



Utilisation des drones pour la définition du domaine public hydraulique : étude d'une concession hydraulique dans les Pyrénées

Marielle Cazalis

► To cite this version:

Marielle Cazalis. Utilisation des drones pour la définition du domaine public hydraulique : étude d'une concession hydraulique dans les Pyrénées. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01685737

HAL Id: dumas-01685737

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01685737>

Submitted on 16 Jan 2018

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 METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir
le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Marielle CAZALIS

**Utilisation des drones pour la définition du domaine public hydraulique :
étude d'une concession hydraulique dans les Pyrénées.**

Soutenu le 04 juillet 2016

JURY

PRESIDENT :	Monsieur Laurent POLIDORI,	Professeur à l'ESGT.
MEMBRES :	Madame Audrey ALAJOUANINE,	Co-gérante de GE Infra,
	Monsieur Eric LABERGERIE,	Maitre de stage.
	Monsieur José CALI,	Professeur à l'ESGT,
	Monsieur Guillaume RICHER,	Professeur référent.
	Monsieur Edouardo RODRIGUES,	Professeur à l'ESGT.
	Monsieur Benoît MARTIN-GOUSSET	Responsable de la division
		géospatiale à REDBIRD.
		Ingénieur à BR +.
		Gérant de QUARTA.

Remerciements

Je tiens à remercier Audrey Alajouanine et Jean Luc Saint-Chamant de m'avoir permis de réaliser mon stage de fin d'études dans leur cabinet. Je remercie particulièrement Audrey Alajouanine pour l'indépendance et la confiance qu'elle m'a accordée ainsi que pour ses nombreuses recommandations.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe de GE Infra pour son accueil chaleureux et sa bonne humeur au quotidien.

Merci à Yann Hascoet, Bogusia Multan, Laure Rives et Frédéric Toiser de m'avoir aiguillé dans mes recherches et de m'avoir permis de mieux appréhender le sujet. Je remercie également Virginie Jeansou pour sa gentillesse et tous ses conseils avisés.

Merci à Eric Labergerie, professeur référent de ce mémoire et professeur à l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT), de m'avoir soutenu pour la rédaction de ce mémoire.

Merci à mes conseillers et relecteurs, Adrien Barbaste et Bastien Ricard.

Enfin je tiens à remercier mes parents et toute ma famille, pour m'avoir soutenu tout au long de mes études et de ce projet. Merci d'avoir toujours cru en moi.

Liste des abréviations

A	APN : Appareil Photographique Numérique
B	BND : Bien Non Délimité
C	CA : Chiffre d’Affaire CCTG : Cahier des Clauses Techniques Générales CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières CP : Classe de Précision
D	DGAC : Direction Générale de l’Aviation Civile DMPC : Document Modificatif du Parcellaire Cadastral DPH : Domaine Public Hydraulique
E	EDF : Electricité De France
F	f : focale de l’appareil photographique numérique
G	GEH : Groupe d’Exploitation Hydraulique GNSS : Global Navigation Satellite System GPS : Global Positioning System GSD : Ground Sample Distance
H	H : Hauteur de vol du drone HT : Hors Taxes
I	IGN : Institut National de l’Information Géographique et Forestière
M	MNS : Modèle Numérique de Surface MNT : Modèle Numérique de Terrain
P	PB : Plan de Bornage PBI : Plan de Bornage d’Intention PDV : Prise De Vue PPR : Plan Parcellaire Régulier PV : Procès-Verbal
R	R : Résolution RN : Retenue Normale
U	UPSO : Unité de Production Sud-Ouest
V	VRD : Voirie et Réseaux Divers

Glossaire

- A** **Aérotriangulation** : Méthode de constitution d'un canevas complémentaire de points d'appui, déterminés par leurs trois coordonnées dans l'espace-objet, en utilisant les relations géométriques qui lient les photographies adjacentes d'une prise de vues stéréoscopiques, et un nombre nettement réduit de points d'appui connus, généralement situés en extrémités et en milieu de bande.
(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)
- C** **Cadence** : Rapport définissant le nombre de clichés pris pendant un intervalle de temps donné.
(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)
- D** **Drone** : aéronef qui circule sans personne à bord et contrôlé par un télépilote.
- E** **Effet de filé** : Court segment de droite qui, sur l'image photographique, représente un point quelconque de l'objet photographié, et qui est dû au déplacement relatif de cet objet et du capteur pendant l'enregistrement.
(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)
- G** **Géoréférencement** : action qui permet de passer de coordonnées locales à des coordonnées issues du système général.
- Gisement** : angle formé entre le nord géographique et la visée.
- L** **Lacet** : Mouvement d'un aéronef autour d'un axe vertical passant par son centre de gravité.
(Source : dictionnaire Larousse)
- N** **Nivellement indirect** : méthode de mesure de l'altitude d'un point par visée inclinée à l'aide d'un tachéomètre. Cette notion est à opposer au nivellement direct, qui permet de mesurer l'altitude du point de manière immédiate par des visées horizontales à l'aide d'un niveau.
- P** **Photogrammétrie aérienne** : Ensemble des techniques qui consistent à prendre des clichés depuis un véhicule aérien et à les exploiter pour déterminer la forme, les dimensions, la position, dans un système de référence lié à la Terre, de la partie photographiée ainsi que des détails visibles sur celle-ci.
(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)
- Photogrammétrie terrestre** : Photogrammétrie appliquée à la partie de la surface terrestre émergée et effectuée à partir de prises de vues réalisées de stations au sol.
(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)

Points d'appui : Point de canevas utilisé pour effectuer le prétraitement et (ou) le traitement géométrique des données.

(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)

Points de contrôle : points utilisés en photogrammétrie pour contrôler la qualité du calcul d'aérotriangulation.

Points de liaison : en photogrammétrie, ce sont des points homologues vus sur un voire plusieurs couples d'images.

R **Ré-échantillonnage** : Action qui permet de modifier le nombre de pixels présents dans l'image et donc sa résolution.

Recouvrement photographique : Portion commune à plusieurs photographies, aériennes ou spatiales, selon la ligne de vol ou le long de deux bandes de photographies adjacentes.

(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)

Résolution : Nombre de points ou de pixels, par unité de longueur, que peut comporter une image reproduite sur un écran ou une feuille de papier.

(Source : Glossaire 3D de l'OGE)

Restitution : En photogrammétrie, processus d'obtention d'une représentation (graphique, numérique, photographique) à trois dimensions d'un objet à partir de clichés pris avec une chambre métrique.

(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)

Roulis : Mouvement d'oscillation d'un aéronef autour de son axe longitudinal.

(Source : dictionnaire Larousse)

S **Stéréopréparation** : Processus au cours duquel on détermine directement tous les éléments du canevas de points d'appui permettant la mise en place dans les appareils de restitution (mise à l'échelle, orientations relative et absolue).

Lorsque les clichés constituent un bloc soumis à aérotriangulation, le travail de stéréopréparation s'en trouve réduit d'autant. Il est néanmoins conseillé, dans ce cas, de prévoir un nombre supérieur de points de vérification.

(Source : Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie – Conseil international de la langue française – 1997. ISBN : 2-85319-270-9)

T **Tangage** : Mouvement d'oscillation d'un aéronef autour d'un axe parallèle à l'envergure des ailes et passant par le centre de gravité.

(Source : dictionnaire Larousse)

Table des matières

Remerciements	3
Liste des abréviations	4
Glossaire	5
Table des matières	7
Introduction	9
 I INTERET DU SUJET.....	11
I.1 LE DRONE DANS LA SOCIETE ACTUELLE.....	11
I.1.1 Etat de l’art	11
I.1.2 Réglementation.....	12
I.2 LA PHOTOGRAMMETRIE ET GE INFRA	14
I.2.1 Présentation de l’entreprise	14
I.2.2 Matériel.....	15
I.3 LES DOSSIERS EDF : LA PARTICULARITE DU DPH	17
I.3.1 Présentation	17
I.3.2 Le CCTG	18
I.3.3 Domaine Public Hydraulique : pourquoi parle-t-on de bornage ?.....	19
 II L’APPORT DU DRONE.....	21
II.1 ANALYSE DE L’ETAT ACTUEL	21
II.1.1 Généralités	21
II.1.2 Exemple de la chute de Nouaux	22
II.1.3 Bilan	23
II.2 LES AVANTAGES FINANCIERS	25
II.2.1 Fixer les tarifs d’utilisation du drone.....	25
II.2.2 Application sur la chute de Nouaux	28
II.2.3 Bilan	29
II.2.3.1 Pour le client.....	29
II.2.3.2 Pour l’entreprise	29
II.3 LES AVANTAGES TECHNIQUES	30
II.3.1 Une capacité technique intéressante	30
II.3.1.1 Obtention d’une bonne résolution	30
II.3.1.2 Adaptabilité au terrain	31
II.3.2 Un outil d’aide à la préparation du bornage	34
II.3.2.1 Problématique.....	34
II.3.2.2 Respect de la classe de précision.....	35
II.3.2.3 Le plan de bornage aujourd’hui.....	36
II.3.2.4 La préparation avec le drone	38
II.3.2.5 Bilan	40

III	UTILISER LE DRONE DE MANIERE OPTIMALE	41
III.1	QUAND UTILISER LE DRONE	41
III.2	PREPARATION DES MISSIONS.....	46
III.2.1	Fiche de préparation de vol	46
III.2.2	Plan de vol	48
III.2.3	Mise en place d'un tableur excel	50
	Conclusion.....	52
	Bibliographie	54
	Table des annexes.....	56
	Liste des figures.....	71
	Liste des tableaux	72

Introduction

"Avec l'évolution des technologies, demain, nous n'aurons plus à nous déplacer sur le terrain pour effectuer des relevés" déclare J.F. Dalbin, président du conseil Supérieur de l'Ordre des Géomètres-Experts dans le rapport annuel d'activité et de développement des géomètres-experts pour l'année 2014. [DALBIN, 2015]

Suite à la crise immobilière de 2008, le contexte économique actuel pour les cabinets de géomètre-expert est encore délicat. Entre 2013 et 2014, on observe une baisse moyenne du chiffre d'affaire des cabinets de l'ordre de 4.4%. [RAPPORT, 2015]

Face à cette conjoncture difficile, et pour faire face à la concurrence interne et externe toujours plus grande, la profession a vu ses activités se diversifier. Bien que le cœur de métier reste inchangé (60% des travaux en 2014 dans un cabinet restent de nature foncière ou topographique) les travaux tels que l'expertise, l'ingénierie ou l'information géographique prennent de l'ampleur.

