

Projet Kwata

Ensemble de rapports effectués dans le cadre d'une étude pilote pour l'utilisation du drone thermique appliquée à la conservation des singes atèles (*Ateles Paniscus*)

Cristina MARQUES FERRI

Chargée de mission faune PAG

Avril 2023



1	Préambule	5
2	Introduction	6
2.1	Dispositif de suivi	6
2.2	Especie ciblee par l'étude	6
2.3	Objectifs	7
3	Demarches reglementaires pour la mise en œuvre d'un suivi par drone	8

I. Expérimentation du drone thermique pour le suivi des singes atèles dans la Réserve Naturelle Nationale des Nouragues

1	Introduction	12
2	Drone et caméra utilisés pour la mission	12
2.1.1	Hauteur de vol et largeur de bande de prospection	12
2.1.2	Autonomie et portée de vol	13
3	LOCALISATION de la zone d'étude	14
4	Moment de la journée choisis pour les vols	15
5	Sites de décollage	15
6	Prospection	16
7	Analyse	16
8	COUT	16
9	Résultats	17
9.1	Détection de singes atèles	17
9.2	Détection d'autres singes de canopée	18
9.3	Efficacité de détection en fonction du moment de la journée	19
10	Discussion (limites et suggestions)	19
10.1	Limites liées aux conditions environnementales	20
10.2	Limites méthodologiques	20
10.3	Limites matérielles	21
11	Conclusion	23

II. Test du drone thermique sur des individus de singes atèles (*Ateles paniscus*) hébergés au Zoo de Guyane

1	Objectif principal	25
2	Objectifs spécifiques.....	25
3	Période du test.....	25
4	Description du site	25
5	Description du matériel.....	26
6	Déroulement de l'opération.....	27
7	Résultats.....	27
7.1	Furtivité du drone	27
7.2	Test de la réactivité des singes atèles face au drone.....	27
7.3	Test de la détectabilité en fonction de la hauteur de vol.....	29
7.4	Détection et identification des atèles à l'infrarouge thermique.....	31
7.5	Signature thermique des atèles	32
7.6	Signatures thermiques d'autres espèces.....	36
8	Conclusion	38

III. Etude pilote pour l'utilisation du drone thermique appliquée à la conservation des singes atèles à Saül

1	Pourquoi Saul ?	40
2	Quelle période ?.....	40
3	Quel matériel ?.....	40
4	Objectif principal	40
5	La mission.....	41
5.1	Principe expérimental	41
5.2	Choix du site d'échantillonnage.....	41
5.3	Résumé du déroulement de la mission.....	42
6	Aspects techniques et optimisation de la méthode.....	42
6.1	Importance des créneaux pour les prospections	42
6.2	Largeur de la bande de prospection	43
6.3	Hauteur de vol et surface prospectée.....	43
6.4	Design du plan de vol.....	46
6.5	Composition de l'équipe drone et l'équipe sol.....	47
6.6	Sites de décollages.....	47
6.7	Le filtre thermique	48

6.8	La vitesse de progression	48
6.9	L'inclinaison de la caméra.....	49
6.10	Direction du plan de vol en fonction de la position du soleil.....	49
6.11	Récapitulatif des recommandations sur les paramètres de vol	49
6.12	Détection des atèles avec le drone thermique.....	50
6.13	Analyse des données graphiques	50
6.14	Outils pour le traitement des données graphiques obtenues	51
7	Résultats des prospections.....	51
7.1	Déroulement des prospections.....	52
7.2	Nuisance du drone sur les atèles.....	52
7.3	Observations d'atèles au drone et au sol	53
7.4	Sources de confusions.....	55
7.5	Autres espèces détectées.....	56
7.6	Densité.....	58
8	Discution	58
9	Conclusion	61
10	Perspectives.....	61
11	Bibliographie	63

1 PREAMBULE

Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme Terra MaKa'andi sur la gestion partagée des ressources naturelles, financé par l'Union Européenne (fonds FEDER) sur la période 2019-2023. Le programme a pour objectif d'établir, avec les habitants, des mesures visant à garantir la pérennité des ressources naturelles sur le long terme. L'atèle (singe araignée, dit kwata en créole, *Ateles paniscus*) illustre ces enjeux sociaux-environnementaux : c'est une espèce traditionnellement chassée par les populations amérindiennes et bushinengue du sud de la Guyane et qui est protégée (ces prélèvements sont donc interdits par la loi mais peu réprimandés dans le sud) du fait de sa vulnérabilité, son endémisme au plateau des Guyanes, et sa valeur patrimoniale. La volonté du Parc Amazonien de Guyane, dans une optique de protéger la nature tout en valorisant les cultures traditionnelles, serait de mettre en place un cadre juridique, en lien avec les communautés locales, pour permettre quelques prélèvements d'atèles tout en s'assurant qu'ils ne mettront pas en danger l'espèce.

Le rapport de Noé le Chanoine (2021) recueille toutes les connaissances disponibles sur le sujet et met en lumière les lacunes vers lesquelles orienter les efforts. Le manque de connaissance sur l'état des populations de l'espèce sur le territoire souligne la nécessité d'explorer de nouvelles méthodes de suivi. La méthode de suivi des espèces gibier (mammifères et certains grands oiseaux) employée sur le territoire guyanais est la plus fréquemment utilisée dans le monde, particulièrement pour la grande faune vivant en milieu forestier : la méthode du transect linéaire pour l'analyse d'abondance et de densité des populations (IKA). Depuis 2008, le PAG effectue des sessions IKA régulièrement sur certaines zones chassées, ainsi que de manière ponctuelle sur des zones non chassées. Cette méthode ne semble pas adaptée pour une espèce comme le singe atèle, qui vit en canopée, peut être très discrète et évolue selon une dynamique de fission-fusion (grands groupes qui se divisent pour chercher de la nourriture et se rejoignent). Noé est arrivé à la conclusion que des expérimentations sont nécessaires pour la mise en place d'un dispositif de suivi efficace sur le long terme. Plusieurs dispositifs de suivi ont été étudiés via la littérature scientifique (bioacoustique, génétique, drone). La méthode qui a été retenue est le drone à caméra thermique car elle semble plus adaptée à ce type de suivi et présente plusieurs avantages : ce dispositif est beaucoup plus facile à mettre en place que les IKAs, il permet de s'affranchir des contraintes fastidieuses de terrain et de prospector plus rapidement et de multiplier les sites d'échantillonnage.

Ce rapport regroupe trois rapports des premiers résultats d'études pilotes pour tester le drone thermique, menées entre novembre 2022 et mars 2023. L'objectif principal étant d'évaluer l'efficacité de cette méthode sur l'échelle du territoire du PAG, pour un suivi des populations de singes atèles sur le long terme. Pour cela, une première mission a eu lieu dans la Réserve Naturelle Nationale des Nouragues, pour tester différents aspects techniques liés à l'utilisation d'un drone en forêt tropicale (décollage et atterrissage, portée du drone, efficacité de détection thermique à différents moments de la journée...). Un autre test a été effectué sur le littoral, sur des individus d'atèles hébergés au Zoo de Guyane pour cette fois-ci, affiner la méthode et déterminer les paramètres optimaux pour optimiser la détection des singes atèles avec le capteur thermique. S'en est suivie la mission pilote à Saül, pour aller plus loin dans l'étude de la faisabilité de la méthode, où on a pu

affiner la méthode et les paramètres en milieu naturel, dans l'optique d'en évaluer sa faisabilité sur le territoire. Ces premiers aboutissants constituent une base qui pourrait permettre de développer cette méthode inédite sur le territoire guyanais et mettre en place des protocoles standardisés pour un suivi des atèles sur le long terme.

2 INTRODUCTION

2.1 DISPOSITIF DE SUIVI

La télédétection par drone équipé d'une caméra infrarouge appliquée à l'écologie et à la conservation présente une série d'avantages tels que la réduction des coûts, la flexibilité dans le temps et l'espace, la haute précision des données et l'absence de risques humains. Par le biais du contraste entre la température des animaux homéothermes (sang chaud) et leur environnement durant les heures froides, l'infrarouge permet de faciliter leur détection, notamment dans des conditions où il serait difficile de les voir à l'œil nu (de nuit ou hors vue de l'observateur). L'identification peut être faite par la signature thermique et un œil avisé ou à l'aide d'une caméra classique RGB couplée à l'infrarouge, si la luminosité le permet.

Bien que cette technologie soit émergente dans le paysage de l'étude de la faune, elle a déjà fait ses preuves, notamment pour le suivi de la faune terrestre en milieu ouvert ou pour les mammifères marins. Le drone IR présente aussi un grand potentiel pour étudier les espèces de canopée, même s'il faut prendre en compte le fait que le rayonnement ne traverse que peu la couverture foliaire ainsi que les contraintes techniques liées au terrain en forêt tropical. Bien qu'on n'ait pas encore beaucoup de recul temporel, certaines études révèlent déjà des résultats prometteurs. A titre d'exemple, Spaan et al. (2019) ont montré l'efficacité de la méthode pour le recensement du singe araignée *Ateles geoffreyi* au Mexique, avec des comptages au drone bien meilleurs que les comptages au sol pour les grands groupes.

Cette nouvelle technologie nous permettrait de s'affranchir des contraintes du terrain en forêt tropicale et offrirait un nouveau point de vue pour en savoir plus sur les espèces vivant à la cime des arbres.

2.2 ESPECE CIBLEE PAR L'ETUDE

Le singe araignée commun (*Ateles paniscus*), aussi appelé *atèle* ou *Kwata* en créole, englobe à lui seul une bonne partie des problématiques socio-environnementales du territoire guyanais, et de l'Amazonie en général (pression de chasse, déforestation, usages traditionnels d'une espèce protégée par des peuples autochtones etc).

L'espèce, endémique du plateau des Guyanes, est classée Vulnérable (VU) au niveau mondial (IUCN, 2008) mais de Préoccupation Mineure (LC) en France (IUCN France, 2017), car bien qu'elle soit en déclin dans les zones plus anthropisées, la Guyane comprend encore une grande partie de zones inaccessibles abritant des populations en très bon état de conservation (Richard-Hansen et al., 2019). Elle est malgré tout protégée en Guyane (arrêté ministériel du 15 mai 1986) car c'est une espèce emblématique et très sensible à la pression humaine qui grignote de plus en plus le territoire. C'est aussi une espèce historiquement ancrée dans les usages cultuels et de subsistance des communautés locales du sud de la Guyane. En effet, pour les bushinengés Alukus, cette espèce est nécessaire pour la cérémonie de levée du deuil. Les femelles sont également couramment chassées par les communautés amérindiennes pour leur viande réputée savoureuse.

Pourtant, à ce jour, nous manquons de connaissances sur les tendances populationnelles et l'écologie de cette espèce. Ces lacunes sont en partie dues au fait que les singes-araignées sont difficiles à étudier en raison de leur forte dynamique de fission-fusion, leurs habitats difficilement accessibles et leur mode de vie strictement arboricole.

2.3 OBJECTIFS

Les objectifs visés par cette étude sont les suivants :

- ⊕ **Détection** : Tester la capacité du drone avec imagerie IR et RGB à détecter la présence de singes atèles sur la canopée.
- ⊕ **Méthode optimale** : Etudier les variations d'efficacité de détection en fonction de différents paramètres
- ⊕ **Faisabilité** : Evaluer la faisabilité de la méthode et de l'outil en fonction des contraintes rencontrées sur le terrain et leur applicabilité sur le territoire du PAG.

Si les tests sont concluants et que la méthode s'avère techniquement applicable à l'échelle du PAG, l'objectif sur le long terme sera d'arriver à estimer les densités de population de l'atèle et évaluer la durabilité des pratiques de chasse dans les zones couvertes par le PAG pour une mise en place d'un cadre juridique adapté à la conservation de l'espèce et aux besoins des communautés locales.

3 DEMARCHEES REGLEMENTAIRES POUR LA MISE EN OEUVRE D'UN SUIVI PAR DRONE

Les réglementations peuvent fortement conditionner la conception des protocoles et limiter le pouvoir d'échantillonnage de l'outils. En effet, le télépilotage d'un drone, qu'il soit amateur ou professionnel, est soumis à des réglementations strictes. La mise en place d'études pilotes et d'un protocole impliquant l'utilisation d'un drone imposent donc de connaître la législation en vigueur en France. En effet, tout aéronef est considéré comme potentiellement dangereux, surtout s'il est utilisé à proximité d'êtres humains. En Guyane, les réglementations sont moins accessibles, en témoigne l'absence de données IGN (site Géoportail) sur les zones réglementaires de vol sur le territoire. Majoritairement constituée de forêt tropicale humide, la Guyane est un territoire peu soumis à réglementation par rapport à la France hexagonale où il y a du rouge sur presque toute la carte.

Les règles de base à avoir en tête et à respecter sont les suivantes :

- **Ne pas voler au-dessus d'une agglomération, ni au-dessus du public** (pour des questions de sécurité et de respect de la vie privée). → En forêt, cette règle ne nous concerne pas.
- **Ne pas voler de nuit.** → Cette règle nous concerne seulement si l'on inclut des vols durant la nuit aéronautique dans le protocole. La nuit aéronautique commence 15 minutes après le coucher du soleil et se termine 15 minutes avant le lever du soleil pour les latitudes inférieures ou égales à 30°.
- **Ne pas voler au-delà de 120m au-dessus du niveau du sol.** → Pas concernés car les vols se feront toujours à une hauteur inférieure au plafond réglementaire.
- **Garder le drone à portée de vue pour éviter des accidents.** → Concernés car les vols en forêt guyanaise impliquent que le drone soit hors vue du télépilote (à moins de décoller d'un point haut surplombant la zone de prospection, exemple un inselberg ou savane roche).
- **Vérifier que la zone aérienne n'est pas soumise à des contraintes, voire à une interdiction de vol.** Sont interdits les survols des agglomérations, aérodromes, prisons, hôpitaux... Certains espaces naturels sont réglementés (cœur de Parcs nationaux, Réserves Naturelles Nationales et arrêtés préfectoraux de protection de biotope). → Potentiellement concernés par les aérodromes (à Saül, Maripasoula, Grand Santi, Camopi par exemple) et les vols en RNN. La zone cœur du Parc Amazonien de Guyane n'est pas soumise à réglementation selon les données fournies par le site web Drone-spot (<https://www.drone-spot.tech/>).

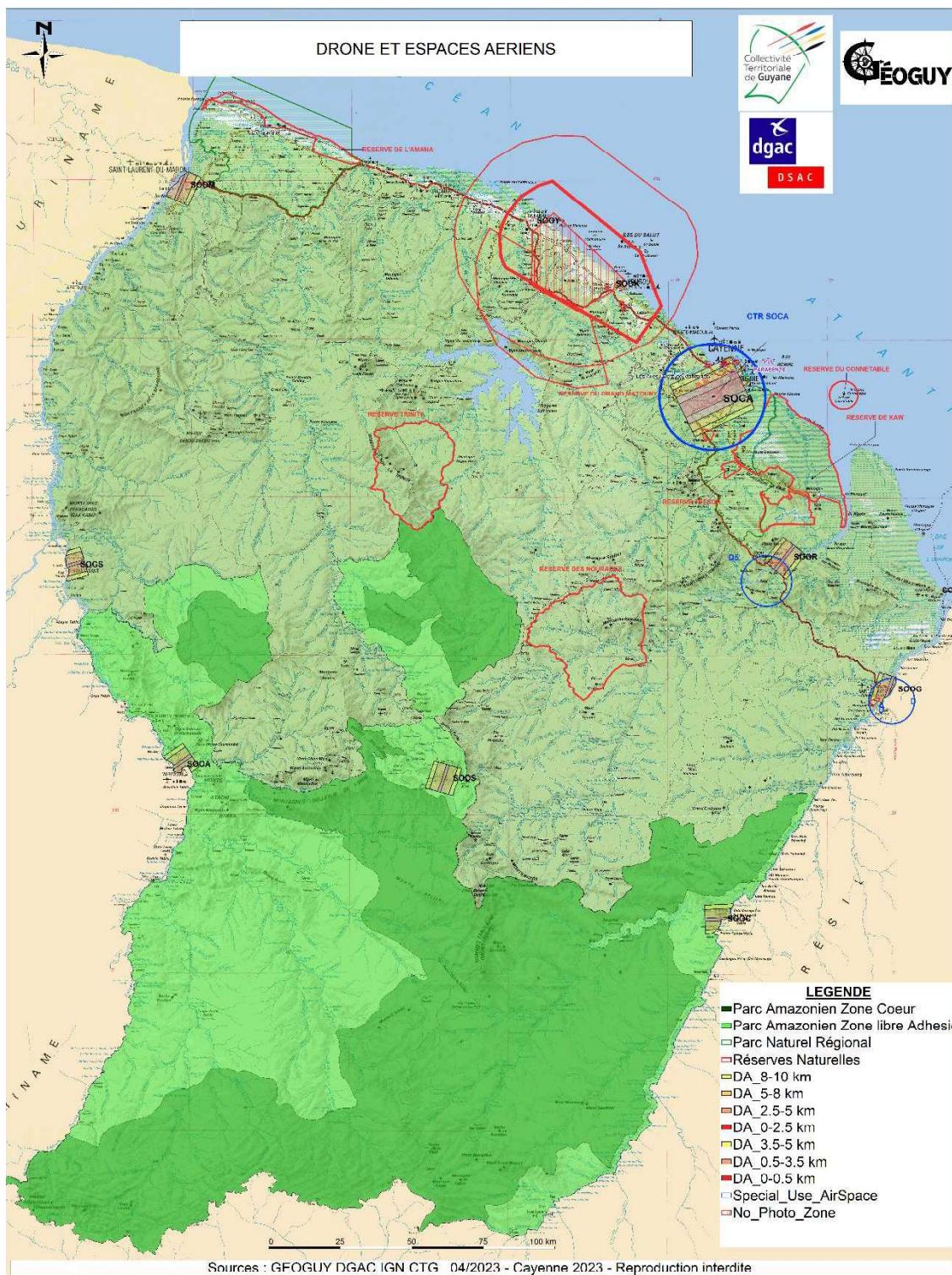


Figure 1 Carte de Guyane montrant les espaces aériens soumis à réglementation pour le télépilotage de drones

- Un drone pesant plus de 250g doit être enregistré sur le site gouvernemental alphatango.aviation-civile.
- Il est fortement recommandé d'être assuré en cas de dommages causés aux personnes ou aux biens.

Il est possible pour les opérateurs professionnels de contourner la législation en effectuant des demandes de dérogations :

- Pour voler dans un espace aérien contrôlé, il faut demander l'autorisation du gestionnaire de la zone en notifiant clairement les vols que l'on souhaite effectuer durant la mission et les objectifs de celle-ci. En Guyane, la DGAC gère les couloirs d'aéroport et la CTG les couloirs d'aérodromes.

A noter qu'il est important d'identifier au préalable le scénario de vol nécessaire pour la mission car les autorisations spécifiques demandées dépendront de ce dernier. Les différentes façons de voler avec son drone sont décrites par la DGAC sous 4 scénarios de vol, classés en fonction du niveau de risques : S1, S2, S3 et S4.

