



**HAL**  
open science

# Veille technologique sur les méthodes de diagnostic et géoréférencement des lignes électriques haute tension en milieux isolés

Théo Martin

## ► To cite this version:

Théo Martin. Veille technologique sur les méthodes de diagnostic et géoréférencement des lignes électriques haute tension en milieux isolés. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04806424

**HAL Id: dumas-04806424**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04806424v1>**

Submitted on 27 Nov 2024

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

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

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS  
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

**Présenté en vue d'obtenir le**

**DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe**

**PAR**

**Théo MARTIN**

---

**Veille technologique sur les méthodes de diagnostic et géoréférencement des  
lignes électriques haute tension en milieux isolés**

**Soutenu le 2 septembre 2024**

---

**JURY**

**SIMONETTO Elisabeth  
CHARLET Christophe  
FREYTAG Thibaud**

**Présidente de jury  
Enseignant référent  
Maître de stage**

# Table des matières

Table des matières .....	1
Table des abréviations .....	2
Remerciements .....	3
Introduction .....	4
I. État de l’art des méthodes de diagnostic et géoréférencement des lignes haute tension en sites isolés.....	5
I.1 Méthodes de diagnostic.....	5
I.2 Méthodes de géoréférencement .....	7
II. Le drone et son application dans le métier de géomètre topographe.....	10
II.1 État de l’art du drone .....	10
II.1.1 Les technologies de drones .....	10
II.1.2 Prérequis administratifs au télépilotage.....	13
II.1.3 Photogrammétrie appliquée à la topographie .....	17
II.1.4 La technologie Lidar.....	20
II.2 Étude de la mission proposée par ENEDIS ; besoins techniques et réponses pratiques	23
II.2.1 Étude de besoins .....	23
II.2.2 Offre disponible sur le marché .....	25
II.2.3 Choix de la réponse matérielle et logicielle.....	28
III. Mise en application .....	30
III.1 Premiers vols .....	30
III.1.1 Réalisation d’un plan de vol.....	30
III.1.2 Process de traitement photogrammétrique .....	33
III.2 Cas concret : ligne haute tension en milieu montagneux sur la commune de Bourbach- le-Haut (68) .....	35
III.2.1 Préparation de mission.....	35
III.2.2 Compte-rendu de vol : présentation et analyse des résultats.....	37
Conclusion.....	41
Table des illustrations.....	43
Liste des tableaux .....	43
Bibliographie.....	43
Annexes .....	47

## **Table des abréviations**

BAPD : Brevet d'Aptitude au Pilotage à Distance

BT : Basse Tension

CATS : Certificat d'Aptitude Théorique de pilote à distance pour les scénarios Standard

CATT : Certificat d'Aptitude Théorique aux fonctions de Télépilote

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DIRCAM : Direction de la Circulation Aérienne Militaire

GNSS : Global Navigation Satellite Systems

HTA : Haute Tension A

HTB : Haute Tension B

IFR : Instrument Flight Rules

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NOTAM : Notice To Air Men

RTH : Return To Home

RTK : Real Time Kinematic

SETBA : Secteur d'Entraînement à Très Basse Altitude

SIA : Service de l'Information Aéronautique

SIG : Système d'information géographique

TTC : Toutes Taxes Comprises

VOLTAC : Secteurs de Vols Tactiques

ZIT : Zone Interdite Temporaire

ZRT : Zone Réglementée Temporaire

## Remerciements

M. Thibaud Freytag, directeur de la société RL Etudes, m'a offert l'opportunité d'effectuer ma troisième année de formation en alternance, au sein de sa société. Le métier de géomètre topographe offre un large spectre de domaines d'application et j'ai pu en mesurer l'étendue lors de mon stage auprès de la société RL Etudes, spécialisée dans la détection et le géoréférencement des réseaux enterrés.

Pour appréhender cette spécialité et parfaire mes connaissances, j'ai pu compter sur le soutien de mon maître de stage, M. Freytag. Je le remercie pour sa disponibilité, sa patience, ses conseils judicieux et la bienveillance dont il a fait preuve à mon égard. Merci à toute son équipe pour le savoir-faire qu'ils ont eu à cœur de me transmettre et qui m'a permis d'étayer fortement mes connaissances et ma maîtrise pratique du métier.

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour, sans le soutien indispensable de mon professeur référent, monsieur Christophe Charlet, qui m'a permis de progresser sereinement tout au long de cette année de contrat de professionnalisation. Outre l'aspect administratif, j'ai pu m'appuyer sur les apports théoriques dispensés tout au long de l'année. J'ai pu clairement mettre en application des éléments abordés en cours, notamment la photogrammétrie et le relevé 3D. Son enseignement, en parfaite corrélation avec le sujet de mon mémoire, a été une véritable plus-value, car il a permis d'alimenter ma réflexion et d'enrichir mes connaissances. Merci à lui pour sa patience, sa gentillesse et sa disponibilité, faisant de sa spécialité un professeur référent idéal.

Je tiens également à saluer mes parents, qui, depuis le début de ma scolarité, ont toujours fait preuve d'un soutien sans faille. Je les remercie pour les valeurs qu'ils m'ont transmises, leur soutien moral, émotionnel et financier. Vous avez été de véritables guides contribuant à mon épanouissement, me permettant d'aborder ma vie professionnelle sereinement et sous les meilleurs auspices. Maman, papa, je vous aime et encore merci.

# Introduction

La maintenance et le diagnostic des lignes haute tension sont des problématiques primordiales dans la garantie de continuité du service de distribution électrique. Cela est d'autant plus important dans les milieux isolés comme les villages de montagne, car bien souvent l'alimentation électrique des foyers réside sur le bon fonctionnement d'une seule ligne.

Il est nécessaire pour l'exploitant du réseau de garantir une continuité d'accès à ses clients. Pour ce faire, le diagnostic des lignes doit être le plus précis et exhaustif possible, pour cibler au mieux les éventuelles défaillances et ainsi, faciliter l'intervention des agents et permettre une meilleure planification des coûts.

C'est en sa qualité de bureau d'études et cabinet de topographie prestataire ENEDIS que RL Etudes souhaite développer une réponse technique à l'émergence de ce nouveau marché de diagnostic et géoréférencement des lignes haute tension.

Implantée en Alsace depuis 1989, la société s'est développée autour de la production de données géoréférencée pour le compte d'entreprises de travaux publics, collectivités locales ou encore grandes entreprises telles qu'ENEDIS ou GRDF. Spécialisé dans la détection et le géoréférencement de réseaux enterrés, le pôle topographie de l'entreprise reste néanmoins compétent dans tout type de missions telles que le levé de corps de rue, la réalisation de plans topographiques, le calcul de cubages, etc.

L'émergence du drone dans le monde professionnel a permis l'essor de domaines à l'instar de la photogrammétrie et du LiDAR. Devenant de plus en plus précises et fiables, il n'est pas surprenant que ces technologies s'installent peu à peu dans les cabinets de Géomètres-Experts et les bureaux d'études. C'est dans cette dynamique de développement que RL Etudes souhaite travailler sur une solution de diagnostic et de géoréférencement des lignes haute tension s'appuyant sur ces nouvelles technologies, en étudiant ses aspects commerciaux, techniques et financiers.

Dans le cadre de cette étude, nous serons amenés à étudier dans une première partie les différentes méthodes actuellement en vigueur en matière de diagnostic et géoréférencement de ligne haute tension en milieu isolé, afin de déterminer les besoins techniques auxquels les nouvelles technologies doivent répondre pour permettre un diagnostic et géoréférencement de lignes haute tension en milieux isolés. Dans une seconde partie, nous feront l'état de l'art des techniques couramment utilisées dans ce cadre. Enfin, dans une troisième partie, nous nous appuierons sur ces réflexions afin de mettre en place un processus de diagnostic et cartographie des lignes.

# I. État de l'art des méthodes de diagnostic et géoréférencement des lignes haute tension en sites isolés

## I.1 Méthodes de diagnostic

Les lignes électriques haute tension sont des ouvrages délicats à diagnostiquer et manipuler. Les techniciens réalisant des travaux sur une ligne s'exposent à des tensions pouvant atteindre 20 000 volts, sans forcément être en contact physique avec les conducteurs, notamment avec le risque de création d'arc électrique.

Un diagnostic peut s'avérer nécessaire dans plusieurs cas de figure. Le plus courant est le diagnostic périodique de vérification de l'état des lignes. Il se peut également qu'un incident technique sur une ligne demande l'intervention des équipes pour réparer ou remettre en service des tronçons. Dans ce cas, un diagnostic préalable est nécessaire rapidement pour permettre la planification et l'intervention efficace des équipes techniques.

Dans ces deux cas, le diagnostic effectué est visuel. Un technicien spécialisé se déplace sur les lieux et inspecte visuellement les éléments constitutifs des infrastructures ; les portants, les armatures, les isolateurs ou encore les câbles.

Il s'agit d'un exercice fastidieux demandant un grand sens de l'observation et une bonne connaissance des réseaux électriques. En effet, les techniciens doivent être capables de détecter la moindre dégradation de manière à prendre les mesures nécessaires au bon maintien du service de distribution électrique. Les dégradations sont classées dans plusieurs catégories d'urgence en interne par ENEDIS, de U0, la plus grave, à U2 la plus légère. Le niveau d'urgence déterminera notamment le délai d'intervention et les mesures à prendre pour la sécurité des tiers et des agents.

Le diagnostic au sol est particulièrement adapté à l'auscultation des poteaux. Beaucoup d'entre eux étant en bois (figure 1), il est important de s'assurer que ceux-ci ne sont pas abîmés par le temps et l'humidité ou encore rongés par des animaux ou fissurés. Les agents au sol peuvent notamment réaliser des tests comme le « sondage au marteau + tournevis » ou la tarière de Pressler, qui permettent un diagnostic sur l'état extérieur et intérieur du bois.

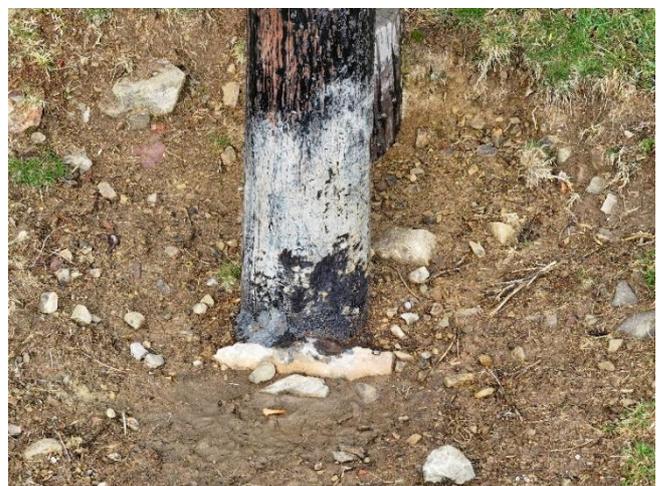


Figure 1 : Portant bois pourri à sa base

Les dégâts peuvent également concerner les isolateurs. Il est parfois difficile d'observer minutieusement les isolateurs placés à plusieurs mètres au-dessus du sol. Les techniciens font donc usage d'appareils photo ou de jumelles pour leur permettre d'observer plus précisément les ouvrages et photographier les éventuels dégâts notables.

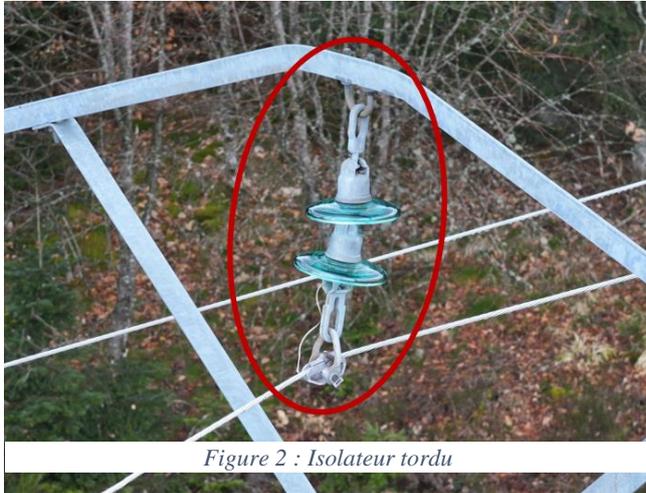


Figure 2 : Isolateur tordu

Les isolateurs (figure 2) ont un rôle primordial sur tout réseau électrique aérien, puisqu'ils sont la barrière physique empêchant le courant de se diffuser à travers les armatures et les piliers.

Des isolateurs endommagés ou déréglés doivent impérativement être repérés et signalés au plus vite pour écarter tout risque de diffusion du courant à travers les portants et le sol environnant, ce qui représenterait un risque majeur pour les tiers.

Si un diagnostic au sol peut être adapté pour l'auscultation des portants, il est difficile d'établir une expertise sur ces éléments en hauteur. La visibilité étant parfois très réduite et les angles de vue ne permettent pas une bonne appréciation de la situation, des diagnostics hélicoptérés sont régulièrement entrepris.

Parmi les éléments clés d'une ligne à expertiser, le câble (figure 3) est évidemment l'un des éléments les plus importants. Si une dégradation venait à apparaître sur les conducteurs, cela compromettrait le bon fonctionnement du raccordement électrique, mais aussi la sécurité aux abords de la ligne, pouvant conduire à la formation d'arcs électriques ou de manquements graves dans l'isolation des poteaux.

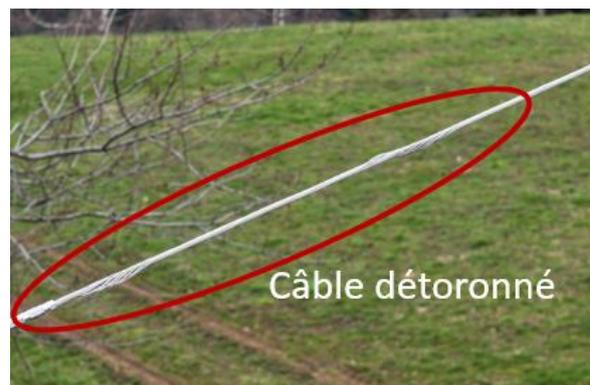


Figure 3 : Câble détourné

Détecter des anomalies directement sur les conducteurs est d'autant plus difficile que ceux-ci sont également à plusieurs mètres au-dessus du sol et souvent relativement fins. Voilà maintenant plusieurs années que de nouveaux outils font leur apparition sur le marché, pouvant s'avérer particulièrement intéressants pour ce type d'application.

Les drones équipés de caméras embarquées sont notamment une solution peu coûteuse, fiable et très efficace dans ce domaine. Ce dispositif permet d'atteindre virtuellement des lignes pour procéder à un contrôle exhaustif de leur état sans compromettre la sécurité des agents et en permettant une bien meilleure observation que depuis le sol. Tous les angles sont observables et la très haute qualité d'image des appareils récents permet le diagnostic en temps réel directement sur place, ainsi que la prise de photos permettant une meilleure transmission des informations aux équipes à distance.

