algorithme de reconnaissance automatique.

4.3.5 Les résultats des modèles

Au vu des tests déjà réalisés, les performances du modèle « cerf rusa » de détection automatique varient de 50 à 87% environ pour le taux de reconnaissance.

La meilleure performance indique que pour une vidéo donnée, l'algorithme identifie, qualifie et compte 87% des cerfs qu'un opérateur humain va identifier (131 cerfs sont comptabilisés par l'algorithme et les opérateurs en détectent 150).

La meilleure performance a été réalisée sur le premier protocole.

Comparer les résultats des différents protocoles sur une même vidéo n'est pas probant dans ce cas de figure car pour une vidéo acquise selon des modalités précises (plan de vol : hauteur, angle...) un protocole est établi pour analyser des données acquises selon des modalités de plan de vol précises. C'est-à-dire que l'on ne peut pas utiliser un protocole d'analyse de données avec un capteur au nadir sur une vidéo qui n'est pas acquise avec le capteur pointant au nadir (bien entendu le paramètre de hauteur doit aussi être pris en compte).

Cette performance amène plusieurs remarques :

Il est possible que le modèle de reconnaissance utilisé soit « sur-adapté » à la vidéo traitée ;

La vérification par un opérateur humain doit être la règle afin de valider les résultats obtenus (si les performances se stabilisent, on pourra envisager un relâchement du contrôle humain).

Les conditions de captation multiplient les paramètres à prendre en considération. Le vecteur, le capteur, l'objet d'intérêt et l'environnement sont tous affectés par un déplacement et chaque élément affecte la prise de vue qui est elle-même dépendante des capacités intrinsèques du capteur thermique. Nous estimons raisonnable de cibler au mieux un taux de reconnaissance de l'ordre de 70-75%.

Remarque : L'état de l'art en termes de reconnaissance est de l'ordre de 99.9 % pour des acquisitions en milieu contrôlé (capteur fixe, objet d'intérêt face au capteur et environnement neutre) et des modèles de reconnaissance développés par de grands groupes (et alimenté par de très nombreuses sources).

Pour l'étude le milieu n'est pas contrôlé : le vecteur, le capteur, l'environnement, les objets... tous sont soumis à des modifications de différentes nature (déplacement des objets, du vecteur, du capteur, de l'environnement sous l'effet du vent et des modifications de radiométrie...). Une performance de l'ordre de 70-75% est raisonnablement le maximum que l'on puisse atteindre.

Aussi quel que soit le milieu et quel que soit le modèle et le capteur utilisé, un engagement sur des performances supérieures n'est pas envisageable (même si ponctuellement des performances supérieures peuvent être réalisées).

La création d'un modèle de reconnaissance plus robuste est envisageable en multipliant les tests et en augmentant qualitativement et quantitativement les données de la base de connaissance eu fur et mesure des sessions de vol.

Cette évolution concerne le modèle de reconnaissance du Cerf Rusa et non les performances de positionnement en planimétrie et altimétrie.

4.3.6 La détection automatique par points chauds

L'idée est dans un premier temps de capter tous les points chauds présents sur les images puis de les filtrer (par différents procédés) afin de ne conserver que les objets d'intérêt.

4.3.6.1 *Extraction des objets présentant un fort contraste par rapport à l'environnement*

Il s'agit de la première étape, elle consiste à identifier les objets chauds de l'image et les stocker dans une liste.

Étape accomplie : on dispose de l'outil permettant cette extraction.

La détection des points chauds s'opère de la même façon pour les deux protocoles. Pour une image donnée, les résultats renvoyés par la détection de points chauds seront rigoureusement identiques (les étapes ultérieures des protocoles vont analyser différemment ces résultats initiaux).

4.3.6.2 *Le calcul des caractéristiques-images des objets extraits*

Le nombre de caractéristiques-images pouvant être définies à partir des objets chauds est relativement important.

Étape accomplie : les résultats ne sont pas probants, il subsiste des artefacts et leur élimination implique une généralisation trop importante des objets. Nécessité de pousser l'investigation plus loin.

Les métriques pouvant être extraites sont extrêmement nombreuses, la détection peut être améliorée en affinant leur exploitation, cela passe par des investigations supplémentaires.

4.3.6.3 *La recherche d'un profil-type*

C'est la troisième étape qui correspond à la recherche d'un schéma-type de valeurs caractéristiques permettant de qualifier un objet chaud comme étant un objet d'intérêt (cerf rusa).

En analysant les caractéristiques établies pour les objets, on va estimer si des valeurs-clés sont systématiquement présentes dans les caractéristiques-images propres aux cerfs rusa.

Étape accomplie : les résultats ne sont pas positifs, les artefacts introduisent de fortes discontinuités dans les profils. Nécessité de pousser l'investigation plus loin.

4.3.7 La détection automatique duale modèle et points chauds

Le principe est d'utiliser la détection par modèle pour discriminer les zones comportant des objets d'intérêts. Une fois définies, on va appliquer des filtres sur ces zones afin d'en extraire les éléments susceptibles d'être des cervidés.

Chaque élément fera l'objet d'évaluations automatisées permettant de calculer ses caractéristiques (centroïde, aire, périmètre, rectangle englobant...) et ses propriétés (aspect ratio, extension, solidité, orientation...).

L'intérêt de cette procédure est de permettre d'une part de spécifier les zones de l'image à investiguer (ce qui évite la multiplication des artefacts), d'autre part d'extraire les éléments identifiés comme des cerfs rusa ainsi que leurs caractéristiques-images (pour ensuite filtrer les résultats et ne conserver que des éléments dotés de caractéristiques cohérentes avec la morphologie des cerfs rusa).

4.3.7.1 La discrimination des zones

Elle s'opère en appliquant une recherche au moyen du modèle de reconnaissance des cerfs rusa déjà défini dans le paragraphe "détection automatique de cerfs rusa".
Étape accomplie : les résultats sont assez positifs. Le modèle devra être retravaillé avec les futures vidéos afin d'améliorer ses performances.

Actuellement les images présentant une surexposition, un filé, des objets flous...ne sont pas correctement analysées par le modèle (aucune zone contenant les cervidés n'est relevée).

Sur les images avec une bonne exposition, sans filé ni flou, les performances sont largement supérieures (la plupart des zones comportant les cervidés sont correctement définies).

4.3.7.2 La recherche d'éléments dans les zones

Elle est réalisée exactement comme dans le paragraphe "la détection automatique par points chauds", la seule différence est qu'au d'être appliquée sur toute l'image, elle est appliquée uniquement sur les zones préalablement définies par le modèle de détection.

Étape accomplie : Les résultats sont mitigés, sur certaines images le taux de réussite est de 100% alors que pour d'autres des artefacts sont détectés.

Les filtres de taille ne permettent pas d'éliminer certaines incohérences relevées.

Le problème principal est la variabilité radiométrique entre les images (ce même lorsque la fréquence d'analyse est élevée : pour deux image consécutives la radiométrie de l'environnement et/ou des objets d'intérêt peut varier considérablement).

Une consolidation stricte des conditions de prise de vue devrait permettre de réduire le nombre d'incohérences, cela porte notamment sur les éléments suivants : hauteur, angle, vitesse de déplacement du vecteur et de l'orientation du capteur et horaire des prises de vue.

4.3.7.3 L'extraction des caractéristiques et propriétés des éléments

C'est cette étape qui devra permettre de définir les seuils à appliquer pour filtrer les résultats et éliminer les éléments de petite taille ou présentant des caractéristiques aberrantes.

Étape accomplie : Les filtres par caractéristiques physiques sont opérationnels et permettent de limiter le nombre d'objets détectés.

4.3.7.4 Le "suivi" des animaux détectés pour limiter le double comptage

L'idée est de suivre les animaux détectés en leur attribuant un identifiant. Ce suivi doit permettre de ne pas détecter plusieurs fois le même animal entre plusieurs images ou du moins de limiter le double comptage.

Étape accomplie : Le suivi est opérationnel

4.3.8 Validation de l'algorithme VS comptage manuel/opérateur

Ce point a été abordé au paragraphe 4.3.5 « Les résultats des modèles ». Les résultats des tests de validation sont un taux de reconnaissance de l'algorithme par rapport à un comptage manuel/opérateur de 50 à 85%. Comme évoqué précédemment, ces résultats doivent être confirmés par des tests complémentaires réalisés suite à l'application de modèles plus robustes.

Les avantages et inconvénients de l'algorithme par rapport au comptage humain sont :

- Inconvénient : Le comptage par l'algorithme est moins performant que celui par un opérateur (sa capacité de qualification d'un objet d'intérêt est très largement inférieure).
- Avantage : La capacité de traitement machine est intéressante lorsqu'il s'agit de traiter un nombre important de données (longueur des vidéos et nombre de cerfs enregistrés). Le visionnage de vidéos par différents opérateurs peut être une source de biais opérateurs en fonction de l'expérience de ces derniers. Le visionnage de vidéos relativement longues par un opérateur engendre une fatigue, une pénibilité et une source d'erreur. L'algorithme traitera un nombre très important de vidéos (quelle que soit leur durée) de façon strictement identique d'une session à une autre, à moins que l'algorithme ait subi au fur et à mesure des perfectionnements.

Ces avantages et inconvénients concernent les différents protocoles ; ceux-ci permettent d'assister l'opérateur humain.

Par conséquent, il est apparu nécessaire de développer une approche duale et de mettre en œuvre un programme d'analyse/détection doté de plusieurs fonctionnalités qui vont assister l'opérateur lors du comptage des animaux sur les vidéos.

La vidéo est analysée image par image et chaque détection donne lieu aux actions suivantes :

Dans un fichier tabulaire [1 fichier /vidéo] au format CSV ('comma separated value') un nouvel enregistrement (ligne) est insérée avec les informations de :

- Nom du fichier vidéo traité ;
- Identifiant unique de l'objet détecté ;
- Coordonnées dans l'image du pixel central de l'objet détecté (numéro de colonne et numéro de ligne) ;
- Cellule de la grille dans laquelle l'objet est détecté (chaque image est découpée en 16 cellules 4*4) ;
- Numéro de l'image dans laquelle il est détecté (30 images/sec) ;
- Coordonnées 'temporelles' de la première détection ;
- Coordonnées géographiques (WGS 84) du centre de l'objet.

Une impression écran est réalisée (le fichier image est enregistré dans le répertoire contenant la vidéo), l'impression écran comprend les éléments suivants :

- Les zones d'intérêt (susceptible de contenir un objet) sont en couleur (le reste de l'image est en niveaux de gris) ;

- L'objet concerné par la détection est encadré en vert ;
- Le nom du fichier image reprend le nom de la vidéo avec pour suffixe un chiffre correspondant à l'identifiant unique de l'objet détecté dans le fichier tabulaire.

L'utilisation de ce programme permettrait une amélioration de l'analyse des vidéos par un opérateur :

- Celui-ci n'aurait pas à visionner les vidéos n'ayant renvoyées aucune détection ;
- Pour les vidéos comportant des détections, il pourrait se concentrer sur le(s) temps lors desquels un/des objets sont détecté(s) ;
- La vérification des détections réalisées par le prototype est facilitée par l'export des images. Il est rapide et facile pour un opérateur de qualifier une détection comme étant correcte ou erronée ;
- Actuellement le prototype traite une seule vidéo, il est tout à fait réalisable d'intégrer une fonctionnalité de traitement en mode lot de vidéos au sein d'une interface graphique simple d'utilisation.

Toutes les détections avérées et erronées font l'objet d'un enregistrement sous deux formes :

- Forme 1 : Dans un tableur une ligne est insérée, elle comprend la zone de l'image où la détection est réalisée, le temps de la vidéo (timecode) auquel la détection est réalisée, les coordonnées images de la détection et les coordonnées terrain de la détection.
- Forme 2 : Une impression écran de la vidéo est réalisée et stockée dans un fichier image avec les informations de temps de la vidéo, et d'identifiant de la détection (identifiant de l'enregistrement dans le tableur)

A partir de ces informations, l'opérateur est en mesure d'aller spécifiquement au temps vidéo correspondant aux détections, il peut alors valider ou non la détection sans devoir visualiser l'entièreté de la vidéo.

L'opérateur ne devra pas (sauf volonté explicite) consulter toute la vidéo car les éléments significatifs auront été extraits de celle-ci.

Par contre, il devra qualifier définitivement les détections opérées.

Remarques

- Le calcul de la surface couverte par la vidéo est réalisé et incrusté dans la vidéo.
- Des couches SIG sont créées par un procédé non-automatique. L'automatisation n'est pas encore implémentée mais elle ne posera pas de problème.
- L'évaluation de la "qualité" de la détection n'a pas été implémentée pour le moment. En évaluant le nombre de retours suite à vérification manuelle (détections erronées et cerfs non détectés) pour une vidéo, il sera possible de qualifier les résultats de l'algorithme. Si de nombreux retours sont perçus, il est fort probable que les résultats soient biaisés, les éléments

physiques comme les roches, arbres ou sols pourraient alors avoir été considérés et retenus comme des points chauds. L'opérateur serait alors confronté à une dégradation de ces conditions de travail s'il utilisait le programme dans ce contexte particulier et marginal. L'idée serait de qualifier "l'utilisabilité" de l'algorithme comme support d'analyse en fonction des vidéos thermiques à exploiter.

- Le programme ne nécessite pas de logiciels tiers, il est strictement dépendant de QGIS.

4.4 Synthèse des différentes étapes de mise en œuvre de l'indice aérien d'abondance Cerf rusa par drone thermique en Nouvelle Calédonie sur zone prioritaire

Dans cette partie de l'étude, une simulation du protocole générale (P2) et du coût de l'indice aérien d'abondance cerf par drone (IAAD NC) sur la zone prioritaire de Thio (Partie A, d'une superficie totale de 3650 ha) est présentée afin de décrire toutes les étapes, de la mise en place de la stratégie d'échantillonnage jusqu'au résultat final de l'indice en passant par l'aspect réglementaire et risques environnements, l'acquisition, le traitement de la donnée, etc. Cette simulation s'effectue sur une surface de 600 ha de la zone d'intérêt.

4.4.1 Protocole général de la définition de la zone d'étude

4.4.1.1 Etape 1 : Définition de la zone d'étude et des superficies théoriques possibles à couvrir par drone thermique

Cette étape va consister à définir le maximum de superficie théorique à couvrir selon la zone d'intérêt. Elle est à planifier et à valider en amont avec le gestionnaire ou demandeur de l'étude.

Comme vu précédemment dans les limites pour la végétation/recouvrement végétal dans les forêts de classe « Strate arborée », il n'est pas possible de mener des relevés sur ce type de végétation dont la canopée est généralement trop fermée pour permettre la détection des cerfs dans le sous-bois.

Les strates d'occupation du sol, pertinentes et donc à retenir pour les relevés par drone sont la strate arbustive et herbacées.

Un exemple de cette étape est représenté en vert (clair et foncé) sur la carte ci-dessous (Figure 44Figure 44 :). Les zones en rouge sont les espaces de végétations arborées non prospectables pour l'indice et donc retirées de l'analyse.