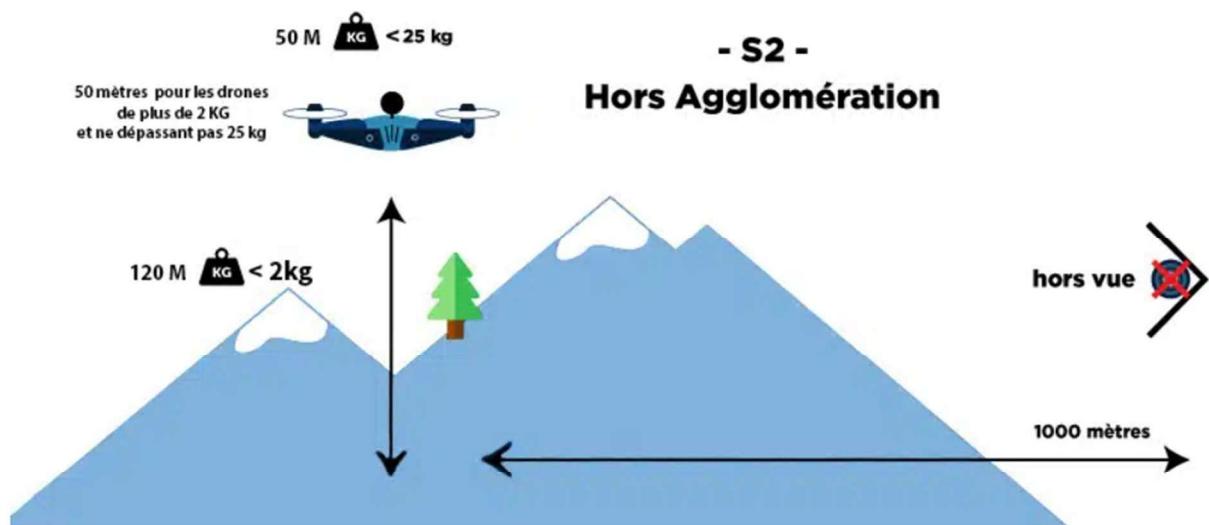


Figure 2 le scénario de vol S2 expliqué schématiquement (source : <https://www.flyingeye.fr/formations-drone/scenarios-de-vol-drone/>)

Dans notre cas, nous sommes en scénario S2 : le but étant de faire de la prospection au-dessus de la forêt tropicale impliquant de piloter hors vue du drone, c'est-à-dire, que le suivi du drone ne se fait que par le biais de l'écran de la radiocommande. Un drone pesant moins de 2 kg peut voler jusqu'au plafond réglementaire fixé à 120m du sol et peut parcourir 1km maximum de distance horizontale par rapport à la position du télépilote. Si le drone pèse plus de 2kg, il faut faire une demande dérogation pour pouvoir voler à plus de 50m.

- Pour voler pendant la nuit aéronautique, un formulaire de demande de dérogation doit être soumis à la DGAC.

En dehors des démarches réglementaires propres à l'utilisation du drone, si la mission scientifique a lieu dans une RNN, il faut avant tout penser à faire une demande d'autorisation d'activité : La démarche d'obtention d'une autorisation est instruite par le service PEB : Milieux Naturels, Biodiversité, Sites et Paysages de la DGTN ainsi que la personne gestionnaire de la réserve.



Réserve Naturelle
NOURAGUES

SENTINEL



I. Expérimentation du drone thermique pour le suivi des singes atèles dans la Réserve Naturelle Nationale des Nouragues



1 INTRODUCTION

Cette mission qui s'est déroulée du 16 au 21 novembre 2022, avait pour objectif de tester différents aspects techniques liés à l'emploi d'un drone thermique en pleine forêt tropicale humide, dans une zone reculée avec du relief altimétrique et une forte densité d'arbres afin d'en faire ressortir les contraintes.

C'était la première partie pour évaluer la faisabilité de cette méthode sur le territoire guyanais. Avant toute chose, il était nécessaire de répondre à ces questions : Est-il possible de faire décoller et atterrir un drone facilement en pleine forêt tropicale ? Quelle est la portée du drone face à un couvert forestier dense ? Quels sont les conditions optimales pour une lecture efficace de l'imagerie infrarouge (bon contraste thermique) ?

...

Cette mission pilote nous a permis de tester certains aspects importants pour déterminer les facteurs technologiques et environnementaux pouvant augmenter les chances de succès dans la détection des singes atèles. Des survols ont été effectués à différents moments de la journée en vidéo ou en orthophotographie, en mode automatique ou manuel, avec différents types de capteurs et la caméra dirigée à différents angles vers le sol. Au moins trois atèles ont été détectés grâce à l'infrarouge thermique et deux autres sources de chaleur en déplacement correspondant probablement à deux singes hurleurs. La mission a permis de mettre en lumière l'importance de la mise en œuvre d'études pilotes, pour collecter plus de données et de connaissances sur la méthode, nécessaires à la mise en place de futurs protocoles adaptés aux conditions du terrain.

2 DRONE ET CAMERA UTILISES POUR LA MISSION

Les vols ont été effectués par un télépilote habilité (Loïc Lascurettes) de la société de drones Sentinel. Celle-ci disposait d'un drone DJI Matrice 300 RTK avec la caméra H20T, possédant à la fois un capteur thermique (TIR) et un capteur au spectre visible (RGB). Ce drone de dernière génération permet d'avoir une autonomie supérieure aux autres drones de ce type (40 minutes vs 25 minutes) et la caméra qu'il embarque possède une résolution 640 x 512 et une ouverture de 40,6° (DFOV).

2.1.1 Hauteur de vol et largeur de bande de prospection

Les enquêtes par drone doivent trouver un équilibre entre la couverture d'une zone maximale au sol dans le temps possible pour le vol et la résolution minimale nécessaire pour que les animaux puissent être correctement identifiés.

En gardant l'hypothèse émise par Burke et al. (2019) selon laquelle il faut compter 10 pixels par entité pour une identification précise, on obtient une hauteur de vol maximale h de 111 mètres (1) entre la canopée et le drone pour permettre de détecter correctement un atèle.

$$(1) \quad h = \frac{l}{2 \tan\left(\frac{DFOV}{2}\right)}$$

$$h = \frac{82}{2 \tan\left(\frac{40.6}{2}\right)} = 111m$$

A cette hauteur, c'est une bande de 64 m mètres de large qui est prospectée (2). Cette largeur dépend de la hauteur selon la formule suivante :

$$(2) \quad lx = h * 2 \tan\left(\frac{DFOV}{2}\right) * \frac{Nx}{\sqrt{Nx^2 + Ny^2}}$$

$$lx = 111 * 2 \tan\left(\frac{40.6}{2}\right) * \frac{640}{820} = 64 m$$

Avec lx la largeur de la bande prospectée en mètres, h la distance entre le drone et la canopée en mètres, $DFOV$ le champ de vision diagonal en degrés, Nx Le nombre de pixel sur l'axe x, Ny le nombre de pixels sur l'axe y.

A 50 mètres de hauteur, la bande ne fait plus que 29 mètres de large. Il est donc nécessaire de pouvoir voler à une hauteur importante pour pouvoir couvrir de grandes distances.

Ce drone embarque un télémètre laser qui permet d'obtenir en permanence la distance entre le drone et la canopée et donc de remonter de la manière la plus précise possible à la surface effectivement prospectée.

2.1.2 Autonomie et portée de vol

Le Matrice 300 RTK affiche une autonomie de 43 minutes lorsqu'il est équipé de la caméra H20T. A cela il faut soustraire le temps de décollage et d'atterrissement ce qui laisse un peu moins de 40 minutes. Il est nécessaire, pour pouvoir s'assurer que tous les animaux comptabilisés comme atèles le sont bien, de pouvoir s'approcher des contacts visuels qui pourraient être des atèles ou encore de pouvoir tourner autour pour multiplier les angles de vue afin de pouvoir confirmer ou infirmer chaque contact. Il paraît donc raisonnable de considérer entre 25 et 35 minutes de déplacement effectif par vol.

Le challenge suivant est de trouver un plan de vol qui permette de couvrir une surface importante en maximisant la surface prospectée (se déplacer en ligne droite durant 6 km n'étant pas un scénario envisageable car il faut compter le parcours nécessaire au drone pour retourner à son point de décollage). De plus, il est important de prendre en compte que, en forêt, le signal entre la radiocommande et le drone tend à se perdre à partir des 1 - 1.2 km (même si cela dépend de facteurs topographiques, météorologiques etc...).

La perte de signal dépend du couvert forestier, il faudra donc juger sur place les risques de perte de signal et, par extension, la portée maximale du vol.

3 LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

La méthode de suivi par drone avec caméra infrarouge a été testée autour du camp Pararé, dans la Réserve Nationale Naturelle des Nouragues ($4^{\circ}02'16.9''N$ $52^{\circ}40'21.9''W$) en Guyane Française.

La station scientifique est située au cœur de la forêt tropicale humide et loin des perturbations anthropiques. Cet endroit a été choisi pour cette première étude pilote car il présente plusieurs avantages : tout d'abord, cette zone est dédiée à la recherche scientifique et les données de densités obtenues par Distance Sampling (DS) sont stables dans le temps. En saison sèche, la densité de singes atèles est d'environ $4,41$ ind/km 2 et de $5,66$ ind/km 2 en saison des pluies.

De plus, la station de Pararé offre un accès relativement facile à une forêt encore peu affectée par l'activité humaine, et donc encore bien habitée par les singes atèles. Le camp de base offre également un certain confort, avec de l'électricité pour recharger les batteries des drones.

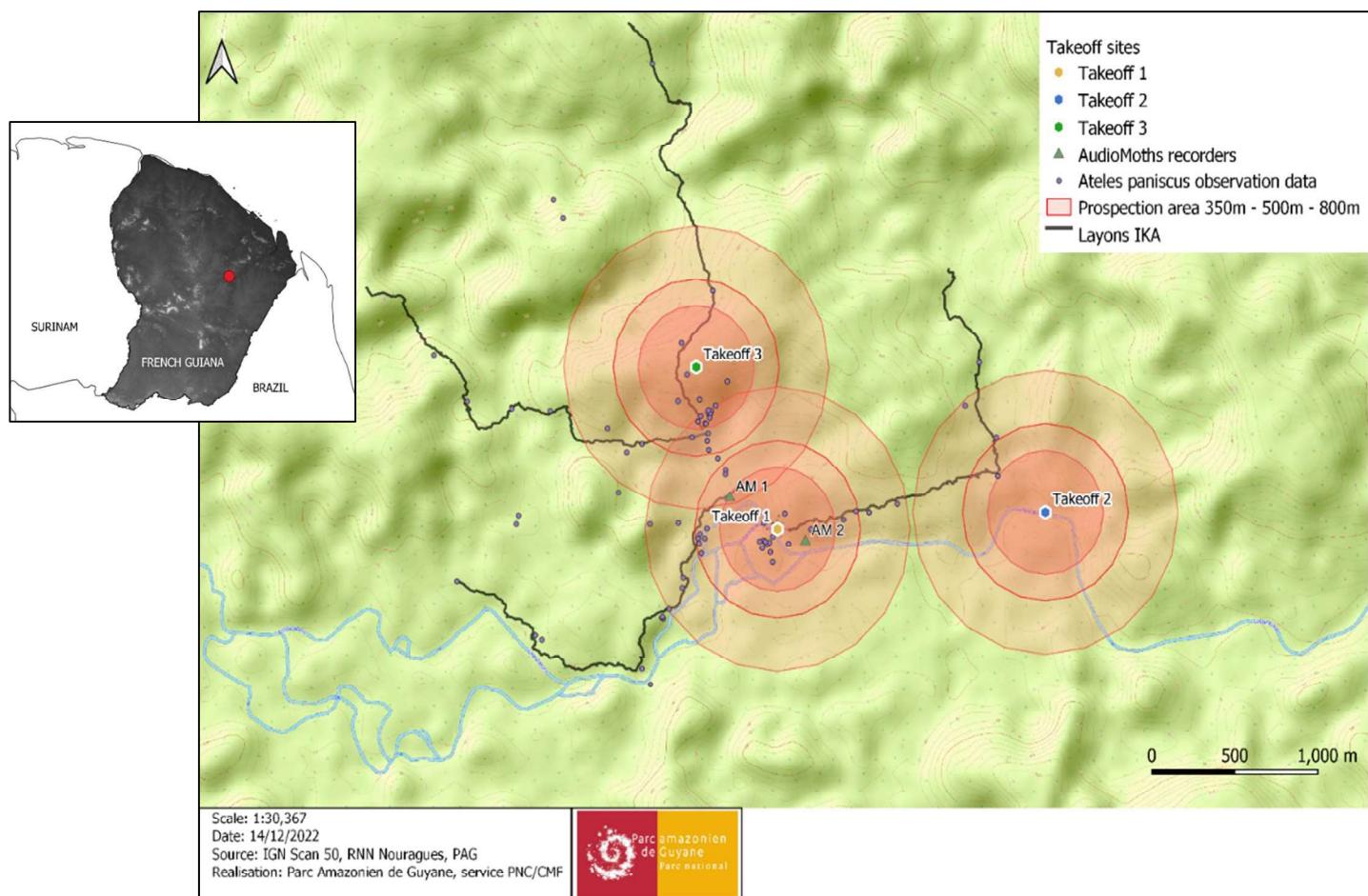


Figure 3 Zone d'étude pour la phase test du suivi des singes atèles par drone à caméra infrarouge situant : les 3 sites de décollage (Takeoff1 = Drop zone du camp Pararé, Takeoff 2 = Pirogue sur l'Arataï, Takeoff3 = Relais radio sur le plateau de forêt), la portée de prospection du drone pouvant aller de 350m (limite minimum), 500m (limite fréquente), 800m (limite maximale), et les deux enregistreurs AudioMoths (AM1 et AM2) placés en forêt.

4 MOMENT DE LA JOURNÉE CHOISIS POUR LES VOLIS

La mission s'est déroulée en saison sèche pour des raisons de conditions de vol. Les vols de drone ne peuvent pas être effectués sous la pluie, car cela présente des risques pour le matériel ainsi qu'une baisse de résolution au niveau des capteurs, ce qui donnerait des données non exploitables.

Tous les jours, pendant 4 jours et demi, des vols étaient effectués à différents moments : en journée (matin, midi et après-midi), au coucher de soleil (17h45-19h), et la nuit (20-23h). Nous n'avons pas pu effectuer de vols très tôt le matin (5-6h) ni au lever de soleil (6-6h30) car une épaisse couche de brume empêchait toute visibilité. La Réserve Nationale Naturelle des Nouragues est un territoire de forêt à nuages de plaines et fait partie, par conséquent, des endroits de Guyane à forte nébulosité matinale (90% des nuits pendant la saison sèche et 100% des nuits pendant la saison des pluies, Obregon et al., 2014).

5 SITES DE DECOLLAGE

Les vols ont été effectués à trois endroits différents (fig.1): 19 depuis la drop zone du camp (site de décollage certain et prédéterminé), 6 depuis la pirogue sur la crique Arataï en aval du camp (site prédéterminé mais à confirmer sur place selon le jugement du télépilote et du piroguier), et 5 depuis le plateau, en forêt, à environ 1km du camp (site prédéterminé mais à confirmer sur place selon le jugement du télépilote).

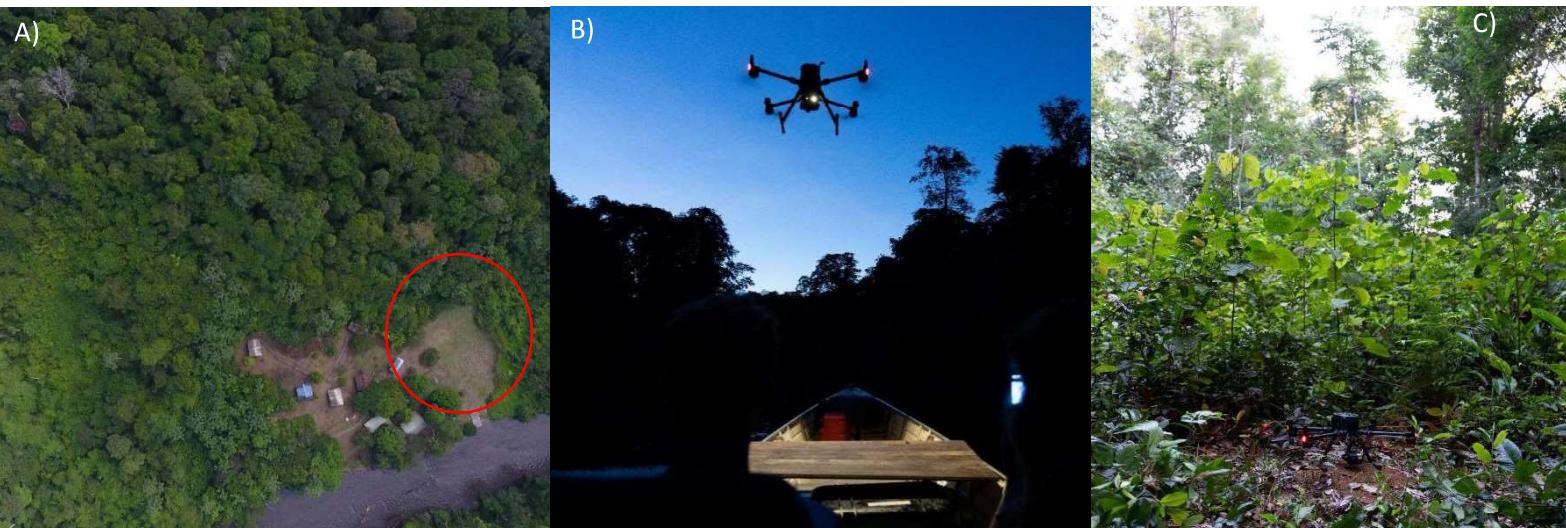


Figure 5 Photographies des trois sites de décollages utilisés pour les tests : A) vue aérienne du camp Pararé avec la drop zone indiquée par un cercle rouge. B) Décollage depuis la pirogue sur la rivière de l'Arataï. C) Décollage depuis la forêt (relais radio), dans une zone défrichée

6 PROSPECTION

14 vols ont été effectués en mode manuel, notamment lorsqu'on voulait prospector une zone en se déplaçant librement ou pour chercher un endroit précis.

Les 16 autres prospections ont été faites avec un plan de vol automatique (en orthophotographie), où le drone est commandé à suivre des transects pour couvrir un périmètre défini en prenant des photos à des pas de temps réguliers. Le plan de vol peut être interrompu si l'on juge intéressant de s'arrêter et de s'approcher d'une source de chaleur.

La caméra H20T permet d'enregistrer des images avec les deux capteurs, en IR et en RGB. Les vols en journée et au coucher de soleil permettaient d'avoir un retour en direct avec le capteur de notre choix. L'IR permettait la détection et l'RGB la confirmation et l'identification. De nuit, seule la caméra IR peut être exploitée.

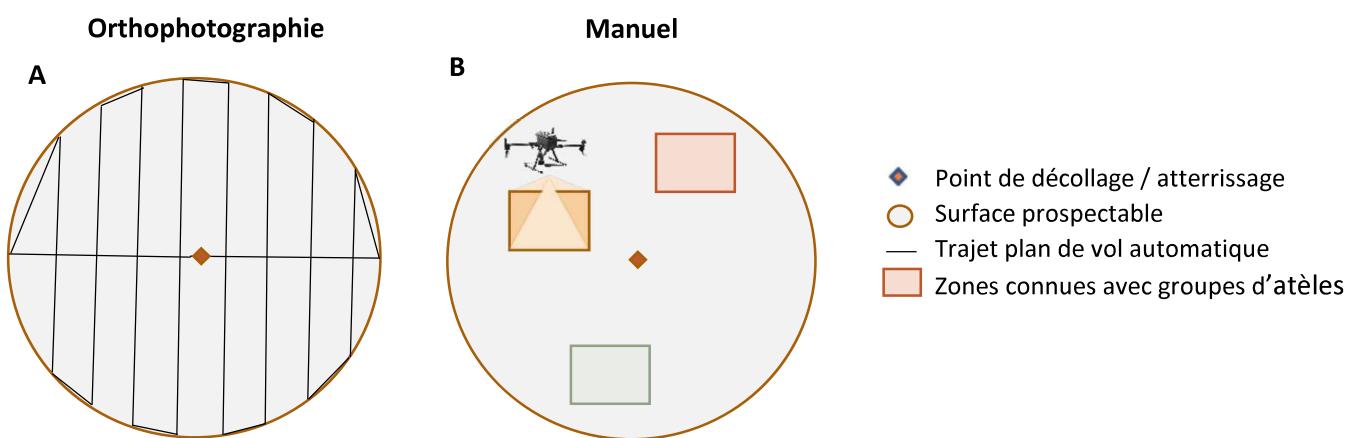


Figure 6 2 types de plans de vol effectués : A) plan de vol automatique en orthophotographie préprogrammé, permettant de prospector l'ensemble de la surface prospectable. B) plan de vol manuel en stationnaire, ciblant les zones connues de présences de singes atèles (notamment grâce à la localisation préalable de « sleeping trees ») ou simplement pour une prospection libre.