## I.2 Méthodes de géoréférencement

La quasi-totalité des opérations de travaux fait aujourd'hui l'objet d'une cartographie et d'un géoréférencement. Qu'il s'agisse de travaux de réfection de réseaux secs ou humides, de chaussée, ou de construction d'ouvrages, les entreprises de travaux publics et les collectivités font régulièrement appel à des cabinets de Géomètres Experts ou des bureaux d'études spécialisés en topographie pour procéder au relevé et géoréférencement des travaux réalisés. Les lignes et ouvrages électriques ne font pas exception à la règle.

Les grandes entreprises telles qu'ENEDiS et les collectivités se dotent peu à peu de services de Système d'Information Géographique (SIG), qui demandent constamment la création de données géoréférencées pour concevoir et créer la cartographie la plus exhaustive et précise possible. C'est dans ce cadre que les opérations de travaux font l'objet de géoréférencement des ouvrages créés, modifiés ou diagnostiqués.

Le géoréférencement des lignes électriques peut s'avérer être une tâche fastidieuse et parfois difficile. Si nous reprenons l'exemple des lignes en milieux isolés, nous comprenons aisément tout l'enjeu du développement de nouvelles techniques sans contact avec le sol. En effet, nous nous retrouvons très rapidement dans des situations de terrains très escarpés, accidentés, en proie à une végétation dense sont impraticables.

Pourtant, c'est aujourd'hui la seule option de géoréférencement disponible pour ce type d'ouvrages pour la société. Les zones qui sont difficiles d'accès voire dangereuses sont souvent inaccessibles avec l'équipement d'usage : un tachéomètre au minimum, une antenne GNSS et les cannes qui leur sont propres.

Les missions de géoréférencement des lignes haute tension peuvent différer dans leur nature et leurs objectifs. Deux situations peuvent se présenter au géomètre.

#### - Le diagnostic mécanique de l'état de la ligne :

Cette prestation est commanditée par des acteurs tels qu'Enedis ou RTE. Elle consiste à calculer l'état mécanique de la ligne en réalisant des relevés tachéométriques. (figure 4)

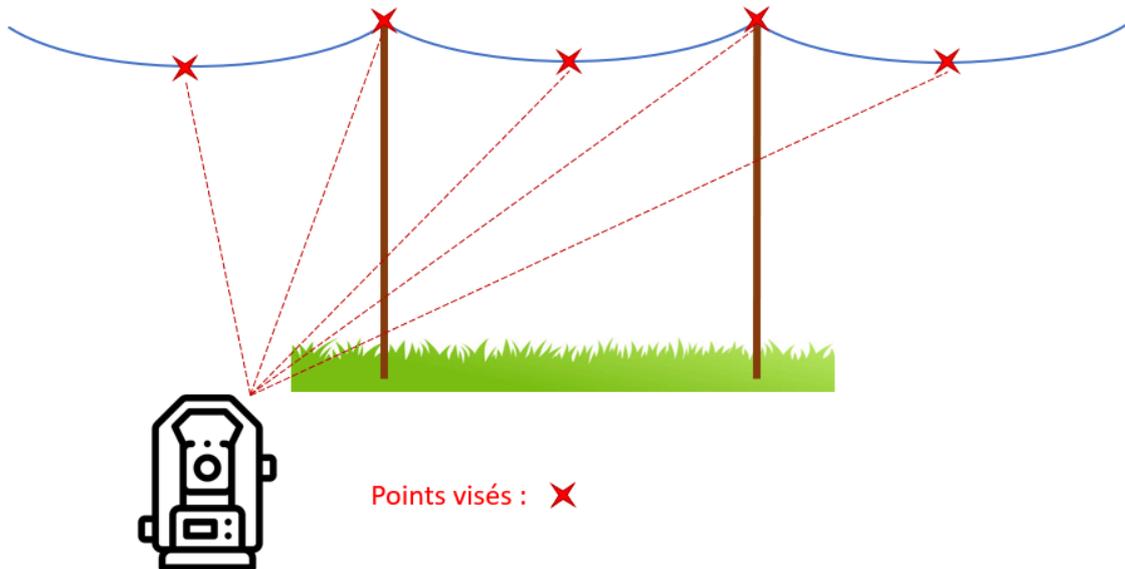


Figure 4 : Points visés dans le cadre d'un diagnostic mécanique

Le technicien procède à des visées laser successives sur les points de fixation du câble sur les portants ainsi que le point bas du câble entre deux portants. Grâce à un logiciel de calcul spécialisé, les chargés d'études au bureau pourront déterminer la tension mécanique exercée par le câble sur les poteaux en fonction de la portée entre les deux points de fixation et le point bas de l'arc de cercle formé par le câble. Ces mesures sont réalisées sans prisme, en utilisant la mesure au laser des tachéomètres.

En plus des mesures de points hauts, les techniciens enregistrent également des points bas, au niveau du sol. Ces points serviront à placer les portants sur le plan de masse et sont relevés avec la canne à prisme ou à l'aide du GNSS.

#### - Le géoréférencement simple de la ligne :

Pour procéder au géoréférencement d'une ligne haute tension, il n'est pas nécessaire de viser des points hauts sur les portants ou les câbles. Il suffit de relever les positions au sol des poteaux, nous donnant ainsi une altitude dans le système de coordonnées souhaité, ainsi que la possibilité de mesurer les portées entre chaque poteau. Les coordonnées sont obtenues en utilisant les fonctions Dist/Rec sur un tachéomètre, qui permettent d'enregistrer séparément la distance et l'angle de manière à placer correctement le centre du poteau dans l'espace. Elle peut également être relevée à l'aide d'une solution GNSS RTK si le lieu et les précisions attendues le permettent. Pour une cartographie de réseaux aériens, les précisions GNSS sont généralement

suffisantes. Deux points sont alors enregistrés, diamétralement de part et d'autre de chaque poteau, de manière à pouvoir reconstituer sa position exacte en DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) au bureau en retrouvant le milieu du segment formé par ces deux points.

En effet, il nous faut être en mesure de viser au minimum deux points sur ces portants, pour pouvoir les positionner et les orienter dans l'espace, sans quoi nous ne pourrions donner qu'une position approximative du poteau.

En milieu difficile tel qu'un pan de montagne, les visées peuvent très vite devenir délicates, voire impossibles, avec des portées de plusieurs centaines de mètres et des obstacles visuels évidents tels que des arbres ou des variations de dénivelée importantes.

Comme abordé précédemment, il y a une première grande difficulté qui peut se poser avec un accès parfois impossible à certains endroits à cause d'une végétation ou d'un terrain impraticable. Placer une station tachéométrique devient difficile dans ce type d'environnement. En fonction de notre position géographique, le signal GNSS peut être perturbé par les champs électromagnétiques engendrés par la tension très élevée circulant dans les câbles et les masques créés par la végétation.

Mettre en place un cheminement n'est pas non plus une solution viable dans cet environnement. Si le technicien est seul, il devra réaliser plusieurs aller-retours tout le long du terrain parfois très escarpé pour réaliser les visées sur ses points de station.

Une solution de géoréférencement sans contact avec le sol serait donc d'une très grande utilité dans cette situation et permettrait un gain énorme, autant sur le temps passé sur place que sur le plan de la sécurité.

Au vu des progrès et du nombre d'essais concluants réalisés par nombre d'acteurs dans le monde de la cartographie, la solution d'un drone LiDar semble plus qu'adéquate pour cette mission. Cependant, il s'agit d'une solution extrêmement coûteuse qui nécessite une étude approfondie avant sa mise en place, car cela représente un investissement considérable pour une petite entreprise. D'autres solutions seront très certainement envisagées à titre d'essais dans un premier temps, de manière à lancer la collaboration avec ENEDIS sur ce type de mission.

## II. Le drone et son application dans le métier de géomètre topographe

### II.1 État de l'art du drone

#### II.1.1 Les technologies de drones

Depuis plusieurs années les drones se développent tous azimuts, du cinéma aux applications militaires, en passant par l'agriculture et la topographie. Les technologies novatrices dont ils sont équipés rendent leur usage non seulement possible dans un cadre professionnel, mais aussi accessible au grand public.

Des fabricants tels que DJI proposent des technologies extrêmement progressistes pour tout type d'applications. De l'utilisation pour de la vidéo amateur, jusqu'aux domaines les plus pointus tels que l'épandage en agriculture ou encore le scanner lidar aéroporté, les technologies proposées n'ont cessé de s'améliorer et d'évoluer.

En 2014 par exemple, la très large majorité des drones axés sur l'activité professionnelle étaient des drones à monter soi-même. Les différentes pièces étaient disponibles à l'achat séparément et la charge du montage de l'aéronef revenait à l'acheteur.

Nous observons des drones tels que le Mikrokopter HexaXL (figure 5), qui n'est autre qu'un châssis sur lequel le propriétaire greffait les différents composants selon ses propres choix.



Figure 5 : Mikrokopter HexaXL équipé d'une caméra Sony NEX-5R (Source : <https://www.mountauburn.org/mikrokopter-hexa-xl-flies-over-mount-auburn-sphinx/>)

Ce type d'appareil n'avait alors qu'une autonomie très limitée, qui ne dépassait guère les dix minutes de vol, rendant très compliquées les missions de grande ampleur telles que des relevés photogrammétriques.

De plus, il n'existait pas encore à cette époque de solution de vol automatisé. Les missions de photogrammétrie nécessitant une très grande régularité dans les prises de vues pouvaient donc s'avérer délicates et fastidieuses, avec de forts risques d'échec dans le recouvrement entre les photos. Nous parlerons plus amplement de photogrammétrie dans le prochain chapitre de ce mémoire. Ces aéronefs n'étaient que très rarement équipés de technologies telles que le positionnement GPS RTK, rendant leur opération encore plus abrupte pour des applications professionnelles. Aujourd'hui, les grands fabricants de drones se sont également lancés dans la production massive de drones professionnels, avec des applications bien précises.

Nous trouvons par exemple toute une gamme « Enterprise » chez DJI, qui constitue un socle très varié de drones professionnels, destinés à des applications bien précises.

Ci-dessus par exemple le DJI Mavic 3 Enterprise (figure 6). Ce drone est un excellent exemple du progrès technique fulgurant auquel nous avons pu assister ces dernières années.



Figure 6 : DJI Mavic 3 Enterprise équipé d'un module RTK (Source : studioSPORT.fr)

Avec un poids de seulement 915 grammes et un format ultra compact d'à peine plus de 20 centimètres (plié), nous avons à notre disposition un concentré de technologies permettant la réalisation de travaux de photogrammétrie d'une précision centimétrique sans avoir recours à des points de contrôle au sol, ou encore l'inspection d'ouvrages sensibles comme des lignes électriques très haute tension avec un zoom caméra hybride jusqu'à 56x.

En effet, cet appareil peut embarquer la technologie de positionnement GNSS avec corrections en temps réel RTK (Real Time Kinematic). En le connectant à une station de base au sol, il est capable de compenser sa propre position dans l'espace avec une précision centimétrique. Cette fonctionnalité est d'une importance primordiale dans beaucoup de circonstances. Elle permet de s'affranchir du placement de points de contrôle au sol pour des environnements délicats tels que les versants de montagnes ou encore les carrières.

Les appareils modernes sont également équipés de systèmes de sécurité performants diminuant au maximum les risques d'accident liés à une panne mais également à une erreur de manipulation du télépilote.

Grâce à des récepteurs GNSS intégrés, les drones connaissent leur position approximative dans l'espace. La précision de ces systèmes étant similaire à ceux que nous trouvons communément sur les voitures par exemple, ils ne sont pas destinés à des applications professionnelles de haute précision. Cependant, ils permettent à l'appareil de connaître son point de décollage et sa position en permanence dans l'espace, ainsi que leur hauteur de vol. Cela permet la mise en place d'un grand nombre de systèmes de sécurité. Par exemple, les paramètres de vol peuvent être ajustés en fonction des restrictions administratives et techniques ; la distance par rapport au télépilote, la hauteur maximale de vol, etc. Les fonctionnalités d'autopilote sont également très efficaces grâce au positionnement satellite. Dans des applications comme l'audiovisuel, il est possible de répéter avec précision des trajectoires enregistrées, en conservant des paramètres de vol constants.

Sur le volet de la sécurité, nous assistons à des progrès très impressionnants. En effet, le positionnement GNSS permet à l'appareil, comme explicité un peu plus haut, de connaître son point de décollage avec précision. En cas de perte du signal avec la télécommande, l'appareil pourra donc automatiquement se mettre en mode « RTH » (Return To Home). Cette manœuvre de sécurité va donc enclencher un retour de l'appareil à son point de décollage de manière totalement autonome.

Ce type de manœuvre pourra également être enclenchée en cas de batterie trop faible. L'appareil calcule en permanence la quantité d'énergie dont il a besoin pour revenir à son point de départ en fonction de la distance à laquelle il se trouve de celui-ci. S'il détermine que sa batterie atteint un niveau critique risquant de ne pas lui permettre de revenir, il enclenchera également lui-même une manœuvre RTH. Ces systèmes de positionnement et de retour automatique sont couplés à des systèmes très efficaces de détection d'obstacles. Des caméras réparties tout autour de l'aéronef permettent non pas les prises de vues mais la détection des obstacles. (Figure 7)



Figure 7 : Système de détection d'obstacles DJI (Source : <https://www.helicomicro.com/>)

Ainsi, qu'il soit en vol manuel, en vol automatique ou même en vol de retour d'urgence autonome, l'appareil adaptera sa trajectoire en fonction des potentiels obstacles qu'il détectera au cours de son trajet évitant d'entrer en collision avec des objets ou des personnes.

Ces systèmes de détection d'obstacles ont néanmoins leurs limites. Dans le cas où le vol se situe à proximité d'une végétation peu dense en hiver par exemple, où les arbres sont dénués de feuillage, le système peut montrer certaines faiblesses à détecter ces obstacles fins ou de petite taille. La sécurité du vol et la prévention des collisions reviennent toujours au télépilote. Il est le garant du bon usage de l'appareil qui reste sous son entière responsabilité.

Les drones sont tous hiérarchisés selon des classes ; de C0 à C4 jusqu'en janvier 2024, et de C0 à C6 après cette date. Cette catégorisation classe les drones principalement en fonction de leur poids. Les drones de moins de 250 grammes sont classés C0, moins de 900 grammes C1, moins de 4 kilogrammes C2. Dans la classe C3, on trouve non seulement les drones de moins de 25 kilogrammes mais aussi d'une envergure de moins de 3 mètres, et le reste est classé C4. Les classes C5 et C6 sont apparues avec les nouvelles réglementations européennes en janvier 2024. Elles ne posent pas de nouvelles conditions de poids mais ajoutent des standards de sécurité supplémentaires aux classes déjà existantes. Par exemple, le DJI Mavic 3 Enterprise que nous avons présenté un peu plus haut est classé C2 en sortie d'usine. Il est nécessaire d'y ajouter un kit d'équipement supplémentaire comprenant notamment un parachute d'urgence, vendu par un fabricant tiers. L'ajout de ce kit classera alors ce drone en catégorie C5, le rendant utilisable dans les scénarios spécifiques selon les standards européens.