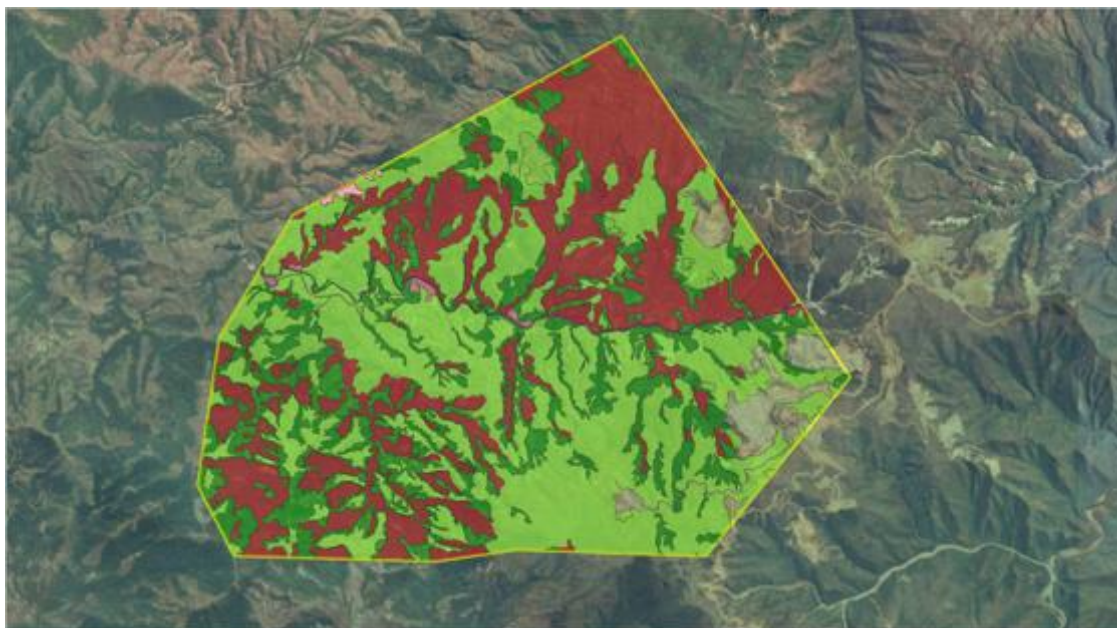


Figure 44 : Exemple de définition de la zone d'étude et des superficies théoriques sur la partie A de la zone prioritaire de Thio avec en rouge la strate arborée, en vert foncé la strate arbustive et en vert clair la strate herbacée. Données récupérées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (<https://georep.nc/explorateur-cartographique>).

4.4.1.2 Etape 2 : définition des zones de survol réelles selon les possibilités techniques et logistiques

Une fois la définition théorique du périmètre d'étude, une phase de prospection est nécessaire sur la zone d'intérêt afin de se rendre compte du terrain, des risques de l'environnement pour le drone (risques air et sol, perte de connexion) ainsi que de l'accessibilité de la zone. Toutes les possibilités d'accès (4x4, à pied, ouverture de piste) doivent être prospectées afin d'avoir la meilleure couverture possible de la zone et pouvoir mettre en place la sélection des missions de vol.

A l'aide des données acquises lors de la phase de prospection, un maillage des différentes missions de vol est créé. Une fois le secteur de survol bien défini et couplé avec les possibilités techniques et logistiques, une carte générale des périmètres où il est possible réellement de réaliser l'indice d'abondance sur la zone d'intérêt est alors obtenue et va servir de base pour éditer les plans de vol.

Si le périmètre général de survol possible sur la zone ne peut pas être sélectionné pour diverses raisons, une dernière étape de « sélection aléatoire des plans de vol » peut être réalisée.

Pour cette étape, plusieurs contraintes sont à prendre en considération, soit:

- Les besoins du gestionnaires (objectif, zone à couvrir),
- La couverture des différentes strates végétales,
- L'accessibilité pour les zones de décollages/atterrissage du drone,
- La topographie de la zone pour l'intervisibilité entre le télépilote et le drone (communication),
- La distance horizontale réglementaire (dans cette simulation on prend 1100 m).

Pour cela, une partition des secteurs de vol par une grille composée de mailles carrées a été générée, cette grille est dotée des caractéristiques suivantes :

- Elle a des dimensions adaptées aux capacités du matériel d'investigation (drone) ;
- Elle est pérenne (nul besoin de la régénérer à chaque nouvelle mission/zone d'étude) ;
- Elle intègre les données de mode d'occupation du sol (MOS2014 de la DITTT) afin de pouvoir sélectionner le pourcentage de classe sur la zone que le gestionnaire voudra couvrir (600 ha de strates non arborées) ;
- Elle intègre les données d'accessibilité pour la bonne réalisation des missions de vol.
- Elle intègre l'intervisibilité afin que la communication entre le télépilote (radiocommande) et le drone ne soit pas perdue avec le relief (topographie). sur les zones de décollage possibles (définies par les accès) et selon les limites de distance horizontale réglementaires (ici 1100 m).

Représentation de l'intégration dans le maillage de :

➤ **L'occupation du sol :**

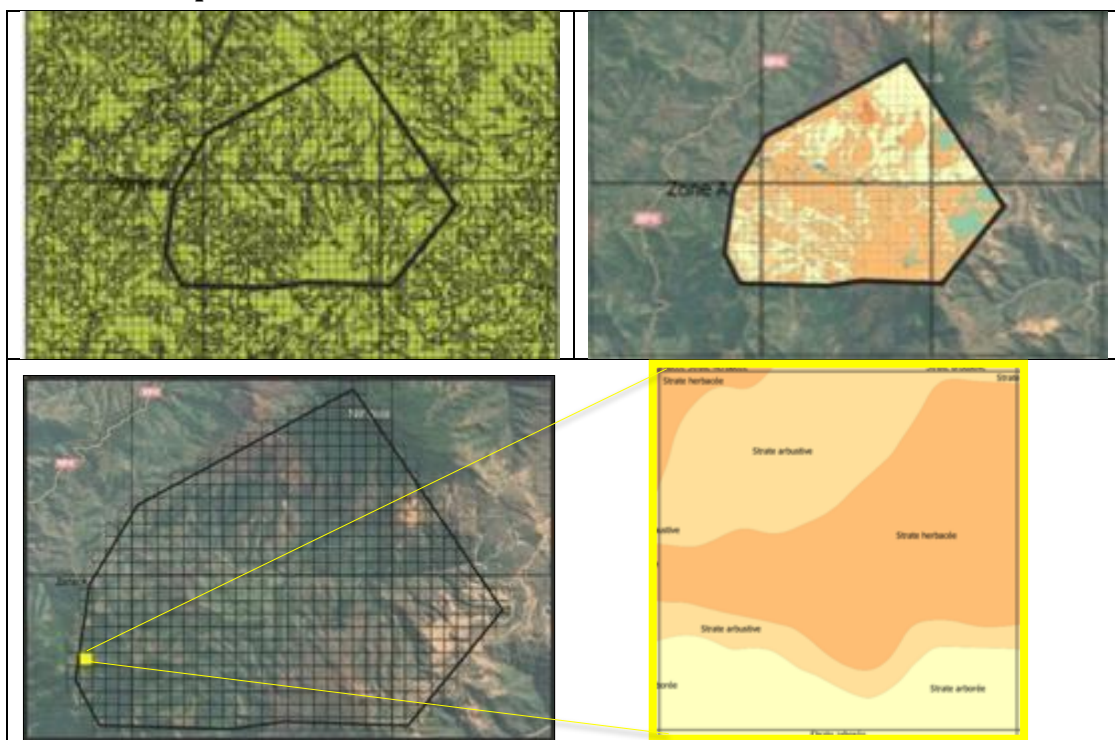


Planche photos 13 : Représentation de l'intégration dans le maillage de l'occupation du sol sur la partie A de la zone prioritaire de Thio.

➤ **L'accessibilité :**

Afin de déterminer les espaces accessibles, les données routières (routes et pistes d'accès) issues de la base de données routières de la DITTT⁵ (BDROUTENC⁶) sont utilisées. Ces données sont vérifiées voir complétées selon celles observées lors de

⁵ Direction des Infrastructures, de la topographie et de transports terrestres

⁶ « La BDROUTE-NC décrit de façon vectorielle les caractéristiques des infrastructures routières du territoire. », cf. « spécifications de contenu de la base de données routière (BDROUTE-NC V1) ».

la phase de prospection. Les secteurs accessibles à la fois en véhicule et à pieds sont représentées sur une carte.

La Figure 45 ci-dessous est un exemple de l'accessibilité de la zone A établie avec les données routières de la BDROUTENC (en blanc) et celles observées lors de la phase de prospection (en bleu pour les accès véhicules et en rouge pour les accès à pieds).

Plusieurs secteurs sont définis (A-1, A-2 A-3 et A-4) afin de comparer les données et relever d'éventuelles discordances.

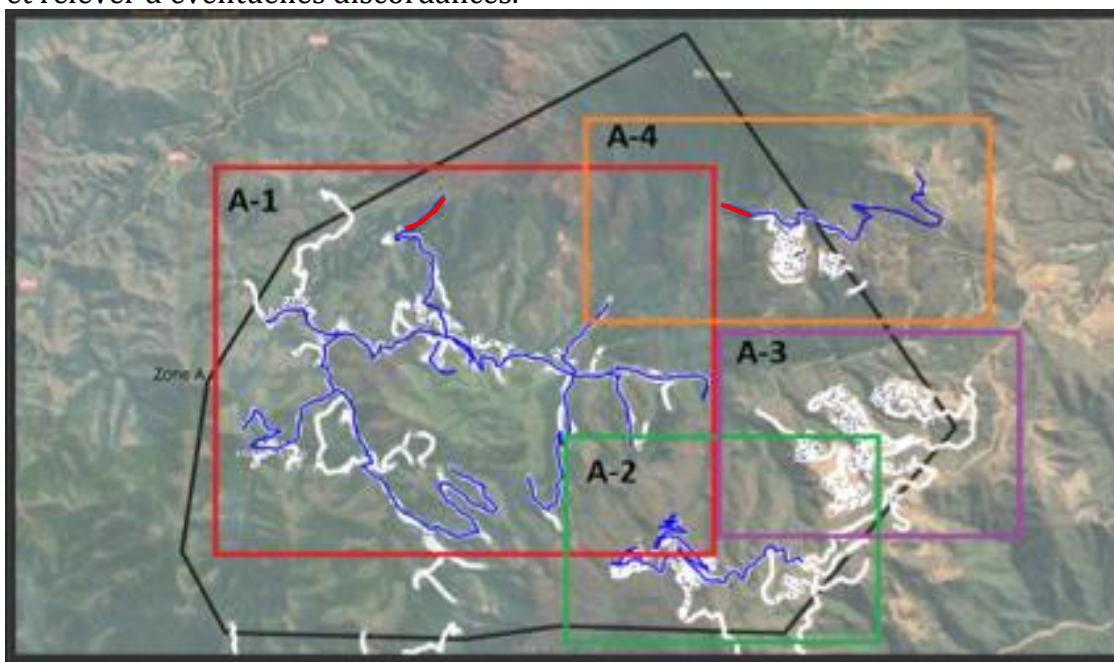


Figure 45 : Accessibilité de la partie A de la zone prioritaire de Thio établie à partir des bases de données routières et de la prospection terrain.

A l'aide des données des secteurs accessibles et en tenant compte du rayon d'action du drone de 1100 m (distance autorisée dans cette étude), un taux d'accessibilité (en véhicule et à pieds) est calculé et intégré dans le maillage.

La figure 8 ci-dessous, est un exemple d'intégration de l'accessibilité sur le maillage établie sur la partie A de la zone de Thio. Les lignes noires représentent les voies de communication et la surcouche beige représente les secteurs d'action possibles de survol du drone à partir des voies accessibles en voiture et à pieds.

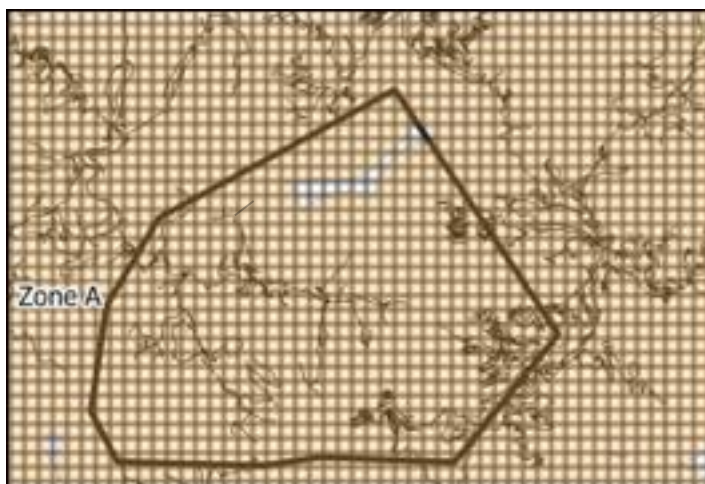


Figure 46 : Cellules accessibles sur la partie A de la zone de Thio par drone d'un rayon d'action de 1100 m et en tenant compte des différents accès (véhicule et à pieds).

Le taux d'accessibilité des cellules en véhicule et à pieds est de 99,84% pour la zone A (635 /636 cellules) d'après les différentes données acquises (théoriques et terrain).

Ce taux d'accessibilité ne permet pas d'évaluer l'accessibilité réelle des cellules. Il est important de tenir compte en plus de l'intervisibilité entre le drone et le télépilote.

➤ **L'intervisibilité et limites de distance horizontale :**

Parmi les contraintes majeures dans la détermination du plan de vol des missions, il figure l'obligation pour le télépilote de conserver un visuel et la communication direct entre la radiocommande (télépilote) et le drone.

La topographie des lieux va considérablement influencer les conditions de visibilité et de communication, sa prise en compte est donc indispensable pour évaluer l'accessibilité des cellules.

Le « bassin » de vision (champ de vision) du télépilote lorsqu'il est positionné sur les sommets accessibles est déterminé. L'union de l'ensemble des bassins de vision va représenter l'espace sur lequel le vecteur (drone) pourra évoluer en demeurant visible et en lien radio pour le télépilote.

Les calculs prennent en considération de nombreux paramètres dont : les points où se situe le télépilote, la hauteur à laquelle va évoluer le vecteur (drone), la distance maximale séparant le télépilote du vecteur, le modèle numérique de terrain...

Pour illustrer le concept, un exemple sur un site en ligne de crête et pouvant être atteint depuis les voies de communication de la partie A de Thio est présenté en Figure 47. Le télépilote, positionné sur ce site, fait évoluer le vecteur jusqu'à une distance de 1,1 km et à une hauteur de 90m.

L'intervisibilité calculée est représentée sur la Figure 47.

- Le télépilote est positionné au niveau de la croix rouge (Figure 47) ;
- La surface bleue représente toutes les zones de survol pour lesquelles le vecteur (drone) est visible et en communication pour le télépilote.

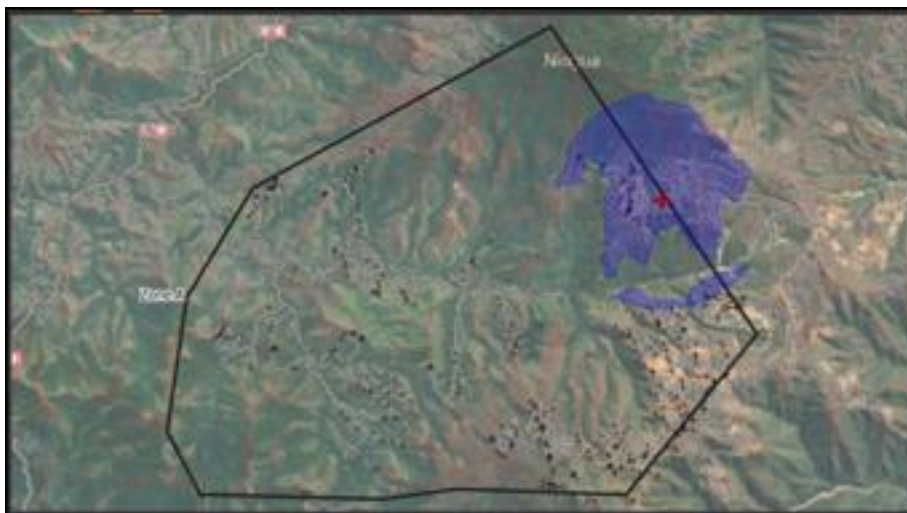


Figure 47 : Intervisibilité depuis un point particulier en crête de la partie A de la zone prioritaire de Thio.