7 ANALYSE

Les photos JPG et vidéos ont été individuellement analysés a posteriori. En cas de doute sur l'identification de sources de chaleur un regard d'expert a été sollicité. Les images ont pu être traitées sur le logiciel DJI Thermal Analysis Tool et les logs de vols sur PhantomHelp (<https://www.phantomhelp.com/LogViewer/upload/>).

8 COUT

Sentinel :

1500 € / jour comprenant vol

980 € / jour transport matériel (aller et retour)

260 € / gestion administrative

260 € / préparation mission

= 8 480€

Station Scientifique des Nouragues :

Hebergement : 50€ / personne / jour (soit 250 € / personne)

Transport :

Taxi Cayenne – Regina : 225€ (Frais partagés CNRS-PAG)

Grande pirogue Regina – Pararé :

- 1 aller REGINA – PARARE : 237 € (Frais partagés CNRS-PAG)
 - 1 journée PARARE 17/11/2022 : 350 €
 - 1 retour PARARE – REGINA : 237.5 € (Frais partagés CNRS-PAG)
- Total pirogue = 825 €

Hélicoptère Pararé – Cayenne : 910 €

= 2 710 €

TOTAL = 11 190 €

9 RESULTATS

9.1 DETECTION DE SINGES ATELES

En survol manuel au coucher de soleil (18h15), deux sources de chaleurs, bien que difficilement remarquables (température légèrement supérieure à celle des troncs), ont été distinguées. La luminosité ambiante nous a permis d'avoir la confirmation de la présence d'un individu sautant de branche en branche (fig. 7, à gauche) et d'une femelle adulte posée au sommet d'un arbre dégagé tenant un juvénile (Fig. 7, à droite), grâce à la caméra RGB. Une signature thermique correspondait donc à deux individus. La température extérieure des atèles à cette heure était de 24,7°C.

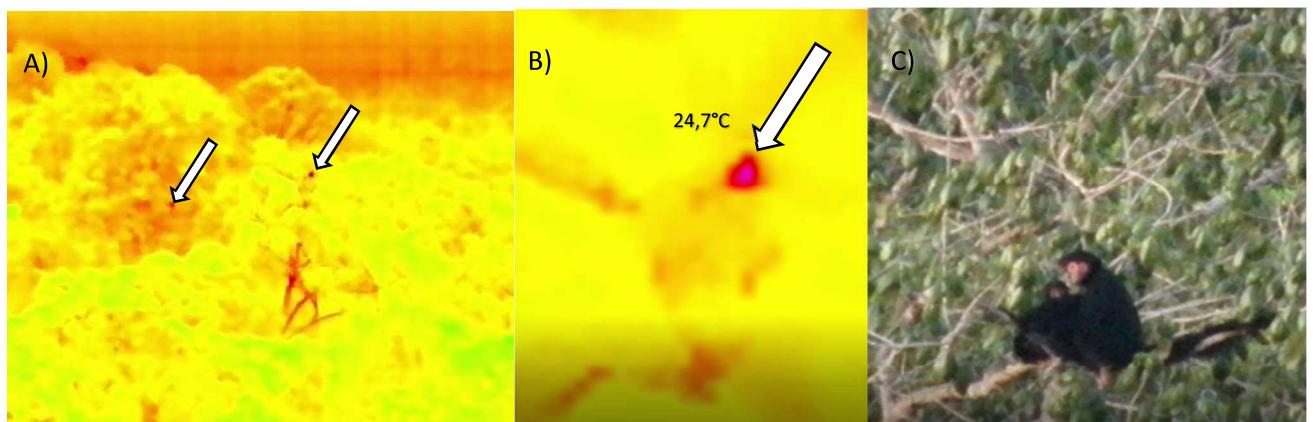


Figure 7 A) Détection de deux signatures thermiques correspondant à trois singes atèles (à gauche : un individu ; à droite : une femelle adulte et un juvénile, signalés par une flèche) grâce à la caméra infrarouge thermique. B) photo zoomée sur l'arbre où se trouvait la femelle et le juvénile C) confirmation visuelle de la présence de deux individus atèles grâce à la caméra RGB.

D'autres sources de chaleur pouvant être des atèles ont été observées (Fig. 8), mais elles n'ont malheureusement pas pu être confirmées au visuel ou depuis le sol. Mais le regard d'une personne habituée aux primates de Guyane (Margo Traimond, Zoo de Guyane) a pu nous orienter vers la présence d'un atèle adulte, allongé prenant un bain de soleil, sous les feuilles (chose qu'ils ont pour habitude de faire, dans cette position).

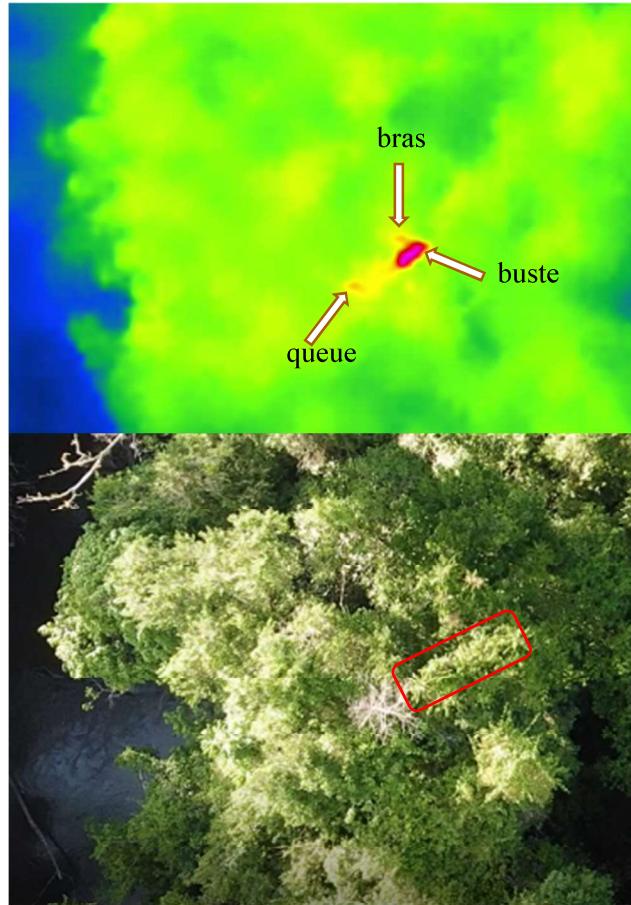


Figure 8 Source de chaleur détectée à l'infrarouge thermique (en haut) et image RGB correspondante (en bas). Les flèches signalent les différentes parties du corps, analysées *a posteriori*. Le rectangle rouge signale l'endroit où est supposé être l'animal, probablement caché sous les feuilles.

9.2 DETECTION D'AUTRES SINGES DE CANOPEE

Deux autres sources de chaleur en mouvement ont été détectées (Fig. 9) lors d'un vol effectué de nuit (vers 22h). Le vol a été arrêté pour s'approcher des dites sources : on voit dans la vidéo deux formes qui se déplacent clairement comme des singes, ressemblant plus à des singes hurleurs (*Alouatta macconnelli*) qu'à des singes araignées. L'identification reste incertaine, mais l'analyse de Margo sur les déplacements des deux animaux, va dans cette direction aussi.

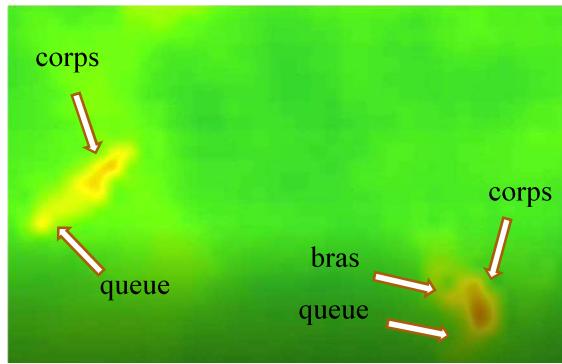


Figure 9 Deux sources de chaleurs s'apparentant à des singes hurleurs, détectées se déplaçant entre les branches d'un arbre.

9.3 EFFICACITE DE DETECTION EN FONCTION DU MOMENT DE LA JOURNEE

Journée	Peu de contraste thermique car beaucoup de surfaces chaudes (feuilles, troncs, branches irradiées par le soleil). → Trop de sources de confusions rendant la détection difficile
Coucher de soleil (17h45-19h)	Bon contraste thermique, mais encore quelques surfaces chaudes (car il faisait très beau pendant la journée) → bonne détection
Nuit (20h-23h)	Bon contraste thermique, mais qualité de l'image moins bonne. → Bonne détection mais impossible de confirmer avec la caméra visuelle

Les prospections au lever de soleil n'ont pas pu être réalisées pour cause de brume, mais c'est le moment le plus propice pour un bon contraste thermique optimal et la possibilité d'alterner entre les deux capteurs. Il faut privilégier le coucher et lever de soleil pour pouvoir détecter ET identifier.

10 DISCUSSION (LIMITES ET SUGGESTIONS)

Cette mission a permis de montrer qu'il est possible de détecter des singes en canopée grâce à une caméra thermique embarquée sur un drone, mais elle avait aussi, et surtout, vocation à mettre en lumière les limites et les contraintes qui peuvent enrayer l'efficacité de cette méthode en forêt tropicale. Voici quelques limites et recommandations à l'issu de cette premières phases test :

10.1 LIMITES LIEES AUX CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Brume et pluie : Certaines conditions météorologiques, telles que la brume ou les fortes pluies, empêchent la lecture des images thermiques. Il est donc primordial, au moment de définir un protocole de s'assurer des choisir un site et une saison aux conditions favorables. Il est préférable de faire les suivis en saison sèche et de vérifier en amont si le site est sujet à une forte nébulosité matinale. Dans notre cas, il était impossible de réaliser des vols avant 8h30, car une épaisse couverture brumeuse empêchait toute vision des capteurs. D'autant plus que les prospections sont supposées être optimales au lever de soleil, lorsque le contraste thermique est le plus élevé.

L'irradiation solaire et la température de canopée : Il est important de prendre en compte également certains facteurs tels que l'ensoleillement direct ou l'humidité relative qui peuvent biaiser l'interprétation du thermogramme. En effet, une photographie IR prise à la même heure, au même endroit mais à différents jours sera différente, selon si le ciel est plus ou moins dégagé, et selon s'il fait plus ou moins humide. A titre d'exemple, lorsque des parties de troncs, rochers, feuilles ou branches sont soumises à une forte radiation solaire en journée, elles peuvent atteindre des températures quasi égales à celle des singes, et ainsi rendre la détection plus ardue. C'est pourquoi, pour éviter ces sources de confusions, il convient d'opérer de nuit ou aux lever / coucher de soleil, mais cela peut être aussi efficace en journée si l'ensoleillement est adouci par la présence de nuages par exemple. Les moments les plus propices sont le lever et le coucher de soleil car ils permettent une détection grâce à l'IR et une identification avec le capteur RGB. A choisir, si la zone d'étude n'est pas sujette à une nébulosité matinale, le lever de soleil offre un meilleur contraste thermique car le couvert forestier a eu toute la journée pour se refroidir.

10.2 LIMITES METHODOLOGIQUES

Ecran déporté : La trop petite taille de l'écran de la radiocommande, à laquelle s'ajoutait des reflets du soleil en journée, ne permettait pas un suivi en direct optimal. Par ailleurs, la présence d'observateurs autour de la radiocommande est une source de stress pour le télépilote. Il conviendrait, pour des prochaines missions, d'utiliser un grand écran déporté, relié à la radiocommande, permettant de faciliter la prospection et l'analyse en direct du retour vidéo.

Zone de survol : 63% des décollages ont été effectués depuis la DZ du camp Pararé, car elle offrait des conditions de décollage et atterrissage idéales. Or, le drone circulait dans un périmètre trop proche du camp, ce qui pourrait expliquer en partie le faible taux de détection. Car il est connu que les atèles sont sensibles aux pressions anthropiques et se portent mieux loin des installations humaines. Il n'est pas impossible de les voir ou de les entendre proches du camp, mais le plus souvent, ils sont un peu éloignés, à au moins 1km. Il conviendrait, à l'avenir, de trouver des sites de décollage permettant de s'éloigner des villages, villes... La pirogue est une bonne solution, car en plus d'offrir des zones bien

ouvertes au ciel dans les cours d'eau (offrant une meilleure portée du signal), elle permet d'accéder à des endroits éloignés et difficilement accessibles à pied.

Drone vs. IKA : Pour les prochaines missions sur le territoire du PAG, il faudrait idéalement faire coïncider les suivis par drone avec des suivis au sol par Distance Sampling (IKA). Pour cela, il conviendrait de prévoir les missions en saison sèche, un peu avant, pendant ou un peu après les sessions d'IKA. Ce croisement permettrait de comparer l'efficacité des deux méthodes dans la probabilité de détection et l'estimation de densités de populations, ainsi que de corroborer les données pour s'assurer que la période choisie ne présente pas une singularité (même si, d'après les données de densités, celles-ci sont plus ou moins stables dans le temps). Par ailleurs, le PAG est équipé en lunettes IR, qui permettraient de prospecter au sol de nuit, en même temps que des survols par drone.

Manuel vs. automatique : Les prospections peuvent être soit opportunistes (vol manuel), soit préprogrammées (vol automatique). Dans des études visant à comparer la probabilité de détection d'un suivi par drone et d'une méthode de suivi traditionnelle au sol, les survols opportunistes sur la faune de la canopée en effectuant manuellement des transects préprogrammés et en faisant des pauses pour analyser les animaux détectés sont assez adaptés. Ils permettent une prospection efficace en temps réel grâce au retour vidéo ainsi que la capture ciblée d'images JPEG et TIFF avec des informations thermiques intégrées. En revanche, le mode manuel n'est pas adapté pour parcourir de la distance et couvrir une large surface car il n'est pas envisageable de prendre le risque d'aller trop loin et de perdre le signal sans pouvoir faire rentrer le drone en toute sécurité. Les prospections en plan de vol automatique présentent, elles, les avantages de prospecter sur de la distance en forêt, et de manière automatisée, annulant les biais potentiels liés aux observateurs et le risque de perdre le drone en cas de signal perdu. Ainsi, pour faire des études de densités de population, sur 1km^2 par exemple (unité des IKA), la méthode automatisée semble plus adaptée. D'autant plus qu'il est possible de stopper le plan de vol automatique pour faire des photos plus précises de sujets d'intérêts.

Format des données et angle de la caméra : Les photos sont certes plus intéressantes car elles portent des informations intégrées et sont donc facilement exploitables en post traitement, mais la vidéo est pertinente, voire indispensable pour la prospection pure en direct et pour voir les mouvements des animaux, qui aident à l'identification. La caméra penchée à 60° semble être un choix plus pertinent pour étudier les singes atèles, car cet angle de vue permet de mieux voir entre les branches et les feuilles de la canopée, comparé à une caméra placée en angle droit.

10.3 LIMITES MATERIELLES

Portée du signal : Bien que ce premier test ait été effectué avec le meilleur matériel possible actuellement disponible sur le marché, nous avons été confrontés à diverses limites liées à la technologie. L'aspect le plus problématique pour la récolte de données a été la perte de signal. En effet, en raison de la forte densité de végétation et de la hauteur du couvert forestier (canopée à environ 30m) qui faisait barrière au signal, il y avait régulièrement des pertes de transmission et de signal entre le drone et la

radiocommande, souvent autour de 500m, parfois même autour de 350m. Le record de distance parcourue par le drone fut 890m. Quand la perte de signal était forte, le retour vidéo se bloquait, empêchant toute analyse en direct et le drone était commandé de rentrer à son point de départ, par peur de perdre un matériel trop onéreux. Il existe néanmoins des solutions pour parcourir de la distance en forêt, comme par exemple, programmer un plan de vol automatique en intégrant les couches topographiques MNT et MNC pour que le drone suive le relief, et où il est commandé à poursuivre son parcours, même en cas de perte de signal. Des systèmes d'antenne déportée permettent également d'augmenter la portée du signal.

Plan de vol automatique : La prestation qui nous a été livrée n'était pas à la hauteur de nos attentes puisque les couches topographiques MNT n'avaient pas été intégrées dans les programmations. Le matériel étant trop onéreux, le télépilote n'a pas voulu prendre le risque de faire beaucoup de distance en automatique. Par ailleurs, le mode automatique n'était possible qu'en orthophotographie et à 90° (du moins avec les applications et les compétences dont disposait le télépilote).

Vols nocturnes : Les vols effectués la nuit, censés être le moment le plus adéquat pour nous apporter une meilleure lecture des contrastes thermiques, se sont avérés un peu décevants de par la très faible résolution des images, très pixelisées. C'était surtout le cas lorsque le drone était à plus de 100 m au-dessus du sol. Il conviendrait donc, de nuit, de voler dans des conditions optimales (un faible taux d'humidité, pas de pluie) et de voler plus bas, à environ 80m.

Hauteur de vol : Le vol du drone à haute altitude (> 100 m) a permis d'étudier une zone plus large en un temps plus court qu'à des altitudes plus faibles, mais cet avantage s'est fait au détriment de la résolution du capteur thermique et de la détectabilité des animaux de la canopée. La résolution augmente lorsque l'on s'approche à une certaine distance du sujet, mais malheureusement, les vols se faisaient trop haut (par souci de sécurité), presque toujours au-dessus de 100m du niveau du sol au point de décollage, et donc environ 70-80m au-dessus de la canopée. Il faut aussi prendre en compte le dérangement occasionné par le bourdonnement du drone, qui s'apparente pour eux à un nid de guêpe. Les deux individus observés en figure 2, étaient très loin du drone, mais ils ont quand même capté sa présence, et le regardaient avec curiosité et/ou peur. Nous avons pu constater qu'une hauteur de vol autour de 80m permettait une meilleure visibilité et résolution des points chauds, augmentant ainsi la probabilité de détecter des atèles. Il s'agit de trouver un bon compromis entre la résolution, le dérangement et la surface prospectée.

Géolocalisation : Avec les moyens mis à disposition par le télépilote, il était difficile de géolocaliser un point d'intérêt en direct (un individu, un arbre...), surtout quand l'image était zoomée. Il est possible en aval d'obtenir les informations de géolocalisation de chaque image, mais les vidéos ne donnent pas cette information. Des applications telles que DJI Waypoint doivent permettre de pallier à ce problème.

Post-traitement des données : une fois les données collectées, le traitement des images thermique constitue un autre défi. L'analyse nécessite encore actuellement un traitement manuel des données. Celui-ci nécessite une expertise un minimum qualifiée en imagerie

thermique et l'assemblage des orthophotographies en ortho-mosaïque requiert des logiciels coûteux et peut prendre plusieurs heures. Pour minimiser le temps et l'énergie, il est important d'anticiper les missions, et de s'assurer que l'expertise accompagnera également le post traitement.

11 CONCLUSION

L'utilité de l'infrarouge dans la détection et l'inspection est indéniable car, en captant la chaleur, ce spectre permet de détecter des choses qui sont difficiles, voire impossible à voir à l'œil nu. Cette technologie n'a été que récemment mise au service de l'écologie et de la conservation. Ce genre de mission est complexe et il faut prendre en compte divers facteurs environnementaux et technologiques desquels dépendra le bon déroulement du protocole. Il est donc, avant toute chose, primordial de définir ces facteurs et d'effectuer plusieurs tests pour évaluer les paramètres qui influenceront l'efficacité de détection des singes atèles (ou autres animaux à sang chaud). Par exemple, comme cités précédemment, la météo, le moment choisi pour faire le vol, la température de l'environnement, le couvert forestier ou l'angle de la caméra peuvent grandement influencer la qualité des données graphiques récoltées.

Ainsi, plus de tests et d'études pilotes sont nécessaires sur le territoire guyanais afin d'arriver à un protocole standardisé et optimal pour l'étude des singes atèles par drone à caméra infrarouge.