Pour y voir plus clair dans les classes de drones et les scénarios standards, étudions les prérequis administratifs sur le télépilotage.

## II.1.2 Prérequis administratifs au télépilotage

L'opération d'un aéronef sans équipage à bord est soumise à des règles que chaque télépilote se doit de connaître et maîtriser. En effet, lorsque nous pilotons un drone, nous naviguons dans l'espace aérien commun à tous et à tout type d'aéronefs. Nous sommes susceptibles de croiser d'autres appareils, du planeur au ballon dirigeable, en passant par les hélicoptères et autres avions. Tout comme la route, les airs sont un espace commun à tout usager qui souhaiterait l'emprunter pour se déplacer. Ils sont donc régis par un code : le code de l'aviation civile.

Il est impératif pour tout pilote ou télépilote de le connaître et le maîtriser pour permettre une cohabitation saine entre tous les usagers du ciel. Pour un télépilote, il existe plusieurs niveaux de certification à obtenir pour naviguer en fonction du type d'aéronef et des espaces aériens qu'il souhaite emprunter. En fonction du risque engendré par la mission qu'il souhaite effectuer, le télépilote se classera parmi trois catégories :

- Catégorie ouverte : risque faible

Dans cette catégorie, le vol envisagé est considéré comme à faible risque. La majorité des vols vont d'ailleurs entrer dans cette catégorie puisque cela regroupe tous les vols à moins de 120 mètres de hauteur, avec l'aéronef toujours en vue, en dehors des agglomérations et des rassemblements de personnes et hors des zones de vol interdites ou réglementées dictées par les cartes aéronautiques OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), que nous aborderons un peu plus tard dans ce mémoire.

La catégorie ouverte est elle-même subdivisée en trois sous-catégories : A1, A2 et A3, apportant chacune des précisions sur la mission envisagée, et par conséquent, son lot de règles. En sous-catégorie A1, le survol de personnes est autorisé mais pas le survol d'un rassemblement de personnes. Cela concerne les drones de classe C0 et C1 que nous avons abordés plus haut. En A2, la distance autorisée pour s'approcher des tiers est de 5 mètres sans les survoler, à condition que le drone soit équipé d'un mode vitesse lente, sinon cette distance est portée à 30 mètres. Cette catégorie concerne les drones de classe C2. Enfin, la sous-catégorie A3 interdit formellement le survol de tiers et concerne les drones de classes C3 et C4.

La catégorie ouverte nécessite de prendre part à une formation théorique gratuite en ligne sur le site « [alphantango.aviation-civile.gouv.fr](http://alphantango.aviation-civile.gouv.fr) ». Elle consiste en une série de 40 questions auxquelles le candidat doit répondre, et d'obtenir un minimum de 75% de bonnes réponses. Cette formation a pour but de sensibiliser le candidat aux règles aéronautiques de base et au bon usage des drones. Il n'y a pas d'obligation de formation pratique. Seule une lecture attentive du manuel d'utilisation de l'appareil est demandée.

- Catégorie spécifique : risque modéré

La catégorie spécifique a été modifiée par l'arrivée des réglementations européennes en janvier 2024. Avant cette date, elle comptait 3 scénarios standards de vol, qui permettaient de

couvrir la quasi-totalité des vols de drones envisageables dans une utilisation poussée ou professionnelle. Depuis la réglementation européenne, les scénarios sont au nombre de 2.

- Scénario standard STS01 : Vol à **vue** en **environnement habité** ; hauteur maximale de 120 mètres, distance horizontale de 100 mètres. Le pilote doit être titulaire d'un certificat d'aptitude théorique délivré spécifiquement pour ce scénario. Il doit également justifier d'une formation pratique suivie auprès d'un organisme reconnu.
- Scénario standard STS02 : Vol **hors vue** en **environnement à faible densité de population** ; hauteur maximale de 120 mètres et une distance horizontale de 1 kilomètre si le pilote est seul. Cette distance peut être portée à 2 kilomètres si le pilote est assisté d'un observateur avec lequel il sera en communication permanente par un moyen fiable et stable.

Pour effectuer un vol entrant dans l'un de ces deux scénarios, le pilote devra effectuer une demande à la préfecture sur la plateforme Alphatango.

Par ailleurs, il est possible de rencontrer un certain nombre de zones à statut particulier. Parmi elles, les zones **D** (dangereuses) ; désignent des zones où des activités aériennes sont interdites ou soumises à des restrictions spécifiques en raison de dangers tels que des essais de missiles, des activités militaires ou des conditions météorologiques extrêmes. Ces zones sont identifiées pour assurer la sécurité des vols et des aéronefs dans l'espace aérien.

Les zones **R** (réglementées) ; indiquent des zones où des activités aériennes sont réglementées en raison de diverses raisons, comme la protection de sites sensibles, des activités militaires ou des restrictions de trafic. Elles peuvent être utilisées pour assurer la sécurité des vols ou pour des raisons de sécurité nationale.

Les zones **P** (de l'anglais « prohibited », interdites) ; désignent des zones où les vols sont strictement interdits en raison de dangers potentiels pour la sécurité des aéronefs, tels que des zones de conflit, des installations nucléaires ou des zones sensibles à la sécurité nationale. Ces zones sont généralement strictement contrôlées pour garantir la sécurité de l'aviation et des personnes au sol.

Les zones D, R et P sont des zones permanentes, que tout pilote peut consulter sur les cartes OACI disponibles sur le Geoportail. Il faut cependant également prêter attention aux ZRT et ZIT, respectivement Zones Réglementées Temporaires et Zones Interdites Temporaires. Ces

zones et leurs restrictions sont à retrouver sur le site Internet du SIA (Service de l'Information Aéronautique).

Pour exercer dans la catégorie spécifique, le télépilote devra justifier d'un CATS européen, qui remplace le CATT français depuis le 1<sup>er</sup> Janvier 2024. Cette formation est composée d'un volet théorique et d'un volet pratique. La pratique doit obligatoirement être réalisée avec un formateur dans un centre agréé. Pour la théorie, il n'est pas obligatoire de faire appel à un centre de formation théorique. L'examen est organisé et géré par la DGAC et consiste en un QCM de 30 questions pour un candidat déjà titulaire d'un examen théorique, et 40 questions s'il ne l'est pas. Il faudra atteindre 75% de bonnes réponses pour valider l'examen.

- Catégorie certifiée : risque élevé

La catégorie certifiée ne concernera jamais les télépilotes de loisir ou même professionnels dans le cadre d'activités telles que la photogrammétrie. Cette catégorie regroupera trois types d'opérations ;

- Type 1 : Vols internationaux de drones cargo, réalisés sous l'égide des règles de vol aux instruments (IFR ; Instrument Flight Rules), comme par exemple un Airbus A320 sans équipage à bord transportant de la marchandise de Paris à New York
- Type 2 : Vols de drones en environnement urbain ou rural suivant un plan de vol prédéfini. Cela inclurait les drones de livraison de colis par exemple.
- Type 3 : Similaire au type 2 mais réalisés avec un pilote à bord de l'appareil. Cela couvrirait les premières générations de taxis des airs, avant que ceux-ci ne soient remplacés par des appareils sans pilote.

Dans cette catégorie, les appareils devront toujours avoir une certification et le pilote ou télépilote devra également justifier d'une certification. La quasi-totalité des organismes de régulation aérienne devra être consultée pour ce type d'opérations. Cela constituera une quantité non négligeable de démarches administratives.

Dans le cadre de l'activité professionnelle de l'entreprise, nous serons amenés à travailler dans des milieux très variés. Les lignes haute tension pouvant parfois se situer dans l'emprise d'une agglomération au regard des cartes aéronautiques, ainsi que des zones P, R ou D (comme par exemple les emprises d'aérodromes) il nous faudra donc nous acquitter des prérequis en termes de formation et diplômes pour obtenir toutes les autorisations relatives au pilotage dans ces zones.

Dans ce cadre, j'ai donc personnellement pris part à une formation se soldant par une réussite à l'examen théorique et pratique, me rendant ainsi apte au télépilotage de drones de tous types également dans les zones faisant l'objet de restrictions citées plus haut.

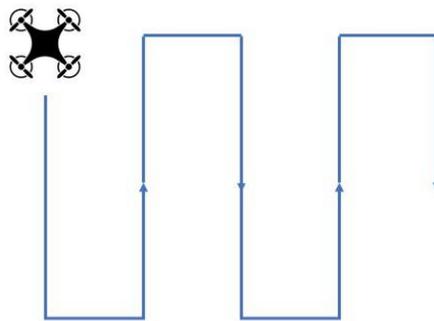
### II.1.3 Photogrammétrie appliquée à la topographie

La topographie s'est vue fortement impactée, entre autres par l'apparition des drones et les nouvelles technologies qui lui sont inhérentes. Parmi elles, la photogrammétrie est un domaine dans lequel le progrès a fait un bon fulgurant sur cette dernière décennie.

La photogrammétrie est un procédé consistant à assembler des photos prises selon des paramètres connus, dans le but de reconstituer un nuage de point 3D à partir de ces prises de vues. Dans le cadre de la topographie par relevé photogrammétrique aérien, les prises de vues sont effectuées suivant des techniques de trajectoires bien précises, dans le but d'optimiser la qualité des produits.

Le principe d'assemblage repose sur le respect d'un certain nombre de prérequis lors des vols ; le plus important étant le recouvrement entre les images. En effet, les images et les bandes doivent avoir des recouvrements horizontaux et verticaux.

Les trajectoires les plus fréquemment utilisées lors d'un relevé photogrammétrique sont des trajectoires en créneaux, créant ainsi plusieurs bandes de prises de vues (figure 8) :



*Figure 8 : Schéma de la trajectoire en créneaux d'un relevé photogrammétrique par drone*

Les photos obtenues en suivant ce type de schéma vont donc non seulement se recouvrir verticalement tout au long du tracé, mais aussi horizontalement. La trajectoire doit être pensée pour que chaque bande d'images se recouvrent entre elles, de manière à créer des liens entre celles-ci. La figure 8 nous permet de nous représenter plus facilement cette notion de recouvrement. Une grande partie de l'image doit être commune sur la première et la deuxième prise. En fonction du taux de recouvrement souhaité ainsi que de l'emprise de l'image au sol, nous pouvons déterminer le pas avec lequel nous devons prendre les photos pour une bonne captation. Cette illustration est valable aussi bien pour le recouvrement vertical, que le recouvrement horizontal.

Le recouvrement est exprimé sous forme de pourcentage. Un recouvrement vertical idéal pour de la photogrammétrie aérienne se situe aux alentours de 80%, et horizontal environ 75%. En déterminant l'emprise verticale et horizontale au sol de notre image, nous pouvons calculer la distance au sol à laquelle correspond notre recouvrement. En la soustrayant à l'emprise de l'image au sol, nous obtenons donc la distance  $b$  qui correspond à la distance à parcourir. Finalement, nous pouvons retenir la formule suivante :

$$b = (1 - \text{Recouvrement}) \times \text{Emprise Image}$$

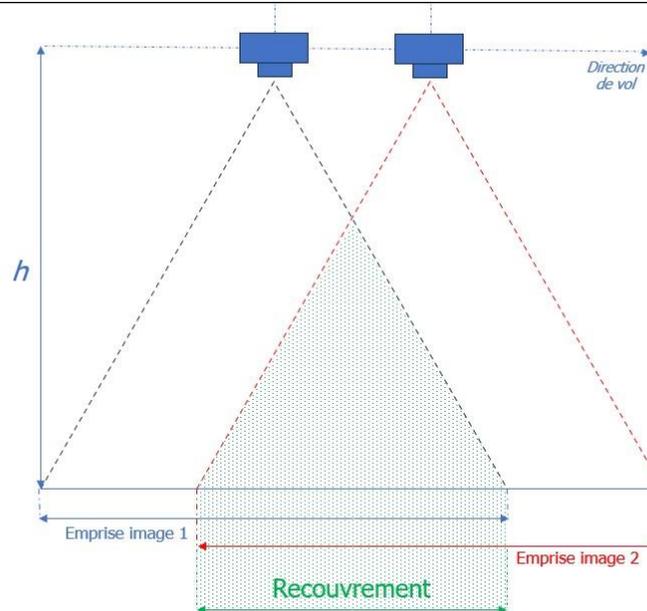


Figure 9 : Schéma descriptif du principe de recouvrement entre images (Source : personnelle)

Avec le **Recouvrement** exprimé en pourcentage décimal et l'emprise image en mètres.

Le paramètre qui nous est encore inconnu pour le moment est l'emprise image au sol. Pour la déterminer, nous devons connaître la taille d'un photosite de l'appareil photo utilisé pour les prises de vues. Cette valeur est généralement communiquée dans la documentation technique de ce dernier. Grâce à des formules de trigonométrie de base, nous pouvons déterminer la taille d'un pixel de l'image au sol (figure 10) :

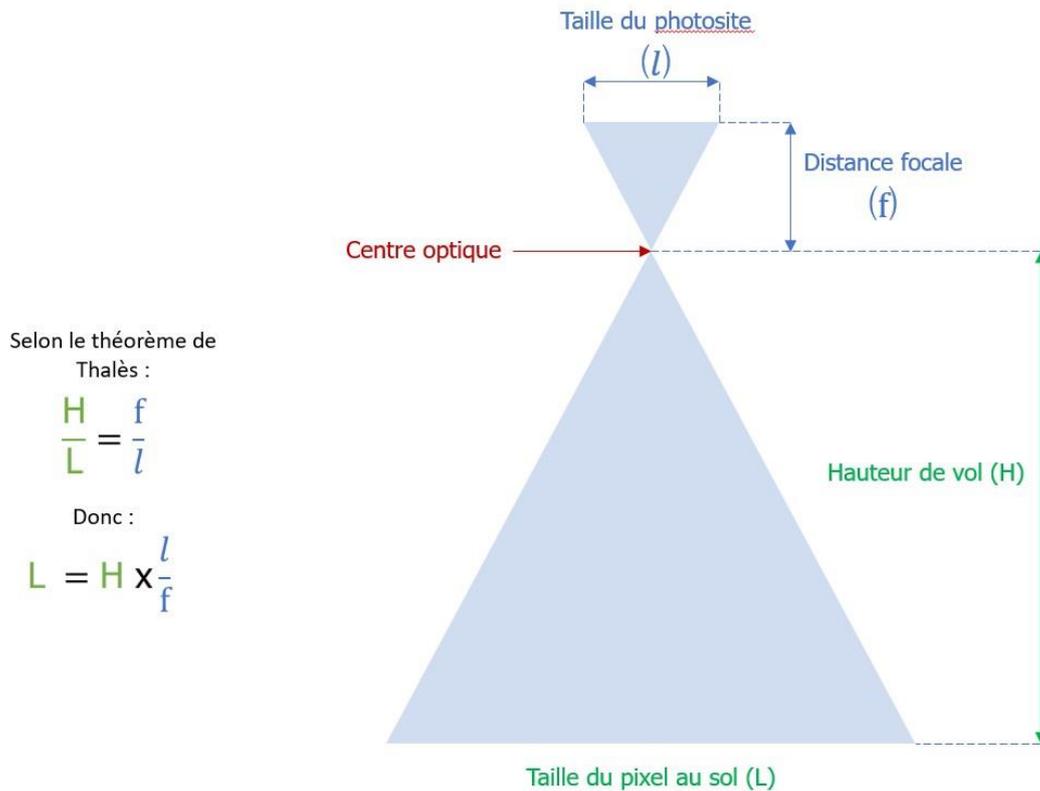


Figure 10 : Schéma représentant le lien entre la taille du photosite et la taille du pixel au sol

Nous multiplions ensuite la valeur obtenue par le nombre de photosites horizontaux et verticaux. Par exemple, pour un capteur photo haute définition 1920x1080 pixels, nous multiplions la taille du pixel au sol par 1920 pour obtenir l'emprise horizontale, et par 1080 pour obtenir l'emprise verticale au sol en mètres.