Les nouvelles technologies viennent également bousculer le mode de fonctionnement des entreprises qui voient apparaître des outils d'acquisition et d'analyse innovants et performants.

Après un fort succès auprès du grand public, le marché des drones s'ouvre chez les professionnels. D'après Frédéric Bergé, journaliste à BFMTV, aujourd'hui, plus de 1 500 entreprises auraient en leur possession un drone, dont 70% proposeraient des prestations dans l'audiovisuel et les prestations artistiques. [BERGE, 2016, SCHMITT, 2016]. Dans un article de l'Usine Nouvelle, Olivier James prédit même une évolution de +25.5% de l'usage des drones par les entreprises d'ici 2025. [JAMES, 2016]. Ces chiffres, associés aux caractéristiques intéressantes du drone, ouvrent un nouvel horizon au métier de géomètre : Petits, légers, rapides et pour un coût raisonnable, ils révolutionnent les modes d'acquisition des données et permettent d'atteindre des zones difficiles d'accès ou dangereuses telles que les carrières. Dix ans après la grande révolution du scanner laser 3D, les drones semblent prendre une place de plus en plus importante dans le monde des géomètres.

Cette avancée est cependant à nuancer. Premièrement parce que l'utilisation des drones en France est fortement contrainte par la réglementation en vigueur. Deuxièmement, parce la conjoncture du marché reste difficile : une étude menée par le groupe Xerfi montre que les clients, malgré une attention toute particulière portée à cette nouvelle technologie, sont souvent très exigeants sur les prestations à effectuer. Ils n'hésitent pas à faire rentrer les entreprises en concurrence voire, comme certaines grosses structures, à internaliser les produits. [Xerfi, 2015]

Le cabinet de géomètres-experts GE Infra propose depuis plusieurs années des prestations photogrammétriques aériennes. Ce service permet de représenter un territoire à partir de prises de vues aériennes, en se basant sur le principe de la vision stéréoscopique.

Les moyens matériels utilisés pour acquérir les clichés (avion et caméra) ont un coût important. Ce service s'adresse donc à une clientèle ciblée. L'achat d'un drone cette année par GE Infra aurait un double intérêt : pour certains types de chantiers, il permettrait d'ouvrir les prestations de photogrammétrie à une clientèle plus large mais aussi proposer à la clientèle déjà présente une méthode moins coûteuse. Cet achat permettrait également d'avoir un contrôle sur la totalité de la chaîne de production des données.

De plus, depuis de nombreuses années, le cabinet est titulaire des marchés de bornage des aménagements hydroélectriques d'EDF pour le lot Sud-Ouest. Ces dossiers particuliers durent de nombreuses années. Les terrains à borner sont situés dans la région montagneuse des Pyrénées, ce qui rend leur accès difficile pour les opérateurs. L'application du drone dans ces zones aurait un grand intérêt pour la société.

Dans le cadre de mon projet de fin d'études, j'ai intégré le cabinet GE Infra à Toulouse (Haute-Garonne) pour une durée de cinq mois.

Ce sujet amène plusieurs questions qui seront abordées dans ce mémoire :

Malgré des avancées probantes en matière de drone chez les géomètres, en quoi l'achat d'un drone par la société GE-Infra est-elle utile ? En quoi les dossiers EDF sont-ils intéressants dans l'étude de ce sujet ? Au-delà de l'image moderne qu'il apporte au cabinet, l'utilisation du drone par la société doit lui apporter des avantages certains. Ces avantages sont-ils plutôt techniques ou financiers ?

Pour répondre à ces questions, et voir quels types de compétences le drone peut apporter, il faudra s'assurer : que l'ensemble des éléments des dossiers sont réalisables grâce à l'utilisation du drone, que l'utilisation de cette technologie répond aux attentes du client et aussi qu'il répond aux exigences relatives à la profession.

Ces résultats nous amèneront à réfléchir sur l'utilisation du drone dans l'entreprise : à quel moment vaut-il mieux utiliser le drone ? Quels outils peuvent permettre d'optimiser son utilisation ?

I Intérêt du sujet

I.1 Le drone dans la société actuelle

I.1.1 Etat de l'art

A la vue de l'essor du drone ces dernières années, de nombreux travaux de recherches ont été effectués sur le sujet.

Katherine Kelm, spécialiste principale d'administration des terres à la Banque mondiale, parle d'une "révolution de l'administration foncière" par les drones, grâce à leur petite dimension et leur adaptabilité à tous les environnements mais surtout grâce à leur fiabilité. [KELM 1, 2014]. En décembre 2016, au Kosovo, dans le village de Krusha e Madhe, son équipe et elle ont réalisé des levés qui ont permis de confectionner des planches cadastrales sur la ville et ainsi de protéger les droits fonciers des femmes de ce village. [KELM 2, 2016]. Cet exemple n'est pas isolé, et plusieurs villes au Vietnam ou encore au Pays Bas ont utilisé le drone à des fins cadastrales.

Dans le domaine topographique et foncier, il a été cherché à savoir si la précision atteinte par le drone était suffisante pour réaliser des levés topographiques voire même être un outil pour les procédures de bornage contractuel. La précision planimétrique des levés a été évaluée à partir des résidus sur les coordonnées de points de contrôle mais également en comparant les limites issues de la digitalisation du cadastre et du levé terrain. Que le terrain d'étude se trouve en milieu rural ou urbain, les écarts observés sur les points de contrôle sont de l'ordre de 3 cm. L'application cadastrale, quant à elle, varie en fonction de la qualité du cadastre initial. [VARIN, 2015]. Grâce aux travaux réalisés dans la matière, nous savons donc aujourd'hui que le drone est un outil utile et utilisable pour les missions d'un géomètre. La précision atteinte par cette méthode est de l'ordre de 2 à 5 centimètres, précision semblable à celle atteinte par un levé par GNSS temps réel. [BARRY, 2013, GROB, 2014].

Ces résultats restent cependant à nuancer : la méthodologie mise en place est contraignante et nécessite une phase de préparation sur le terrain assez longue. En effet, il faut poser puis relever de nombreuses cibles, réparties sur l'ensemble du chantier. Pour obtenir une bonne qualité de positionnement, il faut que ces cibles soient visibles sur le plus de clichés possible (au moins trois clichés voire quatre pour contrôler) et qu'elles soient idéalement relevées par la méthode GNSS statique rapide.

Dans le cadre d'une entreprise, cette étape est « allégée » et les cibles sont souvent remplacées par des points durs ou des points naturels caractéristiques, relevés par la méthode GNSS NRTK.

Un des points faibles de la méthode drone, relevé par l'analyse des travaux, réside dans la génération automatique des surfaces et surtout dans le positionnement altimétrique des points. Il a été observé, pour des surfaces lisses de type route ou encore des surfaces denses avec trop de végétation, des problèmes de modélisation. A cause d'un nombre de points d'accroche insuffisant, les écarts altimétriques observés peuvent atteindre jusqu'à 35cm [FEHRENBACH, 2014, HOUIN, 2014]. Ces erreurs de positionnement planimétrique sont rédhibitoires dans le cadre d'un rendu au client par l'entreprise. La génération de nuages automatiques n'est donc pas une solution adaptée pour la réalisation de plans photogrammétriques.

I.1.2 Réglementation

Trois ans après la première réglementation concernant l'usage des drones civils et professionnels, la DGAC a révisé ses textes en tenant compte des usages des drones et du retour d'expérience de leurs utilisateurs.

Cette nouvelle réglementation est entrée en vigueur au 1er janvier 2016. Comme la précédente, elle est constituée de deux arrêtés qui définissent le nouveau cadre réglementaire de l'usage des drones. On distingue :

- L'arrêté du 17 décembre 2015 relatif à la conception, aux conditions d'utilisation et aux qualifications des télépilotes,
- L'arrêté du 17 décembre 2015 relatif aux conditions d'insertion dans l'espace aérien.

Ces arrêtés distinguent de manière claire et non équivoque : les aéronefs, c'est-à-dire les drones à usage de loisir ou de compétition et les drones à usage d'expérimentation ou autres activités particulières.

L'utilisation d'un drone dans le cadre du métier de géomètre le classe dans la catégorie des « activités particulières ». Elle est encadrée par l'annexe III de l'arrêté du 17 décembre 2015 relatif à la conception des aéronefs.

Le tableau 1 présente les quatre scénarii opérationnels envisagés pour l'activité particulière et décrits dans l'annexe III.

Type de scénario	Utilisation en Zone peuplée	Type de vol	Dh maxi / au télépilote	Hauteur de vol	Conditions
S-1	Non autorisée	A vue	100 m 200 m	150 m	
S-2	Non autorisée	Vue indirecte autorisée	1000 m	150 m 50 m	Poids < 2 kg Poids > 2 kg
S-3	autorisée	A vue	100 m	150 m	Aéronefs captifs ou non captifs mais poids max = 8kg + dispositif de protection des tiers
S-4	autorisée	Vue indirecte autorisé			Masse max = 2 kg

Tableau 1: Type de scénarii de vol pour activités particulières - DGAC

Légende :

Exemple = nouvelles règles issues de l'arrêté de 2016

~~Exemple~~ = dispositions annulées par les nouveaux textes

La nouvelle réglementation permet notamment une simplification des procédures concernant les survols de zones peuplées : la demande d'autorisation préfectorale est remplacée par une déclaration préalable.

Les modalités d'évolution en espaces aériens contrôlés sont aussi assouplies et le vol à vue sous 50 mètres n'est plus soumis à autorisations.

Cette réglementation est stricte du point de vue de la sécurité des tiers, avec la mise en place obligatoire d'une zone de protection des tiers au sol. Il faut également que les drones opérants dans des scénarii hors vus possèdent une commande manuelle d'interruption de vol. En cas d'urgence, cette commande doit être indépendante et fonctionner même en cas de panne des automatismes embarqués de contrôle.

Elle est aussi exigeante au niveau des compétences du télépilote : celui-ci doit posséder un certificat d'aptitude théorique additionné à une formation pratique qui donne lieu à la délivrance d'une déclaration de niveau de compétence.