II. Test du drone thermique sur des individus de singes atèles (*Ateles paniscus*) hébergés au Zoo de Guyane



Participants :

- TRAIMOND Margo (responsable animalière du Zoo de Guyane)
- WEINUM Frédéric (droniste GEOGUY)
- MARQUES FERRI Cristina, en charge de l'opération (chargée de mission faune du PAG)

Était présent également Philippe GAUCHER (écologue, naturaliste).

1 OBJECTIF PRINCIPAL

Tester empiriquement différents facteurs influençant l'efficacité de détection des singes atèles (*Ateles paniscus*) et autres animaux à sangs chauds, sur des individus hébergés au Zoo de Guyane.

2 OBJECTIFS SPECIFIQUES

- Tester un nouveau matériel (drone DJI Mavic 3T)
- Tester la perturbation occasionnée par le drone
- Tester la détectabilité en fonction de plusieurs facteurs (hauteur, luminosité, filtre, sujet en déplacement ou immobile, sujet découvert ou couvert etc...)
- Déterminer les paramètres optimaux

3 PERIODE DU TEST

Le test s'est déroulé le 11 Mars 2023, de 17h à 20h30. La météo clémente du petit été de mars nous a permis de mener l'opération dans de bonnes conditions.

4 DESCRIPTION DU SITE

L'étude a été réalisée sur les individus d'atèles (*Ateles paniscus*) hébergés au Zoo de Guyane. Ils sont répartis dans deux enceintes en forme circulaire formant un grand 8 :

- *Le cirque* : Un espace plus petit et clôturé où sont logés cinq individus qui ont grandi en captivité. Parmi les cinq individus, quatre sont des femelles qui sont nées en milieu naturel mais ont été élevées par l'Homme. Et un mâle qui est né en captivité dans le zoo La Vallée des Singes (près de Poitiers) où les singes sont habitués à l'Homme. L'enclos est tapi de gazon et contient un carbet, quelques arbres et un ponton.
- *L'île* : 8 individus (dont un bébé) sont logés dans un grand îlot, situé à côté du cirque. Certains sont nés en milieu naturel et ont été élevés à la main, tandis que d'autres ont été élevés par leurs parents. Ces animaux sont moins imprégnés que ceux du cirque. L'île se compose de gazon recouvrant tout son sol, d'un carbet et d'une petite forêt au milieu composée d'arbres non très haut (environ 7-10m max).

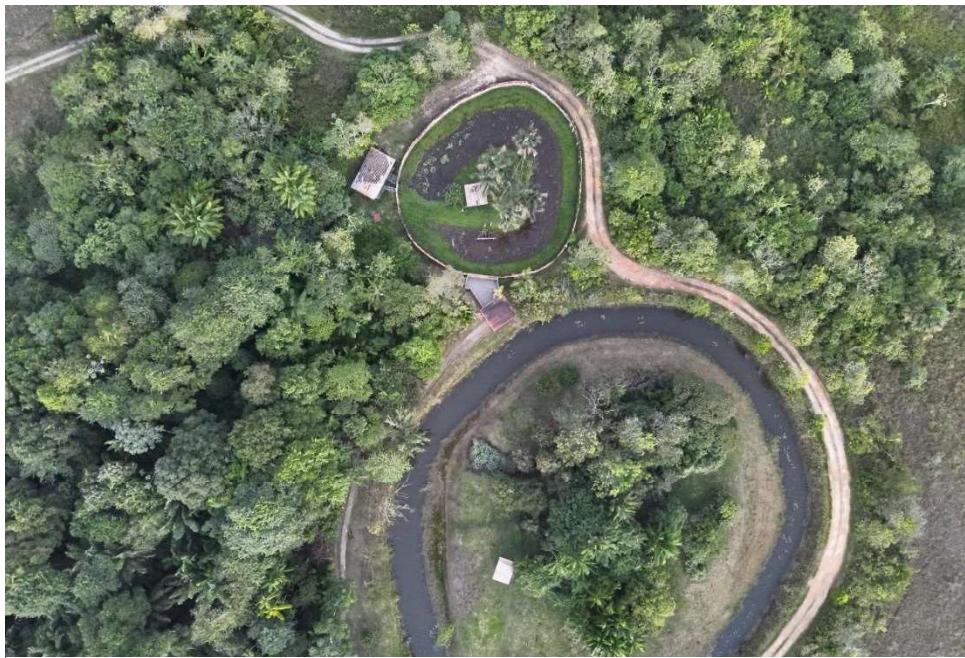


Figure 10 Photographie aérienne prise avec le drone des deux enclos hébergeant des atèles, où les survols ont été effectués. En haut : le petit enclos appelé « cirque » ; en bas : le grand enclos appelé « l'île ».

5 DESCRIPTION DU MATERIEL

Les images et vidéos ont été prises à l'aide d'un drone spécialisé dans l'imagerie infrarouge thermique : le Mavic 3 Thermal. Ce drone est le tout nouveau de la gamme Mavic de DJI et présente l'avantage d'avoir des performances tout aussi élevées qu'un grand drone Matrice (sauf le télémètre intégré) tout en conservant une très petite taille, ce qui le rend le modèle le plus adapté pour ce type de suivi en forêt tropicale. Il est léger (920 g) et pliable, facilitant sa transportabilité sur le terrain. Sa nacelle de captation intègre trois capteurs : deux capteurs visuels RGB (un grand angle et un zoom allant jusqu'à x56) et une caméra radiométrique thermique de 640 x 512p. Doté de capteurs sur tout son corps, il est capable d'éviter les obstacles à 360°. Concernant l'ergonomie, la batterie permet un vol de 45 min (compter environ 30 min de vol effectif). Malgré sa sortie récente sur le marché et le manque de recul, il est déjà en train de faire ses preuves auprès d'une petite poignée d'utilisateurs dans le monde (à Bornéo, par exemple, dans le suivi des Orang outans).



Figure 11 Photographie du Mavic 3T de DJI

6 DEROULEMENT DE L'OPERATION

Les tests ont été effectués au coucher de soleil et de nuit en dehors des horaires d'ouverture du Zoo de Guyane, ce qui nous a permis d'opérer en toute sécurité. Pour survoler les enclos, les décollages se sont fait à environ 500 m de distance, dans une zone de passage dégagée hors vue des singes. Une petite forêt sépare le site de décollage des enclos des atèles. Margo, qui a une connaissance très poussée des individus hébergés au Zoo et de leurs caractères individuels, nous a indiqué que faire décoller le drone à côté des singes induirait une réaction directe de fuite, et il est indispensable de penser à leur bien-être et d'éviter de les effrayer.

7 RESULTATS

7.1 FURTIVITE DU DRONE

Les différents survols nous ont permis d'évaluer la furtivité, tant auditive que visuelle, du nouveau drone Mavic 3T. Visuellement, le drone est très petit, d'une couleur grise-noire discrète, et il devient difficile de le voir dans le ciel dès qu'il atteint une centaine de mètres de hauteur. Or, il possède des lumières colorées (vertes et rouges) à l'extrémité des 4 bras, permettant justement de le repérer plus facilement et d'éviter de le perdre de vue. Ces dernières peuvent être enlevées grâce à un mode « furtif », qui invisibilise totalement le drone de nuit.

Cependant, malgré son style discret et sa petite taille, on constate que le Mavic 3T est assez bruyant. Le bourdonnement s'entend même quand le drone est à une centaine de mètres de distance. Malgré tout, le bruit n'est pas très dérangeant, ressemblant plus à un léger bourdonnement grave qu'à un son strident.

Recommandations : Pour voler le plus discrètement possible, il convient de garder les feux lumineux seulement pendant le décollage et l'atterrissement pour assurer un pilotage sécurisé en gardant un bon contact visuel avec le drone, et de passer au mode furtif pendant le vol. Pour la nuisance sonore, il convient de ne pas voler trop près des sujets pour éviter des réactions de peur et de fuite (aspect développé dans la partie suivante).

7.2 TEST DE LA REACTIVITE DES SINGES ATELES FACE AU DRONE

Comme mentionné précédemment, le drone, censé présenter l'avantage d'être un outil de suivi non invasif, peut tout de même engendrer une nuisance sonore et visuelle dont il est important d'étudier les effets. Les animaux sont des sujets sensibles, et particulièrement les primates sont susceptibles de réagir face à un bruit ou un corps qui leur semble étranger. Ainsi, la mise en place d'un protocole de suivi de faune par drone implique la détermination préalable d'une hauteur optimale de vol permettant un compromis entre une bonne détectabilité du sujet, une surface suffisamment grande de prospection et le non-dérangement du sujet.

Des vols ont été effectués sur les deux enclos, à des hauteurs descendantes pour observer le comportement des atèles en réaction au drone : le drone commençait à une hauteur maximale de 120m (plafond réglementaire), puis descendait peu à peu par paliers de 10m. Sachant que les atèles se trouvaient au sol ou seulement à quelques mètres de hauteur (perchés entre 1-7m sur le ponton ou dans les arbres), nous allons assumer, pour faciliter l'interprétation, que la hauteur de vol correspond à la distance entre le drone et les atèles. Dès qu'une réaction de peur ou de fuite était observée chez un ou plusieurs individus, le drone était immédiatement remonté et la manip interrompue pour éviter de stresser les singes. Margo se trouvait à côté des enclos pour surveiller leurs réactions et communiquait avec nous via un talkie-walkie.

En dehors de la hauteur de vol, la réaction des atèles hébergés au Zoo de Guyane face au drone a été variable selon les individus. En effet, les individus hébergés dans le cirque, plus imprégnés par l'homme, étaient beaucoup moins farouches que ceux hébergés dans l'île.

Les réactions étaient notées pour différentes hauteurs suivant plusieurs catégories :

- *Pas de réaction* : absence de réaction, les atèles n'ont pas repéré le drone et leur comportement ne change pas.
- *Repérage* : un ou plusieurs individus ont détecté la présence du drone. Ils s'interrompent et lèvent la tête pour regarder le drone, sans manifester aucun signe d'agitation ou de peur. Pas d'altération notable de leur comportement.
- *Vigilance* : Un ou plusieurs individus ayant remarqué le drone commencent à exprimer des signaux d'alerte et de vigilance. Ils s'interrompent et regardent pendant longtemps le drone.
- *Fuite* : Un ou plusieurs individus ayant repéré le drone se mettent à courir.
- *Panique* : Un mouvement d'agitation d'un ou plusieurs individus montrant des signaux de mécontentement ou de peur (déplacements rapides, agitation des bras, vocalisations...).

Tableau 1 Réactions des atèles des deux enclos (l'île et le cirque) face au drone en fonction de la hauteur de vol

	120 m	110 m	100 m	90 m	80 m	70 m	60 m	50 m	40 m
Île	Repérage	Repérage	Repérage	Vigilance	Fuite	Panique	-	-	-
Cirque	Pas de réaction	Repérage	Repérage	Repérage	Repérage				

On a bien pu constater que les réactions diffèrent selon le niveau d'imprégnation des atèles et selon les caractères individuels propres : les individus de l'enclos « cirque », bien habitués à l'homme, se sont montrés beaucoup moins craintifs et alertes : ils remarquaient le drone quand il était à environ 70m d'eux, et le droniste pouvait faire

descendre le drone jusqu'à 40m sans qu'ils ne montrent aucun signe de dérangement. Ils étaient relativement immobiles et indifférents au drone pendant toute la manip.

A l'inverse, les individus hébergés dans l'enclos « l'île » se sont montrés beaucoup plus réactifs face au drone, à tel point que nous avons préféré ne pas descendre en dessous de 70 m, pour éviter de leur induire du stress. A la hauteur maximale, le drone avait déjà été repéré par un ou deux des individus de l'île, qui regardaient vers le ciel. Vers 90m, on constate un comportement plus vigilant, avec plus de regards appuyés vers le drone. A environ 80 m certains individus commencent à se déplacer rapidement dans l'espace puis à 70m un individu (Domino) montre des signes de mécontentement et les atèles sont plus agités. Le drone est dès lors remonté et éloigné de l'enclos. En revanche, d'autres individus ne semblaient pas être particulièrement dérangés par le drone et ont pu être approchés de plus près lors un vol suivant.

Recommandations : Pour éviter d'occasionner un fort dérangement du drone sur les atèles, il convient de définir une hauteur optimale de prospection. On le voit bien ici, celle-ci va dépendre du degré d'habituation des singes aux activités humaines. Il semblerait que plus ils sont habitués à la présence de l'Homme, moins ils vont être sensibles au drone. Le cas des individus hébergés au Zoo est bien évidemment singulier et peu représentatif des réactions que l'on pourrait rencontrer sur des individus sauvages en pleine forêt. Il convient donc de définir une fourchette de hauteur optimale sur des individus sauvages, tout en gardant en tête que celle-ci pourrait varier selon l'individu, le groupe, l'endroit. Dans tous les cas, il conviendrait de garder **minimum 40-50 m** de distance entre le drone et les animaux et de privilégier le zoom pour s'approcher visuellement d'eux.

7.3 TEST DE LA DETECTABILITE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE VOL

La distance par rapport à la cible est un facteur important à prendre en compte pour optimiser la détectabilité de ladite cible. Une caméra thermique infrarouge génère des images thermiques en recevant le rayonnement infrarouge d'objets. Plus l'objet est éloigné, plus le rayonnement s'atténue. Une distance trop proche ou trop éloignée entraînera des erreurs de mesure plus importantes.

*les flèches rouges indiquent la présence certaine d'un individu atèle au moment de la photo.



A cette altitude, c'est une largeur réelle d'environ 100m qui est couverte.

Une altitude de 100m est trop haute pour détecter nettement les atèles.

Il faut regarder très attentivement pour arriver à distinguer les points noirs synonymes de corps chauds d'atèles (on distingue très légèrement celui en haut à droite et en bas, sur le ponton, mais celui à gauche n'est pas perceptible car la distance est trop élevée pour capter le rayonnement de cette taille et il se trouve sur le gazon qui émet aussi beaucoup de chaleur).

A 50 m, on distingue mieux les signatures thermiques des atèles, même si les trois individus sur le gazon (à droite de l'image) sont difficilement perceptibles en raison du faible contraste thermique.

Un individu se trouvant un peu en hauteur dans un arbre d'environ 5m apparaît plus évident (à gauche de l'image).

Cette image a été prise avec le drone à 43m du sol et un zoom à 5.25. On distingue bien un individu présent sur le ponton.

Recommandations : Le test qui avait pour but de déterminer des hauteurs de vol minimale, maximale et optimale pour une bonne détection des atèles n'a pas été très concluant car d'autres facteurs influençaient la qualité de détection, notamment le manque de contraste thermique lorsque les individus se trouvaient sur le gazon encore chaud de la journée. Ainsi, que ce soit à 100, 80 ou 50m, la signature thermique des atèles n'était pas facilement perceptible puisque le contraste thermique entre eux et leur environnement n'était pas assez important.

Néanmoins, en se basant sur nos observations lors des tests, nous pouvons quand même constater qu'à partir de 100m de distance entre le drone et les atèles il devient trop difficile de les voir à l'IR. Il convient d'approcher le drone autour de **50 m** pour augmenter la résolution et la détection puis de zoomer pour analyser.

7.4 DETECTION ET IDENTIFICATION DES ATELES A L'INFRAROUGE THERMIQUE

Calibration

Pour s'assurer d'une bonne calibration des plages de températures et que le contraste thermique est bien net entre un animal à sang chaud et son environnement, nous avons testé le capteur thermique du drone sur nous :



Figure 12 Photo IR prise de nuit (vers 19h) avec le drone à environ 20m de hauteur.

Sur cette photo prise de nuit, on remarque bien que la technologie infrarouge thermique offre une vision nocturne et permet de bien faire ressortir les sujets chauds : en l'occurrence ici, des humains, mais aussi l'eau et le chemin en goudron. Quant à la végétation et au gazon, ils apparaissent plus froids en comparaison avec le reste (environ 25°C). Au coucher de soleil tout comme de nuit, nos températures extérieures étaient autour de 30°C.

Filtre

DJI offre une variété d'options de palettes permettant une lecture des différences de températures dans l'image thermique.

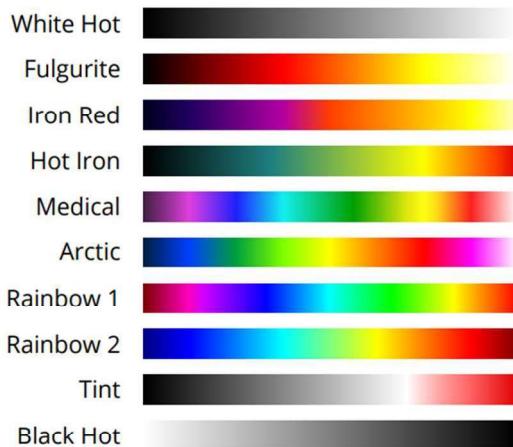


Figure 13 options de palettes proposées par DJI (issue du manuel d'utilisation du logiciel DJI Thermal Analysis Tool 3)

La palette « **Black Hot** » nous a semblé la plus adaptée pour la détection d'animaux à sangs chauds, car une palette de couleurs linéaire (en l'occurrence ici de blanc à noir en passant par des nuances de gris) permet une vision plus contrastée des sujets les plus chauds. Le noir représente les sujets chauds et le blanc les sujets plus froids. Par ailleurs, le filtre « **Black Hot** » semble faire une calibration automatique des plages de températures en fonction des sujets les plus chauds et les plus froids.

7.5 SIGNATURE THERMIQUE DES ATELES

Tous les sujets, qu'ils soient vivants ou inanimés, émettent de l'énergie thermique. Plus un sujet est chaud, plus il émet de l'énergie thermique (rayonnements infrarouges). Cette énergie thermique émise est appelée une « signature thermique ». Celle-ci diffère d'un objet à un autre, d'un individu à un autre, en fonction de la taille, du matériau, du pelage etc... Bien connaître la signature thermique d'une espèce est important pour une meilleure reconnaissance et la discrimination d'autres espèces lors des prospections. Cependant, l'apparence de cette signature dépendra aussi d'autres facteurs extérieurs (la distance du drone à la cible, le taux d'humidité relative, l'ensoleillement direct ...).

Le test au Zoo nous a permis de générer des données graphiques sur l'apparence des singes atèles et autres espèces à l'imagerie thermique.

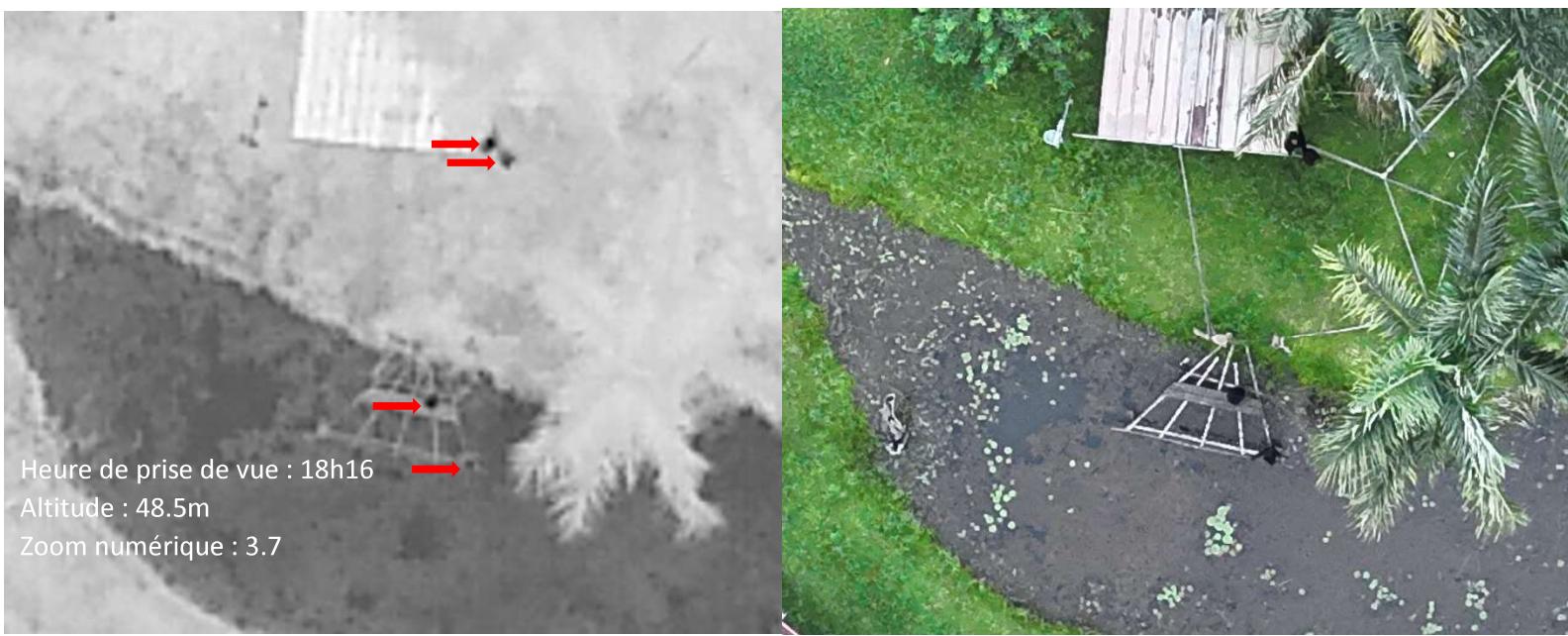


Figure 14 La même image prise avec le capteur thermique (à gauche) et le capteur visuel (à droite). Les signatures thermiques correspondant aux 4 individus présents à ce moment sont signalées par des flèches rouges.