Nous disposons ainsi de toutes les informations pour préparer correctement notre mission de photogrammétrie.

Aujourd'hui, les drones bénéficient d'équipements complets et sont fournis avec des radiocommandes extrêmement sophistiquées. Les logiciels embarqués sur celles-ci permettent un travail toujours plus qualitatif et optimisé avec par exemple des fonctionnalités telles que la préparation de missions de photogrammétrie (voir figure 11).



Figure 11 : Application DJI Pilot : (Source : <https://www.abot.fr/>)

L'interface de la télécommande nous permet de naviguer sur un fond de plan satellite jusqu'au lieu de notre mission. Nous pouvons ensuite tracer un polygone représentant notre zone de vol et renseigner les paramètres que nous souhaitons pour les prises de vues, à savoir le recouvrement entre les photos et les bandes, la hauteur de vol, la vitesse

de vol, etc. Le logiciel se charge ensuite de calculer la trajectoire idéale et les points de prise de vue où une photo sera déclenchée. La caméra sera toujours orientée à 90° vers le sol automatiquement. Sur les modèles les plus récents cependant, DJI a ajouté l'option de capture dynamique, permettant à un drone de réaliser en vol, de manière entièrement automatisée, des prises de vues verticales et des photos à 45° lors d'un seul et même passage. Le drone réhausse seul la caméra à intervalle régulier pour prendre une photo.

Il suffit au télépilote de se rendre sur les lieux et de lancer le vol automatisé. L'appareil effectuera le vol de manière totalement autonome, en prenant toutes les photos nécessaires à la réalisation d'un bon traitement photogrammétrique conformément aux paramètres renseignés. La trajectoire optimale est automatiquement déterminée par le moteur de calcul du logiciel embarqué dans la radiocommande.

Le système de positionnement RTK que nous avons abordé un peu plus haut dans ce mémoire permet des prouesses techniques telles que le « terrain awareness ». Comprenez « appréhension du terrain ». Cette fonctionnalité permet au moteur de calcul de prévoir une trajectoire à hauteur constante au-dessus du sol, même si le vol est effectué en terrain difficile comme un flanc de montagne. La topographie approximative étant préalablement connue grâce aux fonds de plan satellite, le logiciel prévoit l'altitude à laquelle le drone doit voler pour compenser la dénivelée du terrain tout au long de son vol automatisé, maintenant ainsi une hauteur constante au-dessus du sol.

## II.1.4 La technologie Lidar

Les outils de capture et de traitement de données tridimensionnelles deviennent de plus en plus courants dans les métiers de la mesure. Les scanners 3D ont notamment permis des

améliorations notables dans des domaines tels que le diagnostic structurel d'ouvrages d'art ou de bâtiments, et même en topographie.

Ces dispositifs utilisent la technologie Lidar pour mesurer des points, à la manière d'un distancemètre laser, dans toutes les directions autour de l'appareil, à un rythme extrêmement élevé pouvant aller jusqu'à plus de 500 000 points par seconde.

Le principe du Lidar est simple ; l'appareil émet une impulsion laser qui est réfléchiée sur une surface et revient vers sa source d'émission. Le retour de l'impulsion est détecté par des capteurs dans l'appareil. Connaissant la valeur de la célérité de la lumière dans l'air, il suffit de mesurer le temps que l'impulsion a mis à revenir pour déterminer la distance entre le lidar et le point mesuré.

Ce processus est donc basé sur la simple formule de la vitesse ;

$$v = \frac{d}{t} \Leftrightarrow d = v \times t$$

Bien sûr, nous n'utilisons pas ici la vitesse à proprement dit mais la célérité de la lumière :

$$v = c \approx 3 \times 10^8$$

Le temps  $t$  à utiliser dans l'équation est la moitié du temps mesuré par l'appareil car celui-ci va mesurer le temps d'un aller-retour de l'impulsion laser vers le point mesuré. La distance calculée serait alors deux fois trop grande.

Le système lidar peut être embarqué sur des supports divers et variés ; de la voiture au sac à dos, en passant par le drone ou même le trépied fixe, ils permettent en quelques secondes la modélisation 3D d'une scène avec une très haute précision. Pour rendre la donnée exploitable dans le cadre d'une cartographie géoréférencée par exemple, il est nécessaire de connaître la position et l'orientation absolue des capteurs mis en jeu.

Ces systèmes sont donc équipés de solutions GNSS RTK pour le géoréférencement, mais aussi de centrales inertielles (figure 12). Cette dernière permet au système de mesurer l'orientation précise du capteur et ainsi déterminer les valeurs de roulis, tangage et lacet. Ces valeurs correspondent à des angles de rotation autour respectivement des axes X, Y et Z.

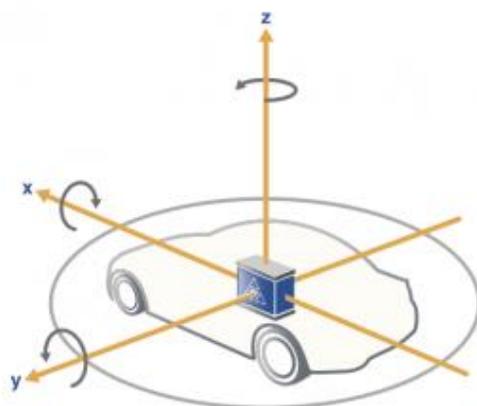


Figure 12 : Schéma d'une centrale inertielle (Source : <https://www.dewetron-services.com/>)

Les données de positionnement GNSS d'une part et les valeurs issues de la centrale inertielle d'autre part permettent l'orientation et le positionnement précis dans l'espace des nuages de points capturés. Les valeurs issues de la centrale inertielle permettent également pour les appareils les plus haut de gamme de procéder à un rattachement automatique de plusieurs nuages de points notamment lors du scan 3D d'un ouvrage en plusieurs fois. Si un bâtiment est composé de plusieurs pièces et que l'on souhaite créer un nuage de points unique regroupant plusieurs scans effectués dans différentes pièces et étages, les appareils modernes permettront de rattachement automatiquement les nuages de points scannés entre eux grâce entre autres aux valeurs mesurées sur la centrale inertielle, à condition que l'opérateur ne fasse pas de mouvements trop brusques lorsqu'il déplace le scanner. Ainsi l'export des données ne contiendra qu'un seul nuage du bâtiment entier, sans qu'il soit nécessaire de rattacher les nuages entre eux en post-traitement sur un PC. Des algorithmes de détection des zones communes permettent également de regrouper des nuages de points entre eux pour reconstituer une scène en plusieurs parties.

Les systèmes de scanner 3D LiDAR peuvent également tout à fait être placés sur des drones. Cela donne naissance à des outils redoutables dans la mesure de la topographie de très haute précision puisque couplés encore une fois à des systèmes de positionnement RTK et centrales inertielles, ces aéronefs sont capables de modéliser plusieurs dizaines d'hectares avec une précision centimétrique en un seul vol d'à peine une demi-heure.

Les données ainsi récoltées permettent la création de modèles numériques de surface (MNS) mais aussi de modèles numériques de terrain (MNT)

En effet, une autre propriété très intéressante du LiDAR est sa capacité à « traverser » plusieurs couches d'obstacles ; il sera par exemple capable de traverser la canopée même très

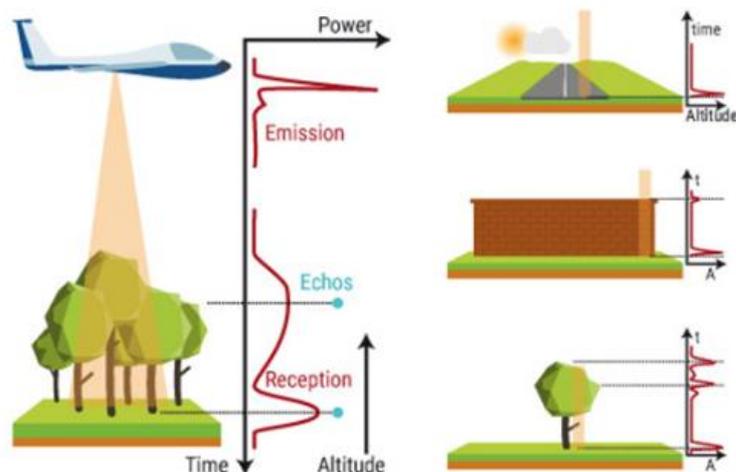


Figure 13 : Mesure lidar à travers la canopée (Source : <https://www.yellowscan.com/>)

épaisse d'une forêt pour aller mesurer précisément le terrain qui se trouve en dessous. Ainsi, il n'est pas nécessaire de réaliser des approximations mathématiques pour modéliser le terrain à partir du MNS.

Ceci est rendu possible par le fait qu'une partie seulement de l'énergie du laser émise est réfléchiée ou diffusée par les feuilles et les branches. Le reste de cette énergie traverse la canopée et atteint le sol. Les récepteurs du Lidar sont sensibles à l'intensité du signal renvoyé. Lorsque le laser atteint le sol, la réflexion est généralement plus intense que lorsque le laser frappe la canopée, en raison de la densité et de la composition différente des surfaces. Les algorithmes de traitement de données Lidar peuvent prendre en compte cette différence d'intensité pour distinguer une réflexion du signal provenant du sol d'une réflexion provenant de la canopée. En combinant ces facteurs, les scanners Lidar sont capables de mesurer précisément le terrain en dessous de la canopée d'une forêt.

La résolution spatiale de ce matériel le rendrait tout à fait excellent dans la création de modèles 3D de lignes haute tension. Ainsi, les pylônes et les câbles électriques seraient des objets tout à fait détectables par un scanner LiDAR avec une résolution inférieure à 10 centimètres entre chaque point. Cette solution reste donc envisagée pour la suite de notre étude sur les méthodes de diagnostic et géoréférencement des lignes haute tension en milieu isolé par drone. Pour retenir la solution adéquate, passons à l'étude de la mission proposée par ENEDIS, ses spécificités techniques et ses prérequis.

## II.2 Étude de la mission proposée par ENEDIS ; besoins techniques et réponses pratiques

### II.2.1 Étude de besoins

ENEDIS est une société faisant partie du groupe EDF, responsable et gestionnaire du réseau de distribution et de consommation électrique aux derniers kilomètres. Ils ne gèrent que les réseaux dont la tension est inférieure à 20 kV, qui comptent les lignes aériennes et souterraines « HTA » (Haute Tension A) de distribution, qui alimentent les différents postes électriques sur le territoire à la tension de 20 kV, et les réseaux « BT » (Basse Tension) dits réseaux de consommation. Leur tension est de 400 V pour les réseaux triphasés et 230 V pour les réseaux monophasés.

Parmi les nombreuses responsabilités du gestionnaire, nous nous intéresserons plus particulièrement au diagnostic des lignes HTA aériennes, dans le cadre d'opérations de maintenance périodique ou de diagnostic après sinistre.

Comme nous l'avons abordé dans la partie I.1 de ce mémoire, le diagnostic des lignes se fait principalement par prises de photos et observations depuis le sol par des techniciens ENEDIS ou par prises de vues aériennes par hélicoptère. Cette dernière solution est la plus complète en matière de prises de vues. Elle permet l'observation de la ligne sous des angles bien plus intéressants que depuis le sol. C'est également le seul moyen de diagnostic pour des lignes situées en milieu difficile, impraticable à pied. Les coûts de mise en œuvre de ce type d'opération sont bien évidemment faramineux ; de l'ordre de 800 à plus de 2000 euros l'heure de vol en fonction du modèle d'aéronef utilisé.

Dans le cadre du marché proposé par ENEDIS, la mission principale consiste à effectuer des diagnostics d'état des lignes électriques à haute tension en milieu isolé, sans pour l'instant proposer de prestation de géoréférencement. Ce diagnostic se baserait donc sur une auscultation par drone télépiloté, avec prises de vues et compte-rendu d'état au gestionnaire du réseau.

Les interventions se feraient sur demande du gestionnaire, dans le cas d'un accident survenu sur une ligne nécessitant une intervention et un diagnostic rapide, dans le cadre d'un contrôle périodique ou encore préalablement à des travaux de réfection ou d'enfouissement par exemple.

Le choix de drone pour cette mission devrait donc se diriger principalement vers un appareil équipé d'une très bonne caméra, permettant la prise d'images de très haute résolution. Un avantage supplémentaire serait la capacité de zoom de cet appareil, qui permettrait de capturer de plus amples détails tels que les isolateurs ou de la visserie sans avoir à s'approcher de la ligne électrique. Dans une démarche de sécurité pour le matériel et pour les tiers au sol, un maintien à une distance de 5 mètres minimum des conducteurs est nécessaire.

D'autre part, il serait très intéressant pour nous de proposer une prestation de géoréférencement de ces lignes à haute tension en milieu isolé. En effet, la plupart de ces lignes ne sont cartographiées qu'approximativement, avec une précision sommaire. Bien que suffisante dans la plupart des cas, une cartographie précise centimétrique s'inscrirait de manière efficace dans les différentes démarches de création de SIG inhérentes aux grandes entreprises telles qu'ENEDIS.

Le développement de l'utilisation du drone pour le diagnostic et l'auscultation pourrait aller de pair avec le développement d'une méthode de géoréférencement aéroportée, qui

viendrait compléter les compétences de l'entreprise et permettrait de proposer ce service dans des marchés tels que celui offert par ENEDIS. Les drones offrent d'excellentes possibilités quant au géoréférencement et à la cartographie. Des solutions telles que le LiDAR ou la photogrammétrie seraient tout à fait envisageables dans le cadre de telles prestations.

La mission actuelle nécessitant un aéronef doté d'une excellente capacité photo et vidéo, il serait intéressant de se pencher vers la solution de la photogrammétrie. Cela permettrait dans un premier temps de lancer l'activité et développer la solution sans engendrer trop de risques financiers, puisque nous pourrions alors éventuellement faire usage d'un seul et même appareil pour les deux tâches.