On peut remarquer une zone non couverte au sud de la croix rouge. Schématiquement, il s'agit d'une vallée dans laquelle le drone (bien qu'évoluant à 90 m de hauteur) ne sera plus visible.

La figure ci-dessous indique la position du drone (croix bleue), la position du télépilote (croix rouge) et la zone sans visibilité (en orange). La ligne de visée directe entre le télépilote et le drone est obstruée par le relief (Figure 48).

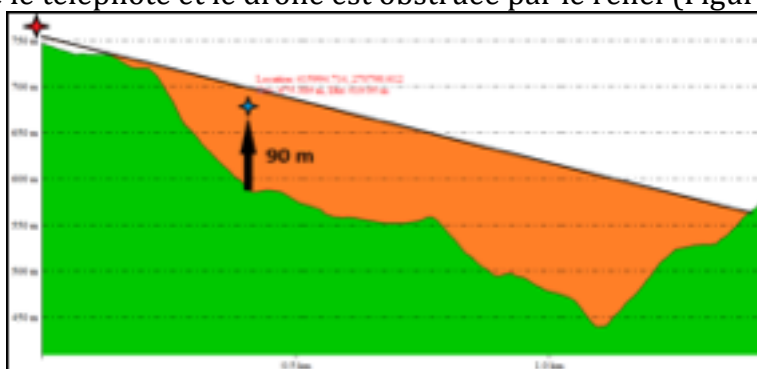


Figure 48 : Exemple d'obstruction de la ligne de visée par le relief (vallée)

Si on applique cette procédure à l'ensemble des 646 sommets accessibles depuis les voies de communication, on obtient une représentation de l'accessibilité prenant en compte la topographie (Figure 49). Les surfaces bleues représentent les zones de survol pour lesquelles le vecteur (drone) est visible pour le télépilote.

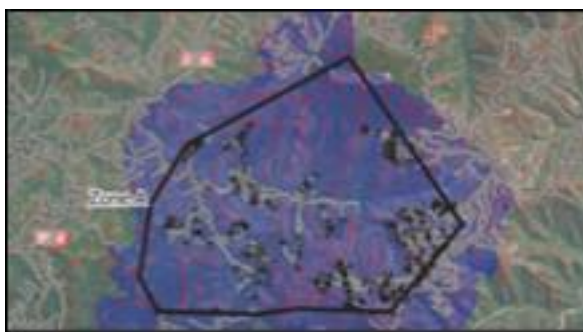


Figure 49 : Intervisibilité sur le site de Thio (partie A). Les paramètres sont : une distance entre le télépilote et le vecteur de 1,1km maximum et une hauteur de vol du vecteur de 90m.

❖ **Compilation accessibilité et intervisibilité**

En compilant les secteurs accessibles en voiture (route, pistes) et à pieds ainsi que l'intervisibilité, une réévaluation des cellules accessibles est réalisée (Figure 50). Une cellule pour être accessible devra répondre aux deux conditions suivantes :

- à moins de 1100m du réseau routier (en véhicule et/ou à pieds) ;
- visible depuis au moins l'un des sommets définis sur les lignes de crête.



Figure 50 : Cellules accessibles sur le site de Thio (partie A) en tenant compte de l'ensemble des contraintes.

En prenant en considération le réseau routier et pédestre, ainsi que la topographie (intervisibilité), le taux d'accessibilité des cellules est de 99,84% pour la zone A (635/636 cellules).

D'après cette analyse, la zone d'étude peut être couverte sur sa globalité avec le drone et donc la sélection aléatoire des missions pour couvrir 600 ha va pouvoir être programmé sur toute sa surface.

4.4.1.3 Etape 3 : Sélection des secteurs de vol dans la grille selon les différentes contraintes

❖ **Sélection volontaire**

La sélection des secteurs de vol dans la grille dans le but d'éditer les différents plans de vol sur la zone d'étude peut s'avérer volontaire dans plusieurs situations :

- Le périmètre survolable, défini selon les accès et l'intervisibilité, peut être entièrement prospecté par drone par volonté du commanditaire;
- Exclusions ou sélections de secteurs par le commanditaire en fonction de ses besoins (secteurs de forte régulation, valeurs environnementales de certains secteurs, concentrations de cerfs connues par les résidents et chasseurs, etc...).

❖ **Sélection aléatoire**

Si le commanditaire ne dispose d'aucune priorisation entre les différents secteurs retenus et que la surface totale de la zone ne peut être survolée complètement, une sélection aléatoire est alors appliquée.

Pour cette étape, un système de sélection aléatoire de secteurs de vol a été conçu. Il tient compte simultanément des différentes contraintes citées précédemment soit les strates, l'accessibilité, l'intervisibilité entre le drone et le télépilote ainsi que la distance horizontale du drone.

A partir de la grille, une sélection aléatoire des cellules a été réalisée afin de couvrir la surface ciblée de strate arbustive et herbacée tout en tenant compte de l'accessibilité, de l'intervisibilité et des distances réglementaires du drone.

Pour cela, un script a donc été utilisé pour sélectionner aléatoirement les groupes de cellules et obtenir ainsi la sélection de plusieurs missions pour une surface totale défini par le commanditaire.

Comme vu précédemment dans ce rapport (paragraphe 4.2.3), une mission type sur cette zone prioritaire (fort dénivelé = protocole P2) va couvrir environ 50-60 ha. Donc pour optimiser le vol, un ou plusieurs groupes ont été sélectionnés avec les caractéristiques suivantes :

- Un groupe est obligatoirement composé de 9 cellules (chaque cellule a pour dimension 250m*250m soit 6,25ha) ;
- La configuration d'un groupe est [3 cellules*3 cellules], cela afin de couvrir une zone de 750m*750m soit environ 56 hectares ;
- Les **paramètres** et **contraintes** permettent d'affiner le processus de sélection des groupes.

La Figure 51 ci-dessous est un exemple généré par le script. Un total de 11 missions de 60 ha a été généré par notre système. Un plan de vol pour chacune de ces 11 missions est ensuite édité puis prospecté selon le protocole d'acquisition de la donnée établi dans cette étude de faisabilité (dans le cas de Thio protocole P2).

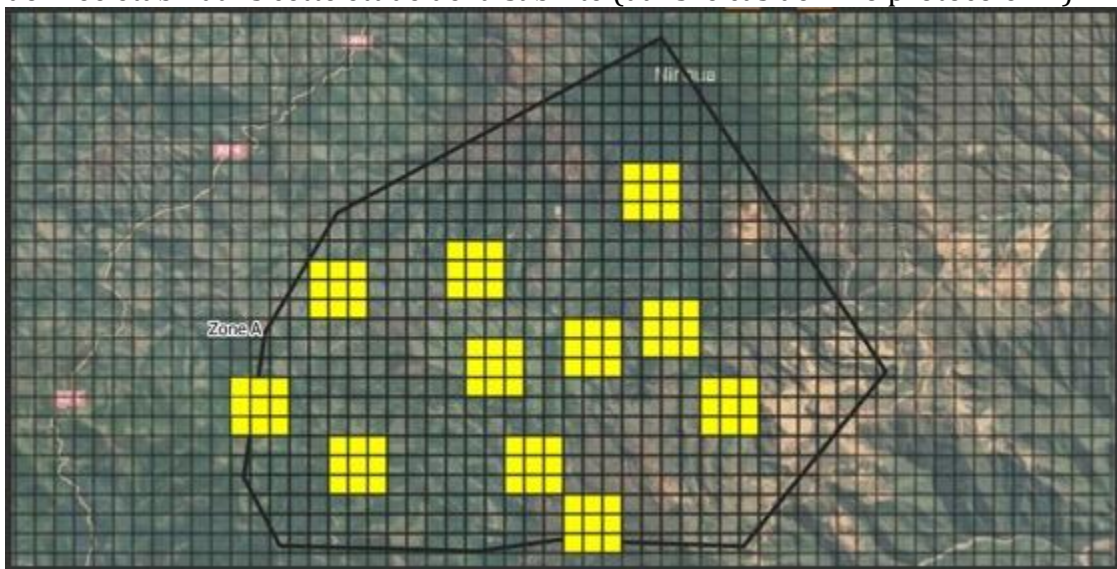


Figure 51 : Sélection aléatoire des cellules par groupes de (3*3) partie A de la zone prioritaire de Thio

Dans ce système, des contraintes, qui permettent d'optimiser la sélection et donc la réalisation des missions de vol, ont été volontairement intégrées:

- Les zones de vol ne peuvent pas se superposer ;
- La taille des plans de vol est adaptée aux capacités [autonomie] du vecteur drone (la surface d'une zone de vol est de l'ordre de 50-60ha) ;
- Seuls les sites accessibles et répondant aux protocoles et règles de survol en vigueur peuvent être sélectionnés (par exemple : le drone/vecteur doit toujours être visible pour le télépilote).

4.4.2 Autorisations règlementaires et coutumières pour les vols de nuit sur la zone

Pour réaliser cette mission plusieurs dérogations, procédure et autorisations sont nécessaires soit :

- Dérogation de vol de nuit pour la zone (demande à la DGAC avec document à remplir et à retourner au moins 3 semaines avant la date de vol prévue),
- Dérogation de la hauteur de vol sur la zone (120 m sol en vol et 250 m sol en cas de RTH=Return To Home=« retour automatique au point de décollage »),
- Dérogation de la distance de vol horizontale (1800 m entre le télépilote et le drone),
- Procédure risque AIR avec émission d'une information aéronautique (NOTAM= Notice to AirMen= « messages aux navigants aériens »), pour la zone de vol concernée. Procédure mise en place avec le service de l'aviation civile concerné (SNA : Service de la Navigation Aérienne),
- Procédure risque sol (Habitation dans les alentours, Tribus),
- Autorisations coutumières.

4.4.3 Edition des missions et redondance/reproductibilité du protocole mise en place sur zone

A partir de la carte des différents secteurs de vol sélectionnés volontairement ou par notre méthode de sélection aléatoire en fonction des contraintes (Figure 51), les différents plans de vol sont alors édités à partir de l'application de programmation automatisé de mission du drone.

Pour chacune des missions, un plan de vol est programmé en mode balayage de zone et suivi de terrain avec les paramètres adaptés, testés et validés par 2 protocoles tributaires des contraintes de terrain rencontrées (contraintes de dénivelés et de végétation).

Pour rappel, les 2 protocoles « idéaux » retenus sont :

- Protocole 1 : adapté en zone plane et ouverte ;
- Protocole 2 : adapté en zone à fort dénivelé en zones arbustives/arborée plus ou moins dense (cas des zones prioritaires).

Tableau 10 : Paramètres des plans de vol selon le protocole d'échantillonnage P1 (en zones planes, peu boisées à totalement ouvertes) et P2 (en zones arbustives/arborée plus ou moins dense et/ou dénivelé important).

Edition des missions, paramétrage	Type de plan de vol	Hauteur	Angle caméra	Vitesse de vol	Espacement des lignées	Tolérance hauteur de vol	Périmètre/forme de la mission
Protocole P1	Balayage de zone en suivi de terrain	70 m	- 50°	8 -10 m/s	80 m	8 m	Forme rectangulaire ou carré à privilégier
Protocole P2	Balayage de zone en suivi de terrain	90 m	- 90°	8 -10 m/s	70 m	8 m	Contour de mission en polygone défini par la topologie du milieu, lignes de crêtes, la communication avec le drone et la réglementation (distance télépilote drone), forme rectangulaire ou carré à privilégier si possible

Un exemple de la représentation des différents plans de vol (P2), définis à partir de la sélection aléatoire sur la partie A de la zone prioritaire de Thio (Figure 51), est présenté ci-après (Figure 52).



Figure 52 : Représentation des différents plans de vol de la partie A de la zone prioritaire de Thio. Missions éditées à l'aide de l'application de programmation de plan de vol automatisé et basées sur l'emplacement théorique de sélection aléatoire.

Pour un suivi de l'abondance aérienne sur la zone d'étude, il est primordial que le plan d'échantillonnage soit reproductible à l'identique d'une session à une autre, afin de permettre une comparaison temporelle fiable.

Du moment que les fichiers d'édition de mission d'origine sont bien conservés, les différentes missions pourront être rejouées avec la même précision géographique.

Il est donc important pour la reproductibilité du suivi, de réaliser des doubles (voir triples) sauvegardes des fichiers sources sur des supports numériques différents (Application du drone utilisée, clé USB, disque dure externe, ...) afin de ne pas perdre les plans de vol mis en place à l'origine.

Pour la reproductibilité du protocole et donc une comparaison robuste des indices au cours des suivis, il est essentiel aussi de respecter la même période d'échantillonnage.

Remarque : Si un drone différent de celui de l'étude est utilisé par la suite pour la réalisation des plans de vol au cours d'un suivi, il est important que le capteur ait la même focale (empreinte au sol similaire). Dans le cas contraire, les espacements entre les lignées et donc les plans de vol devront être ajusté en fonction des caractéristiques du nouveau drone et de son capteur thermique.

4.4.4 Lancement des vols selon protocole et paramètres bien définies et acquisition de la donnée

Une fois les plans de vols édités et que toutes les autorisations sont obtenues, la phase de terrain peut alors être planifiée durant la période optimale (voir paragraphe 3.3.4.2). Chacun des plans de vol est opéré à partir des accès et des aires de décollage/atterrissage inventoriés ultérieurement lors de la phase de prospection et de sélection des différentes missions.

Durant les vols, toutes les procédures pour le risque air et sol sont scrupuleusement respectées. En plus du télépilote, la réglementation exige une autre personne durant les missions de vol (spotter), afin de garder le drone en vue durant toute la phase de vol du drone. Cette personne n'a pas nécessairement besoin de compétence.

Le lancement des vols doit, par sécurité, impérativement tenir compte des conditions météorologiques et des limites machines. Les bonnes conditions ou non de vol afin de choisir de lancer ou non la mission sont synthétisées dans le Tableau 11 ci-après. Si une seule des situations de mauvaises conditions de vol est rencontrée lors du lancement de la mission, le vol doit être annulé et repoussé ultérieurement, lorsque les conditions météorologiques seront favorables au vol drone.

Tableau 11 : Synthèse des conditions météorologiques favorables ou non pour la réalisation des vols drone en toute sécurité selon les limitations machine du drone utilisé au cours de cette étude.

Bonnes conditions (vols réalisés)	Mauvaises conditions (vols annulés)
➤ Beau temps, ciel dégagé, absence de vent, ➤ Temps nuageux sans précipitation ni vent, ➤ Beau temps ou temps nuageux avec vent faible (10 knts) à modéré (20 knts) continu et/ou pluie légère.	➤ Brouillard brume, plafond nuageux très bas (à hauteur de vol du drone), ➤ Pluie modérée à forte > à 7 mm/h, ➤ Vent fort > à 20 knts.

Avec un jeu de batterie (correspondant à une mission de vol), une moyenne de 80-90 ha peuvent être survolés en 30-35 min par le drone (Tableau 12), avec le protocole P1 (zones planes et ouvertes).

Avec le protocole P2 (zones avec fort dénivelé et/ou végétation du type arbustive ou arborée dense), une moyenne de 50-60 ha peuvent être survolés en 20-25 min par vol.