En fin de journée, quatre des cinq individus du cirque ont été facilement détectés grâce à l'infrarouge (le dernier étant dans le carbet, caché par le toit de taule et donc invisible). On distingue bien quatre taches rondes distinctes, correspondant chacune à un individu. Le couplage avec la caméra visuelle nous permet de confirmer le comptage en temps réel. On remarque néanmoins que l'individu le plus bas sur l'image, se trouvant sur l'extrémité du ponton est plus difficilement remarquable dû au faible contraste thermique avec l'eau qui maintient une température élevée en fin de journée. Le bois, la taule et la végétation semblent refroidirent plus vite et offrent un meilleur contraste thermique. On peut donc considérer que le taux de détection du capteur thermique est de 100% lorsque les individus sont à découvert et que leur environnement est relativement plus froid.

Attention aux possibles confusions liées aux caractéristiques de l'espèce cible

Au-delà de facteurs extérieurs pouvant altérer la signature thermique tels qu'un faible contraste thermique, une hauteur de vol trop élevée, une trop forte humidité ou une couverture végétale trop dense, les tests au Zoo nous ont également permis de constater des sources de confusions intrinsèques aux atèles, qui n'avaient pas été identifiées auparavant.



Figure 15 En haut, la même image au capteur IR (a) et capteur visuel (b) montrant deux individus. En bas, une autre image au capteur IR (c) et visuel (d) montrant un seul individu. Une flèche rouge indique la présence d'un individu.

A noter que le zoom numérique réduit notablement la qualité de l'image thermique, qui peinait par moment à faire une bonne mise au point. La basse résolution peut être aussi due à un fort taux d'humidité relative.

Sur la figure 6a, nous distinguons bien les deux individus, même si la signature thermique de celui de gauche est plus diffuse et se confond un peu avec le gazon. On peut constater que la queue étendue de l'atèle de droite ne se distingue pas à l'image thermique, ce qui rend la signature thermique moins évidente en vue d'une identification en milieu naturel. En effet, la signature thermique, ressemblant ici plus à une boule sans membres ne permettrait que difficilement d'identifier un atèle sans confirmation via la caméra visuelle. On pourrait d'ailleurs mal interpréter l'image thermique en pensant qu'il n'y a qu'un individu (le corps plus chaud à droite, et la queue plus diffuse à gauche par exemple).

La figure 6c témoigne d'une nouvelle source de confusion possible : alors qu'on pensait qu'il y avait deux individus sur l'image thermique (deux taches distinctes correspondent intuitivement à deux signatures thermiques), il n'y en avait en fait qu'un. La longue queue préhensile était étendue, et seule son extrémité émettait un rayonnement thermique suffisamment élevé pour être observé. Cela ne veut pas dire que le reste de la queue n'émet pas de chaleur, mais qu'elle n'en émet pas plus que le gazon, ce qui ne la rendait

pas perceptible à l'IR. On s'est donc rendu compte, que les parties de peau nue émettent des températures plus chaudes que les parties couvertes de poils. L'atèle se distingue des autres primates de Guyane par son pelage particulièrement long et noir, qui semble faire office d'isolant thermique et qui rend la signature thermique moins nette que les autres. L'extrémité de la queue est constituée d'une peau épaisse et nue permettant une meilleure accroche aux branches. Nous constatons aussi sur une vidéo, que la partie ventrale des atèles, moins velue, semble être plus chaude que la partie dorsale (la queue comprise).

Recommandations : La signature thermique des atèles (environ 29°C) est particulièrement difficile à identifier et moins remarquable que celle des autres animaux de canopée. On suppose que c'est en partie dû à leur épaisse couche de pelage qui leur sert d'isolant thermique. On distingue difficilement la totalité de la silhouette, le buste étant plus visible à l'IR que leurs 5 membres (bras et queue). La signature thermique des atèles s'apparente donc le plus souvent à une boule noire.

Pour pallier à cette identification thermique non évidente, il faut coupler la prospection à un **capteur visuel** et, si cela ne suffit pas, s'appuyer sur d'autres éléments tels que le **déplacement de l'animal** (brachiation pour cette espèce), et son **comportement** (diurne ou nocturne, gréginaire ou solitaire etc...). A noter que les signatures thermiques obtenues au Zoo donnent une idée générale de ce que l'on peut obtenir en milieu naturel, mais ne sont pas tout à fait représentatives, puisque le contraste thermique est plus élevé (rendant la signature thermique plus nette) sur une canopée en pleine forêt que sur du gazon sur le littoral.

Pour s'assurer d'une bonne identification, il convient aussi que la caméra soit **oblique** plutôt que verticale par rapport à la cible. En biais, il est plus aisément de distinguer la position et la silhouette de l'animal (c'est pareil pour la signature thermique d'un humain, qui verticalement ressemble à un simple rond, tandis qu'en oblique la silhouette se dessine).

Le mouvement permet une meilleure identification de l'espèce

Observer les animaux se déplacer facilite grandement l'identification. Lorsqu'un individu est en mouvement, la signature thermique bouge aussi et change légèrement à travers l'espace, permettant de mieux apprécier la **silhouette** de l'animal (Fig. 7).

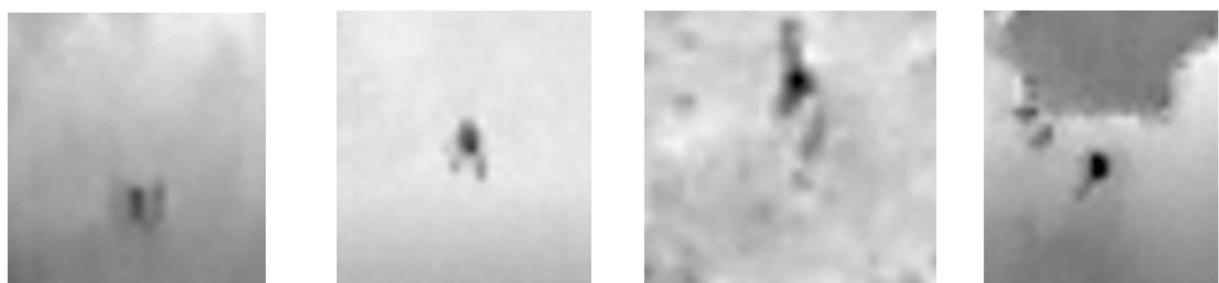


Figure 16 Captures d'écran de vidéos où l'on observe des singes atèles en mouvement et où se distinguent certains membres de leur corps (notamment la queue), améliorant la signature thermique. Les vidéos ont été prises de nuit (vers 19h30).

Au-delà d'une signature thermique plus visible, le type de déplacement d'un animal peut aussi être propre à l'espèce et ainsi permettre une identification (un atèle se déplace déferrement d'un singe hurleur, un kinkajou, un coendou...).

Recommendations : Si la confirmation à l'aide du capteur visuel n'est pas possible, il est important de filmer des **scènes de déplacement** pour pouvoir effectuer une identification en temps réel ou a posteriori. En cas de doute, il convient de solliciter un regard d'expert pour l'identification (Margo peut facilement orienter l'espèce grâce au comportement).

Le couvert forestier peut bloquer la captation thermique des animaux

Lorsque les individus se déplacent dans les arbres, à travers les branches, leur signature thermique se voit par intermittence. En effet, selon nos observations, quand les individus se trouvent au sommet des arbres, ils sont bien visibles à l'IR, même s'ils sont dans un niveau légèrement inférieur cachés par une petite couche de feuilles. En revanche, s'ils sont cachés par une épaisse et dense couche de feuille, alors les rayonnements ne passent pas et ils ne sont plus détectables à l'IR.

7.6 SIGNATURES THERMIQUES D'AUTRES ESPECES

Les capucins bruns (*Cebus apella*)



Figure 17 Photos de l'enclos des capucins prises au même moment, avec la capteur thermique (à gauche) et avec le capteur visuel (à droite).

La signature thermique des capucins apparaît très nette (température relevée autour de 27°C). La queue est bien visible quand ils sont en mouvement (ce qui n'est pas le cas sur la Figure 8). La technologie thermique est très intéressante ici car elle permet clairement de mieux les détecter comparé à la caméra visuelle où on n'arrive pas à bien les distinguer (Fig 8). Le taux de détection avec le capteur thermique est ici de 100% (les 6 individus observés correspondent aux 6 présences théoriques dans l'enclos).

Les singes hurleurs roux (*Alouatta macconnelli*)



Figure 18 Photo IR prise de nuit (20h) montrant un groupe de 5-7 individus dans la forêt du Zoo.

Un survol de la forêt, hors enclos, qui se trouve dans l'enceinte du Zoo a été effectué suivant les observations de Margo, qui nous a affirmé la présence d'au moins un groupe de singes hurleurs sauvages dans ce coin. Nous sommes tombés sur ces signatures thermiques qui pourraient très bien correspondre au groupe de singes hurleurs en train de dormir (ils dorment recroquevillés en boule). Aucune confirmation visuelle n'a pu être faite car il faisait nuit.

Les tapirs (*Tapirus terrestris*)

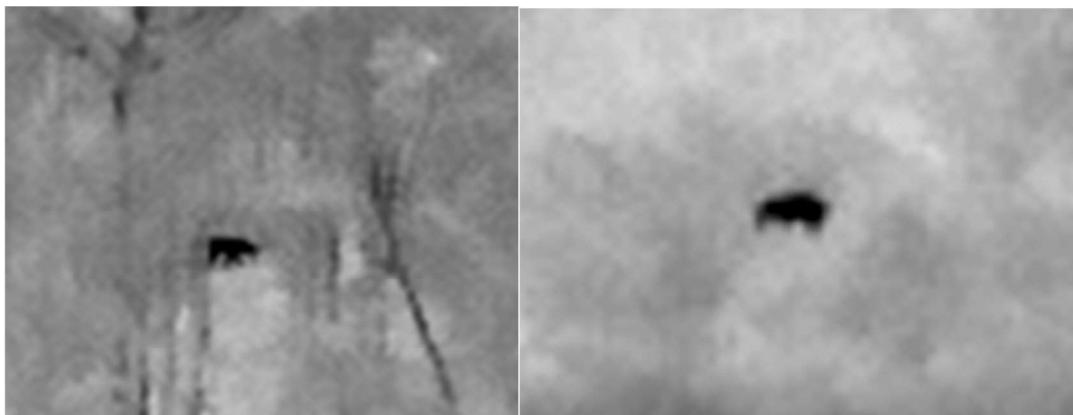


Figure 19 Captures d'écran issues d'une vidéo prise vers 19h30, montrant la signature thermique de deux tapirs.

La signature thermique du tapir est très nette : on arrive à distinguer la forme de sa silhouette quand il est de profil. La signature est tellement évidente qu'il n'est pas nécessaire d'avoir la confirmation grâce à la caméra visuelle. Une hypothèse est que l'absence d'un épais pelage bloque moins les rayonnements thermiques.

8 CONCLUSION

Ce rapport a pour vocation de bâtir un socle définissant les paramètres optimaux et d'orienter des pistes pour affiner la méthodologie de suivi de faune en Guyane via un drone thermique. Il peut donc être utile à toute personne (agent du Parc National, scientifique, doctorant, stagiaire...) désirant utiliser un drone à caméra thermique pour la télédétection de la faune, sur le territoire guyanais ou ailleurs dans un environnement tropical.

Ce travail préliminaire est indispensable pour pouvoir étudier la faisabilité de cette nouvelle méthode, qui plus est, dépendante d'un outil technologique qui offre une large palette de paramètres qu'il est important de maîtriser.

Le choix du Zoo de Guyane pour cette étude préliminaire n'est pas anodin : travailler sur un environnement semi-contrôlé, où le nombre, l'emplacement et la composition des groupes sont connus facilite l'étude de certaines variables et l'obtention de données graphiques. Bien sûr, celles-ci sont à interpréter avec précaution car elles ne sont pas représentatives des données qui seront obtenues en pleine forêt tropicale sur des individus sauvages dans leur habitat naturel. Par exemple, le contraste thermique est plus faible au Zoo qu'en pleine forêt tropicale, où la canopée refroidit notablement la nuit.

Tableau récapitulatif

Variables	Recommandations	Commentaires
Furtivité du drone	Eclairage pour décoll/atter Mode furtif pour prospection	Drone bruyant
Perturbation occasionnée	Garder minimum 40-50m de distance entre le drone et l'animal cible	Difficile d'établir une hauteur optimale car dépend de beaucoup de facteurs (espèce, caractère de l'individu, niveau d'habituat, âge...)
Hauteur de vol	Environ 50 m permettent une bonne détectabilité sans occasionner trop de stress	
Filtre	BlackHot	Palette linéaire -> Fait bien ressortir les corps les plus chauds
Signature thermique	Pour une meilleure identification : <ul style="list-style-type: none">- Filmer déplacements- Changer d'angle- Préférer un angle de prise de vue oblique plutôt que perpendiculaire.	
Période de la journée	<i>Nuit</i> : meilleur contraste thermique <i>Lever/coucher de soleil</i> : bon contraste thermique + confirmation visuelle ➔ Privilégier lever/coucher de soleil	



III. Etude pilote pour l'utilisation du drone thermique appliquée à la conservation des singes atèles à Saül



1 POURQUOI SAUL ?

Saül est un lieu où on trouve une forte abondance d'atèles, même dans la zone chassée non loin des habitations du bourg. Les grands primates ont connu une augmentation remarquable sur cette zone. Les quatre sessions d'IKA en zone chassée de Saül ont montré une nette augmentation de la densité d'atèles (3.29 ind/km² en 2008, 4.20 en 2013, 6.27 en 2019, 14.72 en 2021). Ce phénomène pourrait s'expliquer par un contrôle potentiellement plus important dans cette zone et au fait que l'atèle n'est pas une espèce ciblée par les communautés vivant à Saül (essentiellement créoles, hmongs et métropolitains).

En plus de la forte probabilité de voir des atèles, Saül est une des zones du PAG où la biodiversité est la plus suivie via des missions scientifiques régulières et de nombreux sentiers touristiques offrant un accès privilégié à la forêt tropicale humide. La proximité des layons IKA (zone chassée) au bourg de Saül offre le confort de pouvoir rentrer après chaque session de prospection au carbet pour se reposer, analyser les données etc...

De plus, Saül présente quelques reliefs avec des points hauts ainsi que des zones dégagées, indispensables pour le décollage et l'atterrissement du drone. Mais le relief peut aussi jouer en notre défaveur, car il est plus difficile d'établir des plans de vols adaptés à ce genre de suivi lorsque le profil altimétrique est trop variable.

2 QUELLE PERIODE ?

Cette mission a été programmée sur le petit été de mars. Bien qu'assez aléatoire, ce petit été nous a offert des conditions météorologiques optimales pour l'utilisation du drone thermique. Les retours des agents de la DTC nous indiquaient du beau temps et un ciel dégagé au lever de soleil (l'absence de brume étant un critère de sélection important).

3 QUEL MATERIEL ?

Ce test a été réalisé avec un prestataire pour le matériel et le pilotage du drone car le Parc ne peut pas s'engager dans l'achat d'un matériel cher avant de savoir si le suivi au drone à caméra IR pourra se pérenniser ou non.

L'entreprise GEOGUY possède le drone Mavic 3 Thermal, avec une caméra RGB et une caméra thermique intégrée. Ce drone de dernière génération, spécialement conçu pour l'imagerie thermique, permet d'avoir une autonomie supérieure aux autres drones de ce type (45 minutes vs 25 minutes) et embarque une caméra avec une résolution 640x512 et une ouverture de 61°.

4 OBJECTIF PRINCIPAL

Tester la télédétection des singes atèles à l'aide d'un drone à caméra thermique en milieu naturel et optimiser la méthode pour en évaluer sa faisabilité sur le long terme et à l'échelle du territoire.

5 LA MISSION

Cf. Fiche pratique terrain

(S:\03_Patrimoines\0_1_Ecologie\Etudes\Kwata\Protocole_test_Drone_Mission SAUL) pour les détails des indications et conseils à suivre pour des futures missions drone à Saül.

5.1 PRINCIPE EXPERIMENTAL

Le protocole de cette étude pilote à Saül consistait à effectuer des vols de drone thermique et des prospections traditionnelles au sol simultanément et le long d'un même transect en forêt, pour compter le nombre de singes atèles croisés sur la zone. Ces prospections ont été répétées sur plusieurs jours, au lever (de 6h30 à 8h) et au coucher du soleil (de 17h à 18h30).

Les observations d'atèles, que ce soit par l'équipe drone ou les observateurs à pied, étaient notées en précisant le nombre exact ou approximatif des individus et les coordonnées GPS de leur emplacement au moment de l'observation. Les prospections se faisaient uniquement sur l'aller du transect, le retour se faisait normalement pour éviter des doubles comptages.

L'objectif des vols pilotes du drone était d'évaluer la capacité du drone à détecter les singes atèles en canopée grâce à l'imagerie thermique. Pour ce faire, dès que les agents au sol observaient des singes atèles le long du transect, ils communiquaient l'information via des talkies walkies. En décollant d'un point extérieur au transect, le télépilote dirige alors manuellement le drone vers l'emplacement décrit par les agents. L'équipe drone observe en temps réel les images thermiques sur l'écran de la radiocommande. Cela nous a permis d'un côté de confirmer l'efficacité de l'imagerie thermique pour détecter les atèles en canopée, et d'ajuster les paramètres pour affiner la méthode sur le terrain. Nous n'avons pas eu besoin de faire des tests poussés de différentes variables influençant l'efficacité de détection car cela avait déjà été effectué au Zoo de Guyane.

En raison de la portée limitée des talkies walkies, la communication entre les deux équipes n'a eu lieu que à deux reprises, sur des groupes observés dans les 200 premiers mètres du transect.

Nous avons pu comparer la capacité de détection du drone vs. la méthode traditionnelle à pieds. Bien entendu, cette comparaison est à interpréter avec précaution car il y avait de nombreux biais et trop peu de données. Pour les observations où il y a eu communication, on cherchait à savoir : pour un même groupe, combien d'individus sont détectés au drone et à pied ? Autrement dit, est ce que l'imagerie thermique est capable de détecter autant ou plus d'individus que la méthode traditionnelle ?

5.2 CHOIX DU SITE D'ECHANTILLONNAGE

Les prospections se faisaient sur un transect utilisé pour les comptages de grande faune par Distance Sampling (aussi appelés IKA pour « Indice Kilométrique d'Abondance ») effectués depuis 2008 par le PAG. Ce choix se justifie par le fait qu'il y a une base de données historique déjà existante sur ces transects, et ce sont des layons déjà connus par les agents de Saül et donc plus facilement accessibles.