Comme abordé précédemment, la bonne tenue d'une mission de photogrammétrie aérienne repose également sur la réalisation de bonnes captations photos. La trajectoire, le recouvrement entre les images ou encore la netteté des images induite par la vitesse de vol sont des paramètres à maîtriser absolument si nous souhaitons produire une donnée de qualité, fiable et utilisable dans un cadre professionnel.

Dans une démarche de production de masse, le process de création se doit d'être fiable et reproductible. La création de plans topographiques de lignes haute tension en milieu isolé par photogrammétrie doit donc entrer dans cette démarche et s'intégrer dans un protocole de production fiable et opposable aux autres techniques de mesure traditionnelles.

## II.2.2 Offre disponible sur le marché

Ce marché est donc aujourd'hui destiné à proposer une prestation de diagnostic dans un premier temps. Un drone équipé d'une très bonne nacelle caméra est donc impératif dans ce cadre. Par ailleurs, il serait judicieux de développer la solution de géoréférencement des lignes avec cette solution aéroportée. Le leader du marché dans ce domaine est le fabricant chinois de drones DJI. Pour des raisons de contraintes temporelles, nous concentrerons notre étude de marché sur ce fabricant et ce qu'il peut proposer dans sa gamme (voir tableaux 1 et 2).

Modèle	<p>Matrice 300 RTK</p> 	<p>Mavic Air 3</p> 	<p>Mavic 3 Pro</p> 
Poids	6,3 kg avec 2 batteries, 9 kg avec charge maximale	720 g	958 g
Classe	C2	C1	C2
Autonomie	55 min	46 min	45 min
Nacelle	Drone « plateforme » équipé de 3 emplacements de nacelle amovible	Nacelle caméra fixe (8064 x 6048 px)	Caméra Hasselblad : capteur CMOS 4/3 20 MP format équivalent 24 mm, Télécaméra moyenne : CMOS 1/1,3 pouce 48 MP format équivalent 70 mm (zoom x3) Télécaméra : CMOS 1/2 pouce 12 MP format équivalent 166 mm (zoom x7)
Caractéristiques opérationnelles	Température : -20 à 50°C Résistance aux intempéries : IP45	Température : -10 à 40°C Résistance aux intempéries : N/A	Température : -10 à 40°C Résistance aux intempéries : N/A
Fonctionnalités et sécurité	Nacelles amovibles, possibilité d'intégrer un LiDar, nacelle caméra, ... Corrections GNSS en temps réel RTK, détection d'obstacles omnidirectionnelle,	Fonctionnalités audiovisuelles telles que les vols par waypoints, détection omnidirectionnelle des obstacles. Retour automatique au point de départ par guidage GPS en cas de perte de signal	Fonctionnalités audiovisuelles telles que les vols par waypoints, détection omnidirectionnelle des obstacles. Retour automatique au point de départ par guidage GPS en cas de perte de signal
Prix	Drone : entre 8000 et 9000€ Nacelles : -LiDar 11000 à 12000€ -Caméra : 3000-4000€ Soit un investissement total de près de 25000€. Une batterie supplémentaire coûte 600€ (Les prix sont donnés TTC)	1239€ TTC pour le drone en pack "Fly More" comprenant des filtres ND, 3 batteries ainsi qu'une sacoche de transport et un chargeur triple. Une batterie supplémentaire coûte 149€	2799€ TTC pour le drone en pack "Fly More" comprenant des filtres ND, 3 batteries ainsi qu'une sacoche de transport. Une batterie supplémentaire coûte 199€

Tableau 1 : Comparatif Matrice 300 RTK, Mavic Air 3 et Mavic 3 Pro

Modèle	Mavic 3 Enterprise	Mini 3 Pro	Mini 4 pro
			
Poids	915 g	<249 g	<249 g
Classe	C2	C0	C0
Autonomie	45 min	34 minutes (avec la Batterie de Vol Intelligente) 47 minutes (avec la Batterie de Vol Intelligente Plus)	34 minutes (avec la Batterie de Vol Intelligente) 45 minutes (avec la Batterie de Vol Intelligente Plus)
Nacelle	Nacelle caméra fixe grand angle de 20 MP avec un capteur CMOS 4/3 équivalent 24 mm et d'une caméra à zoom hybride 56x	Capteur CMOS 1/1,3 pouces 48 MP format équivalent 24 mm	Capteur CMOS 1/1,3 pouces 48 MP format équivalent 24 mm
Caractéristiques opérationnelles	Température : -10 à 40°C Résistance aux intempéries : N/A	Température : -10 à 40°C Résistance aux intempéries : N/A	Température : -10 à 40°C Résistance aux intempéries : N/A
Fonctionnalités et sécurité	Fonctionnalités professionnelles de la mesure de précision, topographie et photogrammétrie aérienne. Vols automatisés, préparation de mission et génération de trajectoire de vol optimisée, suivi de terrain pour missions en milieux très accidentés comme en montagne.	Fonctionnalités audiovisuelles telles que les vols par waypoints, détection omnidirectionnelle des obstacles. Retour automatique au point de départ par guidage GPS en cas de perte de signal. Possibilité de contrôler le drone avec des applications de pilotage automatique tierces depuis un smartphone, telles que Pix4D Capture, permettant les vols automatisés de photogrammétrie et la programmation de mission.	Fonctionnalités audiovisuelles telles que les vols par waypoints, détection omnidirectionnelle des obstacles. Retour automatique au point de départ par guidage GPS en cas de perte de signal
Prix	4840€ TTC pour le drone en pack "Fly More" comprenant 3 batteries, une mallette de transport rigide, un chargeur triple ainsi que le module RTK. Une batterie supplémentaire coûte 199€	818€ TTC pour le drone en pack "Fly More" comprenant 3 batteries, une sacoche de transport et un chargeur triple. Une batterie supplémentaire coûte 69€	1129€ TTC pour le drone en pack "Fly More" comprenant 3 batteries, une sacoche de transport et un chargeur triple. Une batterie supplémentaire coûte 69€

Tableau 2 : Comparatif Mavic 3 Enterprise, Mini 3 Pro et Mini 4 Pro

## II.2.3 Choix de la réponse matérielle et logicielle

- Matériel

La mission principale pour laquelle l'entreprise investit sur le drone pour le moment est l'auscultation et le diagnostic de lignes haute tension en milieux isolés. Pour des raisons budgétaires, la gamme Matrice 300 a été écartée, bien que le Lidar semble être une excellente solution de géoréférencement. Le tarif pour ce type de matériel reste cependant bien trop élevé tant que l'entreprise n'est pas correctement placée sur des marchés utilisant le drone.

La cartographie et le géoréférencement des lignes restent cependant une prestation que RL Etudes souhaiterait mettre en avant auprès d'ENEDIS. Pour cela, les techniques de relevés classiques peuvent montrer certains signes de faiblesse, notamment en milieux topographiques difficiles. C'est pourquoi la photogrammétrie fait partie intégrante du présent projet.

Les solutions techniques les plus adaptées à la photogrammétrie sont les modèles de la gamme Mavic 3 Enterprise. Ils répondent également parfaitement à la demande émise quant à l'auscultation et le diagnostic visuel des lignes, avec des capteurs photos de très bonne qualité. La connectivité RTK permettrait également de s'affranchir de points de contrôle au sol, ce qui représente un gain non négligeable de productivité, tout en maintenant une parfaite exactitude dans les données produites.

Malheureusement, leur coût reste très élevé par rapport à d'autres modèles. La photogrammétrie n'étant actuellement qu'au stade du développement et de la prospection commerciale pour l'entreprise, il ne s'agit pas pour le moment d'une priorité dans l'investissement. La caractéristique principale qui sera retenue au jour d'aujourd'hui pour un drone est la qualité des images qu'il sera capable de capturer. C'est pour cette raison que la gamme Mavic 3 Enterprise ne sera pas non plus retenue.

La gamme Mini avec le modèle 3 Pro et 4 Pro ne sera pas non plus retenue du fait que son capteur photo, bien que d'une très bonne qualité, ne permet pas de capturer des détails sur les lignes en maintenant une distance suffisante avec celles-ci puisqu'il ne sera pas capable de zoomer sans engendrer de grosses pertes de qualité.

La solution retenue pour la mission actuelle est le DJI Mavic 3 Pro. En effet, sa nacelle triple capteur photo est parfaitement adaptée à la prise de clichés très haute résolution même pour des petits éléments tels que les isolateurs des lignes grâce aux trois niveaux de zoom optique, sans perte de qualité et tout en maintenant une distance convenable avec les conducteurs.

De plus, il sera toujours possible de développer le segment de la photogrammétrie avec ce matériel. Bien que la tâche ne soit pas des plus aisées sur des surfaces très étendues, nous pouvons toujours réaliser des vols manuels pour procéder aux prises de vues. Il sera également possible de réaliser des vols automatisés par un moyen détourné de l'utilisation des fonctionnalités embarquées par le drone, par le biais d'un service en ligne que nous aborderons dans la prochaine partie de ce mémoire.

- Logiciel

L'offre de logiciels disponibles sur le marché pour des traitements photogrammétriques est diverse et variée.

Des logiciels open source modifiables tel que MicMac ou VisualSFM sont disponibles, avec leur lot d'avantages et d'inconvénients. Certes gratuits, ces logiciels sont parfois difficiles à utiliser notamment dans une utilisation de production dans le cadre d'une activité professionnelle. De plus, les outils naturellement inclus dans ces logiciels sont souvent assez rudimentaires, car leur statut open source les destine naturellement à être modifiés par des utilisateurs ayant une maîtrise très poussée des outils de programmation informatique, qui créeront finalement des outils personnalisés spécifiques à leur utilisation.

Une multitude de logiciels propriétaires est également proposée, avec de grands noms dans le domaine comme Metashape, développé par la société Agisoft, Pix4D Mapper ou Pix4D Matic, ou encore RealityCapture, développé par la société Epic Games également à l'origine d'outils de développement graphiques tels que Unreal Engine.

Ayant déjà pu travailler sur Metashape dans le cadre scolaire, c'est vers cette solution que nous nous tournerons pour traiter les images capturées. La formation à l'ESGT m'ayant permis d'appréhender ce logiciel, me permettant ainsi d'être opérationnel, contrairement aux autres solutions pour lesquelles nous avons une absence totale de connaissances. De plus, les outils proposés par le logiciel sont tout à fait adaptés à l'exercice d'un processus de production photogrammétrique. En effet, ses fonctionnalités internes permettent par exemple la création de chaînes de traitement, qui lancent les étapes de traitement automatiquement les unes après les autres. Il est également possible de créer des nœuds de calcul permettant d'utiliser la puissance de plusieurs ordinateurs connectés à un même réseau local pour accélérer les traitements.

Bien qu'étant une solution propriétaire, Metashape intègre également des fonctionnalités de développement très poussées, grâce à l'implémentation Python directement

disponible dans le logiciel. Cela permet à l'utilisateur de lancer des scripts personnalisés pour réaliser tout type de tâche, comme des scripts de détection d'objets et de segmentation dans les orthophotographies créées lors des traitements.

De plus, chaque étape de traitement peut faire l'objet d'ajustements puisqu'il revient à l'utilisateur de les paramétrer et de les lancer. Elles seront détaillées par ailleurs dans la prochaine partie de ce mémoire. Metashape est donc plus complet que ses concurrents sur ce plan, en quelque sorte à mi-chemin entre la solution propriétaire et la solution open source.

Les traitements seront donc réalisés sur le logiciel Metashape Pro version 2.1.1. Pour mettre en place le process et permettre d'étudier la faisabilité du projet, nous utiliserons dans un premier temps la version d'essai de 30 jours. Si les essais venaient à aboutir, une licence complète serait un investissement tout à fait envisageable pour l'entreprise.

## III. Mise en application

### III.1 Premiers vols

#### III.1.1 Réalisation d'un plan de vol

Il est important de définir clairement l'objectif de notre vol afin d'adopter les bonnes pratiques vis-à-vis de la réglementation et de la sécurité. Les principes de base à appliquer lors d'un vol sont : respecter les hauteurs maximales de vol, respecter les restrictions, ne pas survoler de tiers, respecter la priorité aux aéronefs habités et respecter la vie privée des tiers. Pour ce faire, nous avons un certain nombre d'outils à notre disposition permettant de rechercher les informations aéronautiques dont nous avons besoin, comme le Géoportail, le site du SIA (Service de L'Information Aéronautique) ou celui de la DIRCAM (Direction de la Circulation Aérienne Militaire). Les différentes démarches administratives seront à réaliser sur la plateforme AlphaTango. Par ailleurs, des outils de développeurs indépendants sont également disponibles pour nous aider notamment à ne pas omettre les restrictions provisoires mise en place par NOTAM (Notice to Air Men), comme DroneKeeper.

Après cette phase préliminaire, il est recommandé de rédiger un **document de préparation de mission**. Celui-ci récapitulera les objectifs de la mission, le repérage de la zone d'opération, les démarches administratives à prévoir, ainsi qu'une carte d'implantation et de sécurisation de la zone, ainsi que le récapitulatif des documents de contrôle accompagnés d'un briefing et des annonces météo.

Le repérage de la zone d'opération pourra être matérialisé par un extrait de carte OACI mais aussi par une capture d'écran d'un site d'assistance à la préparation de mission récapitulant toutes les restrictions en vigueur dans la zone.

L'implantation et la sécurisation de la zone seront matérialisés visuellement avec des outils très simples comme Google Earth, permettant de créer une carte claire et succincte des informations de sécurité et du plan de vol.

Le drone en notre possession n'étant pas équipé des fonctions de planification de vol, nous allons devoir recourir au vol manuel, ou à l'utilisation de « [waypointmap.com](https://www.waypointmap.com) » (figure 14). Cet outil en ligne, développé par des étudiants américains, va reprendre les fonctionnalités disponibles sur les drones pour permettre de réaliser des vols automatisés.