Tableau 12 : Caractéristiques techniques de vol avec le protocole d'échantillonnage P1 (en zones planes, peu boisées à totalement ouvertes) et P2 (en zones arbustives/arborée plus ou moins dense et/ou dénivelé important) pour le drone Matrice 300 RTK avec capteur thermique H20T.

Caractéristiques techniques	Temps de vol effectif possible en un vol (*)	Superficie moyenne de la mission	Algorithme de détection des individus
Protocole P1	30-35 min	80-90 ha (selon condition météo, sans vent, 100 ha sont possible)	Totalement automatisé (reconnaissance de forme possible), présence humaine négligeable
Protocole P2	20-25 min	50-60 ha	Semi-automatisé (pas de reconnaissance de forme, présence humaine non négligeable dans l'identification)

* selon dénivelé, distance de la zone de décollage et marge de sécurité batteries 20 % avec drone matrice 300 RTK et capteur H20T

Avec notre matériel actuel (6 jeux de batteries), nous sommes en mesure d'effectuer 6 vols complet (sans recharge) en 3-4 h pour les 2 types de protocole,

soit une superficie total survolée entre 300 et 540 ha selon les contraintes de terrain et le type de protocole opéré.

Il est possible de réaliser beaucoup plus de vols en une soirée (jusqu'à 12, voir plus selon la logistique) mais une étude spécifique sur l'intérêt et l'optimisation des meilleurs créneaux horaires de détection du cerf par drone serait à planifier (selon son activité sur une nuit complète et les biais éventuels associés à ses déplacements).

Une fois l'acquisition réalisée, il est important de sauvegarder la mission opérée après chaque vol en cas de crash du drone. En effet, selon la zone du crash éventuel du drone, toutes les données acquises auparavant pourraient ne pas être récupérables.

4.4.5 Traitement de la donnée sur QGIS, comptage manuel ou par algorithme semi-automatique (P2)/automatique (P1)

Une fois l'acquisition des données réalisées et enregistrée sur un support numérique, le comptage à l'aide des vidéos prises au cours des vols est ensuite réalisé sur ordinateur à l'aide de la plateforme QGIS FMV.

Dans un premier temps, les fichiers SRT associés à chacune des vidéos sont convertis afin que les fichiers vidéo puissent être lus dans l'extension QGIS FMV (Voir paragraphe 3.4.2).

Les vidéos sont ensuite lues dans QGIS FMV (Figure 53) ou dans l'algorithme par un opérateur. L'opérateur ou l'algorithme de détection semi-automatique (pour P2)/automatique (pour P1) exécute alors le comptage des cerfs détectés sur les vidéos.

Rappelons que dans le cas des zones prioritaires du commanditaire de l'étude, l'application du protocole P2 (angle caméra à -90°) contraint à l'utilisation d'un algorithme semi-automatique (détection de points chauds uniquement) du fait des paramètres de vol non adaptés à la reconnaissance de forme.

Une double vérification du comptage est conseillée sur l'ensemble de la vidéo afin de vérifier qu'il n'y a pas d'erreur. Pour le comptage manuel une autre personne que l'opérateur est sollicité.

A partir du nombre total de cerfs détectés sur chaque mission et de la surface totale prospectée par le drone (surface informée dans l'application de programmation de mission ou par QGIS FMV), l'indice d'abondance peut alors être exprimé en effectif de cerfs brut ou en densité (effectif/ha ou effectif/km²).

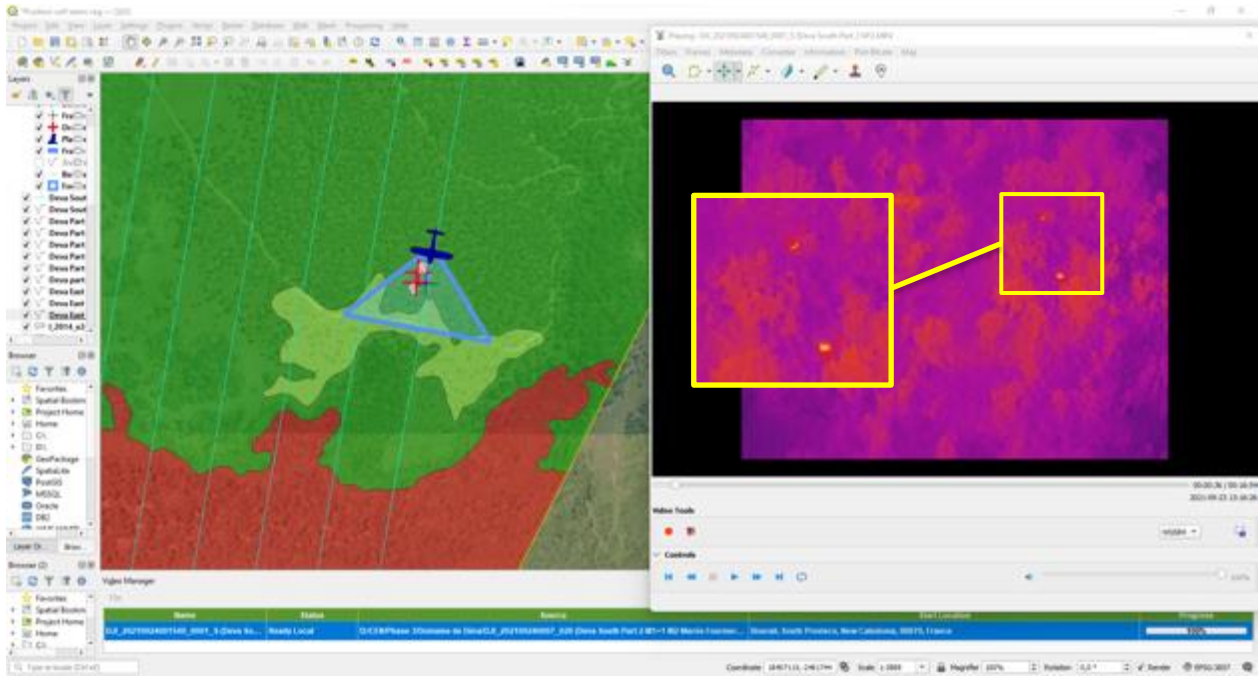


Figure 53 : Exemple du traitement, à l'aide de QGIS FMV, de la vidéo acquise par drone avec capteur thermique.

Cette synthèse, présentée ci-dessous sous forme d'un tableau, résume les avantages et inconvénients/limites de l'IAAD. Elle a été réalisée grâce aux différentes informations détaillées dans les différentes phases de l'étude.

Tableau 13 : Synthèse générale des avantages et inconvénients (limites) de l'IAAD-NC

Composantes de l'IAAD NC	Avantages	Limites	Remarques
Faisabilité générale de l'indice sur zones prioritaires	Tests concluants dans la détection des cerfs en conditions de dénivelés importants et en végétation plus ou moins dense.	Tests de cette étude réalisés seulement sur une petite partie d'une zone prioritaire et en période la moins favorable pour la méthodologie (chaleur de l'été et saisonnalité du cerf non favorables pour les tests)	Réaliser des tests plus poussés sur les zones prioritaires et en période optimale pour le cerf et la méthodologie.
	Très efficace sur végétation du type herbacée et arbustive.	Non adapté en milieu arboré à canopée fermée.	Étude d'investigation sur l'occupation du sol des zones d'étude serait nécessaire afin d'exclure les secteurs de végétation non compatibles.
Qualification nécessaire	Diplôme de télépilote drone professionnel plus abordable financièrement et plus simple que le diplôme de pilote d'avion (PPL).	Formation obligatoire en tant que télépilote professionnel. Formation à prévoir sur plusieurs jours, disponibilité du personnel à former, Coût de la formation non négligeable (250 000 CFP/pers).	Plusieurs structures de formation sur Nouméa.
Règlementation/législation drone pour opérer avec les drones	En tant que professionnel, les limites réglementaires (hauteurs et distances horizontales limites, zones interdites, ...) peuvent être assez facilement dérogeables selon la rigueur en termes de sécurité au travail de l'exploitant drone (généralement connue de la DGAC).	Démarches réglementaires pouvant être lourdes à gérer selon la zone et l'expérience du demandeur.	Selon l'exploitant et son expérience cette partie réglementaire peut aller beaucoup plus vite.
		Législation française très contraignante avec les drones. Prends du temps et n'est pas à négliger dans les études. Plusieurs documents à remplir et à envoyer sont nécessaires.	Démarches facilitées pour une nouvelle session de suivi déjà réalisé (mêmes missions réalisées).
		Déroptions aux scénarios standards de vol (altitude, distance horizontale, vol de nuit,...) peuvent prendre du temps selon la demande (minimum 2 semaines à plusieurs semaines).	
Drone multiréacteur	Comptage en aérien par drone très performant comparé au comptage au sol et tout particulièrement en zone peu accessible à pied ou en véhicule du fait qu'il peut voler à 1 km hors vu du télépilote, voir plus avec demande de dérogation.		
	Drone multiréacteur adapté aux zones avec fort dénivelé et difficiles d'accès.	Autonomie néanmoins réduite selon les conditions de terrain (dénivelé et/ou vent fort).	Il peut être envisageable de s'équiper avec plusieurs batteries et d'un chargeur sur site d'intervention.
	N'entraîne pas de comportement de fuite des animaux à hauteur de vol supérieure à 50 m.		
	Drone est plus facile à piloter contrairement à un avion. Prise en main rapide et drones équipés de nombreuses sécurités.	Objet volant pouvant être dangereux en cas de crash donc rigueur de mise dans les checks pré-vol, l'entretien et la maintenance à faire régulièrement par télépilote (appareil, batteries et capteur).	Engager un spotter pour les missions.
	Coûts moindre pour du comptage aérien comparés à un aéronef habité avec plusieurs personnes à bord (Pilote + observateurs).	Nécessité de plusieurs jeux de batteries et en cas de nombreux vol d'une station de recharge avec du 220V.	
	Outil plus sécuritaire qu'un aéronef habité en cas de crash.	Malgré son faible poids comparé à un aéronef habité, très dangereux si le drone tombe sur une tiers personne (bien prendre en compte durant mission les moyens d'exclusion des tiers dans les procédures de sécurité)	
	Logistique et manipulation beaucoup plus facile qu'un aéronef habité	Néanmoins beaucoup de petit matériel dont ordinateur, caisse du drone, batteries,... donc nécessité parfois de porteurs si les accès se font à pied sur une longue distance.	
	Transportable sur différentes zones même à pied en zone avec fort dénivelé		
Capteur thermique	Capteur thermique très performant pour détecter les animaux à sang chaud (comme le cerf) de nuit en milieu ouvert ou semi-ouvert.	Artefacts possibles selon les objets présents sur la zone (objet comme roches, cailloux) ayant accumulés le rayonnement du soleil (chaleur) pendant la journée. Besoin d'attendre qu'ils se refroidissent.	Néanmoins quand des animaux sont présents au milieu de ces artefacts, il est possible de les différencier du fait de leur signature thermique plus intense (corps plus chaud que les objets).
Applicabilité du protocole selon conditions climatiques	Possibilité de voler et d'acquies de la donnée en condition de visibilité réduite (de nuit) avec ce type de protocole.	Besoin de systèmes d'éclairages spécifiques de nuit pour être repéré de loin par les autres aéronef (réglementation).	
	Possibilité de voler exceptionnellement dans les limites de vent et de pluie (si pluie modérée en mission, elle peut être terminée) mais éviter de lancer une mission s'il pleut déjà.	Limite de vent (20-25 kts) et de pluie (7 mm/h max).	
Stratégie d'échantillonnage et édition des missions	Mission programmable en amont du terrain et entièrement automatisée.	Planification et exécution approprié des missions par personne compétente.	Détention des plans de vols des précédentes missions si elles ont déjà été réalisées.
	Logiciels d'édition de mission très accessible et performant		
	Protocole entièrement reproductible pour un suivi dans le temps.	Ne pas oublier de sauvegarder les plans de vol pour les fois suivantes.	
	Adaptabilité du protocole selon les conditions de terrain		
	Repérage des accès déjà présents pour la mise au point de la stratégie d'échantillonnage afin de couvrir un maximum de zone.	Contraintes liées à l'accessibilité et l'intervisibilité entre le drone et le télépilote selon les zones d'étude, à bien prendre en compte dans la stratégie d'échantillonnage mis en place.	
	Mission en mode Balayage de zone en suivi de terrain très performant en zone difficile avec fort dénivelé (zone prioritaire) et très facilement programmable/édité.	Suivi de terrain dans zone à fort dénivelé consomme de la batterie (autonomie réduite) 20-25 min de vol au lieu de 30 à 35 min en zone plane.	
Période d'échantillonnage (saisonnalité) et créneaux horaires	Météo et saisonnalité du cerf bien marquée avec une période optimale notable pour les suivis en saison fraîche et longue saison sèche lorsque les températures sont les plus fraîches de l'année (meilleur contraste entre les cerfs et leur environnement pour le capteur thermique).	Suivi optimal sur 3 mois de l'année.	Il serait intéressant de tester l'effet de lune sur le protocole ou d'éviter les pleines lunes au cours desquelles les cerfs apparaissent plus vigilants.
		Effet éventuelle de la lune possible sur l'activité des animaux et sur le capteur thermique (rayonnance de la lune sur objets).	
	Activité nocturne du cerf = meilleure contraste qu'en journée entre les animaux et leur environnement avec le capteur thermique et donc meilleure détection.	Travail de nuit plus contraignant qu'en journée (fatigues et logistique).	
		Aucun recul sur le meilleur moment de la nuit où l'activité du cerf est optimale malgré que le début de nuit semble plus favorable d'après nos observations.	Faire une étude plus approfondie, en saison optimale, sur le meilleur moment de la nuit pour l'activité du cerf.