En raison du manque de temps et de la difficulté de progression pour certains layons non entretenus, nous avons choisi de nous concentrer sur un seul des 4 layons proches du bourg (correspondant à la zone chassée), celui de Roche Bateau. Le layon présente plusieurs avantages : il est accessible par une piste quad facilitant son accès, c'est le layon le plus entretenu des 4, et des groupes d'atèles y sont régulièrement observés dans les deux derniers mois par deux agents du PAG qui parcourrent la piste quotidiennement. Durant l'année, ils se déplacent en fonction de la

fructification des arbres, mais sont assez sédentaires lorsqu'ils s'installent dans une zone où il y a une forte abondance de fruits.

5.3 RESUME DU DEROULEMENT DE LA MISSION

Mer 22.03	Arrivée Saül vers 17h <i>Soir : tests vols à côté du bourg (contraste thermique ok)</i>
Jeu 23.03	<i>Matin : tests vols à côté du bourg (portée du drone ok)</i> <i>Journée : travail bureau et rencontre avec la maire pour expliquer la mission et proposer une animation au village</i> <i>Soir : Reconnaissance en quad à la piste Roche Bateau pour noter potentielles DZ (ok)</i>
Ven 24.03	<i>Matin : Prospection transect Roche Bateau (drone et pied)</i> Journée : Travail bureau <i>Soir : Prospection transect Roche Bateau (drone et pied)</i>
Sam 25.03	<i>Matin : Prospection transect Roche Bateau (drone et pied) + animation drone</i> Journée : travail bureau <i>Soir : Pas de prospection (pluie)</i>
Dim 26.03	Pas de prospection (pluie matin et soir)
Lun 27.03	<i>Matin : Tests plans de vols à côté du bourg (pas de prospection car pas d'agents disponibles)</i> <i>Journée : travail bureau</i> <i>Soir : Prospection transect Roche Bateau (drone et pied)</i>
Mar 28.03	<i>Matin : Prospection transect Roche Bateau (drone uniquement) -> interrompue car petit crash. Une hélice cassée.</i> <i>Journée : travail bureau</i> <i>Soir : pas de prospection (drone inutilisable)</i>
Mer 29.03	Retour à Cayenne

6 ASPECTS TECHNIQUES ET OPTIMISATION DE LA METHODE

6.1 IMPORTANCE DES CRENEAUX POUR LES PROSPECTIONS

Les prospections se faisaient dans des créneaux très restreints. En effet, les horaires que nous avons identifiés permettant une bonne télédétection (du moins en Guyane avec les conditions météo du petit été de mars), sont le **lever de soleil (6 :30-8 :00)** et le **coucher de soleil (17 :00-18 :30)**.

Ces créneaux respectent plus ou moins les conditions nécessaires, à savoir :

- **Des températures plus fraîches**, surtout pour le créneau du matin où la forêt a eu le temps de se refroidir pendant la nuit. → Permet un bon contraste thermique facilitant la détection d'animaux à sang chaud.
- **Une luminosité suffisante** pour pouvoir alterner entre les deux capteurs (thermique et visuel). → Facilite l'identification de l'espèce.
- **Des atèles plus facilement observables** : on sait qu'au moins un groupe est présent en cette période sur la zone de prospection. Qui plus est, ce sont les moments de la journée où l'on a le plus de chances d'observer les atèles en groupe, soit se réveillant le matin et commençant à se déplacer pour aller chercher de la nourriture, soit se regroupant le soir

pour dormir au même endroit. → Augmente la probabilité de détecter des atèles sur la zone de prospection.

6.2 LARGEUR DE LA BANDE DE PROSPECTION

Pour déterminer la zone tampon de prospection autour du transect, nous nous sommes basés sur les données historiques issues des IKA et sur les capacités propres à l'observateur en charge des prospections au sol. En moyenne, la distance d'observation perpendiculaire au layon est d'environ 30m pour les atèles dans la zone chassée de Saül sur les 15 dernières années d'IKA. La distance de détection à l'œil nu pouvant aller de 0 (animal sur le transect) à environ 65 m du layon. Cédric nous a affirmé être capable de détecter visuellement des atèles jusqu'à 50-60m, voire jusqu'à 100m par contact auditif. La capacité de détection visuelle des agents du PAG a donc été fixée à 50m (distance effectivement prospectée). Cette valeur correspond à la fonction de détection obtenue avec le logiciel DISTANCE, conçu pour l'analyse des données issues de Distance Sampling (voir fiche Noé : S:\03_Patrimoines\0_1_Ecologie\Etudes\Kwata\Fiches de réflexion)

A partir de là, il fallait déterminer un plan de vol adapté pour que le drone puisse prospector l'intégralité ou plus de cette zone, en considérant plusieurs facteurs détaillés ci-dessous.

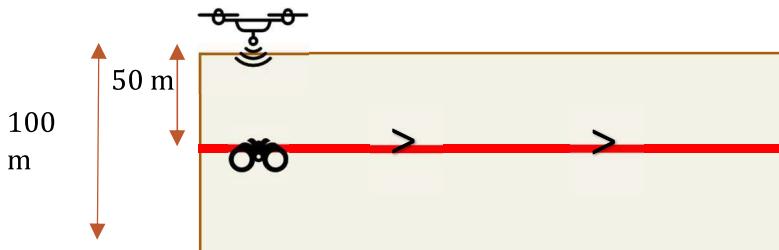


Figure 1 Schéma de la bande de prospection

6.3 HAUTEUR DE VOL ET SURFACE PROSPECTEE

Pour arriver à prospector l'intégralité ou plus de la bande de prospection ci-dessus, il faut étudier un plan de vol adapté, qui va dépendre également de la hauteur de vol choisie. La hauteur de vol est associée à une surface réelle prospectée par le capteur et va donc conditionner le choix du plan de vol.

Détermination de la hauteur de vol

Ici, c'est la hauteur du drone à la canopée qui nous intéresse, il faut donc prendre en compte la hauteur approximative des arbres sur le transect (en moyenne environ 40m). Pour une bonne détection des singes atèles tout en évitant de les déranger, il faut compter une distance du drone d'environ 50m de la canopée. La hauteur de la canopée n'étant pas uniforme, le drone ne volait donc pas à une distance constante des arbres, à quelques mètres près (fig. 2). Idéalement, il faudrait intégrer à la programmation de mission du drone un suivi du relief de canopée, en intégrant le MNH (modèle numérique de hauteur), pour que le drone puisse voler à hauteur constante par rapport aux fluctuations de la canopée. Malheureusement, cette stratégie est risquée dans la pratique, car elle peut manquer de précision et augmenter le risque de crasher le drone. Cette fonctionnalité n'était de toutes manière pas envisageable sur ce drone.

La hauteur de vol a ainsi été déterminée par rapport au point de départ et restait constante pendant tout le vol, le télépilote pouvant reprendre la main à tout moment. Suivant le relief, il y avait donc des endroits où le drone était plus éloigné de la canopée que d'autres (fig. 2)

Heureusement, le transect était assez plat et la canopée relativement uniforme avec seulement quelques arbres émergents.

- ➔ La hauteur de vol optimale pour les prospections a été fixée à 90 m (par rapport au point de décollage).
- ➔ A cette hauteur, le drone était à environ 50m de la canopée, pour une largeur moyenne prospectée d'environ 60m.

90m de hauteur constante par rapport au point de décollage

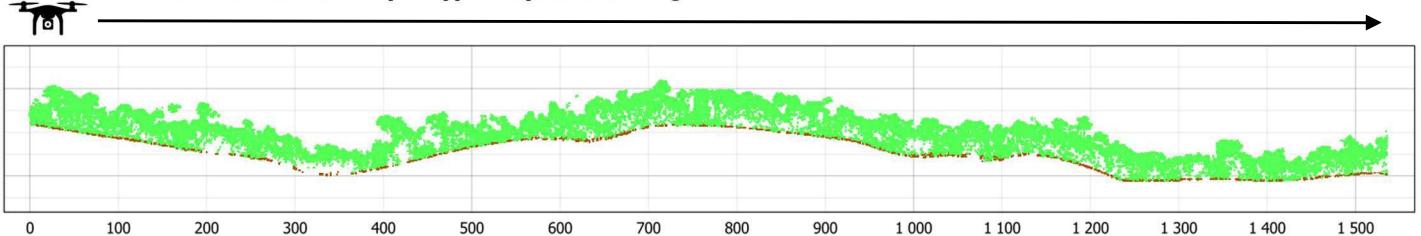


Figure 2 Profil altimétrique de surface de canopée et du sol du transect de 1.5km, obtenu avec les nuages de points (LiDAR) sur GQIS.

Calcul de la surface prospectée

Il est également possible d'incliner l'angle de la caméra par rapport au sol. Cette stratégie s'avère souvent efficace pour recueillir des données sur des animaux qui se cachent sous la végétation, ou pour couvrir une plus grande zone au sol avec un champ de vision (Field of View, FOV) plus large. Elle peut également faciliter la détection par l'œil humain car les cibles restent plus longtemps dans le champ de vision (Burke et al., 2019).

En l'occurrence, pour le suivi des singes, il convient d'incliner la caméra (aspect détaillé plus bas). Or, avec une configuration angulaire, le champ de vision au sol est déformé : la zone couverte ne ressemble plus à un rectangle mais à un trapèze (couvrant une zone plus large en haut du champ de vision et une zone plus étroite en bas). La trigonométrie permet de calculer la surface réelle prospectée dépendant de la hauteur, l'inclinaison et les caractéristiques propres à la caméra (résolution de pixels et l'ouverture FOV).

Il existe aussi des sites internet qui font les calculs : [Camera Field of View Calculator \(omnicalculator.com\)](http://www.omnicalculator.com).

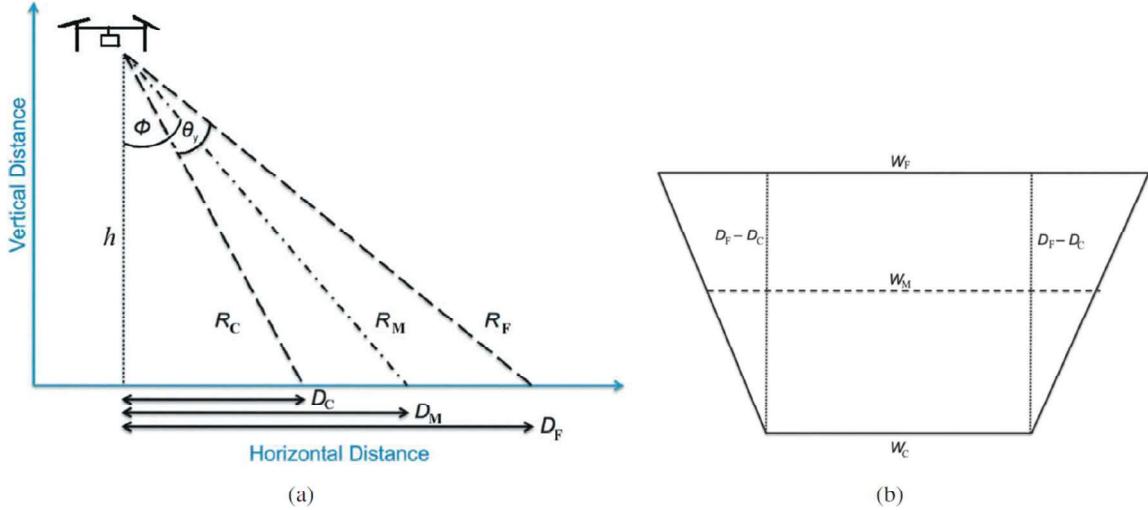


Figure 3 Caméra oblique installée sur le drone, ϕ est l'angle de la caméra par rapport au sol, θ_y est le champ de vision angulaire de la caméra le long de son axe y , DC ; DM ; DF sont les distances la plus proche, la plus moyenne et la plus éloignée le long du champ de vision de la caméra, h est la hauteur du drone. RC ; RM ; RF sont les distances entre le drone et le bas, le milieu et le haut du champ de vision. (b) Le champ de vision déprojecté montrant la zone au sol couverte par la caméra résultant de cette configuration. WC ; WM ; WF sont les largeurs du champ de vision sur l'axe x de la caméra pour les distances les plus proches, les plus proches, les plus moyennes et les plus éloignées sur l'axe des ordonnées (schéma et description issus de Burke et al, 2019).

A une hauteur de 50m (par rapport à la canopée ici), avec une inclinaison de caméra à 60° , un DFOV de 61° et une résolution de 640×512 , le drone prospecte une largeur centrale de 59,3m par une longueur de 51,4m, ce qui nous donne une superficie de $3\,048\text{ m}^2$ couverte par le champ de vision du capteur thermique.

Le calcul de la surface du trapèze correspondant à la surface réelle prospectée se fait à l'aide de la formule suivante (Fig. 3) :

$$\frac{W_c + W_f}{2} * (D_f - D_c)$$

Les longueurs W et D se calculent à partir de la hauteur, l'angle d'inclinaison de la caméra et le HFOV, comme suit :

$$\frac{W}{2} = R \tan \left(\frac{HFOV}{2} \right) \quad \frac{h}{R_M} = \cos(\varphi) \quad \frac{D_M}{h} = \tan(\varphi)$$

Table 1 Valeurs de largeur, longueur et superficie prospectée associées à la hauteur de vol par rapport à la canopée.

Hauteur drone - surface (m)	Largeur centrale de bande prospectée Wm (m)	Longueur de bande prospectée Df-Dc (m)	Superficie prospectée Wm * (Df-Dc) (m ²)
40	47.4	41.1	1 948.1
50	59.3	51.4	3 048
60	71.1	61.7	4 386.9
70	83	71.9	5 967.7
80	94.8	82.2	7 792.6
90	106.7	92.5	9 869.8
100	118.5	102.8	12 181.8

6.4 DESIGN DU PLAN DE VOL

Puisqu'à environ 50m de la canopée, le drone ne prospecte pas toute la largeur de la bande (tableau 1) un simple plan de vol linéaire suivant le transect n'était pas envisageable. D'autant plus qu'il convient d'avoir tout balayé seulement en un aller, le retour au point de départ se faisant en ligne droite et en mode sportif, sans prospecter pour s'assurer que le drone revienne à son point de départ avec au moins 20% de batterie restante ainsi que pour éviter de compter deux fois les mêmes individus.

L'idéal serait d'automatiser le vol pour que le pilote puisse se concentrer lui aussi sur la détection, mais cela ne s'est pas avéré possible car le mode automatique proposé par le Mavic 3T ne marchait que pour la caméra visuelle. On était donc obligés de quitter le plan de vol automatique à des pas de temps réguliers pour pouvoir alterner avec la caméra thermique, ce qui ne présentait que des inconvénients (perte de temps à interrompre et redémarrer le plan de vol à chaque fois, prospection non exhaustive etc...).

Nous avons testé un plan de vol linéaire en balayant à droite et à gauche à des pas de temps réguliers avec le capteur thermique, mais nous avons jugé que cette méthode n'était pas adaptée pour une prospection exhaustive. De plus, c'est en avançant au-dessus des arbres avec le drone que l'on arrive à détecter des animaux cachés et non pas en orientant simplement la caméra d'un côté ou d'un autre.

Après plusieurs tests, nous avons identifié un plan de vol adapté :

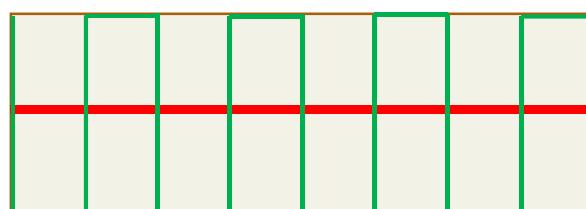


Figure 4 Schéma du plan de vol en serpentin suivant un transect

Plan de vol « en serpentin » : De nombreux tests nous ont permis de conclure que la meilleure manière de prospecter toute la zone était de programmer sur la radiocommande un tracé en serpentins (ou en « tondeuse à gazon », Hamilton et al., 2020; Witt et al., 2020) avec l’application DJI Pilot, qui conçoit un plan de vol recouvrant l’étendue de la zone désirée (polygone que l’on crée préalablement sur l’écran), puis faire ensuite un pilotage manuel du drone suivant ce tracé. Cela permettait de balayer une grande surface de prospection, en gardant l’image thermique à l’écran pour la détection et en pouvant s’arrêter, zoomer, changer d’angle ou de capteur à tout moment. Ce plan de vol implique néanmoins un taux de recouvrement que nous avons fixé au minimum proposé par l’application, c’est-à-dire 10%. Ce plan de vol peut également se faire en plaçant des Waypoints à chaque virage du plan de vol en serpentin pour que le drone puisse se déplacer automatiquement d’un waypoint à un autre.

Pour prospecter avec le drone la totalité ou plus de la surface effectivement prospectée au sol, les plans de vol ont été conçus en intégrant une zone tampon de 50m de part et d’autre du transect (ce qui donne une bande de prospection de 100m de large) avec un taux de recouvrement minimum de 10%.

Problème : ce plan de vol nécessite plus de temps, surtout si l’on s’arrête sur des atèles suspectés et en prenant en compte le temps de retour du drone, sans compter les aléas météorologiques qui pouvaient nous forcer à interrompre la prospection. Nous n’avons pas réussi à prospecter l’intégralité du transect dans les créneaux impartis (1h30) avec un plan de vol en serpentins. Le transect, initialement de 2,3km a donc après coup été tronqué à 1,5km car les prospections s’arrêtaient souvent avant et aucun atèle n’a été observé au-delà de 1,3km (les deux méthodes confondues).

Il faut garder en tête que ce type de plan de vol est adapté pour les missions où l’on souhaite prospecter le long d’un transect avec une largeur de bande supérieur au FOV de la caméra. Ce design ne sera pas nécessairement adapté pour d’autres modes d’échantillonnages. Par exemple, une prospection en étoile est intéressante mais n’était pas adaptée ici car les décollages se faisaient en dehors du transect. De même, une prospection suivant des transects linéaires conviendrait pour prospecter sur de la distance, plutôt que sur de la largeur.

6.5 COMPOSITION DE L'EQUIPE DRONE ET L'EQUIPE SOL

Deux personnes sont nécessaires pour constituer l’équipe drone :

- Le droniste se focalise sur le pilotage du drone, mais peut aussi apporter une concentration mineure sur la détection en temps réel.
- Une personne qui se consacre à 100% sur la détection en observant attentivement le retour en temps réel sur l’écran de la radiocommande pour s’assurer de ne pas rater de cibles et pour ordonner l’interruption du plan de vol en cas de singe atèle suspecté.

Deux personnes sont également nécessaires pour l’équipe sol, car il faut être minimum deux en forêt pour des normes de sécurité. Les observateurs sont expérimentés et habitués à ce genre de suivi.

6.6 SITES DE DECOLLAGES

Les tests nous ont permis de constater qu’il est possible de faire décoller un drone Mavic 3T en pleine forêt tropicale humide. Une petite trouée de canopée d’environ 2x4m suffit. Dans notre cas, nous avions la chance de bénéficier de nombreuses trouées sur la piste quad. La présence fréquente de trouées était sûrement due à l’ouverture de la piste, il est par conséquent, probablement moins évident d’en trouver au milieu d’une forêt (loin de layons, sentiers, pistes...).

Le drone doit décoller et atterrir sur une surface plane et dégagée. La piste étant relativement dégagée, il ne nous a pas été nécessaire de défricher ou d'aménager le sol.

Deux sites de décollage identifiés sur la piste quad, à environ 2 km de distance l'un de l'autre, ont servi à prospecter l'entièreté du transect tout en respectant la limitation réglementaire de 1km de distance parcourue par rapport au droniste. Des tests préalables ont été effectués pour voir si le drone avait une portée de 1km en pleine forêt : contrairement aux Nouragues avec le Matrice 300, aucune perte de signal n'a été constatée. Ainsi, la prospection complète pouvait se faire en deux fois (deux vols), nécessitant un déplacement rapide à pied entre les deux sites de décollage une fois le premier vol terminé. Nous avons volontairement choisi des sites en dehors du transect de prospection, car effectuer des décollages à même le transect aurait occasionné une nuisance trop importante pouvant faire fuir les animaux.