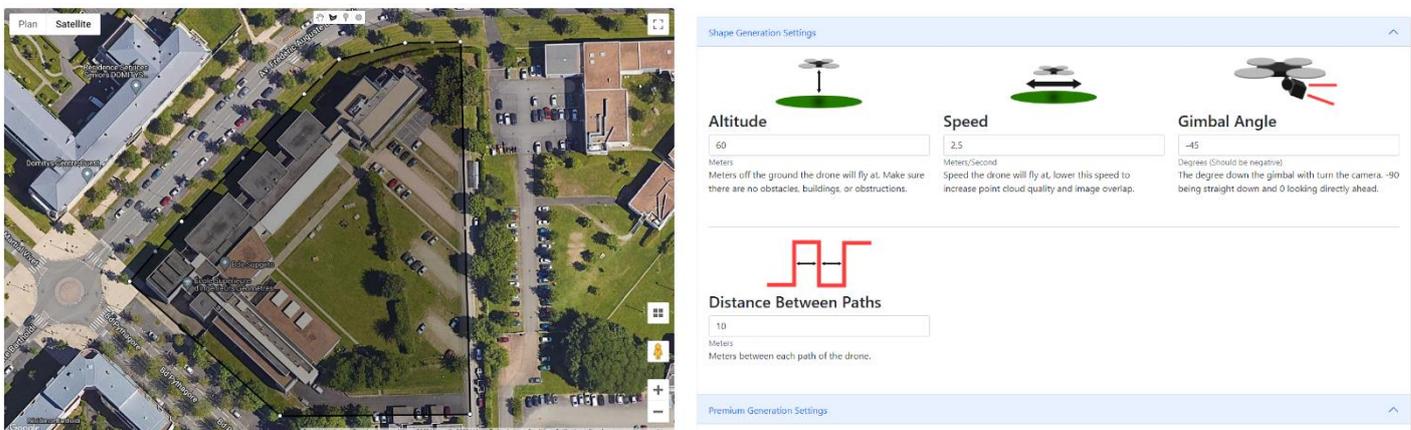


Figure 14 : Carte interactive et paramètres de vol du site [waypointmap.com](https://www.waypointmap.com) (Source : <https://www.waypointmap.com>)

Il se présente sous la forme d'une carte interactive sur fond d'images satellite Google Maps, sur lesquelles l'utilisateur doit désigner la zone qu'il souhaite cartographier par un polygone. Une fois la zone matérialisée, l'utilisateur renseigne les paramètres de vol qu'il souhaite suivre à savoir la hauteur de vol, la vitesse, l'angle d'inclinaison de la caméra et la distance souhaitée entre les bandes.

Une fois renseignés, ces paramètres permettront de générer une carte de trajectoire formée par des points de passages comme le montre la figure 15 :

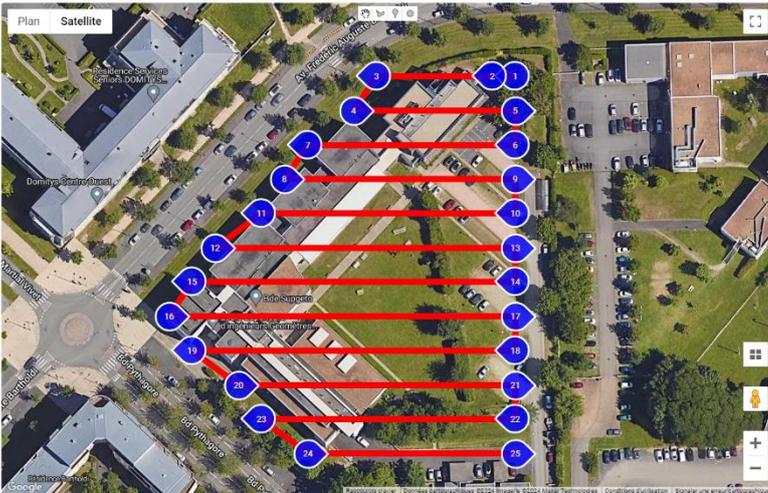


Figure 15 : Waypoints générés par l'outil en ligne (Source : <https://www.waypointmap.com>)

L'outil a généré des points de passage pour créer une trajectoire respectant les paramètres choisis par l'utilisateur.

De là, le site nous permet de générer un fichier « KMZ », qui contient les coordonnées GPS des points de passage, et qui correspond au format du fichier utilisé par les télécommandes DJI pour créer des « Waypoints » nativement.

Cette fonctionnalité est principalement utilisée pour des

applications audiovisuelles sur les drones de la gamme pour permettre par exemple au réalisateur de refaire plusieurs fois une trajectoire parfaitement identique, et ainsi filmer plusieurs fois une scène rigoureusement semblable.

Dans les télécommandes DJI, lorsque nous créons des missions de waypoints, des fichiers sont enregistrés dans la mémoire. Ces fichiers contiennent notamment les points de passages et les paramètres de vol au format « .kmz ». Il suffit donc de créer une mission fictive sur la télécommande, et de remplacer le fichier « .kmz » fictif par celui généré sur le site. Les points de passages seront alors les points adaptés à de la cartographie respectant les paramètres choisis. La trajectoire suivie par le drone ne sera pas celle imaginée pour un traitement photogrammétrique puisque le logiciel interne de la télécommande va tenter de lisser la trajectoire au maximum. Elle ne suivra pas exactement de bandes comme la théorie le préconise.

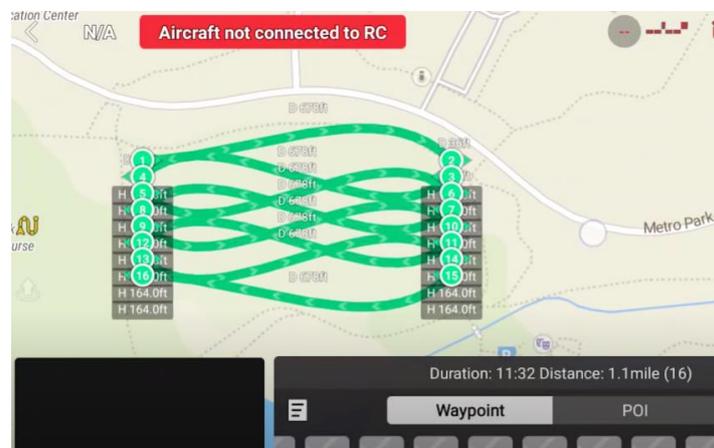


Figure 16 : Trajectoire lissée sur la télécommande DJI (Source : <https://www.waypointmap.com>)

Cependant, après plusieurs essais, ce type de trajectoire s'est avéré tout à fait adapté à une mission photogrammétrique. Le recouvrement horizontal et vertical sont respectés et le logiciel de traitement parvient parfaitement à recalibrer les photos entre elles.

### III.1.2 Process de traitement photogrammétrique

Après un recoupage d'informations contenues dans la documentation technique de Metashape ainsi que des retours d'expérience utilisateur via de nombreux forums, nous avons mis en place un process de traitement photogrammétrique qui nous semble le plus optimisé pour obtenir des résultats précis et fiables.

- Étape 1 : Importer puis aligner les photos
- Étape 2 : Dans le menu Modèle > Sélection graduelle ;

- Dans un premier temps, nous utilisons l'incertitude de reconstruction ;

L'incertitude de reconstruction est utilisée pour mesurer la précision avec laquelle un point 3D a été calculé à partir des images. La géométrie de la configuration des caméras et la précision des correspondances de points entre les images sont pris en considération. Un point dont la reconstruction est très incertaine est moins fiable, car il a été reconstruit avec une marge d'erreur plus importante. Ce critère permet de sélectionner les points dont les positions en 3D sont les plus problématiques.

La mesure de l'incertitude de reconstruction est exprimée par un nombre positif qui exprime l'incertitude relative.

Des valeurs faibles indiquent une reconstruction précise. Les valeurs peuvent varier largement selon la complexité de la scène et la configuration des caméras :

- **0 à 10** : très faible incertitude, reconstruction fiable
- **10 à 50** : acceptable
- **Plus de 50** : grande incertitude, points peu fiables

Nous chercherons idéalement à abaisser le curseur jusqu'à une valeur de 20 environ, sous réserve que cela ne sélectionne pas trop de points, puis nous supprimons les points ainsi sélectionnés puis réalisons une optimisation des caméras.

- Utiliser l'erreur de reprojection : l'erreur de reprojection mesure la différence entre les positions des points 2D observés dans les images et les positions projetées des points 3D reconstruits. En d'autres termes, elle indique à quel point le point 3D reconstruit correspond aux

positions observées dans les images. Une grande erreur de reprojection peut signaler des incohérences dans la correspondance des points ou des erreurs dans les positions des caméras, et elle peut être employée afin de supprimer les points 3D qui ne s'alignent pas correctement avec les images initiales. Elle est exprimée en pixels et sa valeur varie de 0 à plus de 2 :

- **0 à 1 pixel** : très bonne correspondance
- **1 à 2 pixels** : acceptable
- **Plus de 2 pixels** : correspondances moins précises et erreurs dans la reconstruction.

Nous fixerons donc le seuil de cette erreur à 0,5 lors de nos traitements. Les points ayant une erreur supérieure à 0,5 seront sélectionnés dans le nuage et nous pourrons ainsi les supprimer. Nous effectuerons ensuite un nouvel alignement des caméras.

- Utiliser la précision de reprojection : il s'agit d'une mesure de la qualité de l'ajustement des projections des points 3D sur les images. Selon leur position supposée, elle évalue la répartition des projections des points 3D sur les images. Les points projetés sont dispersés de manière incohérente lorsque la précision de projection est faible, ce qui peut être dû à des erreurs de correspondance ou à des imprécisions dans la modélisation des caméras.

La précision de reprojection peut également être considérée comme une mesure non dimensionnelle qui évalue la qualité de l'adaptation des points projetés :

- **0 à 1** : très bonne précision
- **1 à 5** : acceptable
- **Plus de 5** : faible précision

Nous sélectionnerons cependant environ 10% des points restants à ce stade de la modélisation. En effet, nous avons déjà utilisé deux critères précédemment pour filtrer les points de liaison. Si nous abaissons le seuil de précision de la reprojection en dessous de 1, nous risquons de sélectionner beaucoup de points et donc en supprimer de trop, ce qui conduira à un échec de la modélisation par manque de points de liaison. En sélectionnant environ 10% des points restants, nous observerons en règle générale que le curseur se situe entre 1 et 5 de valeur numérique. Cela correspond donc à un seuil amplement acceptable pour une bonne modélisation.

- Étape 3 : Géoréférencer les points de liaison en pointant les points de contrôle au sol. Dans l'onglet « Référence » de Metashape, importer les coordonnées des points de contrôle au sol sous forme de fichier texte. Une fois importés, faire un clic droit sur l'un des points puis « Filtrer les photos par repère ». Placer correctement le repère dans

toutes les photos dans lesquelles il apparaît. Une fois le pointage terminé, cliquer sur les flèches bleues  pour actualiser la transformation. Veiller à ce que la précision des points de contrôle soit en adéquation avec les prérequis de notre mission.

- Étape 4 : Construire le nuage dense en veillant à cocher l’option du calcul de la confiance des points.
- Étape 5 : Filtrer le nuage dense à l’aide de « Outil > Filtrer par confiance » ; trouver la valeur de confiance qui sélectionne les points les plus aberrants (généralement entre 2 et 5) et supprimer ces points.
- Étape 6 : Créer le maillage (Arbitraire 3D).
- Étape 7 : Créer le MNE et l’orthomosaïque. Nous pourrions également créer un modèle tuilé et une texture si nos traitements le requièrent à ce moment-là.

Nous étudierons les résultats obtenus avec ce process dans la prochaine partie de ce mémoire.

## III.2 Cas concret : ligne haute tension en milieu montagneux sur la commune de Bourbach-le-Haut (68)

### III.2.1 Préparation de mission



Figure 17 : Carte matérialisant la zone de vol autour d’une ligne électrique à Bourbach-le-Haut (68)

Une première appréciation du terrain sur Google Earth nous permet de mettre en place les premières mesures nécessaires au bon déroulé de notre vol. Nous serons en terrain très

escarpé avec une pente de près de 28% sur la zone test. Cela implique pour le télépilote de s'assurer qu'il pourra toujours garder le drone en vue lors de la mission, en choisissant de diviser le vol en plusieurs sous-zones si besoin.

Pour la partie photogrammétrie de la mission, l'absence de programmes de planification et de vol automatique sur le Mavic 3 Pro va nous contraindre à un vol manuel le long de cette ligne. En effet, à la date des essais, l'outil en ligne « waypointmap » ne permettait pas de s'adapter à la dénivelée de la zone de vol choisie, chose qu'il peut faire aujourd'hui moyennant un abonnement payant sur le site. Si nous générons une carte de waypoints à partir de cet outil, nous allons spécifier une unique hauteur de vol, et le drone se maintiendra à cette hauteur au-dessus du point de départ sans prendre en compte la très forte dénivelée du terrain. Nous risquons de nous écraser dans la montée ou bien d'obtenir de mauvais résultats lors des traitements du fait de la hauteur de plus en plus grande par rapport au sol si nous partons du haut de la pente.

Le vol manuel avec suivi approximatif de pente semble donc être le plus adapté dans cette situation. Nous maintiendrons une vitesse de déplacement constante en suivant la ligne de manière rectiligne avec la fonction de régulateur de vitesse embarquée par le drone. Nous tâcherons de maintenir une hauteur de vol visuellement constante en nous aidant également de l'emprise de l'image sur le retour vidéo de la télécommande.

Pour déterminer les paramètres de vol les plus adaptés pour les prochaines missions, il serait bon de réaliser la captation et les traitements du tronçon à plusieurs hauteurs de vol. Dans le cadre de notre mission, nous ne disposons que d'un temps relativement limité sur place. Nous réaliserons donc deux captations : l'une à une hauteur de 30 mètres et la deuxième à une hauteur de 100 mètres. Nous prendrons bien entendu toutes les dispositions réglementaires pour être autorisés à voler à cette hauteur.

Les paramètres de vol calculés sont donnés dans le tableau 3 :

Hauteur de vol	Recouvrement vertical souhaité	Vitesse de vol
30 m	80 %	3,3 m/s
50 m	80 %	5,5 m/s
100 m	80 %	13,8 m/s

Tableau 3 : Calcul des paramètres de vol pour la mission test

Nous ne réaliserons qu'une seule bande de passage au-dessus de la ligne. Nous n'avons donc pas besoin de la valeur d'écart entre chaque bande.

Le document de préparation de vol rédigé pour cette mission a été joint en annexe 1 de ce mémoire.

### III.2.2 Compte-rendu de vol : présentation et analyse des résultats

Les conditions météorologiques le jour de la mission étaient favorables à une bonne captation photogrammétrique. En effet, une météo nuageuse permet d'éviter la présence d'ombres sur les photos et ainsi augmenter la qualité générale de la captation. La météo de montagne pouvant cependant s'avérer capricieuse, nous sommes restés vigilants à l'éventuel risque de pluie tout au long des vols.

La trajectoire que nous avons choisi d'adopter ici est une trajectoire rectiligne, suivant la portion test de la ligne. Nous tâcherons de maintenir une hauteur au-dessus du sol la plus constante possible manuellement. Comme abordé au paragraphe précédent, nous volerons à 30, 50 puis 100 mètres au-dessus de la ligne. Chaque vol a été réalisé d'une part avec des visées nadirales ( $90^\circ$ ) et d'autre part avec une inclinaison de  $45^\circ$ . Les résultats avec la nacelle inclinée à  $45^\circ$  n'étant pas concluants, nous ne montrerons ici que le vol réalisé à 100 mètres de haut avec cette inclinaison à titre d'exemple.

Pour géoréférencer notre nuage de points, nous utiliserons des points de contrôle au sol, matérialisés par des cibles obtenues sur le logiciel Metashape. Ces cibles seront placées tout le long de la pente, de part et d'autre de la ligne et relevées au GNSS. La précision des coordonnées mesurées est de l'ordre de 5 centimètres en planimétrie et en altimétrie, ce qui est amplement suffisant pour la cartographie de lignes.