La réalisation des opérations est conditionnée par le dépôt auprès du ministre chargé de l'aviation civile d'une « Déclaration d'activité d'un exploitant d'aéronefs circulant sans personne à bord utilisés dans le cadre d'activités particulières » et d'un MAP (Manuel d'Activités Particulières). Ces documents précisent les modalités d'utilisation du drone dans le cadre de l'activité particulière. Tous changements ou modifications nécessitent des mises à jour de ces deux documents.¹ [DGAC, 2015]

¹ Confère annexe 1

I.2 La photogrammétrie et GE INFRA

I.2.1 Présentation de l'entreprise

Une spécificité de GE Infra est son pôle photogrammétrique. Depuis plus de 40 ans, la société maîtrise et met en œuvre les techniques de restitution photogrammétrique. A Toulouse, elle est l'une des rares à proposer ce type de prestation qui demande des compétences techniques et matérielles particulières.

Les prestations proposées par GE Infra dans ce domaine sont :

- La restitution numérique du 1/500 au 1/5000,
- La création d'orthophotoplan,
- L'auscultation par photogrammétrie terrestre,
- La photogrammétrie architecturale,
- Le calcul de cubatures sur stocks ou sur des projets d'aménagement,
- La réalisation de MNT/MNS,
- La modélisation 3D.

Grâce à ce secteur d'activité, GE Infra peut se positionner sur des dossiers non seulement au niveau régional mais aussi au niveau national.

Pour répondre aux exigences de ses travaux, l'équipe du pôle photogrammétrie est constituée d'un technicien qui gère le traitement des images, la réalisation d'orthophotoplan et l'édition cartographique et de deux restituteurs qui effectuent les calculs d'aérotriangulation puis la restitution des plans.

Actuellement, les deux types d'activités générant le plus de chiffre d'affaire sont les travaux topographiques et les travaux photogrammétiques. (Cf. annexe 2)

La figure 1 ci-dessous présente l'évolution de l'activité photogrammétrique dans l'entreprise sur les trois dernières années. Les revenus générés par la photogrammétrie ont augmenté: représentant 18% du CA en 2013, l'activité a aujourd'hui atteint presque 24% du CA. Cette activité est donc une source de revenus sûre pour l'entreprise.

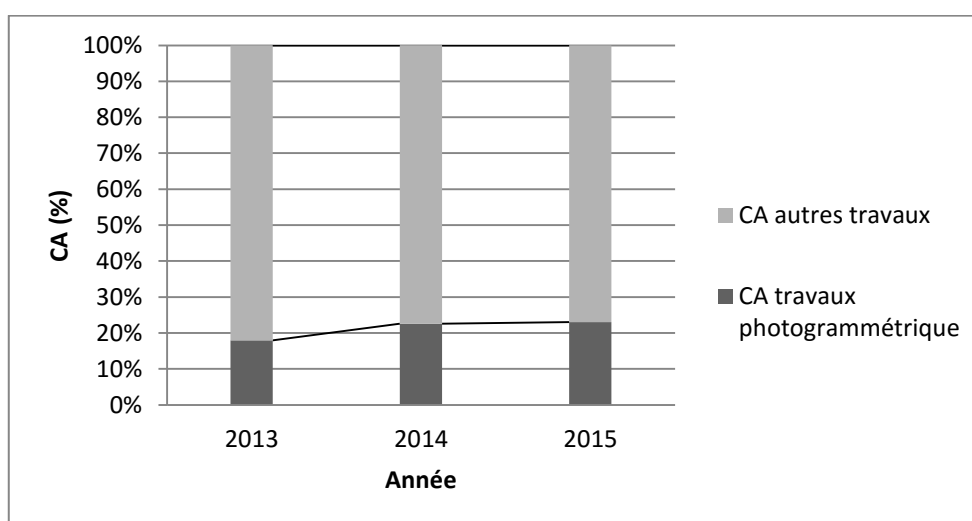


Figure 1: Evolution du CA photogrammétrique chez GE Infra

I.2.2 Matériel

A la vue des chiffres énoncés précédemment, GE Infra a souhaité développer son pôle de photogrammétrie et investir dans le matériel innovant qu'est le drone. La société a fait l'acquisition cette année de deux drones DJI: un Phantom 4 et un S1000+.

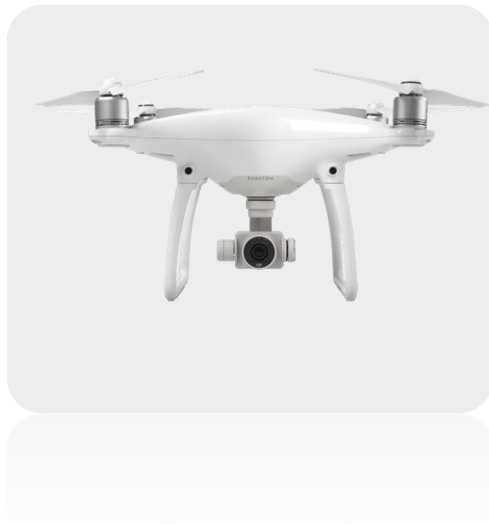


Figure 2: DJI Phantom 4 (à gauche) et DJI S1000+ (à droite), source : www.dji.com

Ces deux drones ont des caractéristiques bien distinctes.

Le Phantom est un drone prêt à l'utilisation. La nacelle qui supporte la caméra est intégrée à la structure et n'est pas amovible. Le S1000+ ne constitue qu'une structure de base du drone. Cette structure a été agrémentée des éléments choisis par GE Infra selon la qualité recherchée.

Le tableau 2 ci-dessous présente les caractéristiques des deux drones :

Caractéristiques	DJI Phantom 4	DJI A2 S1000 +
APPAREIL		
Taille (diagonale)	35 cm	104.5 cm
Nombre de moteurs	4	8
Poids (tout compris, hélice et batteries)=	1.4 kg	Environ 8 kg
Batterie	17.4 V Autonomie : 28 minutes maximum	(6S lipo) Autonomie : environ 15 min
Temps de charge batteries	1h30	1 h
Précision du vol stationnaire	<u>Verticale</u> : 0.1 m si vision positioning activé sinon 0.5 m <u>Horizontale</u> : 0.3 m si vision positioning activé sinon 1.5 m	Carte North GNSS RTKite <u>Verticale</u> : +/- 5 mm + 1 ppm <u>Horizontale</u> : +/- 8 mm + 1 ppm

CAMERA	Intégrée, non échangeable	Sony A7r ii
Capteur	12.7 Mpxels (24 x 36 mm)	42 Mpxels (24 x 36 mm)
Objectif	20 mm	35 mm
Vitesse d'obturation	8 s à 1/8000 s	1/8000 s à 30 s
Taille image	4000 x 3000	7952 x 5305
Le plus	Système de reconnaissance d'obstacles	Nacelle séparée de la structure principale par des amortisseurs (réduction des vibrations)

Tableau 2: Caractéristique des drones DJI, sources : www.dji.com et www.sony.fr

Les modifications apportées à la structure du S1000+ ont été effectuées par la société Airoad Technologie à Toulouse. Il a été ajouté :

- Une batterie supplémentaire de type 6S,
- Un APN Sony A7r ii,
- Un parachute,
- Une carte de positionnement North GNSS RTKite.

Les forces de ce dispositif résident dans la précision de positionnement des centres de prises de vues grâce à la carte GNSS couplée à un abonnement Teria temps réel mais aussi dans l'APN, qui garantit la qualité des images.

Ces changements ont également modifié le comportement de certains paramètres qu'il faudra recalculer en situation réelle, comme l'autonomie des batteries.

Les drones acquis par la société pourront être homologués en scénarii S1 et S2. Seul le phantom 4 pourra être homologué pour les scénarii S3 et S4.

Les logiciels de traitement actuellement utilisés dans la société sont la chaîne de restitution Erdas Imagine et Orima pour le calcul d'aérottriangulation.

La durée d'intervention moyenne sur ce genre de dossier est de 3 ans. Elle comprend trois étapes de réalisations :

- Le plan parcellaire régulier (PPR) : ce plan est une première étude du domaine concédé. C'est une application cadastrale de la zone complétée par les relevés topographique des ouvrages à régulariser,
- Le plan de bornage d'intention (PBI) : Cette étape est la phase préparatoire au bornage. Après détermination des limites du domaine concédé, celles-ci sont appliquées au PPR. Les parcelles concernées par la régularisation sont identifiées et une Base de Données des propriétaires riverains est établie,
- Et le plan de bornage (PB) : c'est la dernière étape du processus. C'est durant cette phase que tous les outils de régularisation foncière sont mis en place (procédure d'alignement, DMPC). Elle aboutit par le bornage des ouvrages à régulariser et par la confection du plan de bornage. Celui-ci est annexé aux procès-verbaux de bornage établit pour chaque parcelle concernée.

Les conditions de réalisation de ces trois étapes sont fixées par le CCTG.

I.3.2 Le CCTG

Comme pour de nombreux travaux soumis à appel d'offre, ceux-ci sont encadrés par un cahier des clauses précis. Edf a mis en place un CCTG (Cahier des Clauses Techniques Générales) qui s'applique à l'ensemble des concessions. Il permet à l'entreprise qui traite les travaux de savoir sous quelles conditions ceux-ci doivent être réalisés : cela se traduit par le choix du mode de levé, le format des livrables ou encore les règles de sécurité à respecter.

Tous les chantiers sont également accompagnés d'un CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) qui fixe des conditions spécifiques pour une concession donnée. C'est grâce au CCTP que l'entreprise connaît par exemple, la nature des ouvrages à relever ou encore les cotes RN du plan d'eau.

A la lecture du CCTG, le choix du drone comme mode de levé ne pose pas de soucis puisqu'il est l'une des méthodes proposé dans la description technique de la prestation. Pour autant, il faudra respecter des spécifications techniques en matière de prises de vues :

- *Surface utile des clichés* : précisée dans le CCTP
- *Recouvrement longitudinal* : 80% avec une tolérance de variation de 5%.
- *Recouvrement latéral* : 40% avec une tolérance de variation de 5%.
- *Résolution spatiale des clichés* : GSD = précisée dans le CCTP.

Il faudra aussi, avant la réalisation des levés, présenter à EDF le plan de vol sur un fond de carte IGN. Les prises de vues doivent être réalisées dans des conditions climatiques favorables c'est-à-dire avec une bonne visibilité, un sol dégagé et peu d'ombre.

Au-delà des recommandations techniques, le CCTG impose une qualité des plans à fournir. Après calculs, les plans photogrammétriques fournis au 1/2000 devront respecter une classe de précision de 20 cm, conformément à l'arrêté du 16 septembre 2003.