Tableau 14 : Synthèse générale des avantages et inconvénients (limites) de l'IAAD-NC (suite)

Composantes de l'IAAD NC	Avantages	Limites	Remarques
Acquisition sur le terrain de la donnée en vidéo thermique	Vidéo beaucoup plus performante que la méthode classique par orthophotos.	Données vidéo pouvant être lourdes à traiter.	Automatisation par algorithme automatisé de détection et de comptage des animaux.
	Grace aux missions entièrement automatisées, l'acquisition est très facile, le pilotage manuel pouvant entraîner des biais dans l'acquisition.		
	En un seul vol (20-25 min en zone à fort dénivelé), le drone peut couvrir 60 ha en moyenne avec l'application du protocole mis en place.	Pour une grande zone d'étude (plusieurs centaines voire milliers d'hectare), de nombreuses missions doivent être opérées pour couvrir toute la zone, l'autonomie batteries limitée et la législation (distance horizontale règlementée) sont donc un frein. Nécessité d'un jeu conséquent de batteries et logistique plus compliqué afin de couvrir la zone d'intérêt.	Afin de pallier au problème des batteries, notre bureau d'étude est équipé de 6 paires de batteries (soit 12 batteries) avec 2 stations de charges pouvant accueillir 8 batteries.
	Protocole d'acquisition mis en place permet d'éviter le double comptage entre les lignées.	Les cerfs situés dans les inter-espaces (bien que réduits) ne sont pas dénombrés.	
	Deux protocoles mis en place: P1 pour zone plane et P2 pour les zones à fort dénivelé >10% (adaptabilité du protocole).	Dès 10 % de pente le protocole doit prendre en compte un angle de caméra à 90° ce qui va limiter l'identification des animaux du fait qu'ils ne sont vu que du dessus au lieu du coté (pattes apparentes) et qui va aussi se répercuter sur le comptage automatisé.	
Traitement de la donnée	Gratuité de la Plateforme de traitement utilisé QGIS FMV.	Quelques connaissances nécessaires en installation d'extension sur QGIS car extension FMV de QGIS peut présenter des problèmes lors de son installation automatique et donc il faut réaliser cela manuellement.	Installation par connaisseurs/expert en SIG et avoir un outil informatique avec des performances en conséquence.
	QGIS FMV très bon outil pour traiter de la vidéo géoréférencée, gain de temps conséquent, possibilité d'appliqué ou crée de nombreuses couches SIG facilitant l'analyse et les interprétations.	Extension qui nécessite une amélioration changement dans le codage comme l'empreinte au sol qui n'est pas bonne parfois selon l'angle caméra	Recréer une extension ou avoir les autorisations pour modifier le codage sur le FMV de QGIS
		Faire attention au double comptage lorsque le drone change de direction pour attaquer la lignée suivante. L'opérateur doit être très attentif sur les individus observés lors de ce changement de direction.	
	Comptage manuel possible avec peu de ressources. Coût beaucoup moins chère que la création d'un algorithme.	Temps de comptage manuel très chronophage selon le nombre de missions à traiter (1 à 2h pour un vol de 60 – 80 ha avec forte densité de cerfs). Accumulation de fatigue si traitement de plusieurs vols et donc risque accru d'erreur de comptage. Besoin de faire double, voir triple, vérification par des opérateurs différents.	
	Utilisation possible d'un algorithme semi-automatisé ou automatique pour un gain de temps importants lors de l'identification et le comptage des animaux (traitement 3 à 4 fois plus rapide que du comptage manuel simple) et ainsi éviter des erreurs de l'opérateur liées à la fatigue.	Compétences spécifiques en programmation/codage nécessaires pour créer l'algorithme. Coût important de la réalisation de l'interface.	
		Reconnaissance de forme pas possible lorsque le capteur est à 90°. Cet angle est privilégié en zone plane boisée ou dès qu'il y a du dénivelé.	Étude à réaliser éventuellement pour voir quelle est la limite réelle des choix de l'angle caméra (-50 ou -90°) en fonction du gradient de dénivelé et/ou de celui de la densité de végétation.

4.5 Coûts des différentes étapes de mise en oeuvre de l'indice aérien d'abondance Cerf rusa sur zone prioritaire

Le Tableau 15 ci-dessous présente un exemple des coûts de l'IAAD-NC sur une partie de la zone prioritaire de Thio d'une surface de 600 ha selon 2 scénarios :

- Externalisation de l'étude : travaux réalisés par un prestataire (tarifs de notre bureau d'étude pour ce genre d'étude) ;
- Internalisation de l'étude : travaux réalisés par le gestionnaire (selon tarif brut à l'heure personnel CEN de 3 000 cfp).

Lors de la toute première étude sur cette zone, le coût pour 600 ha s'élève à :

- 1 011 000 cfp (1 685 cfp/ha) si l'étude est externalisée ;
- 646 000 cfp (1 077 cfp/ha) + investissement matériel de 16 900 000 cfp si l'étude est internalisée.

Lors de sessions suivantes sur les mêmes missions de vol, le coût est le suivant :

- 702 000 cfp (1 170 cfp/ha) en externalisation ;
- 392 000 cfp (653 cfp/ha) en internalisation.

Comme on peut le voir d'après ces coûts, lorsque la zone est étudiée pour la première fois, son étude demande beaucoup plus d'étapes et donc un coût plus conséquent que si la même zone est de nouveau suivie dans le temps. En effet, certaines étapes comme l'étude de site, la mise en place de la stratégie d'échantillonnage ne sont plus à faire par la suite et donc réduit les coûts. De même en internalisation, l'achat du matériel et la création des algorithmes pour réaliser pour la première fois ce genre d'étude ont un coût très conséquent au départ. Par la suite, ces achats ne sont plus à refaire pour les études suivantes, ce qui diminue considérablement le coût de la mission par la suite (étude de suivi).

Remarque : il est important de ne pas appliquer le coup à l'hectare de cette simulation présentée ci-dessus et l'extrapoler sur d'autres zones d'études car selon la taille de la zone d'étude, le lieu (temps de déplacement sur zone) ou autres contraintes, certaines sous-étapes pourraient être très différentes et engendreraient des coûts très différents.

Par exemple, plus on va faire d'hectare sur une zone et plus le coût à l'hectare va diminuer car seul le temps de vol drone va réellement changer (augmenter) alors que la majorité des autres étapes (étude de site, prospection, démarches réglementaires, déplacements, etc...) vont rester inchangées.

Inversement, sur des zones prioritaires avec des distances de déplacement plus longues (par exemple le Mont Panié), le coût pour 600 ha et donc le coût à l'hectare seront plus élevés à cause de la logistique (déplacement sur site, logement, essence véhicule, ...) qui sera plus couteuse.

Etapes de l'IAAD-NC	Sous-Etapes	Compétences nécessaires	Fréquence	Externalisation				Internalisation			
				Qté unité d'œuvre	unité (en h ou km)	Prix unitaire	Montant HT XPF	Qté unité d'œuvre	unité (en h ou km)	Prix unitaire	Montant HT XPF
Formation nécessaire	Diplôme de télépilote drone professionnel	Non	une seule fois	1	0	0	0	1	2	250 000	500 000
Etude de site: Définition et prospection de la zone d'étude pour accès, étude aéronautique et environnement, aires de décollage/atterrissage, ...	Definition de zones avec expert locaux (définitions des zones avec différents types de végétations et de recouvrements). Cartographies. Analyses Topographique.	Compétence SIG	une seule fois	1	4	10 000	40 000	1	8	temps personnel CEN	24 000
	Prospection de la zone d'étude pour vérifier les accès et les points de décollage du drone	Compétence en mission drone	une seule fois	1	8	10 000	80 000	1	8	temps personnel CEN	24 000
	Déplacement: Véhicule frais kilométrique essence comprise (Aller retour Nouméa ZP 240 km d'après Google Map à 70 cfp/km selon Grille tarifaire NC) + déplacements sur sites (20 km/jours environ soit 20 km) 260 km au total	Aucune	une seule fois	1	300	70	21 000	1	260	temps personnel CEN	13 000
	Frais personnel déplacement	Aucune	une seule fois	1	3,0	6 000	18 000	1	3,0	temps personnel CEN	9 000
Démarches réglementaires	Préparation dossiers règlementaires et techniques, étude du site/projet, analyses des risques air-sol-environnement, création autorisation spécifique de vol de nuit auprès de la DGAC	Compétence réglementation drone en NC	Pour chaque suivi (annuel)	1	4	10 000	40 000	1	10	temps personnel CEN	30 000
Mise en place de la stratégie d'échantillonnage et édition des missions	Selection aléatoire des zones de missions en fonction de l'occupation du sol, des accès et des limitations du drone et du budget du gestionnaire	Compétence SIG et programmation	une seule fois	1	5	20 000	100 000	1	20	temps personnel CEN	44 000
	creation mission selon risque air et sol	Compétence en programmation automatisé de mission drone	une seule fois	1	5	10 000	50 000	1	20	temps personnel CEN avec formation	140 000
Acquisition de la donnée sur le terrain	Déplacement: Véhicule frais kilométrique essence comprise (Aller retour Nouméa ZP 240 km d'après Google Map à 70 cfp/km selon Grille tarifaire NC) + déplacements sur sites (20 km/jours environ soit 40 km) 280 km au total	Aucune	Pour chaque suivi (annuel)	1	300	70	21 000	2	280	temps personnel CEN	28 000
	Frais personnel déplacement	Aucune	Pour chaque suivi (annuel)	1	4,0	6 000	24 000	1	4	temps personnel CEN	12 000
	Matériel: drone + capteur thermique+ 12 batteries+ 2stations de charge + ordinateur + divers matériel logistique	Aucune	une seule fois	1	0	0	0	1	1	5600000	5 600 000
	Vol drone sur les differentes zones (10 missions de 60 ha environ soit 600 ha) à raison de 2 soirées	Compétence en pilotage de drone (Télépilote professionnel)	Pour chaque suivi (annuel)	1	9	36 000	324 000	1	16	temps personnel CEN avec usure matériel et temps sur place	96 000
	Assistant de terrain spotter (obligation reglementaire)	Compétence en sécurité vol drone (attentif et en connaissance des dangers)	Pour chaque suivi (annuel)	1	9	7 000	63 000	1	16	temps personnel CEN avec usure matériel et temps sur place	96 000
Traitement de la donnée et résultats de IAAD-NC	Conversion SRT en csv avec software interface	Compétence codage	une seule fois	1	0	0	0	1	Création algorithme de conversion + formation		600 000
	Analyse video georeferencée (QGIS Gis Full Motion Video (FMV)) installation QGIS FMV par poste	Compétence SIG	une seule fois	1	0	0	0	1	Installation de QGIS FMV + formation		200 000
	Création algorithme et interface pour utilisation simplifiée	Compétence codage	une seule fois	1	0	0	0	1	Création de l'agorithme de détection automatisé ou semi-automatisé		10 000 000
	Estimation de la population. Comptage Automatique ou semi-automatique et vérif par 2 personnes indépendamment minimum, livrable synthétique avec indice	Compétence SIG et/ou codage selon méthode utilisée (détection manuelle ou semi-auto)	Pour chaque suivi (annuel)	1	8	20 000	160 000	1	20	temps personnel CEN	60 000
Logistique	Logement lors des différentes phases de terrain	Aucune	Pour chaque suivi (annuel)	2	2	12 500	50 000	2	2	12 500	50 000
	Nourriture lors des différentes phases de terrain (Matin, Midi et soir)	Aucune	Pour chaque suivi (annuel)	2	2	5 000	20 000	2	2	5 000	20 000
Première étude (n)	Coût total en FCFP (HT) de l'IAANC sur 600 ha de la zone prioritaire de Thio (première étude, avec investissement matériel)			1 011 000				17 546 000			
	Coût à l'hectare en FCFP (HT) pour une zone de 600 ha de la zone prioritaire de Thio (première étude sans l'investissement matériel)			1685				1077			
Etude sur la même zone pour un suivi (étude n+1)	Coût total en FCFP (HT) de l'IAANC sur 600 ha de la zone prioritaire de Thio pour un suivi (étude n+1)			702 000				392 000			
	Coût à l'hectare en FCFP (HT) pour une zone de 600 ha de la zone prioritaire de Thio pour un suivi (étude n+1)			1170				653			

D'après nos calculs, le temps d'amortissement de l'investissement du matériel, dans le cas de l'internalisation du suivi est à n+54 (Tableau 16). Ce protocole commence à être rentable en interne au bout de la 54 ième étude.

Tableau 16 : Temps d'amortissement (en nombre de suivis) de l'acquisition par le gestionnaire (internalisation) du protocole de l'IAAD sur sa globalité (matériel, logiciel, algorithmes compris), simulation de 600 ha sur la zone prioritaire de Thio .

Nombre d'étude	Externalisation	Internalisation
n	1 011 000	17 546 000
n+1	1 713 000	17 938 000
n+2	2 415 000	18 330 000
n+3	3 117 000	18 722 000
n+4	3 819 000	19 114 000
n+5	4 521 000	19 506 000
n+6	5 223 000	19 898 000
n+7	5 925 000	20 290 000
n+8	6 627 000	20 682 000
n+9	7 329 000	21 074 000
n+10	8 031 000	21 466 000
n+11	8 733 000	21 858 000
n+12	9 435 000	22 250 000
n+13	10 137 000	22 642 000
n+14	10 839 000	23 034 000
n+15	11 541 000	23 426 000
n+16	12 243 000	23 818 000
n+17	12 945 000	24 210 000
n+18	13 647 000	24 602 000
n+19	14 349 000	24 994 000
n+20	15 051 000	25 386 000
n+21	15 753 000	25 778 000
n+22	16 455 000	26 170 000
n+23	17 157 000	26 562 000
n+24	17 859 000	26 954 000
n+25	18 561 000	27 346 000
n+26	19 263 000	27 738 000
n+27	19 965 000	28 130 000
n+28	20 667 000	28 522 000
n+29	21 369 000	28 914 000
n+30	22 071 000	29 306 000
n+31	22 773 000	29 698 000
n+32	23 475 000	30 090 000
n+33	24 177 000	30 482 000
n+34	24 879 000	30 874 000
n+35	25 581 000	31 266 000
n+36	26 283 000	31 658 000
n+37	26 985 000	32 050 000
n+38	27 687 000	32 442 000
n+39	28 389 000	32 834 000
n+40	29 091 000	33 226 000
n+41	29 793 000	33 618 000
n+42	30 495 000	34 010 000
n+43	31 197 000	34 402 000
n+44	31 899 000	34 794 000
n+45	32 601 000	35 186 000
n+46	33 303 000	35 578 000
n+47	34 005 000	35 970 000
n+48	34 707 000	36 362 000
n+49	35 409 000	36 754 000
n+50	36 111 000	37 146 000
n+51	36 813 000	37 538 000
n+52	37 515 000	37 930 000
n+53	38 217 000	38 322 000
n+54	38 919 000	38 714 000

5 Recommandations

- Pour plusieurs raisons citées dans ce rapport, le protocole de l'IAAD-NC n'a pas pu être testé dans les conditions optimales d'acquisition de la donnée sur les zones prioritaires. Il serait donc intéressant de lancer à nouveau des tests du protocole tout spécifiquement dans ces zones et durant la bonne période pour le cerf et le drone afin d'expérimenter l'indice dans ces zones en condition optimale.
- Lorsque les objectifs et les budgets des gestionnaires des zones prioritaires seront réellement connus, il sera primordial en amont de mettre en place toute la stratégie d'échantillonnage de l'indice sur l'ensemble des zones.
- Une étude serait à réaliser éventuellement pour voir quelle est la limite réelle des choix d'angle caméra (-50 ou -90°) en fonction du gradient de dénivelé et/ou du gradient de densité de végétation. 2 scénarios actuels :
 - Zone plane peu boisée (hauteur 70m et angle caméra -50°) et,
 - Zone avec dénivelé et/ou fortement boisée (hauteur 90 m, angle caméra -90°).

Le premier scénario pourrait selon cette étude être réajusté et couvrir plus de typologie de milieu. Ce scénario est très intéressant car il permet d'avoir une reconnaissance de forme des individus du fait de l'angle et donc une optimisation du comptage automatisé par l'algorithme et une information plus précise sur l'état de la population (forme plus précise pour différencier mâles, des femelles, Daguetts et jeunes faons).

- Réalisation d'une étude d'évaluation et de tests plus approfondis sur la strate arborée des zones prioritaires, définie selon l'occupation du sol du Georep NC, afin de voir si l'application du protocole sur des parties moins denses de cette strate, selon leur abondance non négligeable, peut apporter de l'information pertinente aux objectifs.
- Il serait aussi intéressant de tester l'effet de la lune sur le protocole.
- De même, une étude plus approfondie, en saison optimale pour le cerf, sur le meilleur moment de la nuit pour la détection du cerf selon son pic d'activité serait nécessaire afin d'affiner le protocole de l'IAAD-NC proposé.
- Approfondir l'étude par des tests plus poussés sur les paramètres de vol retenus selon les contraintes de terrain afin de trouver les optimums.
- Créer une extension QGIS FMV tout spécialement pour le Matrice 300 RTK car plusieurs bugs peuvent surgir lors de son utilisation.
- Continuer l'apprentissage et l'optimisation de l'algorithme de détection en lui injectant de plus en plus de données acquises sur le terrain.