Nous relèverons également les portants bois de la ligne avec la méthode GNSS traditionnelle. Ce relevé nous permettra de comparer les résultats de la photogrammétrie avec les méthodes traditionnelles.

Visuellement, les nuages sont similaires (voir figure 18). Nous noterons cependant que les portants ressortent beaucoup plus clairement avec une hauteur de vol plus élevée. Sur les deux relevés à 100 mètres, les pylônes sont clairement visibles tandis que sur les nuages à 30 et 50 mètres, ils sont peu ou pas visibles. Seule une trace au niveau du sol permet de les repérer.

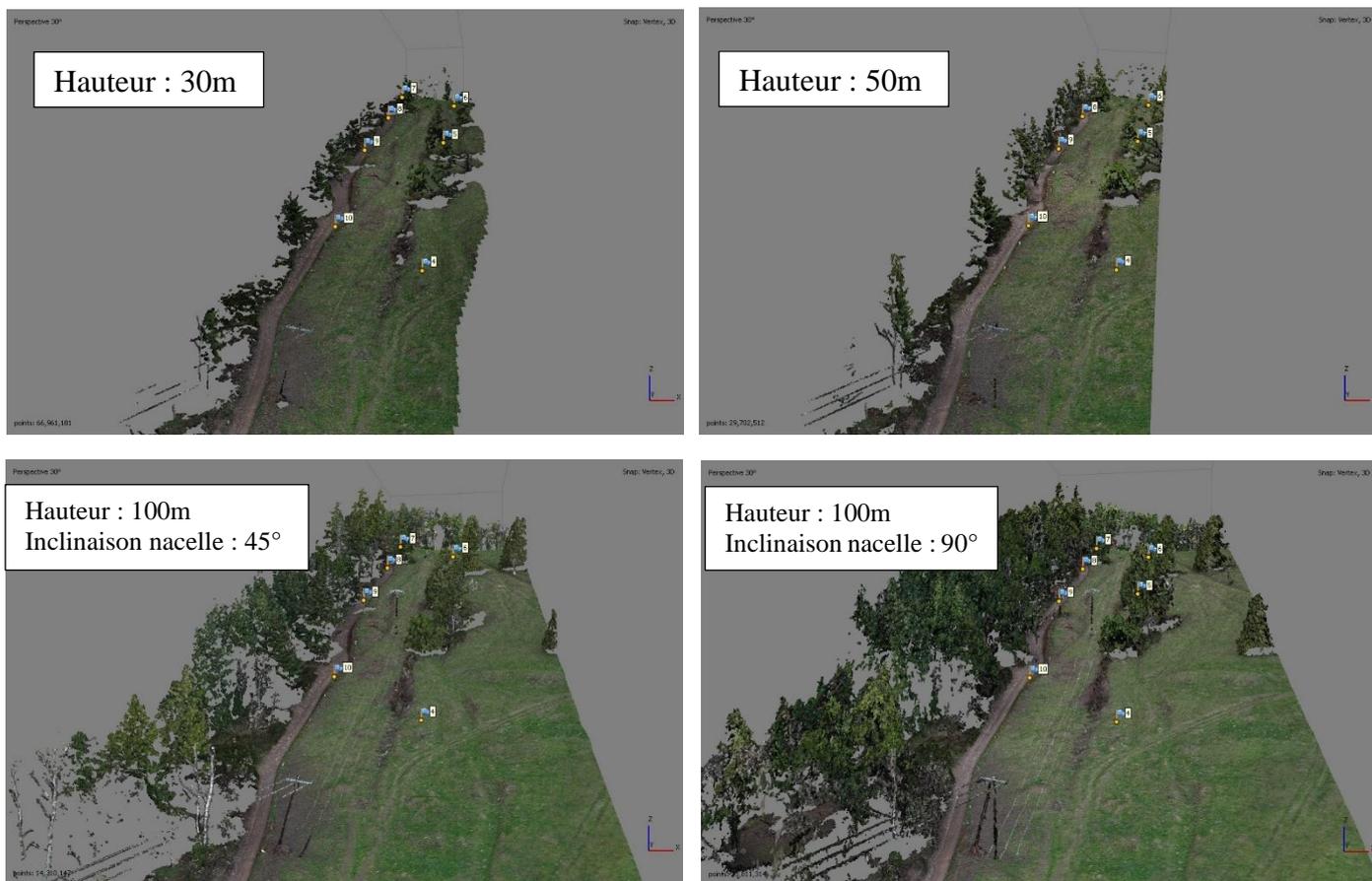


Figure 18 : Comparatif des nuages denses obtenus à différentes hauteurs de vol

Les points de contrôle au sol sont placés de la manière suivante sur la zone de test :



Figure 19 : Placement des points de contrôle au sol

Nous utiliserons les points 1, 2, 3, 6 et 7 comme points de contrôle

Les erreurs obtenues après traitement sur les différentes hauteurs de vol sont :

Hauteur de vol	30 m	50 m	100 m / 45°	100 m / 90°
Erreur sur les points de contrôle	0,052 m	0,067 m	0,083 m	0,063 m
Erreur sur les points de vérification	0,070 m	0,069 m	0,096 m	0,076 m

Tableau 4 : Erreurs calculées après traitements Metashape

Nous notons une erreur significativement plus élevée à une hauteur de 100 mètres avec la caméra inclinée à 45°. Cette erreur était présente sur les autres essais réalisés avec ce paramètre. Nous verrons que cela se reflète également sur les différences de coordonnées entre la méthode traditionnelle et le traçage à partir de la photogrammétrie.

Les erreurs restent néanmoins relativement acceptables avec une moyenne avoisinant les 6 centimètres sur les points de contrôle et 7 centimètres sur les points de vérification.

Pour tracer un plan sur Autocad à partir du traitement photogrammétrique, nous construisons des points sur Metashape. Ces points seront ensuite exportés au format dxf pour être ouverts sur Autocad. Nous pointons l'emplacement des pylônes sur le MNS ou l'orthophotographie en fonction d'où ils sont le plus visibles. Pour éviter les erreurs d'altimétrie au pointage, nous pointerons le pylône en son centre pour la position XY, mais également deux points de part et d'autre pour moyenner les deux valeurs d'altitude et calculer ainsi un Z.

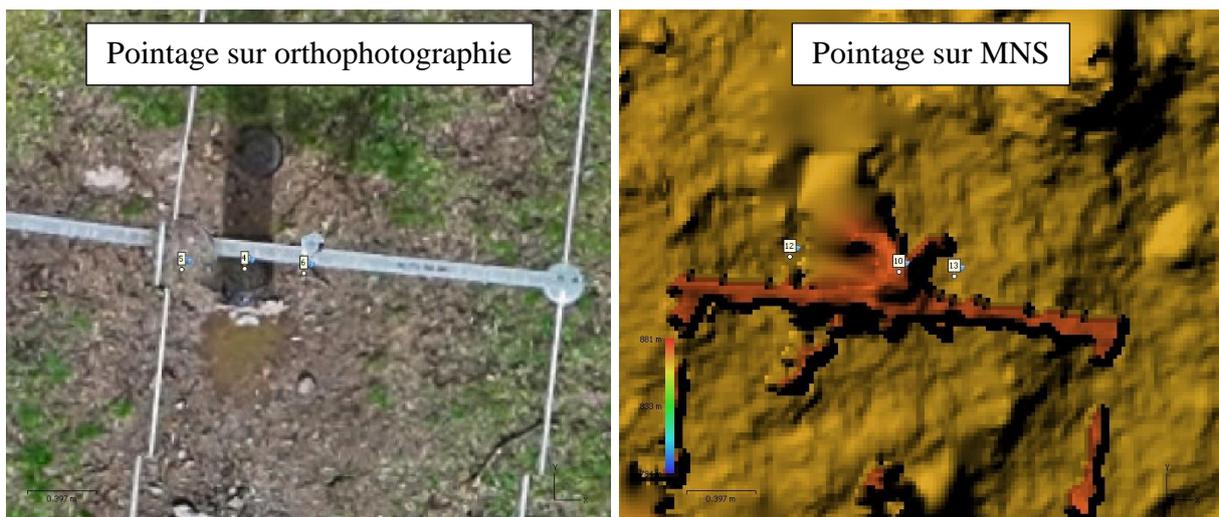


Figure 20 : Exemple de pointage des pylônes et du terrain

Une fois exportés, nous pouvons copier le levé réalisé au GNSS sur le même dessin Autocad pour comparer les résultats.

Hauteur de vol	Pylône	Z issu de la photogra (m)		Z retenu (m)	$\Delta Z$ (m)	$\Delta XY$ (m)	$\Delta Z$ moyen (m)	$\Delta XY$ moyen (m)
30 m	1	804,24	804,17	804,21	0,04	0,23	0,09	0,19
	2	827,59	827,62	827,61	-0,02	0,03		
	3	855,12	855,07	855,10	0,15	0,26		
	4	864,45	864,43	864,44	0,12	0,22		
50 m	1	804,11	804,12	804,12	-0,04	0,12	0,06	0,09
	2	827,63	827,65	827,64	0,01	0,05		
	3	855,13	855,02	855,08	0,13	0,11		
	4	864,20	864,37	864,29	-0,03	0,09		
100 m 45°	1	804,09	804,12	804,11	-0,05	0,25	0,12	0,32
	2	827,63	827,67	827,65	0,02	0,28		
	3	854,95	854,93	854,94	0,00	0,38		
	4	864,72	864,76	864,74	0,42	0,35		
100 m 90°	1	803,96	804,00	803,98	-0,18	0,21	0,09	0,23
	2	827,67	827,67	827,67	0,04	0,10		
	3	854,94	855,08	855,01	0,07	0,38		
	4	864,43	864,36	864,40	0,07	0,23		

Tableau 5 : Erreurs constatées sur le dessin Autocad

Comme abordé précédemment, nous constatons une nette augmentation de l'erreur pour l'essai à 100 mètres et 45° d'inclinaison. Cette tendance était également présente sur les autres hauteurs avec cette inclinaison. Nous pouvons donc conclure que cette inclinaison de nacelle réduit dans notre cas la qualité des traitements.

La hauteur de vol la plus adaptée d'après le tableau comparatif serait de 50 mètres. Avec une différence moyenne inférieure à 10 centimètres en XY et en Z par rapport à un levé GNSS, ces résultats sont très concluants. Aucune valeur aberrante n'est à déplorer dans ce tableau ; la dispersion des valeurs est très faible par rapport aux valeurs  $\Delta Z$  et  $\Delta XY$  moyens.

Les résultats pour une hauteur de 30 mètres sont cependant à considérer avec parcimonie. En effet, durant les traitements, nous nous sommes aperçus d'un nombre de photos relativement faible par rapport aux autres hauteurs. Nous émettons l'hypothèse qu'une mauvaise manipulation a pu être faite lors du paramétrage de la vitesse, et peut donc expliquer le manque de photos et l'imprécision de ce levé.

## Conclusion

La veille technologique représente une mission importante du métier d'ingénieur. Savoir se tenir au courant des dernières avancées technologiques et les étudier pour l'appliquer à son domaine d'activité sont des atouts indéniables pour maintenir notre compétitivité sur un marché de plus en plus rigoureux.

La technologie et les méthodes de levés sont en constante évolution et permettent d'ouvrir la voie à de nouvelles opportunités de marchés, ou d'amélioration de méthodologies existantes. Dans le cas de notre étude, nous nous sommes penchés sur la méthodologie de relevés de lignes haute tension en milieu isolé et difficile d'accès.

Après avoir fait état des techniques actuellement en vigueur, nous avons profité de l'opportunité de l'ouverture d'un marché de diagnostic visuel d'état de lignes haute tension pour explorer plus profondément la piste du drone et plus amplement de la photogrammétrie appliquée à la topographie. Nous avons développé dans ce mémoire une étude de la méthode de géoréférencement de lignes haute tension par photogrammétrie.

La prestation de géoréférencement pour ENEDiS a pour objectif principal une cartographie qui se doit d'être précise sans donner de classe ni de limite. Si l'on se réfère à la cartographie des réseaux enterrés, les classes de précision sont de 50 centimètres pour un réseau souple, et 40 centimètres pour un réseau rigide pour entrer en classe de précision « A », la plus précise de toutes. Sachant que les réseaux aériens ne posent pas les mêmes problèmes de visibilité que les réseaux enterrés, ces classes de précisions sont plus qu'approximatives mais sont les seules classes clairement données par les conventions et les exploitants de réseaux, aériens et souterrains confondus.

Comme nous l'avons observé dans la dernière partie de ce mémoire, la photogrammétrie offre des résultats plutôt concluants si nous usons des bonnes pratiques lors de la captation et de la production des modèles.

Pour bien comprendre et valider nos résultats, il ne faut pas oublier que les mesures GNSS sont déjà elles-mêmes entachées d'erreurs ; les erreurs propres au dispositif de mesure, avec l'imprécision que l'on sait de cette technique, à laquelle on ajoute l'imprécision liée à la méthode de mesure qui consiste à mesurer un point de part et d'autre du poteau pour en déterminer le milieu. Cette technique suppose que nous sommes placés parfaitement sur l'axe du diamètre du poteau. De plus, avec l'erreur de reconstruction photogrammétrique, et l'erreur liée au pointé dans le modèle, des écarts de l'ordre de 10 à 20 centimètres entre la mesure GNSS et la mesure sur modèle 3D semblent inévitables.

Nous observons cependant qu'avec une hauteur de vol adaptée, les résultats peuvent être très proches. La tendance tend à nous confirmer que plus la hauteur de vol est basse, plus le modèle est fidèle et précis. Encore une fois, les résultats obtenus à la hauteur de 30 mètres sont à considérer avec méfiance du fait d'une potentielle erreur de manipulation lors du levé.

Compte tenu des précisions attendues dans le domaine de la cartographie de réseaux enterrés, nous pouvons considérer notre technique photogrammétrique valide et utilisable à l'avenir pour ce type de prestation. Les cartographies ainsi générées entrent largement dans les classes de précision de 40 ou 50 centimètres de la cartographie de réseau classique. Les techniques actuelles chronophages et périlleuses pourront à l'avenir être complétées par ce type de prestation.

Des pistes d'amélioration sont à explorer, notamment celle d'uniquement effectuer deux ou trois passages décalés par rapport à l'axe de la ligne pour potentiellement compléter et améliorer le nuage de points, et ainsi produire des plans de meilleure qualité.

D'autre part, la solution drone offre de nombreuses autres possibilités d'activité. En effet, outre le diagnostic de lignes, nous avons également eu l'occasion d'effectuer de nombreux autres essais et prestations de photogrammétrie ; de la production d'orthophotographie simple jusqu'à la création de modèles numériques de surface et aux calculs de cubatures, les opportunités offertes par cet outil semblent être une excellente ouverture pour développer l'activité de l'entreprise.