Avant chaque nouvelle étape à réaliser, le CCTP est transmis au géomètre qui établit un devis en fonction des prestations demandées et du bordereau des prix. Lorsque le devis est accepté, la commande est passée et on peut alors réaliser les opérations sur le terrain ou au bureau.

Normalement, les interventions sur le terrain se produisent au moment de l'élaboration du PPR (lever des ouvrages et autres éléments spécifiés) puis en phase finale de bornage pour la pose des bornes pendant les réunions contradictoires.

Cependant l'enveloppe des ouvrages à régulariser n'est pas toujours précisément connue au moment de la confection du PPR. Il est donc fréquent que des compléments de levés soient effectués en phase de PBI voire parfois en phase de PB juste avant le bornage.

Cela induit que pour un même chantier, les interventions sur le terrain peuvent être multiples. Leur nombre n'est pas déterminable à l'avance. Cette situation pose deux problèmes :

- un retard dans l'élaboration du plan de bornage qui se répercute sur l'action de bornage,
- une mobilisation d'équipe pour retourner sur le terrain, avec des conditions de levés difficiles dans les sites de montagne.

Le drone pour ce type de chantier semblerait être une solution intéressante car il permettrait de réduire le temps passé sur le terrain. De plus la prise de photo aérienne prendrait une zone plus étendue qu'un levé terrestre classique et pourrait permettre d'éviter certains déplacements.

I.3.3 Domaine Public Hydraulique : pourquoi parle-t-on de bornage ?

Une des particularités de ce projet vient du client EDF, ancienne personne publique spécialisée et concessionnaire de barrages hydroélectriques. En 2004 la société s'est privatisée et depuis cette date, le statut de la propriété des barrages a été controversé et a fait l'objet de nombreuses jurisprudences.

Au titre d'une concession de service public, les biens gérés par EDF sont des biens de retours c'est-à-dire des biens, meubles ou immeubles, indispensables à l'exécution d'un service public et qui font retour, en principe gratuitement, à la personne publique en fin de concession. Les biens gérés ou acquis durant le contrat de concession sont donc propriété de la personne publique. [LEGIFRANCE1]

En théorie, la délimitation du domaine public s'effectue par une procédure d'alignement. Cette procédure constitue un acte unilatéral de la part de l'autorité administrative qui détermine ainsi les limites de son domaine.

Cependant, le cas des concessions hydroélectriques est particulier. En effet, dans le cahier des charges de concessions conclu entre EDF et l'Etat, il est fait mention de bornage de la concession à plusieurs reprises : premièrement dans l'article 15 du cahier des charges intitulé « bornage », il est indiqué qu'en cas de modification de la limite du domaine concédé pendant la durée de la concession, une opération de bornage contradictoire devra être effectuée sur la ou les parcelles à régulariser. Deuxièmement, le cahier des charges précise aussi que le concessionnaire, lors de la concession initiale, doit obligatoirement effectuer un bornage afin de réaliser un « état des lieux » du domaine concédé. [CDC, 2009]

La délimitation du domaine concédé consiste donc en une régularisation des achats ou cessions effectuées par EDF. Elle s'établit suivant les mêmes règles qu'un bornage privé mais l'alinéa deux de l'article 646 du code civil² ne s'applique pas puisque le bornage est fait aux frais du concessionnaire. L'ensemble des opérations de bornage suivent la procédure normalisée (convocation des parties, rédaction d'un PV) et sont faits aux frais du concessionnaire.

Les limites appliquées pour le bornage sont soit celles mentionnées dans les actes ou dans des anciens procès-verbaux de bornage soit les limites naturelles constatées sur le terrain et appuyées par la représentation cadastrale. Toutefois, les cas particuliers suivants sont distingués :

- Le bornage autour des retenues et des plans d'eau : lorsque la délimitation doit se faire autour des plans d'eau, les règles applicables au bornage ne sont pas les mêmes. Il n'existe pas de procédure de délimitation unique concernant le domaine fluvial artificiel. Cependant, dans le cadre des barrages de retenus, l'utilisation de la délimitation énoncée pour le domaine fluvial naturel semble pertinente. Cette hypothèse est soutenue par une décision du Conseil d'Etat du 21 avril 1971 [LEGIFRANCE2]. Le domaine fluvial artificiel est délimité longitudinalement par la hauteur des eaux coulant à pleins bords avant de déborder. On parle aussi de RN+1 c'est-à-dire la retenue normale du barrage augmentée de 1 m. [LEGIFRANCE3]
- Le bornage des biens non délimités (BND) : Les BND sont des propriétés qui n'ont pas été délimités contradictoirement. Aucune limite n'a pu être portée sur le cadastre car on ne sait pas où se trouve physiquement la limite. C'est une parcelle unique qui représente l'ensemble des propriétés contiguës [SENAT]. Au moment de la construction des barrages hydrauliques, il a été courant de pratiquer à des actes car il permettait un gain de temps administratif. Des actes étaient conclus sur lesquels sont mentionnés les propriétaires et la surface leur appartenant en pourcentage de parcelle. Aujourd'hui il faut traduire ces pourcentages et les placer physiquement sur la parcelle dans le but de régulariser la situation.
- La délimitation avec des propriétés appartenant à une autre personne publique : cette délimitation est nouvellement réglementée. Avant une procédure d'alignement était nécessaire pour définir la limite. Aujourd'hui, un Procès-Verbal de délimitation de la Propriété de la Personne Publique doit être mis en place.

² Article 646 du Code Civil : « Tout propriétaire peut obliger son voisin au bornage de leurs propriétés contiguës. Le bornage se fait à frais communs ». (Source : www.legifrance.gouv.fr)

II L'apport du drone

II.1 Analyse de l'état actuel

II.1.1 Généralités

Afin de savoir comment se déroulent en réalité les dossiers EDF aujourd'hui, 8 dossiers clôturés ou en phase finale de bornage ont été analysés. Ce travail, présenté dans le tableau 3 ci-dessous, permet d'apprécier les écarts entre les faits et les étapes théoriques proposées par le protocole d'EDF.

Chute de	Département	Durée	Etat	Terrain	Distance/ Toulouse	Temps de trajet
Nouaux	Hautes-Pyrénées (65)	2 ans (en cours)	PB	PPR : 1 fois PBI : 4 fois ³	200 km	2h10
Pont de la Reine	Hautes-Pyrénées (65)	2 ans (en cours)	PB	PPR : 1 fois PBI : 2 fois ³	200 km	2h10
Le Pouget	Aveyron (12)	1 an	PB	PPR : 1 fois PB : 2 fois ³	150 km	2h00
Plan d'Arem	Haute-Garonne (31)	3 ans	PB	PPR : 1 fois PBI : 3 fois ³	130 km	1h40
Orgeix	Ariège (09)	6 ans	FINI	PPR : 1 fois PBI : 4 fois	130 km	1h30
Vintrou	Tarn (81)	2 ans	FINI	PPR : 1 fois PBI : 2 fois	100 km	1h30
Labarre	Ariège (09)	5 ans	FINI	PPR : 2 fois PBI : 2 fois	85 km	1h
Moyenne		3 ans		PPR : 1,1 fois PBI : 2,7 fois	142 km	1h40

Tableau 3: Caractéristique des dossiers EDF

Le tableau ci-dessus révèle que dans tous les cas de figure, la réalisation des dossiers ne s'effectue pas conformément au protocole proposé par EDF. En moyenne, il faut retourner 2,7 fois sur le terrain en phase PBI.

Lorsque les dossiers se déroulent bien, comme c'est le cas pour les chutes de Le Pouget ou du Pont de la Reine, seulement une intervention terrain supplémentaire est suffisante. Pour d'autres dossiers en revanche, tel que la chute de Nouaux ou de Plan d'Arem, jusqu'à trois retours sur le terrain sont nécessaires avant d'arriver à la phase de bornage.

³ Le stade d'avancement « PB » implique qu'une sortie supplémentaire sur le terrain sera prévue pour l'implantation des bornes. Pour être sur la même base d'analyse que les dossiers clôturés, cette sortie a été comptabilisée dans la phase PBI, en prévision de l'élaboration du PB.

Ces anomalies de procédure sont la plupart du temps dues à des compléments de levés non anticipés par le donneur d'ordre et décelés lors de l'application du domaine concédés sur le plan cadastral.

Pour connaître plus précisément leurs conséquences, une analyse plus poussée des dossiers a été effectuée. L'exemple présenté dans ce rapport porte sur la chute de Nouaux, pour laquelle il a fallu retourner trois fois sur le terrain.

II.1.2 Exemple de la chute de Nouaux

Temps de trajet Toulouse/Nouaux = 2h

Détail du déroulement en phase PPR

Dates	Nature des travaux	Heures	Facturation
18/09/2013 au 18/10/2013	BUREAU	11h30	
21/10/2013 au 24/10/2013	Sortie TERRAIN n°1 1 semaine x2 personnes	60h00	
28/10/2013 au 28/01/2014	BUREAU	53h00	
total		124h30	6 996,42€ HT

Détail du déroulement en phase PBI :

Dates	Nature des travaux	Heures	Facturation
26/10/2015	Sortie TERRAIN n°5 1 jour x 2 personnes	7h30	
28/10/2015	Sortie TERRAIN n°4 1 jour x 1 personne	6h30	
12/11/2015 au 19/11/2015	BUREAU	7h00	
19/11/2015	Sortie TERRAIN n°3 1jour x 2 personnes	6h30	
20/11/2015 au 25/11/2015	BUREAU	6h00	
25/11/2015	Sortie TERRAIN n°2 1 jour x 2 personnes	6h30	
30/11/2015 au 16/12/2015	BUREAU	5h30	
total		45h30	4 545,00€ HT

Tableau 4: Déroulement de la chute de Nouaux

Le tableau 4 ci-dessus présente la répartition de la nature des travaux effectués sur le dossier de la chute de Nouaux.

Le plan présenté en annexe 3 permet de visualiser les éléments relevés lors des différentes sorties terrains.⁴

Les relevés réalisés lors de la première sortie terrain sont les plus conséquents. Ils couvrent la totalité du site, c'est-à-dire : la conduite forcée (levé des fenêtres permettant l'accès), le barrage de retenue d'eau et la centrale hydraulique.

Les relevés réalisés à l'occasion des autres sorties sont plus ciblés. Ce sont généralement des compléments de levés autour des ouvrages ou des profils.