6 ANNEXES

6.1 Annexe 1

Tableau 17 : Exemples de suivi de différentes espèces sauvages par drone en Australie, Europe et Amérique (Source Mangewa et al. 2019).

Class & Order	Species	Country	Monitored Aspects	UAV Class	Camera Sensor	Flight Height	Behavioral Response	References
Mammalia: Sirenia and Cetartiodactyla	Marine mammals (Dugong and whales, <i>Megaptera novaeangliae</i>)	Western Australia	Detection and recognition capability	Warrigul UAV	Colour/infrared/hi-res still photography	1000 ft, 750 ft and 550 ft	Not recorded	[7]
Mammalia: Diprotodontia	Eastern grey kangaroo (<i>Macropus giganteus</i>)	Queensland, Australia	Response to UAV	DJI Phantom 3 Advanced	Video and IR camera	120 m, 100 m, 60 and 30 m	Vigilance behavior	[2]
Chondrichthyes and Cetacea	Sharks, rays and Dolphins	New South Wales, Australia	Detection and classification	DJI Phantom 4	ND4 polarizing filters	60 m	Not recorded	[5]
Mammalia: Cetartiodactyla	Humpback whales (<i>Megaptera novaeangliae</i>)	North Stradbroke, Australia	Detection	ScanEagle	(i) D90 12 SLR (ii) Standard Definition Electro-Optical Camera	732 m	No significant reaction	[7]
Mammalia	White-tailed deer (<i>Odocoileus virginianus</i>), domestic dog (<i>Canis lupus familiaris</i>), domestic cat (<i>Felis silvestris catus</i>).	Canada, North America	Minimum detection heights	Quadcopter (SkyRanger)	Not provided	1.5 m	Hearing response	[9]
Reptilia: Testudines	Sea turtles (olive ridley turtles): <i>Lepidochelys olivacea</i>	Costa Rica, North America	Population densities	Fixed-wing, senseFly eBee	Canon PowerShot S110 near-infrared (NIR)	90 m	No behavioral change	[33]
Avian: Anseriformes	Flocks of Canada Snow Geese	Canada, North America	Population size	CropCama, a 2.5-m wingspan	Pentax Optio A20 infrared LED	183 m (600 ft)	Not significant response	Chabot and Bird (2012)
Avian: Galliformes, and Anseriformes	Northern bobwhite upland game bird (<i>Colinus virginianus</i>), and mallard waterfowl bird (<i>Anas platyrhynchos</i>)	Canada, North America	Minimum safe flight heights	Fixed-wing platform (eBee; Sensefly)	Not provided	1.5 m	No significant reaction	[9]
Mammalia: Artiodactyla	White-tailed deer (<i>Odocoileus virginianus</i>)	Germany, Europe	Detection and counts	ING Robotic Aviation	D7000 visible sensor (RGB) & Tau640 thermal infrared	60 m	Not recorded	[4]
Mammalia: Artiodactyla	Roe deer (<i>capreolus capreolus</i>)	Germany, Europe	Detection and count	Micro air vehicle (MAV) Falcon-8	Thermal camera core Tau640	30-50 m	Not recorded	[31]
Avian: Charadriiformes	Seagulls	Germany, Europe	Counting seagulls colonies	Multicopters (Falcon 8, MD 4 1000)	Olympus PEN E2 (RGB and thermal cameras)	15 m	They ignored the UAS	[34]
Avian: Charadriiformes	Black headed gull	Spain, Europe	Detection and recognition	Radio-control model aircraft, Poway, wingspan 1420 mm)	Panasonic Lumix FT-1,	-	Not provided	[35]

Tableau 18 : Exemples de suivi de différentes espèces sauvages par drone en Asie et Afrique (Source Mangewa et al. 2019).

Class and Order	Species	Country	Monitored Aspects	UAV Class Used	Camera Sensor	Flight Height	Behavioral Response	References
Mammalia: Primates, and Proboscidea	Sumatran orangutan and Sumatran elephant	Sumatra, Indonesia, Asia	Detection	Hobbyking Bixler	Canon IXUS 220 HS (Pentax) and GoPro Optio WG-1 GPS	100 m, 180 m	Not recorded	[14]
Mammalia: Carnivora	Endangered species: Tiger	Nepal, Asia	Endangered species against poachers	GPS-enabled FPV Raptors	Still and video cameras	<200 m	Not recorded	[42]
Mammalia	Large mammals	Namibia, Africa	Detection and identification	Canon PowerShot S110 compact camera,	Red Green and Blue (RGB) bands	-	Not recorded	[43]
Mammalia: Proboscidea	African Elephant (<i>Loxodonta africana</i>)	Bukina Faso, Africa	Animal counts	Gatewing6100TM	Ricoh GR III camera	100 m and 300 m	No reaction	[36]
Mammalia: Perissodactyla	Black rhinoceros (<i>Diceros bicornis</i>) and the white rhinoceros (<i>Ceratotherium simum</i>)	South Africa	Rhinoceros and poachers detection	Fixed-wing, Easy Fly St-330 (St-models, China)	(i) FPV video camera, (ii) Panasonic Lumix LX-3 digital camera (iii) thermal video (IR camera module)	32-180 m	No flight response	[27,43]
Mammalia: Artiodactyla	Common Hippopotamus (<i>Hippopotamus amphibius</i> L.)	Democratic republic of Congo, Africa	Population	Fixed-wing, Falcon UAS	Sony Nex7 digital still camera (RGB)	20 m, 40-150 m	No reaction from 40 m	[28]
Class and Order	Species	Country	Monitored Aspects	UAV Class Used	Camera Sensor	Flight Height	Behavioral Response	References
Reptilia: Crocodilia	Nile crocodile (<i>Crocodylus niloticus</i>)	South Africa	Population	DJI Phantom 3 Standard Drone	Still camera of 1/2.3" sensor, fast f/2.8 prime lens	40 m, 55 m and 70 m	Not recorded	[37]
Mammalia: Primate	Chimpanzee (<i>Pan troglodytes</i>)	Tanzania, Africa	Nests detection and population estimate	(i) Skywalker X5 frame; (ii) HBS Skywalker 100 km Long Range Fix Wings drone	(i) Canon S100 camera operating a CHDK firmware modification; (ii) Sony RX100M2	90 m	Not recorded	[41]
Mammalia: Proboscidea	African Elephant (<i>Loxodonta africana</i>)	Tanzania, Africa	Human-Elephant Conflict control	DJI Phantom 2	No camera	50 m	Flight response	[44]
Mammalia: Primate: Primate	Human poachers	Tanzania, Africa	Detection of poachers	Multicopter (DJI F550 frame)	(i) 16 MP RGB Survey 2 camera; (ii) Thermal Capture v1.0 TIR camera	70 m, and 100 m	Not recorded	[8]
* Wetland	Wetland habitats	Tanzania, Africa	Wetland condition and human threats	Multicopter DJI Phantom 4 Pro	20MP camera with 1 in sensor CMOS with a Field of View of 84.4° and a lens of 8.8 mm equivalent to a 24 mm	Not provided	Not applicable	[1]

* This was purposively added as an example of special wetland habitats assessed using UAV.

6.3 Annexe 3

Tableau 20 : Détails des dates et heures de vol réalisées au cours de la phase 3 de l'étude sur chacune des zones prospectées.

Étape de l'étude	Phase 3																																													
Date	Septembre 2021																Octobre 2021																Décembre 2021													
Période de la journée	16-sept.				17-sept.		18-sept.		...	23-sept.		24-sept.				25-sept.		26-sept.		...	4-oct.		5-oct.				6-oct.		...	9-oct.		10-oct.		...	23-oct.		...	20-déc.		21-déc.						
Début et fin des vols	Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin		Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin		Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin		Dép	Fin	Dép	Fin		Dép	Fin		Dép	Fin	Dép	Fin	Dép	Fin					
Ferme de chasse la Cotonnière (Philippe Bourguine)	12:0	17:00	19:30	23:30	19:00	23:00	5:00	8:00																																						
Domaine de Deva										19:00	0:00	0:00	2:00	19:00	23:30	19:00	0:00	0:00	1:30										21:00	23:30																
Parc des Grandes Fougères																					19:00	0:00	0:00	2:00	18:30	22:00	5:00	7:30																		
Propriété ETS Cheval																																														
Koua																																														
Total heures de vol	5:00		4:00		4:00		3:00		5:00		2:00		4:30		5:00		1:30		5:00		2:00		3:30		2:30		2:30		3:00		2:30		3:00		3:30		3:00									
Nombre d'heures de vol drone par zone d'étude	16,0								18,0								13,0								5,5				2,5		15,5															
Total des heures de vol (sans compter les heures sur le terrain de logistique, de préparation zone de décollage, de modification, prospection des zones de vol en journée, etc ...)	85,7																																													
Présence des scientifiques Polonais sur le territoire calédonien	Du 4 septembre au 17 octobre 2021																																													

6.4 Annexe 4

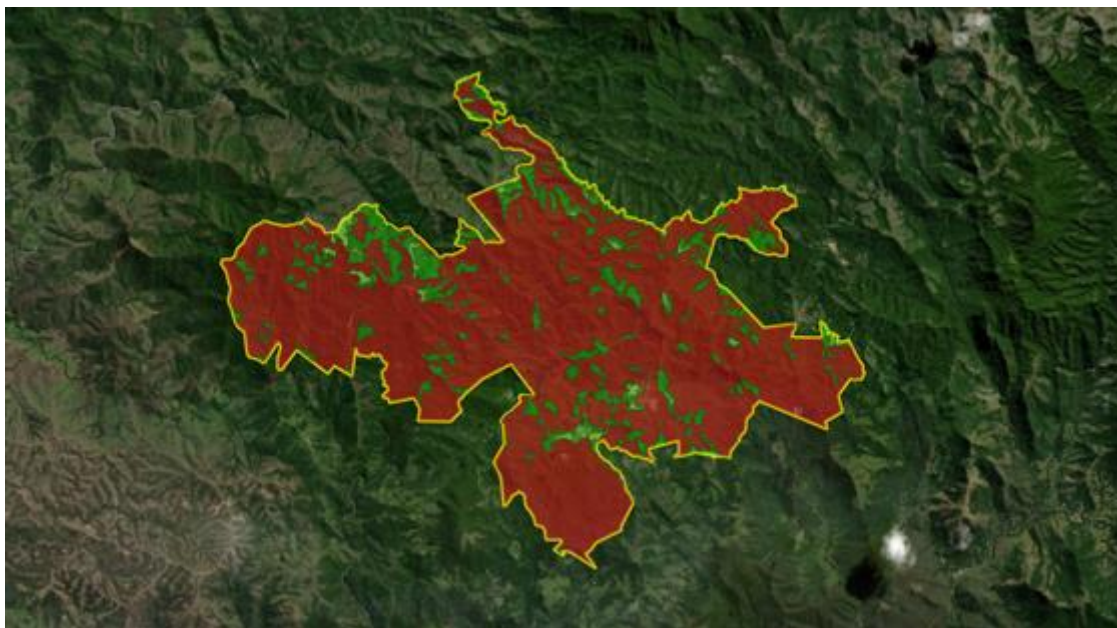


Figure 54 : Carte de l'occupation du sol de la végétation sur le Parc des Grandes Fougères avec en rouge la strate arborée, en vert foncé la strate arbustive et en vert clair la strate herbacée. Données récupérées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (<https://georep.nc/explorateur-cartographique>).

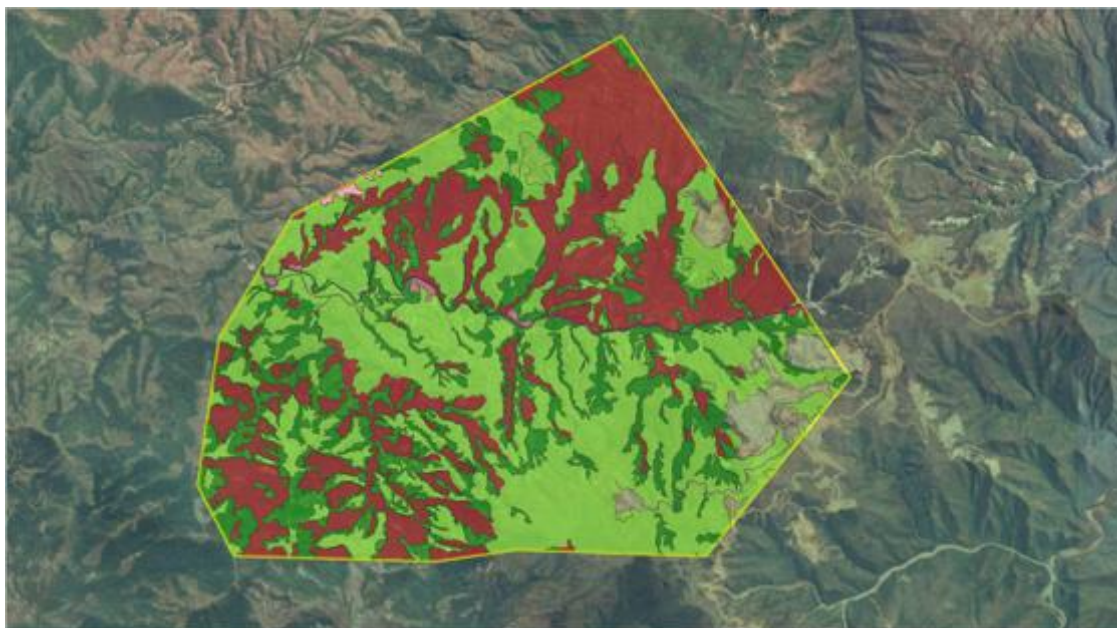


Figure 55 : Carte de l'occupation du sol de la végétation sur la partie A de la zone prioritaire de Thio avec en rouge la strate arborée, en vert foncé la strate arbustive et en vert clair la strate herbacée. Données récupérées du Mode d'Occupation des Sols (MOS) 2014 du Georepertoire de Nouvelle Calédonie (<https://georep.nc/explorateur-cartographique>).

6.5 Annexe 5

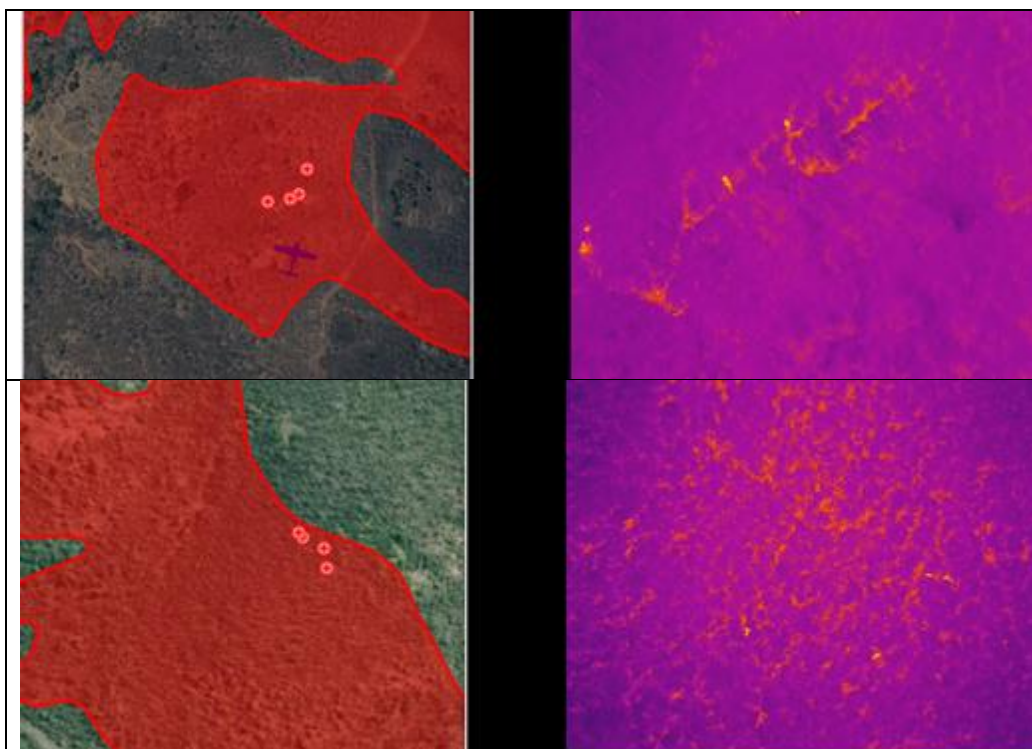


Planche photos 14 : Visualisation de différentes images drone en thermique de nuit au-dessus de zones de forêt (strate arborée), avec un couvert végétal semi-ouvert, de la propriété ETS Cheval, permettant de distinguer des points chauds (animaux) au travers.