Figure 5 Photographies de deux trouées de canopée qui ont servi à faire décoller et atterrir le drone

6.7 LE FILTRE THERMIQUE

Le drone offre une sélection de différentes palettes permettant une lecture des températures adaptée pour différents types de situation. Dans notre cas, une palette linéaire est plus appropriée pour une interprétation plus simple (un dégradé allant du plus froid au plus chaud).

Sur la base des tests préliminaires effectués au Zoo de guyane et à Saül, le filtre "Black Hot" a été préféré pour l'image thermique, car c'est ce mode qui nous a donné les images les plus claires. Dans ce mode de capteur thermique, les objets chauds sont bien visibles car ils sont représentés plus sombres que les objets froids.

Black Hot

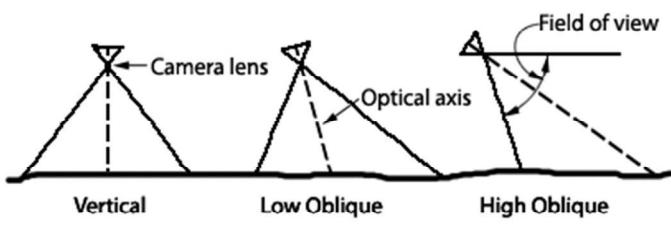
Figure 6 Filtre thermique BlackHot proposé par DJI

6.8 LA VITESSE DE PROGRESSION

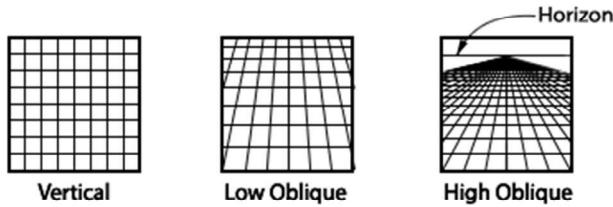
La vitesse du drone a été fixée à 3m/s. Ce rythme de progression permet une prospection relativement rapide sans pour autant passer trop rapidement sur des points d'intérêt et en laissant un temps de réaction suffisante

6.9 L'INCLINAISON DE LA CAMERA

- **La caméra verticale (90°)** ne permet pas une bonne détection des atèles car les arbres sont vus du dessus (« en brocolis ») et, à moins que les atèles soient placés tout au sommet d'un arbre dégagé, la plupart du temps il est difficile de les détecter sous cet angle.
- **La caméra oblique basse ($\sim 60^\circ$)** permet une bonne détection, offrant une vision proche et à travers les branches.
- **La caméra oblique haute ($\sim 45^\circ$)** ne permet pas une détection optimale. Le champ de vision de l'image est trop profond et déformé, rendant la détection imprécise.



Camera orientation for various types of aerial photographs



How a grid of section lines appears on various types of photos.



Figure 7 Représentation schématique et photographique du champ de vision en fonction de trois niveaux d'inclinaison de la caméra

6.10 DIRECTION DU PLAN DE VOL EN FONCTION DE LA POSITION DU SOLEIL

Divers tests près du bourg de Saül nous ont permis de constater que le rendu de l'imagerie thermique et la qualité des contrastes étaient meilleurs lorsque le soleil était derrière le drone. Cela semble logique, on voit moins bien à contre-jour. Si le protocole permet cette flexibilité, il faut donc de préférence choisir un cap vers l'ouest le matin et vers l'est le soir.

6.11 RECAPITULATIF DES RECOMMANDATIONS SUR LES PARAMETRES DE VOL

Différents paramètres ont été testés au cours de la mission, permettant une optimisation de la méthode. Les recommandations sont listées ci-dessous.

Table 2 Tableau récapitulatif des recommandations sur différents paramètres de vol

Paramètre	Recommandation	Commentaire
Color isotherm (filtre)	Black Hot	Facilite détection de corps chauds avec un contraste marqué noir sur blanc (palette linéaire)
Inclinaison de la caméra	60°	Facilite la détection en permettant vision à travers les branches sans trop déformer l'image
Vitesse	3 m/s	Permet une bonne détection et un temps de réaction
Hauteur de vol (AGL)	90 m	Facilite la détection en minimisant la perturbation
Plan de vol	Manuel suivant un plan de vol en serpentins OU Automatique suivant des waypoints placés (en serpentins)	Permet de scanner toute la zone de prospection et de switcher entre capteurs
Capteurs	IR en alternant avec RGB Ou Double capteur sur écran partagé pour détection + confirmation en direct (mais images plus petites)	Permet la détection ET l'identification de l'espèce La deuxième option facilite la comparaison en direct. Mais l'image étant plus petite, il convient d'avoir un grand écran déporté.

6.12 DETECTION DES ATELES AVEC LE DRONE THERMIQUE

Lorsque la présence de singes atèles est soupçonnée au retour écran de la radiocommande, le pan de vol est interrompu, le mode « enregistrement vidéo » activé, pour venir s'approcher des signatures thermiques, alterner les capteurs, changer d'angle, zoomer ... Le but étant de pouvoir récolter un maximum de matériel graphique (photos et vidéos des atèles en IR et RGB).

Il est impératif d'enregistrer les coordonnées GPS de l'arbre où ils ont été observés. Le Mavic 3T n'ayant pas de télémètre intégré, il existe un seul moyen de sauvegarder le point GPS d'un emplacement précis : à l'aide des PIN points. Le problème est que le pinpoint prend la position du drone, donc pour avoir la position des atèles il faut placer le drone pile au-dessus d'eux. Souvent la détection est oblique, donc une fois détectés, il faut se déplacer pour arriver sur eux et prendre le pinpoint. Durant le déplacement il faut absolument éviter de les perdre de vue.

6.13 ANALYSE DES DONNEES GRAPHIQUES

La détection en temps réel ne suffit pas, il arrive de se tromper et de se persuader qu'il y a des atèles alors qu'en réalité aucune image ne peut garantir l'identification. A l'inverse, il arrive aussi de réaliser au post visionnage qu'il y avait plus d'individus que ceux comptabilisés sur le terrain (car on a tendance à se focaliser que sur un bout de l'écran). C'est pourquoi l'analyse post terrain est indispensable. Pour ce faire, il faut visionner plusieurs fois toutes les photos et vidéos récoltées. Il convient de prêter d'avantage d'attention aux vidéos, en jouant sur les contrastes ou la luminosité si besoin, et sur la vitesse de lecture sur VLC.

Un arbre qui bouge alors qu'il n'y a pas de vent est signe de présence de singes. Ce sont notamment les atèles qui ont pour habitude de faire beaucoup secouer les arbres. Malheureusement, voir un arbre bouger sur une vidéo (avec le capteur optique) ne suffit pas pour affirmer l'identification.

Un groupe d'atèles est comptabilisé comme tel, seulement si la caméra optique permet de distinguer au moins un individu du groupe. Voir un bout du corps (un bras, une queue...) suffit pour l'identification. En effet, la confusion avec d'autres espèces de primates est peu probable car l'atèle est le seul singe présent dans ce site avec une silhouette fine, un pelage très noir et ce comportement grégaire.

Dès que l'identification est certaine, il faut renommer le.s fichier.s en question avec « atèles » ou « kwatas » à la fin pour pouvoir facilement les retrouver. Si l'identification est incertaine, il convient également de renommer le fichier pour pouvoir le révisionner plus tard ou le soumettre à d'autres regards. Les fichiers contenant des atèles sont à noter sur une fiche excel (*S:\03_Patrimoines\0_1_Ecologie\Etudes\Kwata\Protocole_test_Drone_Mission SAUL*).

6.14 OUTILS POUR LE TRAITEMENT DES DONNEES GRAPHIQUES OBTENUES

Après la collecte de données avec le drone, le challenge continue : il faut les traiter et les analyser. Pour cela, divers outils ont été utilisés.

- **Visionner les vidéos et photographies**

VLC Media Player (recommandé pour les options de réglages)

- **Visualiser les logs de vols**

Les logs contiennent toutes les informations pour chaque vol effectué. On peut revoir le trajet parcouru par le drone et les commandes ...

Flight Reader (logiciel DJI) : [DJI drone flight log viewer | Flight Reader](#) (14 jours d'essai gratuit)

Ou sa version inférieure PhantomHelp (site DJI) : [DJI Flight Log Viewer | Phantom Help](#)

- **Visualiser les fichiers KML et KMZ (vols, pinpoints...), profils altimétriques**

Google Earth Pro et QGIS.

- **Analyse et traitement des images thermiques**

DJI Thermal Analysis Tool 3 : [DJI Thermal Analysis Tool 3.0 - Download Center - DJI](#) (attention : ne prend pas en compte les vidéos)

- **Reconnaissance automatique par machine learning**

ConservationAI (site internet) : <https://www.conservationai.co.uk/>

7 RESULTATS DES PROSPECTIONS

Les résultats sont indicatifs. Ils ne sont pas analysables statistiquement et sont à interpréter avec précaution en raison du manque de données comparables et de divers biais que serons développés plus loin. Ils permettent néanmoins d'avoir un ordre d'idée sur l'efficacité de la méthode et sa faisabilité sur le territoire du PAG.

7.1 DEROULEMENT DES PROSPECTIONS

Prospections au sol :

Jour	Moment	Transect complet	Distance parcourue (m)
Ven 24/03	Matin	Oui	2 300
	Soir	Non	705
Sam 25/03	Matin	Oui	2 300
Lun 27/03	Soir	Non	975

Au sol, sur les 4 prospections réalisées, deux ont dû être interrompues pour cause de pluie (vendredi soir et lundi soir).

Prospections au drone :

Jour	Moment	Transect complet	Distance parcourue (m)	Type de plan de vol
Ven 24/03	Matin	Oui	2 300	Linéaire
	Soir	Non	949	Linéaire +balayage
Sam 25/03	Matin	Non	1 340	Linéaire+balayage
Lun 27/03	Soir	Non	1 439	Serpentins
Mar 28/03	Matin	Non	1 173	Serpentins

Au drone, sur les 5 prospections, une seule est allée jusqu'au bout du transect mais sans prospecter toute la largeur de la bande (vendredi matin). Celle-ci correspondait au test du plan de vol en ligne droite qui était par conséquent plus rapide mais ne permettait pas une prospection exhaustive de la zone.

En raison de la non homogénéité de la distance parcourue lors des prospections pour chaque méthode, la distance a été tronquée à la valeur la plus petite par prospection, afin de pouvoir comparer les observations faites sur la même zone.

Plusieurs raisons rendaient difficile de survoler les 2,3km de transect dans le temps imparti (1h30) :

- La pluie qui nous obligeait à interrompre le vol et poser le drone jusqu'à la fin de l'averse.
 - Les interférences avec le trafic aérien : si un avion ou un hélicoptère passe dans la zone au même moment, le drone se pose automatiquement. Cela nous ait arrivé lors d'un décollage où le drone refusait de monter.
 - La longueur des plans de vols sur un créneau horaire trop restreint.
 - Les ajustements de paramètres et de plans de vols.
- ➔ Pour un pan de vol en serpentins, il convient donc de faire des transects d'1.5km maximum.
- ➔ Pour des plans de vols linéaires, il est possible de prospecter des transects plus longs, mais une zone moins large

7.2 NUISANCE DU DRONE SUR LES ATELES

Nous n'avons pas observé de réactions particulières face au possible dérangement sonore du drone, aussi bien pour les atèles que pour les autres espèces rencontrées. Un agent au sol nous a

signalé qu'un individu d'atèle regardait vers le haut lorsque le drone se trouvait au-dessus de leur emplacement. Ils sont donc conscients de la présence du drone mais n'ont pas montré de signes de dérangement (vigilance, fuite, panique...). Les atèles semblaient plus dérangés par les personnes au sol que par le drone en l'air. Fidèles à leur habitude, ils cassaient des branches et les balançaient en direction des agents.

Il arrive que des oiseaux passent non loin du drone. Même si les risques de collision semblent assez faibles, il est indispensable de prendre des précautions lors de la mise en place d'un protocole de suivi de faune avec un drone. Une vitesse faible et une hauteur de vol suffisamment haute permettent de minimiser le dérangement et le danger de collision.

7.3 OBSERVATIONS D'ATELES AU DRONE ET AU SOL



Figure 8 Observations d'atèles le long du transect d,1,5km pour la méthode drone et la méthode traditionnelle de suivi. n indique le nombre d'individus comptés pour chaque observation.

- Pour un même groupe, le drone a permis d'identifier plus d'individus que les observateurs au sol.

Le 24/03 matin, l'équipe sol commence la prospection un peu avant l'équipe drone et observe au début du transect un groupe de 6 atèles. L'information est communiquée à l'équipe drone, qui détecte un peu après à l'aide du capteur thermique, pour le même groupe, une dizaine d'individus regroupés sur environ deux arbres (fig 8). Il est difficile de donner un effectif exact, même pour un regard entraîné, car on aperçoit des petites taches noires se déplaçant rapidement à travers les branches et apparaissant par intermittence (car la signature

thermique est par moments cachée par la végétation). On peut néanmoins compter assurément minimum 10 individus. Ils sont restés sur cet arbre pendant une longue durée, en le secouant fort, ce qui nous indique que c'est probablement un arbre fruitier (« arbre mangeoir », probablement du genre *Virola* ou « yayamadou » en créole).

Pour un même groupe, le drone a donc permis de compter minimum quatre individus supplémentaires que les observateurs au sol.

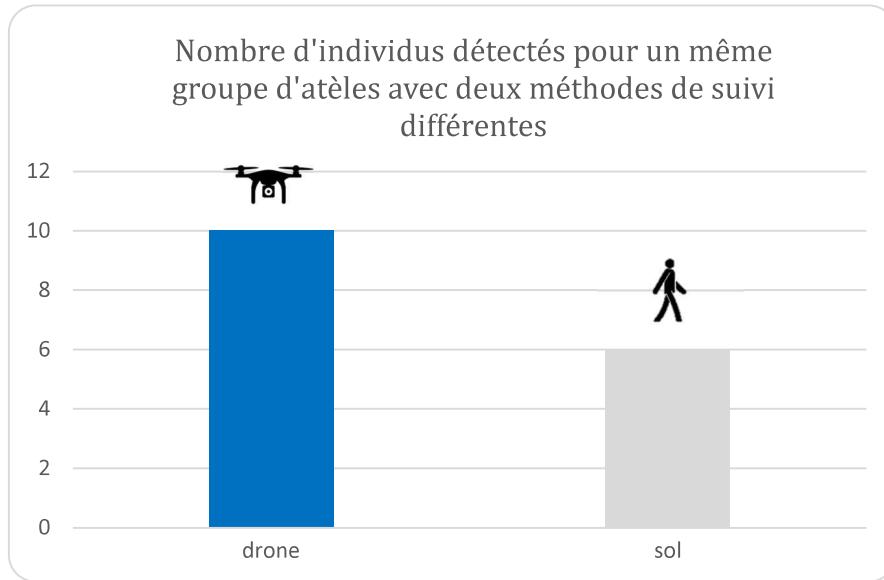


Figure 9 Histogramme illustrant le nombre d'individus détectés pour le groupe d'atèles observé le 24/03 matin en fonction des deux méthodes de suivi différentes.

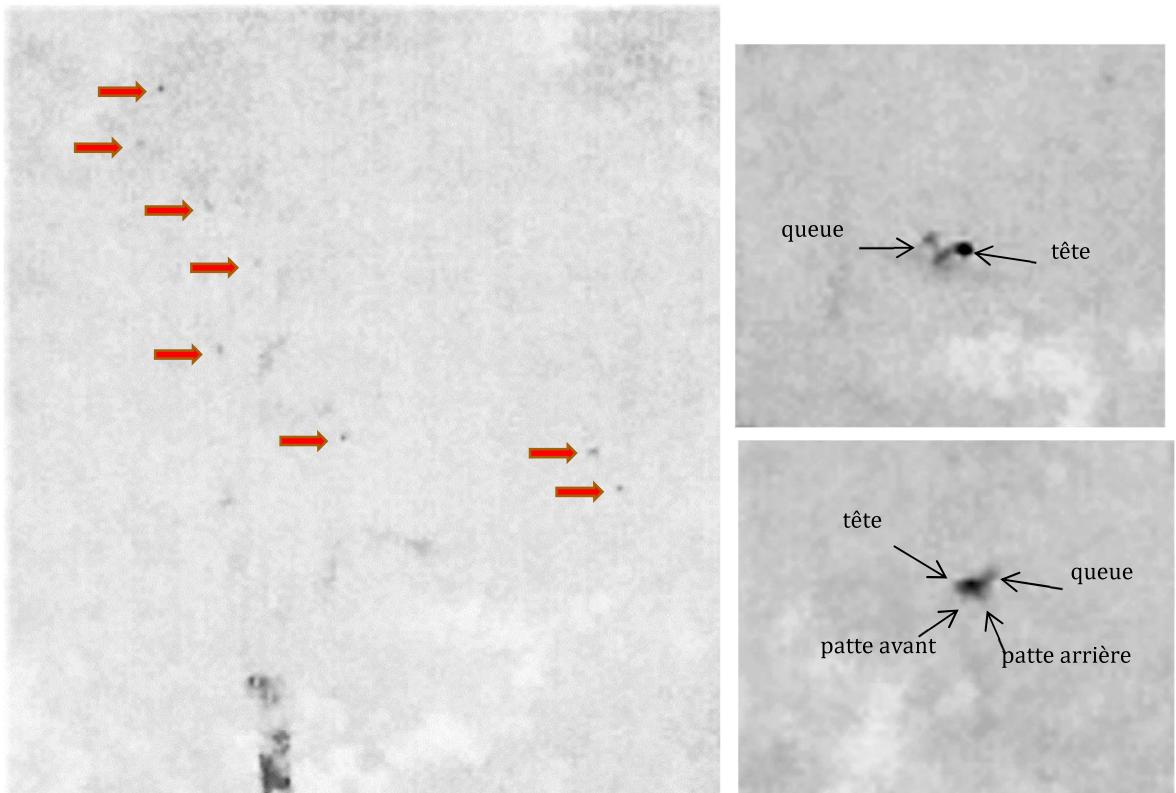


Figure 10 Captures d'écran d'une vidéo du groupe d'une dizaine de singes atèles détectés au capteur thermique : photo où l'on aperçoit plusieurs individus en même temps (a) photos où l'on aperçoit des individus en déplacement et peu couverts par les feuilles, reflétant une signature thermique presque complète (b et c). Les flèches rouges indiquent une signature thermique correspondant à un individu de singe atèle. Les flèches noires indiquent les parties du corps qui se distinguent.

- **Un groupe ($n \approx 8$) détecté par le drone**

Le 24/03 soir, on entend de nombreuses vocalisations d'atèles dans la zone et c'est à nouveau un grand groupe d'environ 8 individus qui a été détecté grâce au capteur thermique. Il pourrait s'agir du même groupe observé le matin même, ou d'un deuxième groupe. Les individus étaient regroupés sur un arbre, prêts à passer la nuit (arbre dortoir). La prospection au sol a dû être interrompue avant d'arriver à cette distance pour cause de pluie, nous n'avons donc pas pu comparer la capacité de détection pour les deux méthodes. Malheureusement, les données graphiques ont été perdues. Nous n'avons donc pas pu analyser et compter les signatures thermiques en post traitement.

- **Deux sous-groupes de trois et deux individus en déplacement détectés par les observateurs au sol mais pas par le drone**

Le 24/03 matin, l'équipe sol observe trois individus se déplaçant à environ 1.3km du transect et le 27/03 soir, deux individus sont observés à même le transect, en déplacement également. Ces deux sous-groupes n'ont pas été détectés par le drone. Selon les observations des agents au sol, les atèles sont descendus en les voyant, pour leur lancer des branches et se déplaçaient dans des sous strates de la canopée. S'ils n'ont pas été détectés par l'imagerie thermique, c'est donc probablement qu'ils n'étaient plus sur la zone au moment du passage du drone (qui est passé peu de temps après), ou bien qu'ils étaient descendus rendant leur rayonnement thermique imperceptible.