II.1.3 Bilan

En règle générale, les éléments levés sur le terrain sont donc de taille importante ou assez étendu dans l'espace. Ils sont tous consécutifs aux travaux de modifications de terrain réalisés par EDF sur les chutes. Ce sont :

- Des ouvrages (barrages, dépendances, conduites forcées, fenêtres d'accès),
- Des routes ou chemins d'accès,
- Des clôtures ou murs de soutènements,
- Des talus ou enrochements,
- Des lignes de courbes de niveau.

Dans la phase de PPR, on remarque bien l'intention de vouloir lever l'ensemble des éléments nécessaires à la régularisation du domaine concédé. Malgré tout, lors de l'élaboration du PBI, en moins d'un mois, il a fallu retourner sur le terrain quatre fois pour compléter les levés.

Tous ces compléments de levés ont des conséquences financières pour le client qui règle tous les déplacements supplémentaires. Pour les quatre jours de déplacement, EDF a dû rajouter 3 600 € de plus sur le montant de la facture initialement prévue.

Pour GE Infra, bien que les déplacements soient facturés au client, les opérateurs mobilisés sur quatre jours distincts perdent du temps, principalement à cause des temps de déplacement. La figure 4 illustre la répartition du temps lors des compléments de levés : Sur les quatre journées de travail, le temps de déplacement total s'élève à 16 h pour seulement 11h de levé.

⁴ Confère annexe 3

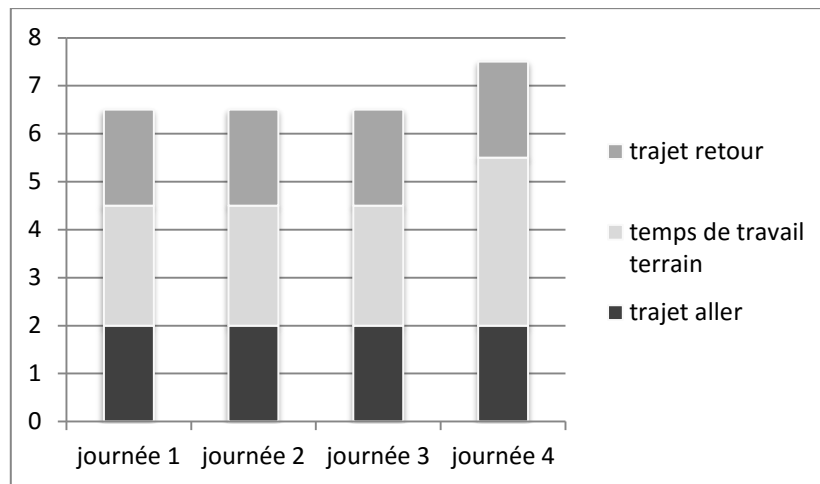


Figure 4: répartition du temps de travail sur les journées « TERRAIN » de la chute de Nouaux

La figure 5 décrit la répartition du temps une fois les levés regroupés. Elle permet de mettre en valeur le temps perdu par les déplacements des équipes sur le terrain. Nous pouvons voir que dans le cas de la chute de Nouaux, deux jours et demi de travail ont été sacrifiés dans le transport. Ceci est autant de temps perdu pour des travaux réalisés sur d'autres chantiers.

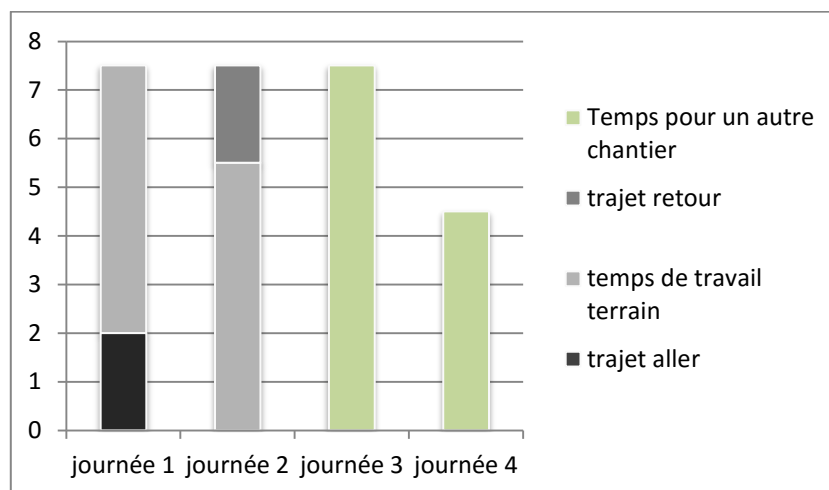


Figure 5: Optimisation du temps de travail sur la chute de Nouaux

A travers cette première analyse, on voit apparaître un problème d'organisation qui coûte de l'argent tant au client qu'à l'entreprise. Le drone a-t-il la capacité de résoudre ces problèmes et d'améliorer la gestion de ces dossiers ?

II.2 Les avantages financiers

II.2.1 Fixer les tarifs d'utilisation du drone

Pour faire accepter l'utilisation de la méthode « drone » au client EDF, il faut lui démontrer qu'il pourra faire des économies. En effet, à qualité de service égal, le client choisira la prestation la moins chère. Il faut donc pour le client, que cette méthode ait un avantage pécuniaire.

Actuellement, pour l'ensemble des prestations à effectuer sur le lot sud-ouest, un bordereau des prix a été négocié entre GE Infra et EDF. Ce bordereau est établi suivant les activités détaillées dans le CCTG. Les prix sont fixés selon le type d'activité demandé (par planche pour les plans, par ½ journées pour les levés, etc.). Avant chaque intervention, un devis est établi suivant le bordereau des prix.

La question du prix est une question importante quand on développe un nouveau service. Il faut à la fois que celui-ci rentre dans les coûts de l'entreprise et qu'il reste concurrentiel, c'est-à-dire attractif pour le client par rapport aux autres entreprises. L'exemple de business plan fourni par le crédit agricole nous explique comment fixer le prix de vente d'un produit. [Business plan]. Ce calcul s'établit selon la formule suivante :

$$\text{Prix de vente} = \text{coût de revient HT} + \text{marge commerciale}$$

Le coût de revient correspond aux différentes charges de l'entreprise et qui constituent la prestation de service. Il comprend :

- Le coût horaire ou journalier du service (déplacement sur le terrain, mobilisation de personnel, préparation du matériel, vol),
- Les frais de prospection,
- Les charges courantes (frais de location de bureau, électricité),
- Les frais de production de service incluant l'achat de matériel et son amortissement.

La marge commerciale, quant à elle, permet à l'entreprise d'être rentable, c'est-à-dire de gagner de l'argent sur la prestation.

Si l'on applique cette méthode pour fixer un prix de vente du service « drone » au client, il faut prendre en compte les coûts propres à l'entreprise. On distingue les coûts suivants :

❖ *Coût moyen d'un employé: 55 €/heure*

❖ *Frais de déplacement : 0.70 €/km*

❖ *Investissement matériel :*

	S1000 +			Phantom 4
	Prix à l'unité		total	
Batteries	250,00 €	x2	500,00 €	Compris dans l'achat du drone
Valise de protection	1200,00 €	x1	1200,00 €	190,00 €
Drone	4000,00 €	x1	4000,00 €	2000,00 €
APN	2500,00 €	x1	2500,00 €	Compris dans l'achat du drone
parachute	850,00 €	x1	850,00 €	/
Carte GNSS + 1 an d'abonnement TERIA	6000,00 €	x1	6000,00 €	/
Montage des éléments			2000,00 €	/
Tablette	300,00 €	x1	300,00 €	
Logiciels / licences			gratuit	gratuit
Total			17 350,00 €	2 127,00 €
Amortissement (sur 5 ans)			3 470,00 €	425,40 €
Coût à facturer par prestation	(Estimation de 25 chantiers par an) 140,00 €			(Estimation de 10 chantiers par an) 45 €

Tableau 5: Investissement matériel

- ❖ *Assurances : 300 € par machine par an,
soit pour le phantom 4 , avec 10 chantiers par an : 30 €/prestation
soit pour le S1000+, avec 25 chantiers par an : 12€/prestation*

Le calcul du coût total est basé sur les éléments suivant : l'utilisation du drone sur une journée, mobilisant deux techniciens et nécessitant une demi-journée de préparation de la mission.

Coût total pour l'utilisation du drone S1000+ :

$$8h*2 \text{ pers}*55 \text{ €} + 4h*1 \text{ pers}*55 \text{ €} + 140 \text{ €} + 12 \text{ €} = \mathbf{1\ 252,00 \text{ €}}$$

Coût total pour l'utilisation du drone Phantom 4 :

$$8h*2 \text{ pers}*55 \text{ €} + 4h*1 \text{ pers}*55 \text{ €} + 45 \text{ €} + 30 \text{ €} = \mathbf{1\ 175,00 \text{ €}}$$

Le prix de vente du service, pour qu'il soit rentable, doit être facturé 1252 € lors de l'utilisation du drone S1000+ et 1175 € lors de l'utilisation du Phantom4.⁵

⁵ Les prix de revient présentés sont des prix estimatifs calculés à partir d'éléments approximatifs. Ils ne tiennent pas compte de la marge commerciale de l'entreprise et ce ne sont pas les prix appliqués par la société.

Dans le but de tester la cohérence des prix proposés par rapport au marché, une recherche sur les tarifs pratiqués par la concurrence a été effectuée. Elle permet de savoir si le prix fixé permet de rentrer en concurrence avec les autres acteurs du marché. Cette recherche s'est faite à partir de plusieurs sources : le bordereau des marchés publics attribués pour des prestations de photogrammétrie par drone et les tarifs indiqués sur des sites concurrents.

Les avis d'attributions de marché public ne sont malheureusement pas assez détaillés pour pouvoir déterminer le montant de la valeur de la prestation du drone. La comparaison n'a donc été établie qu'à partir des tarifs de sociétés concurrentes.

Toutes les sociétés présentées dans le tableau 6 ont été sélectionnées car elles proposent soit directement des prestations de photogrammétrie aérienne soit de la sous-traitance de matériel à des géomètres. De plus le matériel utilisé par ses sociétés est proche de celui acquis par la société. La comparaison a été effectuée avec des drones proches du S1000+.

Les prix affichés sur les sites prennent tous en compte les mêmes types de charges, à savoir :

- Le matériel,
- Le pilote,
- La gestion des autorisations de vol,
- Les prestations photographiques,
- La livraison des images.