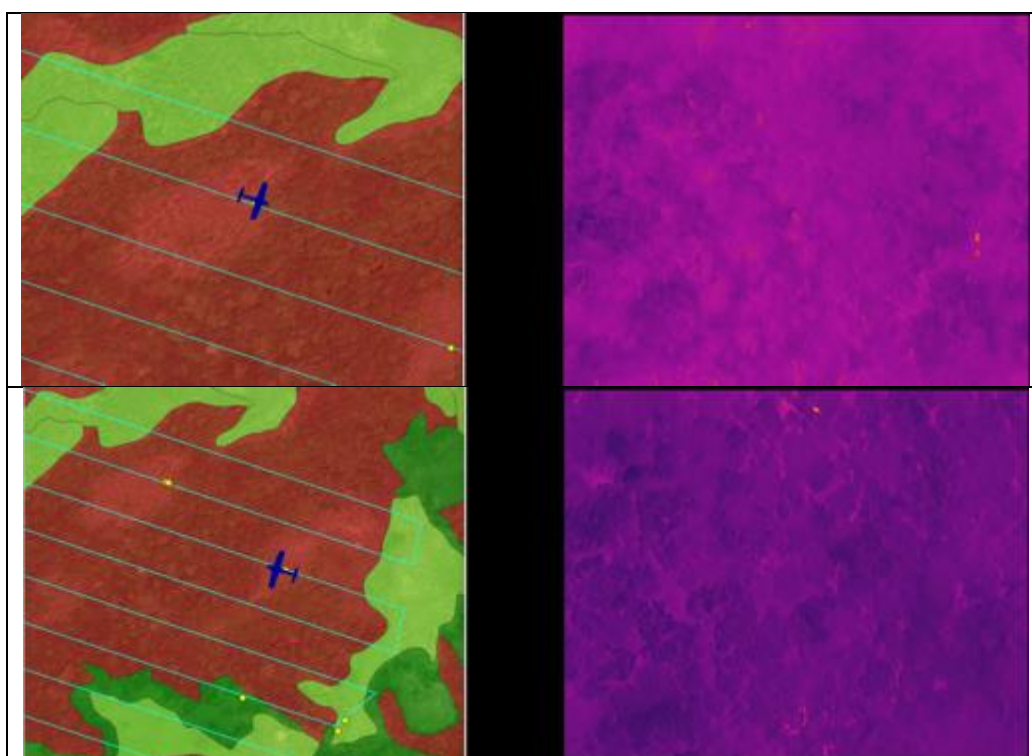


Planche photos 15 : Visualisation de différentes images drone en thermique de nuit au-dessus de zones de forêt (strate arborée), avec un couvert végétal semi-ouvert, de la zone prioritaire de Thio (mission MF1), permettant de distinguer des points chauds (animaux) au travers.

7 Bibliographie

Alliod Romain et Naseur Cherif 2022. Fiche Technique : Indice Aérien d'Abondance par Drone en Nouvelle-Calédonie (IAAD-NC)

Acevedo, P., J. Ferreres, R. Jaroso, M. Duran, M. Escudero, J. Marco, and C. Gortazar. 2010. Estimating roe deer abundance from pellet group counts in Spain: an assessment of methods suitable for Mediterranean woodlands. *Ecological Indicators* 10:1226–1230.

Aldous, S. E. 1944. A deer browse survey method. *Journal of Mammalogy* 25:130–136.

Anderson, K., and K. J. Gaston. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11:138–146.

Barrière P. 2008. Organisation et mise en place d'un schéma de gestion concertée des populations de cerf rusa sur un massif provincial test - Etude de mise à disposition de la FFCNC d'un domaine provincial - Avant-projet de création d'un « Centre de REGulation des gros gibiers ». 4ème Mission d'expertise « Cerf rusa » suite à l'expertise effectuée par P.B. du 15 Novembre au 10 Décembre 2007 en Nouvelle-Calédonie et en Nouvelle-Zélande, 136 p.

Barrière, P. & Fort C. 2021. Monographie spécifique : Cerf de Java *Rusa timorensis*. Atlas des mammifères sauvages de France volume 2 - Ongulés et Lagomorphes. P 96-101.

Bayliss, P., and Yeomans, K. M. 1989. Distribution and abundance of feral livestock in the 'Top End' of the Northern Territory (1985–86), and their relation to population control. *Australian Wildlife Research* 16(6), 651– 676

Bevan, E., Wibbels, T., Najera, B. M. Z., Martinez, M. A. C., Martinez, L. A. S., Martinez, F. I., Cuevas, J. M., Anderson, T., Bonka, A., Hernandez, M. H., Pena, L. J., and Burchfield, P. M. 2015. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring sea turtles in near-shore waters. *Marine Turtle Newsletter* 145, 19–22.

Beaver J. T., Harper C. A., Kissell R. E., Muller L. I., Basinger P. S., M. J. Goode, F. T. Van Manen, W. Winton, and M. L. Kennedy 2014. Aerial vertical-looking infrared imagery to evaluate bias of distance sampling techniques for white-tailed deer. *Wildlife Society Bulletin* 38:419–427.

Beaver, J. T., Baldwin, R. W., Messinger, M., Newbolt, C. H., Ditchkoff, S. S., Silman, M. R. (2020). Evaluating the Use of Drones Equipped with Thermal Sensors as an Effective Method for Estimating Wildlife. *Wildlife Society Bulletin* 44, 434–443.

Bernatas, S., and L. Nelson. (2004). Sightability model for California bighorn sheep in canyonlands using forward-looking infrared (FLIR). *Wildlife Society Bulletin* 32:638–647.

Bhat, K.S., Saptharishi, M., Khosla, P.K, 2000. Motion detection and segmentation using image mosics,IEEE ICME, 2000.

Borrelle, S.B. & Fletcher, A.T. 2017. Will drones reduce investigator disturbance to surface-nesting seabirds? *Marine Ornithology* 45: 89–94.

Bouché, P., Lejeune, P., Vermeulen, C., (2012). How to count elephants in West African savannahs? Synthesis and comparison of main gamecount methods. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 16 (1), 77–91.

Brunton, E., Bolin, J., Leon, J., Burnett, S., 2019. Fright or Flight? Behavioural Responses of Kangaroos to Drone-Based Monitoring. *Drones*, 3, 41.

Burke C., Rashman M., Wich S., Symons A., Theron C., Longmore S. (2018). Optimizing observing strategies for monitoring animals using drone-mounted thermal infrared cameras, *International Journal of Remote Sensing* 40. 10.1080.

Caughley, G. 1974. Bias in aerial survey. *Journal of Wildlife Management* 38:921–933.

Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., Garcia, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1, e1400253.

CEN Nouvelle-Calédonie, 2016. Stratégie de lutte contre les espèces exotiques envahissantes dans les espaces naturels de Nouvelle-Calédonie. Rapport cadre, p. 107

CEN Nouvelle-Calédonie, 2022. Bilan des opérations de régulation et de suivi mis à jour au 31 décembre 2021 sur le domaine de Déva. 47pp.

Chabot, D. 2009. Systematic evaluation of a stock unmanned aerial vehicle (UAV) system for small scale wildlife survey applications. M.Sc. Thesis, McGill University, Montreal.

Chabot, D., and Bird, D. M. 2012. Evaluation of an off-the-shelf unmanned aircraft system for surveying flocks of geese. *Waterbirds* 35, 170–174.

Chabot, D., and Bird, D. M. 2015. Wildlife research and management methods in the 21st Century: where do unmanned aircraft fit in? *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 3, 137–155.

Chabot, D., and C. M. Francis. 2016. Computer-automated bird detection and counts in high-resolution aerial images: a review. *Journal of Field Ornithology* 87:343–359.

Chabot, D., C. Dillon, and C. M. Francis. 2018. An approach for using off-the-shelf object-based image analysis software to detect and count birds in large volumes of aerial imagery. *Avian Conservation and Ecology* 13(1):15.

<https://doi.org/10.5751/ACE-01205-130115>

<https://www.ace-eco.org/vol13/iss1/art15/>

Chrétien, L.-P., J. Théau, and P. Ménard. 2016. Visible and thermal infrared remote sensing for the detection of white-tailed deer using an unmanned aerial system. *Wildlife Society Bulletin* 40:181–191.

Chrétien, L.-P. 2016. Détection et dénombrement de la moyenne et grande faune par imagerie visible et infrarouge thermique acquise à l'aide d'un aéronef sans pilote (ASP). M.Sc. en sciences géographiques, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 143 p.

Christie, K. S., Gilbert, S. L., Brown, C. L., Hatfield, M., & Hanson, L. (2016). Unmanned aircraft systems in wildlife research: Current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14, 241–251.

Christiansen, F., A. M. Dujon, K. R. Sprogis, J. P. Y. Arnould, and L. Bejder. 2016. Noninvasive unmanned aerial vehicle provides estimates of the energetic cost of reproduction in humpback whales. *Ecosphere* 7:e01468.

Collier, B. A., S. S. Ditchkoff, J. B. Raglin, and J. M. Smith. 2007. Detection probability and sources of variation in white-tailed deer spotlight surveys. *Journal of Wildlife Management* 71:277–281.

Collier, B. A., S. S. Ditchkoff, C. R. Ruth, and J. B. Raglin. 2013. Spotlight surveys for white-tailed deer: monitoring panacea or exercise in futility? *Journal of Wildlife Management* 77:165–171.

Daniels, M. 2006. Estimating red deer *Cervus elaphus* populations: an analysis of variation and cost-effectiveness of counting methods. *Mammal Review* 36:235–247.

Dell, A.I., Bender, J.A., Branson, K., Couzin, I.D., de Polavieja, G.G., Noldus, L.P.J.J. et al. (2014). Automated image-based tracking and its application in ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(7), 417–428.

DeYoung, C., F. Guthery, S. Beasom, S. Coughlin, and J. Heffelfinger. 1989. Improving estimates of white-tailed deer abundance from helicopter surveys. *Wildlife Society Bulletin* 17:275–279.

DeYoung, C. A. 2011. Population dynamics. Pages 147–180 in D. G. Hewitt, editor. *Biology and management of white-tailed deer*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Diefenbach, D. R. 2005. The ability of aerial surveys using thermal infrared imagery to detect changes in abundance of white-tailed deer on Pennsylvania state forest. Commonwealth of Pennsylvania, Department of Conservation and Natural Resources, Bureau of Forestry, Harrisburg, USA.

Ditmer, M. A., Vincent, J. B., Werden, L. K., Iaizzo, P. A., Garshelis, D. L., and Fieberg, J. R. (2015). Bears show a physiological but limited behavioral response to unmanned aerial vehicles. *Current Biology* 25, 2278–2283.

Drake, D., C. Aquila, and G. Huntington. 2005. Counting a suburban deer population using forward-looking infrared radar and road counts. *Wildlife Society Bulletin* 33:656–661.

Erwin, R.M. (1982) Observer variability in estimating numbers: an experiment. *Journal of Field Ornithology*, 53(2), 159–167.

Evans, L. J., Jones, T. H., Pang, K., Saimin, S., and Goossens, B. (2016). Spatial ecology of estuarine crocodile (*Crocodylus porosus*) nesting in a fragmented landscape. *Sensors* 16, 1527

Fang, Y., Du, S., Abdoola, R., Djouani, K., Richards, C. 2016. Motion Based Animal Detection in Aerial Videos. 2nd International Conference on Intelligent Computing, Communication and Convergence.

Forsyth, D. M., Comte, S., Davis, N. E., Bengsen, A. J., Côté, S. D., Hewitt, D. G., Morellet, N., and Mysterud, A. 2022. Methodology matters when estimating deer abundance: a global systematic review and recommendations for improvements. *Journal of Wildlife Management*; 25pp.

Franke, U. et al. 2012. Aerial ungulate surveys with a combination of infrared and high-resolution natural colour images. — *Anim. Biodivers. Conserv.* 35: 285–293.

Fiori L., Doshi A. Martinez E, Orams M.B. and Bollard-Breen B. 2017. The Use of Unmanned Aerial Systems in Marine Mammal Research. *Remote Sensing*, 9, 543.

Focardi, S. et al. 2005. Distance sampling effectively monitored a declining population of Italian roe deer *Capreolus capreolus italicus*. — *Oryx* 39: 421–428.

Forsyth, D., R. Barker, G. Morriss, and M. Scroggie. 2007. Modeling the relationship between fecal pellet indices and deer density. *Journal of Wildlife Management* 71:964–970.

Garel et al. 2015. Fiche N°6 : Indice Aérien d'Abondance (IAA) p29-32. In: Chevrier T. et al. 2015, Suivi des populations d'ongulés et de leurs habitats, Fiches techniques Indice de Changement Ecologique (ICE), 84pp.

Gill, R. M. A., M. L. Thomas, and D. Stocker. 1997. The use of portable thermal imaging for estimating deer population density in forest habitats. *Journal of Applied Ecology* 34:1273–1286.

- Gliwicz J., Pagacz S., Witczuk J., 2006. Strategy of food plant selection in the Siberian northern pika, *Ochotona hyperborea*. Arctic, Antarctic and Alpine Research. 38: 54-59.
- Gliwicz J., Witczuk J., Pagacz S., 2005. Spatial behaviour of the rock-dwelling pika, *Ochotona hyperborea*. Journal of Zoology, Lond., 267:1-8.
- Gonzalez, L. F., Montes, G. A., Puig, E., Johnson, S., Mengersen, K., and Gaston, K. J. (2016). Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation' Sensors 16(1), 97.
- Gooday, O. J., Key, N., Goldstien, S., and Zawar-Reza, P. (2018). An assessment of thermal-image acquisition with an unmanned aerial vehicle (UAV) for direct counts of coastal marine mammals ashore. Journal of Unmanned Vehicle Systems 6(2), 100–108.
- Harris, M.P. & Lloyd, C.S. (1977) Variations in counts of sea birds from photographs. British Birds, 70(5), 200–205
- Harwell, F. et al. 1979. The spotlight count method for surveying white-tailed deer in Texas. — Texas Parks and Wildlife Dept.
- Hodgson, A., Kelly, N., and Peel, D. (2013). Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: a dugong case study. PLoS One 8(11), e79556.
- Hodgson, J. C., S. M. Baylis, R. Mott, A. Herrod, and R. H. Clarke. 2016. "Precision Wildlife Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles." Scientific Reports 6: 22574 EP.
- Hodgson, J. C., S. M. Rowan Mott, T. T. Baylis, S. W. Pham, A. D. Kilpatrick, R. R. Segaran, I. Reid, A. Terauds, L. P. Koh, and N. Yoccoz. (2018) "Drones Count Wildlife More Accurately and Precisely than Humans." Methods in Ecology and Evolution 9: 1160–1167.
- Hussey, N. E., Kessel, S. T., Aarestrup, K., Cooke, S. J., Cowley, P. D., Fisk, A. T., ... Whoriskey, F. G. (2015). Aquatic animal telemetry: A panoramic window into the underwater world. Science, 348, 1255642
- Iijima, H., Nagaike, T., Honda, T., 2013. Estimation of deer population dynamics using a Bayesian state-space model with multiple abundance indices. Journal of Wildlife Management.
- Israel, M. 2011. A UAV-based roe deer fawn detection system. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38(1/C22):51–55.
- Jachmann, H., 1991. Evaluation of four survey methods for estimating elephant densities. Afr. J. Ecol. 29 (3), 188–195.