## Table des illustrations

Figure 1 : Portant bois pourri à sa base .....	5
Figure 2 : Isolateur tordu .....	6
Figure 3 : Câble détourné .....	6
Figure 4 : Points visés dans le cadre d'un diagnostic mécanique .....	8
Figure 5 : Mikrokopter HexaXL équipé d'une caméra Sony NEX-5R (Source : <a href="https://www.mountauburn.org/mikrokopter-hexa-xl-flies-over-mount-auburn-sphinx/">https://www.mountauburn.org/mikrokopter-hexa-xl-flies-over-mount-auburn-sphinx/</a> ) .....	10
Figure 6 : DJi Mavic 3 Enterprise équipé d'un module RTK (Source : <a href="https://studioSPORT.fr">studioSPORT.fr</a> ) .....	11
Figure 7 : Système de détection d'obstacles DJi (Source : <a href="https://www.helicomico.com/">https://www.helicomico.com/</a> ) ...	12
Figure 8 : Schéma de la trajectoire en créneaux d'un relevé photogrammétrique par drone...	17
Figure 9 : Schéma descriptif du principe de recouvrement entre images (Source : personnelle) .....	18
Figure 10 : Schéma représentant le lien entre la taille du photosite et la taille du pixel au sol	19
Figure 11 : Application DJi Pilot : (Source : <a href="https://www.abot.fr/">https://www.abot.fr/</a> ) .....	20
Figure 12 : Schéma d'une centrale inertielle (Source : <a href="https://www.dewetron-services.com/">https://www.dewetron-services.com/</a> ) .....	21
Figure 13 : Mesure lidar à travers la canopée (Source : <a href="https://www.yellowscan.com/">https://www.yellowscan.com/</a> ) .....	22
Figure 14 : Carte interactive et paramètres de vol du site <a href="https://www.waypointmap.com">waypointmap.com</a> (Source : <a href="https://www.waypointmap.com">https://www.waypointmap.com</a> ) .....	31
Figure 15 : Waypoints générés par l'outil en ligne (Source : <a href="https://www.waypointmap.com">https://www.waypointmap.com</a> ) .....	32
Figure 16 : Trajectoire lissée sur la télécommande DJI (Source : <a href="https://www.waypointmap.com">https://www.waypointmap.com</a> ) .....	32
Figure 17 : Carte matérialisant la zone de vol autour d'une ligne électrique à Bourbach-le-Haut (68) .....	35
Figure 18 : Comparatif des nuages denses obtenus à différentes hauteurs de vol .....	38
Figure 19 : Placement des points de contrôle au sol .....	38
Figure 20 : Exemple de pointage des pylônes et du terrain .....	39

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparatif Matrice 300 RTK, Mavic Air 3 et Mavic 3 Pro .....	26
Tableau 2 : Comparatif Mavic 3 Enterprise, Mini 3 Pro et Mini 4 Pro .....	27
Tableau 3 : Calcul des paramètres de vol pour la mission test .....	36
Tableau 4 : Erreurs calculées après traitements Metashape .....	39
Tableau 5 : Erreurs constatées sur le dessin Autocad .....	40

## Bibliographie

### Ouvrages imprimés

Simonetto, (2023). Photogrammétrique / Vision et traitement des nuages de points 3D. École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans.

## Travaux universitaires

Stempfhuber, W., & Buchholz, M. (n.d.). A precise, low-cost RTK GNSS system for UAV applications. Beuth Hochschule für Technik Berlin, University of Applied Sciences, Department III. <https://www.beuth-hochschule.de>

Tournadre, V. (2015). Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère: Application au suivi d'évolution de digues. *Traitement des images [eess.IV]*. Université Paris-Est. <https://www.univ-paris-est.fr>

Maouche, Q. (n.d.). Détection des câbles et pylônes électriques avec un drone équipé d'un capteur Lidar [Mémoire de diplôme d'ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers, École Supérieure d'Ingénieurs Géomètres et Topographes]. CNAM.

Buschinelli, P., Salazar, J. D., Regner, D., Oliveira, D., Machado, M., Marcellino, G., Sales, D. C., Santos, J. M., Marinho, C. A., Stemmer, M. R., & Pinto, T. C. (n.d.). Targetless photogrammetry network simulation for inspection planning in oil and gas industry. *Labmetro/UFSC, Mechanical Engineering Department*. <https://www.ufsc.br>

Caudal, P. (2021). Apport de la photogrammétrie et de l'intelligence artificielle à la détection des zones amiantées sur les fronts rocheux [Thèse de doctorat, Le Mans Université, École Doctorale N° 602, Sciences pour l'Ingénieur]. Le Cnam laboratoire G&F. <https://www.lecnam.fr>

Daakir, M., Pierrot-Deseilligny, M., Bosser, P., Pichard, F., & Thom, C. (n.d.). UAV onboard photogrammetry and GPS positioning for earthworks. *Vinci-Construction-Terrassement*. <https://www.vinci-construction.com>

## Articles en ligne

CNET, (2022), Appareils photo plein format, APS-c, 4/3... comprendre la taille des capteurs <https://www.cnetfrance.fr/produits/s-y-retrouver-dans-la-taille-des-capteurs-en-photo-numerique-39713467.htm>

Benowitz, D. (2019). Eliminate Grid Downtime With Drone Inspection. <https://enterprise-insights.dji.com/user-stories/eliminate-grid-downtime-with-drone-inspection>

DJI Enterprise, (2024). Planification et design de construction.

<https://enterprise.dji.com/fr/electricity/construction-planning-and-design>

Yellowscan, (2023). Comment fonctionne le LiDAR ?

<https://www.yellowscan.com/fr/knowledge/how-does-lidar-work/#:~:text=Le%20principe%20du%20LiDAR%20est%20assez%20facile%20%C3%A0%20comprendre%20%3A,temps%20de%20parcours%20du%20laser>

### **Documentation technique**

Agisoft. (n.d.). *Metashape User Manual*. [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_5\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf)

CloudCompare. (n.d.). *CloudCompare User Manual*. <https://www.cloudcompare.org/doc/>

### **Sites web**

<https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones>

<https://vision.middlebury.edu/>

<https://www.agisoft.com/forum>

<https://rtkexplorer.com/rtk-overview/>

# **Veille technologique sur les méthodes de diagnostic et géoréférencement des lignes électriques haute tension en milieux isolés**

**Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024**

## **RÉSUMÉ**

Le métier de géomètre topographe est un métier en renouvellement technologique constant. Plus largement, le poste d'ingénieur géomètre topographe est déterminant dans le suivi, l'information et le développement de ces nouveaux outils dans les entreprises.

La veille technologique fait donc partie intégrante des missions confiées aux ingénieurs, qui par leur appréciation plus approfondie du domaine, seront à même d'appliquer au mieux les nouvelles techniques dans le domaine qui leur est propre.

Dans la mesure et le diagnostic de lignes électriques haute tension, les méthodes traditionnelles peuvent s'avérer difficiles et peu efficaces. La solution du drone s'inscrit comme une solution de choix dans ce domaine, permettant des photos et des points de vue très rapprochés des lignes haute tension en toute sécurité.

L'essor de la photogrammétrie comme méthode de relevé et géoréférencement décuple encore les capacités de tels appareils. Nous étudierons la solution de la photogrammétrie comme méthode de relevé et géoréférencement de lignes électriques haute tension, et comparerons les résultats aux méthodes traditionnelles.

**Mots clés : drone, photogrammétrie, géoréférencement, lignes haute tension**

## **SUMMARY**

Surveyor and topographer is a profession that is constantly evolving technology-wise. It is crucial for an engineer to stay in touch with the upcoming tools that are being made available on the market at any time given to increase the performance of his company.

Technological watch is then a major part of an engineer's mission, that will be more inclined to taking the correct decisions regarding these new techniques, thanks to their deeper knowledge of the domain.

When diagnosing and measuring high voltage lines, traditional methods might be hard to implement and time consuming. Drone seemed like the obvious solution to these problematics, offering safe close-up point of view of the lines.

The huge development of drone photogrammetry increases even more the capacity in the usage of these tools in the domain of topography and surveying. We will study this solution in the field of georeferencing high voltage power lines, and compare it with the results obtained by the traditional surveying methods.

**Keywords: drone, photogrammetry, georeferencing, high voltage power lines**

## Annexes

Annexe 1 : document de préparation de vol pour la mission à Bourbach-le-Haut (68)

**Pilote(s):** Théo MARTIN

**Date :** 02/04/2024

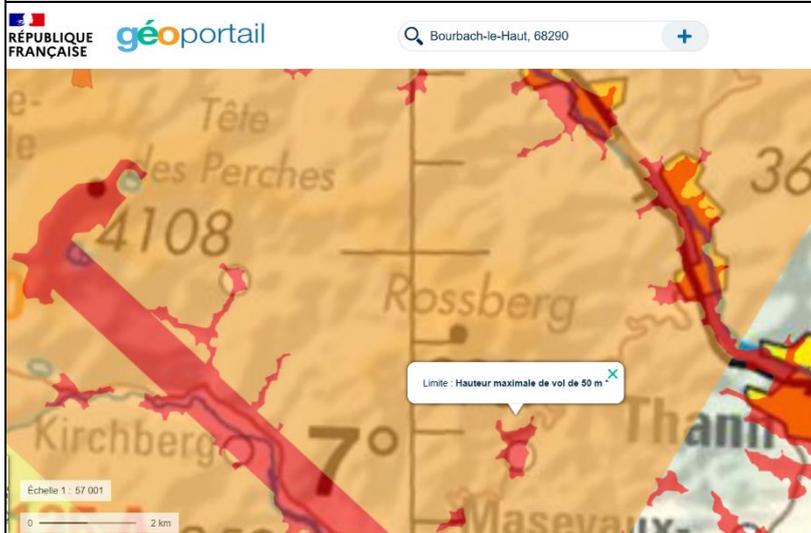
### 1 - DESCRIPTION ET OBJECTIFS DE LA MISSION

#### DESCRIPTION ET OBJECTIFS DE LA MISSION

Prises de vues aériennes rapprochées de lignes électriques haute tension et essais de prises de vues photogrammétriques sur la commune de Bourbach-le-Haut (68) – DJI Mavic 3 Pro – Photos JPG – Prises de vues réalisées le 02/04/2024 – La mission se divisera en deux phases ; première phase étant le diagnostic d'état de lignes réalisé par auscultation directe et prises de vues aériennes au drone, puis deuxième phase, réalisation de prises de vues aériennes pour essais de géoréférencement de lignes par photogrammétrie.

### 2 - REPERAGE ZONE D'OPERATION

#### REPERAGE ZONE D'OPERATION



Nous sommes concernés par une zone VOLTAC nécessitant la notification du vol aux services des armées pour les aéronefs de plus de 900 grammes.

Aucun NOTAM nous concernant n'est actuellement actif dans la zone.

Nous volerons hors agglomération

Nous volerons également dans le parc naturel régional des ballons des Vosges. Une attention particulière sera portée à l'environnement faunistique et floristique.

### 3 – DEMARCHES ADMINISTRATIVES

#### CHOIX SCENARIO

**Nous volerons uniquement en catégorie ouverte pour cette mission.**

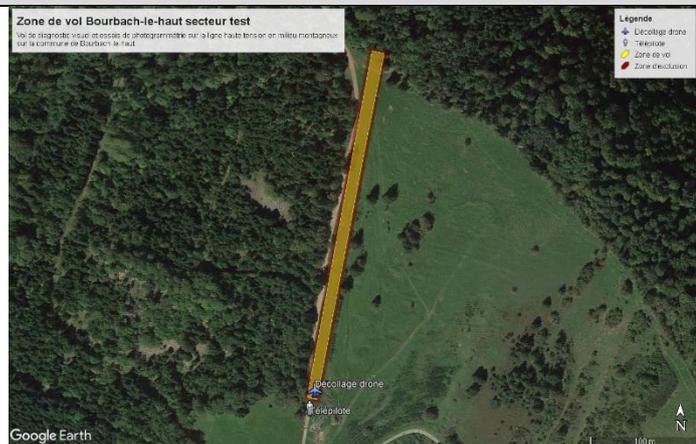
**Le vol se fera en vue avec une limite horizontale de 350 mètres et verticale de 120 mètres conformément aux réglementations.**

**Nous maintiendrons une distance minimale de 7 mètres par rapport aux lignes électriques.**

IDENTIFICATION DES ZONES	DEMARCHES ET DESTINATAIRES	PREAVIS
VOLTAC PHG prémontagne	Notification aux armées sur AlphaTango	6 heures

### 4 - IMPLANTATION ET SECURISATION DE LA ZONE

#### IMPLANTATION ET SECURISATION DE LA ZONE



**La zone a une longueur totale de 325 mètres. Le télépilote se tiendra en bas de la pente, endroit depuis lequel il pourra garder le drone en visuel jusqu'en haut. Si toutefois il venait à perdre le drone de vue, il montera le long du chemin jusqu'à avoir un bon visuel sur l'aéronef.**

**La zone est quasi intégralement hors du chemin de promenade. Celui-ci est délimité par une clôture qui matérialisera la zone d'exclusion. Là où la zone de vol se superpose au chemin piéton, une signalisation sera mise en place pour prévenir les promeneurs. Dans la mesure du possible, le télépilote se tiendra à cet endroit pour prévenir également.**

## 5 – DOCUMENTS DE CONTROLE ET BRIEFING

### DOCUMENTS DE CONTROLE

*Extrait d'enregistrement de l'aéronef, extrait d'enregistrement exploitant, assurance, CATT, déclaration d'activité, MANEX, carte d'identité recto verso.*

*La notification aux armées ne génère pas de document supplémentaire*

### BRIEFING DE MISSION

*Lors de cette mission, nous veillerons à ce que les promeneurs soient toujours hors de tout danger. Nous prendrons également garde à maintenir une distance suffisante vis-à-vis de la ligne électrique et également redoubler de vigilance par rapport aux arbres et espaces forestiers.*

### METEOROLOGIE

*METAR :*

*LFSB 020600Z AUTO 24008KT 9999 FEW033 BKN056 BKN110 09/05 Q1014 TEMPO SCT020TCU*

*Décodage :*

*Code OACI de l'aérodrome : LFSB*

*Jour du mois : 02*

*Heure : 06:00 UTC*

*Vent : direction 240 degrés, vitesse 8 nœuds*

*Visibilité : 10 km ou plus*

*Nuages : quelques nuages (1 à 2 octas) à 3300 pieds au-dessus du niveau de l'aéroport*

*Nuages : ciel fragmenté (5 à 7 octas) à 5600 pieds au-dessus du niveau de l'aéroport*

*Nuages : ciel fragmenté (5 à 7 octas) à 11000 pieds au-dessus du niveau de l'aéroport*

*Température : 09 degrés Celsius*

*Point de rosée : 05 degrés Celsius*

*Pression atmosphérique rapportée au niveau de la mer : 1014 hPa*

*Les phénomènes météorologiques suivants devraient se produire temporairement :*

*Nuages : nuages épars (3 à 4 octas) à 2000 pieds au-dessus du niveau de l'aéroport, cumulus congestus*

*Les conditions seront adaptées pour un vol de drone.*