Société		Matériel	Tarifs		Ecart
Nom	Localisation		Durée	Forfait	
Aerofilm	Rhones (69)	octocoptère	1 journée	1390 €	-138,00 €
Drone-pictures	Marseille (13)	DJI S1000	autre	A partir de 590 €	+ 72,00 €
Hexadrone	St-Juste-Malmont (43)	DJI S900	1 journée	1290 €	-32,00 €
Aer-drone	Lure (70)		autre	A partir de 180 €	Non pris en compte
Cliche et drone	Tarbes (65)	Hexacoptère	½ journée	550 €	+ 152,00 €
Flying eyes	Vallauris (06)	DJI S1000	1 journée	1800 €	- 542,00 €
Freeway drone	Paris (75)		1 journée	1200 €	+52 €
Ecart total moyen :					- 74,00 €

Tableau 6: Concurrence

Le prix fixé pour l'utilisation du S1000+ semble cohérent par rapport au prix du marché actuel. Il est en moyenne inférieur de 74 € par rapport au prix des concurrents. L'entreprise GE Infra peut donc à partir de ces résultats, établir une marge sur son prix d'utilisation.

II.2.2 Application sur la chute de Nouaux

Dans le but d'apprécier les avantages financiers de l'utilisation du drone, une mise en pratique sur un chantier particulier a été effectuée. Le chantier de Nouaux, pour lequel il a fallu retourner 3 fois sur le terrain, est à nouveau pris comme exemple afin de constater les différences entre l'ancien dossier et le dossier simulation.

Détails du devis n°1 : phase PPR

- Levés par drone S1000+ : Prix forfaitaire pour 2 journées, comprenant trajet et vol du drone, déplacement de 2 personnes et sortie du GPS pour prendre les points de contrôle et d'appui = $0.7 \text{ €/km} \times 400 \text{ km} + 1252,00 \text{ €} \times 2$ **2 784,00 €**
- Restitution photo zone moyenne = 13.5 €/ha soit 13.5×13 **175,50 €**
(Zone à lever d'environ 130 000 m² = 13 ha)
- Achat des planches cadastrales, assemblage **1 209,70 €**
- Encartage **428,78 €**
- Réunions **824,56 €**

Total = 5 422,00 € HT

Détail du devis n°2 : phase PBI

Durant la phase PBI, les retours terrains ne seraient plus nécessaires mais seraient remplacés par des heures de restitution soit un montant total de :

$4\,545,00 \text{ €} - 3\,150,00 \text{ € (journées terrain)} + 13.5 \text{ €} \times 1 \text{ ha} = 1\,422,00 \text{ € HT}$

II.2.3 Bilan

II.2.3.1 Pour le client

Si l'on compare le montant total de la facture présentée dans la partie II.1.2 et celle établie par la simulation précédente, on observe un premier avantage de l'utilisation du drone sur le chantier pour le client : la réduction des coûts.

En effet, le montant total des factures établies pour cette chute est de 11 541,42 €, hors le montant total simulé atteint les 6 844 €.

Bien qu'au premier abord, l'utilisation du drone sur une journée est plus chère que l'envoi de deux techniciens sur le terrain, EDF voit réduire sa facture finale de 4 697 € soit presque 42% de la note initiale.

En plus d'avoir un attrait financier pour le client, cette méthode permet également d'obtenir des orthophotographies actuelles de la chute. Dans les anciens dossiers, les orthophotographies étaient issues des banques de données IGN et n'étaient donc pas toujours à jour.

II.2.3.2 Pour l'entreprise

Si la baisse du montant de la facture est un avantage pour le client, cela peut s'apparenter à une baisse d'entrée d'argent pour l'entreprise. Comme présenté dans la partie II.1.3, l'attrait de cette technologie pour l'entreprise réside plutôt dans l'optimisation du temps passé sur le terrain.

Nous pouvons remarquer, grâce à la simulation, que le drone permet une réduction conséquente du temps passé sur le terrain : en effet, pour des temps de bureau similaires, le temps de travail terrain a lui été divisé par cinq. Le relevé terrestre, qui prenait une semaine à laquelle on additionnait 4 jours de levé en plus, est effectué avec le drone en seulement 2 jours : l'équipe de technicien économise près de 70 heures de travail soit presque une semaine de libre qui peut être consacrée à un autre dossier.

L'entreprise gagne une bien meilleure optimisation de son temps de gestion des dossiers et de facto, le nombre de dossiers traités dans l'année augmente.

II.3 Les avantages techniques

II.3.1 Une capacité technique intéressante

II.3.1.1 Obtention d'une bonne résolution

La qualité des images issues des levés photogrammétriques est dépendante de plusieurs facteurs : la résolution de l'image et sa précision.

La résolution, si l'image n'est pas ré-échantillonnée, correspond à la taille d'un pixel sur le terrain. Elle dépend des caractéristiques du capteur de l'APN et des paramètres de vol.

La précision correspond au positionnement de chacun des pixels dans l'image par rapport au terrain. Elle est appelée précision absolue.

Le tableau 7 présente les résolutions obtenues partir des APN respectifs de drones et des paramètres de vol extrêmes (hauteur de vol maximale autorisée) issus des scénarii de vol. L'APN fixé au S1000+ permet d'obtenir une résolution environ 3 fois plus petite que celle de l'APN du Phantom 4. Ceci est dû au nombre de pixels présent sur le capteur. En effet, pour une taille identique (24 x 36 mm²), le sony A7r possède 42 Mpixels pour seulement 12Mpixels pour le phantom.

		S1000+	Phantom 4
S1	H = 150 m	2,0 cm	6,7 cm
S2	H= 50 m	0,6 cm	2,3 cm

Tableau 7 : Résolution de l'image

Nous pouvons remarquer que le levé par drone permet d'obtenir une résolution de l'ordre du centimètre. Nous pouvons alors dire que ces résultats sont de bonne qualité en comparaison avec les résolutions obtenues par avion, qui ont des valeurs de l'ordre de 10 cm. Cette amélioration est principalement due aux hauteurs de vol plus basses du drone.

L'avantage d'obtenir des images avec une bonne résolution réside dans la capacité à distinguer des petits détails sur l'image. En photogrammétrie, il est courant de dire que la résolution de l'image doit être au moins trois fois plus petite que de la dimension de l'objet à détecter. Si nous prenons le raisonnement à l'envers, nous pouvons dire en première approximation que les objets à détecter doivent mesurer au moins trois fois la résolution calculée précédemment, soit :

$$\text{Taille l'objet} = R \times 3$$

Ceci permet d'assurer que les éléments sont visibles sur la photographie et qu'ils pourront par la suite être restitués.

Taille des éléments	S1000+	Phantom 4
S1	6,0 cm	20,1 cm
S2	1,8 cm	6,9 cm

Tableau 8 : Taille des éléments sur le terrain

Le tableau 8 présente la taille minimale des objets à détecter sur le terrain en fonction de la résolution.

A priori, à partir des photographies prises par drone, l'ensemble des éléments à lever présentés dans la partie II.1.2 seront visibles car ce sont de gros objets. Cependant si des éléments du terrain, importants pour le plan, sont inférieurs à cette taille, ils devront être relevés avec une autre méthode par précaution.

II.3.1.2 Adaptabilité au terrain

Grâce au drone et à sa maniabilité, nous pouvons améliorer des caractéristiques photogrammétriques qu'il serait difficile de gérer avec la photogrammétrie par avion. En effet, certains paramètres de gestion du vol sont accessibles et modifiables plus facilement. Il est notamment possible de modifier la hauteur de vol ou encore de « demander » au drone de s'arrêter au niveau des sommets de PDV. Ces actions ont plusieurs avantages qui sont présentés ci-dessous :

- **variation de la hauteur de vol** au cours d'un plan de vol:

Avec un avion, la hauteur de vol est plus ou moins constante. Hors, dans des zones à fortes dénivelées, cela peut poser un problème au niveau du recouvrement entre les clichés. En temps normal, la préparation du plan de vol passe par ce calcul de la dénivelée maximale afin de s'assurer que le recouvrement minimal est respecté. Si ce n'est pas le cas, il faut alors adapter le plan de vol et resserrer la distance entre les axes de vol. La variation de dénivelée engendre également une variation de la taille du pixel au sol et donc une variation de l'échelle en fonction de l'endroit du cliché.

Le drone permet de résoudre ou du moins d'atténuer ces effets grâce à la programmation de vol. Les programmeurs de vol utilisent les services de cartographie en ligne gratuit pour connaître la forme du terrain. Une fois les paramètres de vol complétés, ils adaptent alors la position du drone pour que la hauteur de vol soit la même partout. L'illustration 6 ci-dessous est tirée du logiciel UgCS et montre le profil de vol créé par le logiciel suite à la programmation. Nous pouvons apercevoir que la hauteur de vol du drone suit les variations du terrain.



Figure 6: Profil d'élévation issu du logiciel UgCS

- arrêt du drone sur les sommets de PDV :

Ce réglage a un double intérêt : réduire voire même annuler l'effet de filé sur les images et avoir une meilleure précision du positionnement des centres de PDV. Cela permettrait donc d'obtenir des images de meilleure qualité mais aussi une trajectographie réelle mieux déterminée. A termes, ce gain de précision permettrait de réduire le nombre de points d'appuis sur le terrain [DAAKIR, 2015]

L'arrêt du drone sur les sommets de PDV permet lui aussi d'assurer le recouvrement entre les clichés.

Les facteurs qui peuvent aujourd'hui influencer le recouvrement des images sont donc :

- les effets de roulis, tangage et lacet :

Ces effets sont induits par le mouvement du drone en vol. Ils sont mesurés à l'aide de trois gyroscopes.



Figure 7: Effet de roulis, lacet et tangage.
Source: www.tpe-blog-tlm.eklablog.com

- le positionnement du GPS :

Un contrôle de l'influence de cette précision a donc tout de même été effectué.

Le CCTG tolère une variation de $\pm 5\%$ du recouvrement latéral et longitudinal. Les précisions de positionnement du vol stationnaire des drones sont présentées dans la partie I.2.2. Les figures 7 et 8 suivantes montrent l'influence de la variation du positionnement sur le recouvrement.