7.4 SOURCES DE CONFUSIONS

Plusieurs signatures thermiques ont fortement ralenti les prospections au drone, car le plan de vol était interrompu pour analyser de plus près la cible et ainsi pouvoir confirmer ou infirmer qu'il s'agissait d'atèles.

Le 25 matin, deux signatures thermiques sont détectées au drone. Elles apparaissaient bien plus foncées que le reste de l'arbre, indiquant la présence de corps chauds et la signature thermique, révélant un semblant de queue, pouvait ressembler à celle des atèles (cf. fig 11) mais ils étaient immobiles et nous n'avons pas pu les identifier avec le capteur optique. Nous n'avons donc pas pu les compter comme des atèles, mais cela prouve néanmoins que les rayonnements thermiques peuvent traverser quelques feuilles et ainsi détecter la présence d'animaux quand on ne les voit pas à l'œil nu.



Figure 11 Deux signatures thermiques non identifiées

Les termitières

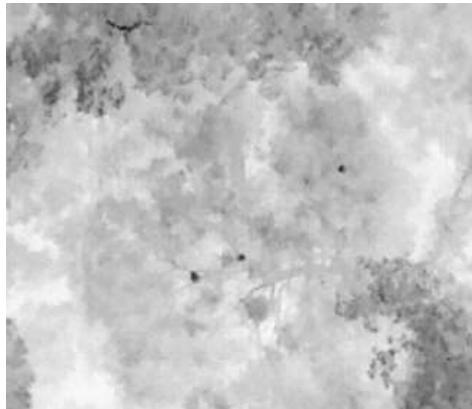


Figure 12 Trois termitières vues par le capteur thermique

Nous avons constaté que les termitières émettent beaucoup de chaleur et ont une signature thermique qui pourrait s'apparenter d'animaux.

Après une journée ensoleillée, les prospections au drone le soir étaient moins évidentes que le matin, car il y a plus de surfaces chaudes qui viennent perturber l'efficacité de la détection en temps réel et ralentir la prospection. Nous nous sommes arrêtés de nombreuses fois sur des sources chaudes qui s'avéraient être de la végétation, des troncs, des termitières irradiés par le soleil toute la journée.

7.5 AUTRES ESPECES DETECTEES

Des tests de vols à côté du bourg de Saül nous ont permis de collecter des informations sur les signatures thermiques d'autres espèces :

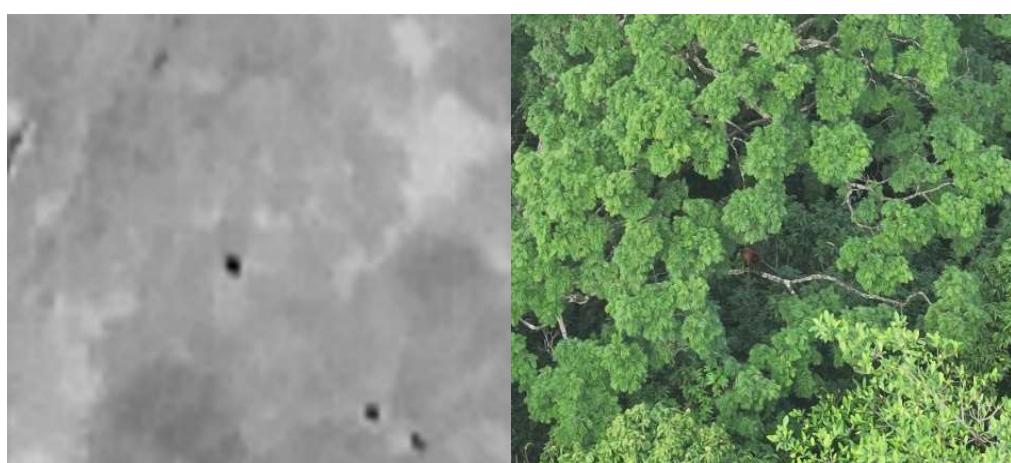
Urubus



Toucans à bec rouge



Singes hurleurs



Capucins bruns



Paresseux à trois doigts



7.6 DENSITE

Calculer la densité de population d'atèles ici n'est pas pertinent pour plusieurs raisons :

- Le transect a été délibérément choisi en raison de la présence connue d'un ou plusieurs groupes d'atèles dans la zone à ce moment-là. La densité obtenue serait surévaluée et ne serait donc pas représentative.
- Les arrêts du drone sur les signatures thermiques, le différent temps passé pour chaque prospection et le fait que ce ne soit pas un protocole standardisé apportent beaucoup de biais.

Sur l'étendue de la zone couverte par les prospections (environ $100\text{m} \times 1\,500\text{m} = 150\,000\text{m}^2$), si l'on fait la moyenne des individus comptés par prospection (les deux observations faites du même groupe du 24.03 matin sont comptées comme un seul groupe de 10 individus), on obtient : $(13+8+2)/3 \approx 7,7$ individus / $0,15\text{km}^2$, soit une densité de population de 51,3 individus d'atèles au km^2 . Ce chiffre est aberrant et peu représentatif, bien qu'il puisse être cohérent à cette zone, en cette saison, où la disponibilité en fruit est abondante. Une étude de (Aldana et al., 2008) a montré pour une espèce de singe atèle (*Ateles hybridus*), que les densités de population étaient dépendantes de la disponibilité en ressources de la zone prospectée (ils ont trouvé 29 individus/ km^2 dans les forêts non perturbées, et 38 individus/ km^2 dans les forêts exploitées mais conservant une forte abondance en fruit et une protection contre la chasse). Pour calculer une densité, il faudrait y consacrer plusieurs campagnes de terrain, espacées dans le temps de manière à prospecter plusieurs transects sur une zone une fois tous les x mois ou années.

8 DISCUTION

Les observations lors des prospections reflètent la dynamique de fission-fusion bien connue chez cette espèce (M van Roosmalen, 1985; Mcfarland Symington, 1990). Cette stratégie se manifeste généralement par une grande variabilité dans la composition des groupes d'atèles, composés d'une dizaine à vingtaine d'individus qui se réunissent le soir pour dormir puis se divisent en sous-groupes d'un à trois individus en journée pour se disperser et chercher de la nourriture. Ce comportement, à la fois grégaire et dispersé, sédentaire et mobile, les rend particulièrement difficiles à étudier. Même si nous ne pouvons pas faire d'analyse statistique, ces premiers résultats montrent que le drone thermique semble détecter avec plus de précision les grands groupes, probablement car ils ont plus tendance à être au sommet de la canopée au coucher et au réveil. A l'inverse, les observateurs au sol semblent détecter plus aisément les sous-groupes, qui sont plus mobiles et qui évoluent plus souvent dans des sous strates de la canopée. En effet, pour un même grand groupe détecté, le drone a pu compter plus d'individus que les agents au sol. Un autre grand groupe a été détecté un soir grâce au capteur thermique et, même si la prospection au sol avait dû être interrompue avant, il est très probable qu'ils auraient échappé à la vue des agents, car ils étaient calmes, immobiles, prêts à dormir au sommet de l'arbre. Ces observations vont dans le sens de Spaan et al., 2019 qui étaient arrivés à cette conclusion : le drone thermique a une réelle plus-value par rapport à la méthode traditionnelle de Distance Sampling pour les grands groupes (>10 individus).

Cette étude pilote a également mis en lumière certains biais méthodologiques qu'il faudra prendre en compte pour la mise en place de futurs protocoles. Nous avons constaté que, lorsqu'ils sont en déplacement, les atèles qui croisent les agents au sol ont tendance à descendre du sommet de la canopée pour leur jeter des branches ou simplement par curiosité. Le drone passant la plupart du temps derrière les agents, le capteur thermique ne pouvait pas détecter la chaleur des atèles lorsqu'ils étaient trop bas, ce qui a probablement induit une sous-évaluation du comptage drone.

C'est probablement la raison pour laquelle le drone n'a pas détecté les sous-groupes (de 2 et 3 individus) observés par suivi traditionnel. Pour faire une étude comparative plus poussée du suivi par drone vs le suivi traditionnel, il faudra idéalement faire commencer le plan de vol avant la prospection au sol, de manière à éviter la descente des atèles.

Un autre biais était l'écart entre les agents qui maîtrisaient beaucoup plus leur méthode qu'ils ont l'habitude de faire que l'équipe drone, qui était en phase expérimentale et d'ajustement. Il faut du temps pour aiguiser le regard et apprendre à repérer les animaux et discriminer rapidement les signatures thermiques qui ne sont pas ciblées par l'étude. On a déjà pu constater, au fur et à mesure des prospections, une nette amélioration et habituation en termes de détection et lecture de l'image thermique. La méthode reste néanmoins inédite sur le territoire, et les personnes en charge de la détection en temps réel via l'imagerie thermique sont débutantes.

L'imagerie thermique facilite indéniablement la détection d'animaux de canopée sur plusieurs plans : dans la manœuvre, cette méthode est moins coûteuse en efforts humains, en logistique et en temps. Son intérêt premier réside dans le fait qu'elle permettrait, une fois standardisée, de prospecter de grandes surfaces en moins de temps et en s'affranchissant de la contrainte majeure des IKA, à savoir devoir ouvrir et entretenir dans le temps des transects en forêt. Si la manœuvre est largement facilitée avec le drone, le post traitement lui, est plus chronophage. En effet, la détection en direct ne suffit pas, il est nécessaire de visionner plusieurs fois l'ensemble des vidéos et photos collectées. Il arrive souvent de découvrir, au énième visionnage, des signatures thermiques qui nous avaient échappées, ou alors de découvrir que ce que l'on pensait être des atèles en direct n'étaient que des trous noirs entre les feuilles. Pour pallier à cela, des chercheurs ont développé une plateforme (<https://www.conservational.co.uk/>) de machine learning dédié à la conservation. Le but de celle-ci étant de détecter et d'identifier les animaux, les humains et les objets artificiels indiquant le braconnage (par exemple, les voitures, les incendies). Ce système permet de traiter la reconnaissance automatique de fichiers photos et vidéos (visuel ou thermique) grâce au machine learning. Les algorithmes doivent être entraînés, plus il y a de données disponibles, plus l'algorithme apprend et devient efficace. Pour l'imagerie thermique des singes araignées, il n'est pas encore assez au point car il y a encore trop peu de données. La chercheuse Denise Spaan y contribue avec ses données d'*Ateles geoffroyi* au Mexique, et maintenant, l'apport des données d'*Ateles paniscus* en Guyane Française devrait aider à améliorer l'algorithme. En espérant arriver rapidement à automatiser le post traitement des données graphiques.

	Avantages	Inconvénients
Drone	<ul style="list-style-type: none"> - Détection : l'imagerie thermique facilite nettement la détection d'animaux en canopée (mammifères et oiseaux). Les corps chauds se distinguent parfois même alors qu'ils sont cachés et non perceptibles au visible. Possibilité de zoomer pour s'approcher de la cible, changer d'angle etc... - Facile à mettre en place : gain de temps, de coût et d'efforts humains employés pour une mission. - Permet de prospection des grandes surfaces en peu de temps et sans nécessité d'ouvrir des transects - Ne semble pas occasionner plus de dérangement qu'une méthode traditionnelle impliquant de se déplacer le long du transect. - Développement de l'IA pour l'identification et le comptage en post traitement. - Génère du matériel graphique et peut apporter des informations sur le comportement des espèces. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'identification après détection peut être ardue si l'animal est caché et non visible au capteur optique. - La signature thermique de l'atèle seule ne permet pas une identification sûre. Besoin de la confirmation visuelle. - Les individus se trouvant dans des sous-strates de la canopée peuvent être manqués à la détection. - Nécessité d'établir le pourcentage d'individus détectés par cette méthode (compter le nombre d'individus qui n'est pas situé sur le sommet de la canopée, observation difficile à faire depuis le sol). - Post traitement très chronophage (en l'attente d'une IA suffisamment entraînée) - Démarches réglementaires (demande de dérogations)
IKA	<ul style="list-style-type: none"> - Détection facilitée par l'association de l'ouïe et la vue. - Agents expérimentés. - Post traitement des données peu chronophage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige ouverture et entretien des transects (travail préliminaire fastidieux et chronophage) - Les individus se trouvant au sommet des arbres et silencieux ou immobiles risquent de ne pas être détectés. - Les prospections nécessitent un passage régulier sur les transects, pouvant occasionner un biais en occasionnant la fuite des animaux. - Manœuvre couteuse en temps, énergie et argent.

9 CONCLUSION

Cette nouvelle méthode est très prometteuse et présente beaucoup d'avantages qui permettraient d'étudier plus facilement des espèces de canopée à enjeux sur le territoire guyanais.

- 1) Le suivi par drone thermique est une méthode efficace pour détecter les singes atèles (et autres espèces de canopée) au lever et au coucher de soleil. Elle a permis pour un même groupe de détecter plus d'individus que par la méthode traditionnelle au sol.
- 2) Il semble que le drone thermique détecte mieux les grands groupes d'atèles que la méthode traditionnelle. A l'inverse, il semble plus facile de détecter les sous-groupes au sol qu'au drone. Cela pourrait être corrélé au fait que les grands groupes se retrouvent souvent au sommet des arbres, tandis que les sous-groupes auraient plus tendance à se déplacer à quelques mètres en dessous.
- 3) Si la détection avec l'imagerie thermique est forte, l'identification demeure, elle, plus complexe et aléatoire. Les animaux cachés sous les feuilles ne peuvent pas être identifiés avec la caméra visuelle. Néanmoins, la signature thermique, le comportement et la manière de se déplacer peuvent parfois suffirent pour confirmer ou infirmer une identification sans nécessité d'avoir une image visuelle.
- 4) Il est possible d'utiliser un drone thermique dans un environnement aussi complexe que la forêt amazonienne. Un drone tel que le Mavic 3T ou semblable est adapté à ce genre de prospection : il peut décoller d'une petite trouée en forêt, il a une bonne autonomie, une bonne portée du signal (à plus de 1km en foret), et est facilement transportable.
- 5) Bien que cette méthode soit beaucoup moins contraignante dans son aspect opérationnel que la méthode traditionnelle des IKAs, elle présente néanmoins un post traitement très chronophage. Avec l'IA en développement appliquée à la conservation, on peut espérer rapidement pallier à cette contrainte.

10 PERSPECTIVES

- 1) Poursuivre les efforts et standardiser la méthode de suivi des atèles par drone à caméra thermique pourrait permettre de suivre l'évolution de l'état des populations sur le territoire du PAG, sur le long terme.
- 2) Arriver à des densités semble compliqué avec cette méthode. La seule méthode réellement adéquate pour l'estimation de densités de population est la capture-marquage-recapture, ce qui n'est pas envisageable pour cette espèce. En revanche, il est tout à fait envisageable d'arriver à des protocoles standardisés pour de la **présence/ absence (probabilité d'occupation dans la zone, N-mixture)**. Par exemple, sur une surface choisie, prendre aléatoirement des points que le drone survolera en stationnaire pendant une durée

déterminée. Il faut effectuer plusieurs passages sur un même point, pour arriver à estimer une probabilité de détection et d'occupation, et répéter les mesures tous les x mois ou x années. Les modèles de N-mixture (site occupancy.) permettent de fournir des estimations d'abondances à partir de relevés par drone répétés spatialement, tout en tenant compte de la détection imparfaite de l'espèce (Brack et al., 2023). Cela nous indiquerait la probabilité que l'unité (zone) soit occupée par l'espèce.

- 3) Cette méthode ne remplacera probablement pas les IKAs, qui se maintiendront pour le suivi de la grande faune en général. En revanche, elle pourra venir compléter et élargir les données sur les singes atèles sur le territoire, dans l'espace (dans des zones non concernées par les IKAs par exemple) et/ou dans le temps (entre deux sessions d'IKAs), permettant d'avoir une estimation plus fine des tendances populationnelles de l'espèce. Il faudra donc privilégier les zones non concernées par les IKAs pour les protocoles de présence/absence.
- 4) Idéalement, il conviendrait que le PAG investisse dans un ou plusieurs drones thermiques (un par délégation dans l'idéal, si le budget le permet) et que des agents des délégations intérieures (DTO, DTC, DTM) passent le diplôme de droniste professionnel puis se forment et se familiarisent avec l'outils. Passer par l'achat du drone et la formation d'un agent est plus rentable et durable que de payer des prestations pour chaque mission. Ainsi, les prospections pourraient se faire régulièrement par des agents sur place, ne nécessitant pas de mobiliser tout un engrenage logistique. Les données seraient plus facilement collectées et la méthode pourrait être vite standardisée.

Une deuxième option serait d'engager une personne droniste en CDD ou stage pour partir minimum 5-6 mois complets à Saül (par exemple) de manière à développer et standardiser la méthode pour obtenir des densités de populations de l'espèce.

Une troisième option serait de co-encadrer une thèse financée par la DGTM ou l'OFB, ou via une bourse doctorale de l'Université de Guyane pour l'année 2024. Ainsi, un.e étudiant.e pourra se pencher sérieusement sur le sujet du développement de méthodes (drone thermique, génétique des populations...) pour le suivi et la conservation des populations d'atèles en Guyane, voire dans le plateau des Guyanes

- 5) L'utilisation de cet outil pourrait s'étendre à d'autres espèces à enjeux (endémiques, vulnérables, rarement observées) telles que le Saki Satan, primate vivant également en haut des arbres. Il pourrait être observé grâce au drone thermique en balayant des larges zones dans des lieux où sa présence est connue et des lieux où il n'a jamais été recensé pour faire au moins du présence/absence.
- 6) Le drone thermique pourrait permettre de prospecter facilement des zones chassées et non chassées, selon un gradient de proximité aux villages et aux rivières, en plaçant plusieurs transects d'environ 1km selon ces gradients de pression de chasse. Les plans de vol pourraient suivre une forme d'étoile (cf protocole Noé S:\03_Patrimoines\0_1_Ecologie_Etudes\Kwata\ Fiches de réflexion), de serpentins ou simplement de transect linéaire.

11 BIBLIOGRAPHIE

- Aldana, A. M., Beltrán, M., Torres-Neira, J., & Stevenson, P. R. (2008). Habitat Characterization and Population Density of Brown Spider Monkeys (*Ateles hybridus*) in Magdalena Valley, Colombia. *Neotropical Primates*, 15(2), 46–50. <https://doi.org/10.1896/044.015.0203>
- Brack, I. V., Kindel, A., de Oliveira, L. F. B., & Lahoz-Monfort, J. J. (2023). Optimally designing drone-based surveys for wildlife abundance estimation with N-mixture models. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(3), 898–910. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14054>
- Burke, C., Rashman, M., Wich, S., Symons, A., Theron, C., & Longmore, S. (2019). Optimizing observing strategies for monitoring animals using drone-mounted thermal infrared cameras. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2), 439–467. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1558372>
- Hamilton, G., Corcoran, E., Denman, S., Hennekam, M. E., & Koh, L. P. (2020). When you can't see the koalas for the trees: Using drones and machine learning in complex environments. *Biological Conservation*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108598>
- M van Roosmalen, M. G., & -, N. (n.d.). *Habitat preferences, diet, feeding strategy and social organization of the black spider monkey [Ateles paniscus paniscus Linnaeus 1758] in Surinam "* ACTA AMAZÔNICA.
- Mcfarland Symington, M. (1990). Fission-Fusion Social Organization in A teles and Pan. In *International Journal of Primatology* (Vol. 11, Issue 1).
- Spaan, D., Burke, C., McAree, O., Aureli, F., Rangel-Rivera, C. E., Hutschenreiter, A., Longmore, S. N., McWhirter, P. R., & Wich, S. A. (2019). Thermal infrared imaging from drones offers a major advance for spider monkey surveys. *Drones*, 3(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/drones3020034>
- Witt, R. R., Beranek, C. T., Howell, L. G., Ryan, S. A., Clulow, J., Jordan, N. R., Denholm, B., & Roff, A. (2020). Real-time drone derived thermal imagery outperforms traditional survey methods for an arboreal forest mammal. *PLoS ONE*, 15(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242204>