Jacobson, H. A., J. C. Kroll, R. W. Browning, B. H. Koerth, and M. H. Conway. 1997. Infrared-triggered cameras for censusing white-tailed deer. *Wildlife Society Bulletin* 25:547–556.

Jones, G. P. I. V., Pearlstine, L. G., and Percival, H. F. (2006). An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research. *Wildlife Society Bulletin* 34, 750–758. doi:10.2193/0091-7648(2006)34[750:AAOSUA] 2.0.CO;2

Kaji, K., T. Saitoh, H. Uno, H. Matsuda, and K. Yamamura. 2010. Adaptive management of sika deer populations in Hokkaido, Japan: theory and practice. *Population Ecology* 52:373–387.

Kays, R., Crofoot, M. C., Jetz, W., & Wikelski, M. (2015). Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, 348, aaa2478

Kellenberger B., Marcos D., Tuia D. (2018) Detecting mammals in UAV images: Best practices to address a substantially imbalanced dataset with deep learning. *Remote Sensing of Environment* 216, 139–153

Kissell, R. E. Jr., and S. K. Nimmo. 2011. A technique to estimate whitetailed deer density using vertical-looking infrared imagery. *Wildlife Biology* 17:85–92.

Koerth, B. H., and J. C. Kroll. 2000. Bait type and timing for deer counts using cameras triggered by infrared monitors. *Wildlife Society Bulletin* 28:630–635.

Lethbridge M., Stead M., Wells C. (2019). Estimating kangaroo density by aerial survey: a comparison of thermal cameras with human observers. *Wildlife Research*, 46, 639–648

Linchant, J., Lhoest S., Quevauvillers S., Lejeune P., Vermeulen C., Semeki Ngabinzeke J., Luse Belanganayi B., Delvingt W., and Bouché P. 2018. UAS imagery reveals new survey opportunities for counting hippos. *PLoS ONE* 13:e0206413.

Linchant, J., J. Lisein, J. Semeki, P. Lejeune, and C. Vermeulen. 2015. Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. *Mammal Review* 45:239–252.

Marques, T. A., Thomas, L., Martin, S. W., Mellinger, D. K., Ward, J. A., Moretti, D. J., ... Tyack, P. L. (2013). Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 88, 287–309.

Mangewa L. J., Ndakidemi P. A., Munishi L. K. (2019). Integrating UAV technology in an ecological monitoring system for community wildlife management areas in Tanzania. *Sustainability*, 11, 6116

Meyer A.F., Lack, N., Jordan, D., 2019. Wildlife monitoring with UAVs - Artificial intelligence for the automated detection of infrared signatures. Three-country conference of the DGPF, the OVG and the SGPF in Vienna, Austria - Publications of

the DGPF, Volume 28.

Michel J.F. 2000. Les dénombrements d'animaux domestiques. *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* 53(1):55.

Mysterud, A., E. Meisingset, V. Veiberg, R. Langvatn, E. Solberg, L. Loe, and N. Stenseth. 2007. Monitoring population size of red deer *Cervus elaphus*: an evaluation of two types of census data from Norway. *Wildlife Biology* 13:285–298.

McCarthy E.D. , Martin J.M. , Boer M.M., and Welbergen J.A. 2021 Drone-based thermal remote sensing provides an effective new tool for monitoring the abundance of roosting fruit bats. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of Zoological Society of London

McCullough, D. R. 1982. Evaluation of night spotlighting as a deer study technique. *Journal of Wildlife Management* 46:963–973.

Mitchell, W. A. 1986. Deer spotlight census: section 6.4.3, U.S. Army Corp of Engineers wildlife resources management manual. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Technical Report EL-86-53, Vicksburg, Mississippi, USA.

Michel J.F. 2000. Les dénombrements d'animaux domestiques, *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.*, 53 (1) : 55-66

Millette, T. L., D. Slaymaker, E. Marcano, C. Alexander, and L. Richardson. 2011. AIMS-Thermal—a thermal and high resolution color camera system integrated with GIS for aerial moose and deer census in northeastern Vermont. *Alces* 47:27–37.

Millspaugh, J. J., J. R. Skalski, R. L. Townsend, D. R. Diefenbach, M. S. Boyce, L. P. Hansen, and K. Kammermeyer. 2009. An evaluation of sex-age-kill (SAK) model performance. *Journal of Wildlife Management* 73:442–451.

Moranduzzo, T., Melgani, F., 2014. Automatic Car Counting Method for Unmanned Aerial Vehicle Images”, *Geoscience and Remote Sensing*, Vol 52, pp: 1635 – 1647.

Morellet, N., J. Gaillard, A. Hewison, P. Ballon, Y. Boscardin, P. Duncan, F. Klein, and D. Maillard. 2007. Indicators of ecological change: new tools for managing populations of large herbivores. *Journal of Applied Ecology* 44:634–643.

Mustafa O., Barbosa A., Krause D.J., Peter H.U., Vieira G. and Rümmler M.C. 2018. State of knowledge: Antarctic wildlife response to unmanned aerial systems. *Polar Biology* volume 41, pages 2387–2398.

Naugle, D. E., J. A. Jenks, and B. J. Kernohan. 1996. Use of thermal infrared sensing to estimate density of white-tailed deer. *Wildlife Society Bulletin* 24:37–43.

Nazir, S., Newey, S., Irvine, R.J., Verdicchio, F., Davidson, P., Fairhurst, G., Van Der Wal, R., 2017. Wiseeye: Next generation expandable and programmable camera

trap platform for wildlife research. PLoS One 12 (1), e0169758.

Norton-Griffiths, M., 1978. Counting animals. In: No. 1. Serengeti Ecological Monitoring Programme. African Wildlife Leadership Foundation.

Ott, Maxwell C., 2020. Using Unmanned Aerial Systems (Drones) with a Thermal Sensor to Map and Count Deer Population. Williams Honors College, Honors Research Projects. 1068.

https://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/1068

Pagacz S., Witczuk J., 2010. Intensive exploitation of amphibians by Eurasian otter (*Lutra lutra*) in the Wołosaty stream, southeastern Poland. Annales Zoologici Fennici 47: 403–410.

Parameswaran, S., Lane, C., Bagnall, B., Buck, H., 2014. Marine Object Detection in UAV full-motion video”, Airborne Intelligence, surveillance, Reconnaissance Systems and Applications, 2014.

Pellerin, M., Bessière, A., Maillard, D., Capron, G., Gaillard, J.M., Michallet, J. and Bonenfant, C., 2017. Saving time and money by using diurnal vehicle counts to monitor roe deer abundance. Wildlife Biology Issue 1 VOL. 2017 · NO. 4

Pettorelli, N., Cote, S.D., Gingras, A., Potvin, F. & Huot, J. 2007: Aerial surveys vs hunting statistics to monitor deer density: the example of Anticosti Island, Quebec, Canada. - Wildlife Biology. 13: 321-327.

Pojar, T.M., D.C. Bowden, and R.B. Gill. 1995. Aerial counting experiments to estimate pronghorn density and herd structure. J. Wildl. Manage. 59:117-128

Porter, W. P., and D. M. Gates. 1969. Thermodynamic equilibria of animals with environment. Ecological Monographs 39:245–270.

Progulske D. R. and Duerre D. C. 1964. Factors influencing spotlighting counts of deer. J. Wildl. Manage. 28:27 — 34.

Prokaj, J., Medioni, G., 2014. Persistent Tracking for Wide Area Aerial Surveillance, Computer Vision and Pattern Recognition, pp: 1186-1193.

Putman, R. J. 1984. Facts from feces. — Mammal Rev. 14: 79–97.

Ratcliffe, N., Guihen, D., Robst, J., Crofts, S., Stanworth, A., and Enderlein, P. (2015). A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. Journal of Unmanned Vehicle Systems 3, 95–101.

Rees Al.F., Avens L., Ballorain K., Bevan E., Broderick A.C., Carthy R.R., et al. 2018. The potential of unmanned aerial systems for sea turtle research and conservation: A review and future directions. Endanger. Species Res. 35: 81–100.

Ritchie, E. G., & Johnson, C. N. (2009). Predator interactions, mesopredator release and biodiversity conservation. Ecology Letters, 12, 982–998.

Roques Rogery G. (2008). Monitoring population trends of introduced rusa deer (*Cervus timorensis russa*) in New Caledonian sclerophyll forests: tests and relevance of methods for management programmes, Thesis for Masters Technologiae in Nature Conservation, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, Date of submission 31/01/2008.

Rönnegård, L., H. Sand, H. Andrén, J. Måansson, and Å. Pehrson. 2008. Evaluation of four methods used to estimate population density of moose *Alces alces*. *Wildlife Biology* 14:358–371.

Roseberry, J. L., and A. Woolf., 1991. A comparative evaluation of techniques for analyzing white-tailed deer harvest data. *Wildlife Monographs* 117.

Rowcliffe, J. M., & Carbone, C., 2008. Surveys using camera traps: Are we looking to a brighter future? *Animal Conservation*, 11, 185–186.

Schwarz, C.J. and Seber, G.A.F., 1999. Estimating Animal Abundance: Review III. *Statistical Science*, 14, 427-456. <http://dx.doi.org/10.1214/ss/1009212521>

Schlossberg, S., Chase, M.J., Griffin, C.R., (2016). Testing the accuracy of aerial surveys for large mammals: an experiment with African savanna elephants (*Loxodonta africana*). *PLoS One* 11 (10), e0164904.

Se, S., Shi, F., Liu, X., Ghazel, M., 2015. Object and activity detection from aerial video", *Geospatial Informatics, Fusion, and Motion Video Analytics*.

Seymour A. C., Dale J., Hammill M., Halpin P. N., and Johnston D. W., 2017. Automated detection and enumeration of marine wildlife using unmanned aircraft systems (UAS) and thermal imagery. *Scientific Reports* 7:1–10.

Silver, S.C., Ostro, L.E., Marsh, L.K., Maffei, L., Noss, A.J., Kelly, M.J., Wallace, R.B., Gómez, H., Ayala, G., 2004. The use of camera traps for estimating jaguar *Panthera onca* abundance and density using capture/recapture analysis. *Oryx* 38 (2), 148–154.

Stark, B., B. Smith, and Y. Chen. 2014. Survey of thermal infrared remote sensing for Unmanned Aerial Systems. Pages 1294–1299 in 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. IEEE, New York, USA.

Stauffer, C. and Grimson, W.E.L. 1999. Adaptive background mixture models for real-time tracking, *Proc. CVPR*.

Tabak, M.A., Norouzzadeh, M.S., Wolfson, D.W., Sweeney, S.J., Vercauteren, K.C., Snow, N.P. et al. (2019) Machine learning to classify animal species in camera trap images: applications in ecology. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(4), 585–590.

Terletzky, P.A. & Ramsey, R.D. (2016) Comparison of three techniques to identify and count individual animals in aerial imagery. *Journal of Signal and Information Processing*, 7(3), 123–135.

Tremblay, J.-P., I. Thibault, C. Dussault, J. Huot, and S. D. Côté. 2005. Long-term decline in white-tailed deer browse supply: can lichens and litterfall act as alternative food sources that preclude density-dependent feedbacks. *Canadian Journal of Zoology* 83:1087–1096.

Ueno, M., Kaji, K., Saitoh, T., 2010. Culling versus density effects in management of a deer population. *Journal of Wildlife Management* 74:1472–1483.

Uno, H., K. Kaji, T. Saitoh, H. Matsuda, H. Hirakawa, K. Yamamura, and K. Tamada. 2006. Evaluation of relative density indices for sika deer in eastern Hokkaido, Japan. *Ecological Research* 21:624–632.

Valente, A. M. et al. 2014. Living on the edge: roe deer (*Capreolus capreolus*) density in the margins of its geographical range. — *PLoS ONE* 9(2): e88459.

Valletta, J.J., Torney, C., Kings, M., Thornton, A. & Madden, J. (2017). Applications of machine learning in animal behaviour studies. *Animal Behaviour*, 124, 203–220

Vermeulen, C., P. Lejeune, J. Lisein, P. Sawadogo, and P. Bouché. 2013. Unmanned aerial survey of elephants. *PLoS ONE* 8:e54700.

Vincent, J. P., GAILLARD, J. M., BIDEAU, E., 1991. Kilometric index as biological indicator for monitoring forest roe deer populations. *Acta Theriologica*. 36:315–328.

Watts A. C., Perry J. H., Smith S. E., Burgess M. A., Wilkinson B. E., Szantoi Z., Ifju P. G., and Percival H. F. (2010). Small unmanned aircraft systems for low-altitude aerial surveys. *Journal of Wildlife Management* 74:1614–1619.

Wich, S., Dellatore, D., Houghton, M., Ardi, R., and Koh, L. P. (2016). A preliminary assessment of using conservation drones for Sumatran orang-utan (*Pongo abelii*) distribution and density. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 4, 45–52.

Wich, S., and L. P. Koh. 2018. *Conservation Drones, Mapping and Monitoring Biodiversity*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Wiggers, E. P., and S. F. Beckerman. 1993. Use of thermal infrared sensing to survey white-tailed deer populations. *Wildlife Society Bulletin* 21:263–268.

Williams, B. K., J. D. Nichols, and M. J. Conroy. 2002. *Analysis and management of animal populations*. Academic Press, San Diego, California, USA.

Witczuk J., Pagacz S., 2020. Effects of population and habitat characteristics on the accuracy and precision of wildlife aerial surveys results. *Sylwan* 164 (7):560-567.

Witczuk J., Pagacz S., Zmarz A., Cypel M., 2018. Exploring the feasibility of unmanned aerial vehicles and thermal imaging for ungulate surveys in forests -

preliminary results. *International Journal of Remote Sensing* 39 (15-16): 5504-5521.

Witczuk J., Pagacz S., Gliwicz J, Mills L.S., 2015. Niche overlap between sympatric coyotes and bobcats in highland zones of Olympic Mountains, Washington. *Journal of Zoology* 297 (3), 176-183.

Witczuk J., Pagacz S., Mills L.S., 2013. Disproportionate predation on endemic marmots by invasive coyotes. *Journal of Mammalogy*, 94 (3), 702-713.

Witczuk J., Pagacz S., Mills L.S., 2008. Optimizing methods for monitoring programs: Olympic marmots as a case study. *Wildlife Research*. 35: 788-797.

Yang, Z., Wang, T., Skidmore, A.K., de Leeuw, J., Said, M.Y.& Freer, J. (2015) Spotting east African mammals in opensavannah from space. *PLoS One*, 9(12), e115989

Yoccoz, N. G., J. D. Nichols, and T. Boulinier. 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* 16:446–453.

Zhou, H., Kong, H., Wei, L., Creighton, D., 2015. Efficient Road Detection and Tracking for Unmanned Aerial Vehicle, *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol 16, pp: 297-309.