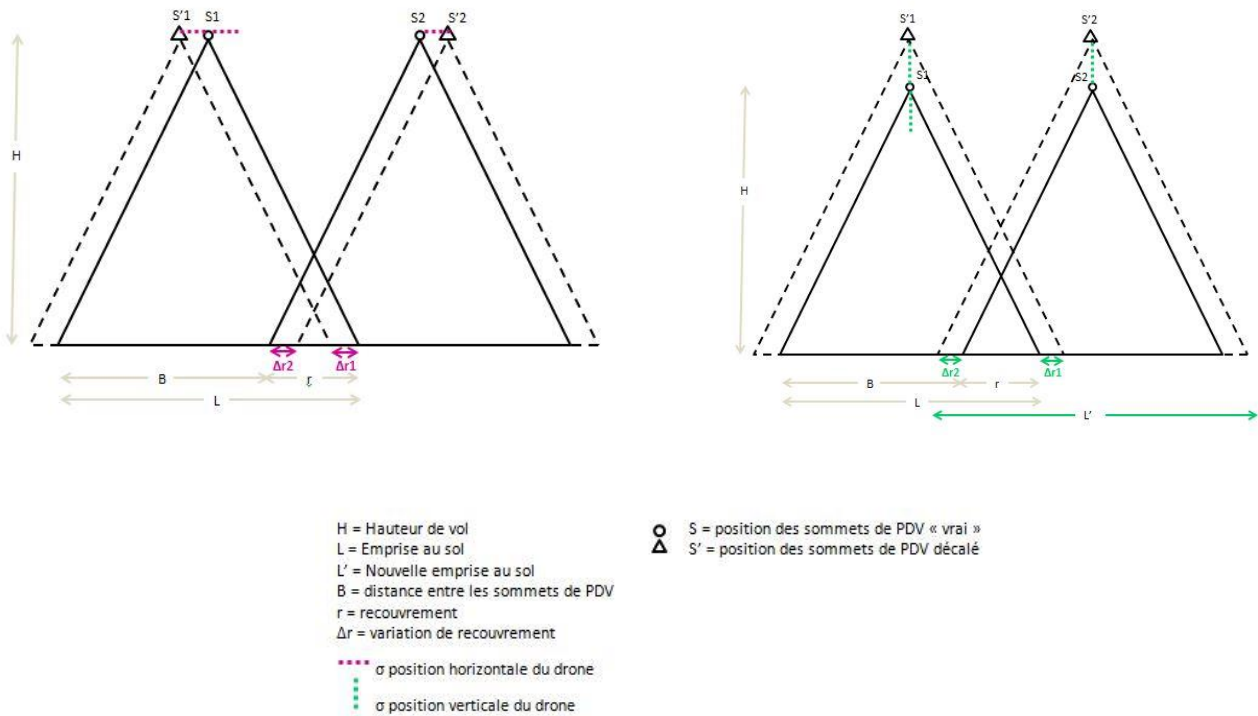


Figure 8: Variation de position du drone horizontale (à gauche) ou verticale (à droite).

Dans tous les cas, il faut que la variation engendrée soit inférieure à 5%, c'est-à-dire que $\Delta r_1 + \Delta r_2 < 0.05 * r$.

Dans le cas d'un déplacement horizontal, les Δr correspondent aux décalages du drone c'est-à-dire à sa précision de positionnement horizontale.

Dans le cas d'un déplacement vertical, les Δr correspondent à la variation d'emprise au sol du capteur, soit : $\Delta r = L' - L$ pour le recouvrement latéral et $\Delta r = l' - l$ pour le recouvrement longitudinal.

II.3.2 Un outil d'aide à la préparation du bornage

II.3.2.1 Problématique

En matière de bornage, et tout particulièrement dans le cas des bornages EDF, il est essentiel de se rappeler les éléments suivants :

- Les limites sont généralement matérialisées sur le terrain par des bornes. Les points non matérialisables sont fournis sous forme de points numériques au client.
- L'implantation des bornes se fait à partir de coordonnées théoriques issues du PBI. Ce plan est principalement établi par application cadastrale. Le cadastre a été « recalé » à partir des éléments levés sur le terrain (souvent des ouvrages).
- Lors de l'implantation des bornes, il est fréquent que leur position soit « ajustée » à la réalité du terrain.

Cet ajustement n'a pas d'incidence sur la validité du bornage puisque elle est réalisée de manière contradictoire et que la « nouvelle » position de la borne est relevée après sa pose puis modifiée sur le plan de bornage final.

En cas d'écarts trop importants entre la limite cadastrale et la limite du bornage, un DMPC est réalisé pour régulariser la situation.

Le bornage se définit alors en deux étapes distinctes :

- La préparation du bornage, qui passe par la définition numérique des points de limite,
- Et la réalisation du bornage qui passe par la matérialisation, quand cela est réalisable, de la limite sur le terrain.

Dans cette procédure, l'avantage de la matérialisation sur le terrain est que les bornes sont relevées après implantation, donc la précision de leurs coordonnées dépend uniquement du mode d'implantation. Par contre, le problème se pose lorsque des points numériques sont fournis. Il faut dans ce cas être sûr de la qualité du plan de préparation de bornage.

La qualité du plan dépend des méthodes de levé et de dessin employées. Elle peut se vérifiée par le calcul de sa classe de précision.

Avant de déterminer si l'utilisation du drone a un impact positif sur l'action de bornage, il faut, dans un premier temps, analyser la méthode actuellement mise en place. Cela permettra d'identifier les points forts et les points faibles de cette méthode. Utilisée comme référence, nous pourrons ensuite savoir en quoi le drone peut être un atout.

II.3.2.2 Respect de la classe de précision

Le CCTG indique que les plans doivent être livrés avec une classe de précision de 20 cm. (CP [20 cm]). Cette indication dans le CCTG peut être traduite en volonté de la part d'EDF d'assurer une certaine justesse des mesures.

La justesse des mesures est à différencier de la précision. En topographie, on parle souvent de précision c'est-à-dire d'un intervalle de mesure dans lequel le point peut se situer. Elle dépend des appareils de mesure utilisés mais aussi de l'opérateur et de la technique de mesure mise en place.

Pour autant, il est également important de s'interroger sur la justesse des mesures réalisées. Cette notion s'apprécie par l'appartenance du point vrai à l'intervalle de précision qui est associé à la mesure.

Ces notions associées au plan peuvent être exprimées de la manière suivante : un point dur, de type angle de bâtiment, est calculé par la méthode de restitution. Cette mesure est précise à 2 cm à 1σ . Lorsque le point est implanté sur le terrain, l'écart entre ce point et l'angle vrai du bâtiment doit être compris dans l'intervalle de 2 cm : alors on peut dire que le point calculé est juste.

Les calculs du contrôle de CP se fait grâce à l'article 6 de l'arrêté du 16 septembre 2003. [LEGIFRANCE4]

Pour qu'un chantier rentre dans la classe de précision [20 cm], il faut que les trois conditions suivantes soient remplies :

1. La moyenne des écarts en position soit inférieure à l'équation 1.
Equation 1 = $[XX] \times (1 + 1/(2 \times C^2))$
2. Que le nombre d'écarts en positions soit inférieur à N' et que leur valeur soit inférieure au seuil 1

$$N' = 0.01 \times N + 0.232 \sqrt{N}$$

$$\text{Seuil 1} = k \times [XX] \times (1 + (1/2 \times C^2))$$

Avec N = nombre d'écarts et k le coefficient en fonction du nombre de composante des points de contrôles.

k1	z	3.23
k2	xy	2.42
k3	xyz	2.11

3. Qu'aucun écart en position n'excède le seuil 2.

$$\text{Seuil 2} = 1.5 \times \text{seuil 1}$$

Dans le cadre des dossiers EDF, le calcul d'aérottriangulation en bloc conduit à un contrôle en trois dimensions du plan. Le coefficient utilisé sera donc k3.

Les trois conditions à remplir pour respecter la classe de précision [20 cm] sont :

1. **L'écart moyen en position 3D de l'échantillon doit être inférieur à 22,5 cm.**
2. **Le nombre N' ne doit pas dépasser 72,7 cm.**
3. **Aucun écart en position ne doit dépasser 1,09 m.**

Une classe de précision de [20 cm] n'est pas trop exigeante et permet donc d'obtenir des écarts à la moyenne de l'ordre du mètre.

Pour que les plans réalisés aient plus de chance de rentrer dans cette classe de précision, il faut que la méthode de levé utilisée soit plus précise.

II.3.2.3 Le plan de bornage aujourd'hui

Actuellement, les éléments figurant sur le PBI ont deux origines. Ils sont, soit issus des levés ponctuels demandés par EDF, soit, pour le reste du domaine concédé, issu de l'application du cadastre. Le problème posé par cette situation est le suivant : la précision des coordonnées théoriques à implanter lors du bornage varie en fonction du type d'éléments utilisés pour leur détermination.

- ❖ Si les coordonnées théoriques sont issues des éléments levés par tachéométrie classique alors, on peut s'attendre à la précision suivante :

En planimétrie :

Les coordonnées planimétriques d'un point sur le plan sont déterminées de la manière suivante :

$$X_m = X_s + D(SM) \times \sin(G(SM))$$

$$Y_m = Y_s + D(SM) \times \cos(G(SM))$$

Avec $X(M), Y(M)$ = coordonnées planimétriques inconnues du point M
 $X(S), Y(S)$ = coordonnées de la station S depuis laquelle le point M a été levé
 $D(SM)$ = distance horizontale entre les points S et M
 $G(SM)$ = gisement entre les points S et M

La précision associée à ce type de mesure se calcule de la manière suivante :

$$\sigma^2(X(M)) = \sigma^2(X(S)) + \sin(G(SM)) \sigma^2 D(SM) + D(SM) \times \cos(G(SM)) \sigma^2 G(SM)$$

$$\sigma^2(Y(M)) = \sigma^2(Y(S)) + \cos(G(SM)) \sigma^2 D(SM) - D(SM) \times \sin(G(SM)) \sigma^2 G(SM)$$

Avec : $\sigma^2(X(M)), \sigma^2(Y(M))$ = précision sur les coordonnées planimétriques du point M
 $\sigma^2(X(S)), \sigma^2(Y(S))$ = précision sur les coordonnées planimétriques du point S
 $\sigma^2 D(SM)$ = précision sur la mesure de distance SM
 $\sigma^2 G(SM)$ = précision sur la mesure de l'angle SM

Pour un appareil de mesure de type Leica TDA5005, la précision annoncée par le constructeur est de 1 mm + 2 ppm pour les distances ($\sigma D = 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$) et de 0,15 mgon pour les mesures de distance ($\sigma \text{angle} = 0,15 \text{ mgon}$). Le point S est rattaché par la méthode GNSS temps réel. La précision annoncée sur ce point est donc de l'ordre de 2 cm.

Soit, pour un point M situé à une distance de 100 m de la station, avec un angle vertical d'une valeur de 100 gon et un gisement de 20 gon :

$$\sigma^2(X(M)) = 0.02^2 + 2.7 \times 10^{-6} = 0.0004 \text{ m}$$

$$\sigma(X(M)) = 2 \text{ cm}$$

La précision planimétrique des points issus du levé est de l'ordre de 2 cm à 1σ .

En altimétrie :

L'altitude d'un point déterminé par nivellement indirect se calcule de la manière suivante :

$$Z(M) = Z(S) + ht + Di(SM) \times \cos(V) - hi$$

Avec : $Z(M)$: altitude du point M

$Z(S)$: altitude de la station S

Di : distance inclinée entre S et M

V : angle vertical

Ht : hauteur des tourillons

Hi : hauteur du prisme

La précision associée à ce type de mesure se calcule de la manière suivante :

$$\sigma^2 Z(M) = \sigma^2 Z(S) + 2 \sigma^2 ht + \cos(V) \sigma^2 Di - Di \times \sin(V) \sigma^2 V$$

La précision altimétrique de rattachement de la station S par méthode de GNSS temps réel, est de l'ordre de 5 à 10 cm. Pour le même appareil, avec une précision de détermination de l'ordre du millimètre ($\sigma ht = \partial hi = 0.001 \text{ m}$), on obtient :

$$\sigma^2 Z(M) = 0.07^2 + 1.9 \times 10^{-6} = 0.0049 \text{ m}$$

$$\sigma Z(M) = 7 \text{ cm}$$

La précision altimétrique issue du levé est de l'ordre de 7 cm.

A travers ces équations, on remarque que la précision des coordonnées dépend de la précision sur les coordonnées du point de station et de la précision sur les mesures. Le facteur déterminant est celui des coordonnées du point S.

Son positionnement dépend de la méthode de géoréférencement. En cas d'erreur sur cette mesure, cela aura une conséquence sur le positionnement du plan dans le système général : on parle ici de précision absolue.

La précision sur les mesures va dépendre, quant à elle, du type d'appareil d'utilisé, mais aussi de l'acuité de l'opérateur à prendre les mesures. La variation de ses paramètres va influencer sur la précision de positionnement des points du plan les uns par rapport aux autres : on parle alors de précision relative.

❖ Si les coordonnées sont issues des limites des planches cadastrales recalées :

Le cadastre a initialement été créé pour calcul l'assiette foncière de la propriété des personnes. Sa vocation n'en fait pas un document valable juridiquement pour la définition des limites de propriété. Dans les zones de montagne, le relief étant très marqué, son positionnement est plus ou moins précis. Sa précision peut donc varier de **quelques centimètres à plusieurs mètres**.

Malgré son imprécision, dans certains cas comme pour les dossiers EDF, le cadastre est pourtant utilisé pour la détermination préalable des limites lors des procédures de bornage. En l'absence de tout autre document, il fait partie des indices que le géomètre peut utiliser pour déterminer une limite présumée.

Nous nous trouvons donc face au constat suivant : les éléments levés, hormis les profils qui permettent la délimitation des retenues d'eau, ne sont pas souvent utiles pour la détermination des limites. Ils permettent plutôt de « recaler » le cadastre. Le bornage s'effectue donc souvent à partir des limites cadastrales, dont la précision est variable.

Le plan de bornage est finalement dessiné avec des disparités. Les points numériques générés ont donc de forte chance de ne pas rentrer dans la classe de précision demandée par EDF.

En conclusion, nous pouvons dire les bornes théoriques calculées à partir de l'application cadastrale en l'absence de tout autre indice ne permet pas une préparation au bornage optimale et surtout ne permettent pas d'assurer la qualité du bornage. Le géomètre devra donc obligatoirement s'adapter sur le terrain. Le problème se pose lorsqu'il va livrer des points numériques à partir de ces données.

Pour une meilleure préparation, il faudrait que l'ensemble du domaine concédé soit relevé. Ce procédé est impossible vu l'ampleur des surfaces à lever.

II.3.2.4 La préparation avec le drone

Dans un plan réalisé suite à des photographies par drone, les points sont déterminés à partir de l'intersection des rayons homologues perspectifs :

$$M(X,Y,Z) = S1(X,Y,Z) + \lambda(mS1) = S2(X,Y,Z) + \lambda V2$$

$$\Leftrightarrow M(X,Y,Z) = S1(X,Y,Z) + \lambda x S1(X,Y,Z) - \lambda m(x,y,z) = S2(X,Y,Z) + \lambda x S2(X,Y,Z) - \lambda m(x,y,z)$$

Avec $S1(X,Y,Z)$: coordonnées du sommet de prise de vue n°1
 $M(X,Y,Z)$: coordonnées terrain du point M
 $m(x,y,z)$: coordonnées image dans le cliché du point M

La précision associée à ce type de mesure se calcule de la manière suivante :

$$\sigma^2(M) = (\lambda+1) \sigma^2(S1) + \lambda \sigma^2(m)$$

Avec : $\sigma^2(M)$ = précision des coordonnées (X,Y) du point M
 $\sigma^2(S1)$ = précision des coordonnées (X,Y) du sommet de PDV S1
 $\sigma^2(m)$ = précision sur les coordonnées (x,y) du point m

Ceci est vrai pour un couple de photographies isolées. Cependant, en photogrammétrie, l'ensemble des images sont traitées en bloc pendant le calcul d'aérottriangulation. Ces calculs de compensation par faisceaux permettent de compenser les erreurs de calculs sur l'ensemble des points.

Une fois le modèle formé, le plan est dessiné en restitution par les opérateurs.

La précision finale du plan va donc dépendre de deux facteurs : la précision du calcul d'aérottriangulation puis de la restitution.

❖ La précision du calcul d'aérottriangulation :

Pour connaître la précision de positionnement du bloc et donc du calcul d'aérottriangulation, il faut regarder les résultats obtenus sur les points de contrôles. Dans son mémoire de 2015, B. VARIN présente les résultats d'un calcul d'aérottriangulation en milieu urbain à partir de six points de contrôles. Ses résultats sont présentés dans le tableau 9 suivant :

	Plus gros écart	RMS (m) (écart moyen)
X	2,4 cm	1,2 cm
Y	1,6cm	1,6cm
Z	8,3cm	4,4cm

Tableau 9: Résultats d'un calcul d'aérottriangulation par drone

Ces résultats montrent bien que l'on peut obtenir une précision proche de l'outil GNSS temps réel. Cependant, nous ne pouvons appliquer ces résultats tels quels pour notre dossier car : dans notre cas, l'APN utilisé sera de meilleure qualité, ce qui en théorie peut améliorer les précisions, mais le terrain de mesure se situe en montagne, ce qui peut dégrader le processus de corrélation automatique des points de liaison et donc dégrader la précision du bloc.

Pour avoir une idée de la précision que l'on peut obtenir sur un calcul d'aérottriangulation en zone de montagne, avec un APN plus performant qu'une Gopro, nous analysons les résultats issus d'un levé photogrammétrique par avion, en zone de montagne. On obtient les résultats suivants :

	Plus gros écart	RMS (cm) (écart moyen)
X	4,7 cm	2,7 cm
Y	5,5 cm	2,7 cm
Z	7,0 cm	3,3 cm

Tableau 10: Résultats d'un calcul d'aérottriangulation par avion

On peut imaginer que les résultats issus du drone S1000+ seront des résultats intermédiaires entre les deux exemples présentés ci-dessus.

❖ La précision de restitution dépend de plusieurs facteurs tels que le pointé de l'opérateur, sa capacité à voir en 3D, la qualité de la photographie, etc.

En planimétrie, on estime qu'un opérateur peut placer un point avec une précision d'un demi-pixel.

En altimétrie, la précision va également dépendre de la géométrie des images entre elles. Le facteur le plus déterminant est le rapport base / hauteur de vol. En effet, le triangle formé à partir de la base et des rayons perspectifs, et dépendant de la hauteur de vol, ne doit pas être ni trop aiguë ni trop obtus, sous peine de rendre la détermination de l'intersection des rayons difficile pour l'opérateur.

Soit :

$$\sigma M(X,Y) = \sigma_{\text{pointé}} * R \text{ et } \sigma Z(M) = \sigma_{\text{stéréo}} \times (H/B) \times R$$

Avec : σ_p = précision de restitution planimétrique

σ_z = précision de restitution altimétrique

σ_{pl} = précision du pointé linéaire

σ_a = précision du pointé stéréoscopique

R = résolution terrain

$\sigma_{pl} = \sigma_a = 0.5$ pixel environ

On obtient : $\sigma M(X,Y) = 1 \text{ cm}$

$\sigma M(Z) = 5 \text{ cm}$

(Application numérique avec comme valeurs H= 150 m, f= 0,035 m et R= 0,02 m)

Au final, le plan issu des levés par photogrammétrie a une précision cumulée de la restitution et de l'aérotriangulation. On obtient donc une précision en planimétrie de l'ordre de 3 cm et une précision en altimétrie de l'ordre de 10 cm.

II.3.2.5 Bilan

Suite à ses comparaisons, nous obtenons sans surprise le classement suivant pour l'élaboration de plan de qualité : levé classique, levé par drone, application cadastrale.

L'avantage du levé par drone réside dans la fiabilité et l'homogénéité de l'ensemble des points du plan. En utilisant cette méthode, on remarque que les points contrôlés rentrent tous dans la CP [20 cm].

Les prises de vues permettent donc d'obtenir une cartographie actuelle, avec des données plus justes.

III Utiliser le drone de manière optimale

III.1 Quand utiliser le drone

Le drone est un outil puissant pour le géomètre. Il permet d'obtenir des résultats de qualité à moindres coûts. Cependant, il est intéressant de se questionner sur son utilisation dans le cabinet.

L'étude du moment de l'utilisation du drone s'est basée sur une comparaison entre les différentes méthodes de lever possible sur les chantiers EDF, à savoir : la photogrammétrie par avion, la photogrammétrie par drone ou le levé classique.

Pour évaluer quelle méthode est la plus avantageuse, différents paramètres ont été utiles. Le premier paramètre pris en compte est le temps de travail sur le terrain et le second le coût générer par cette intervention sur le terrain. La base de l'estimation a été effectuée à partir des surfaces potentielles à lever.

La méthode la plus avantageuse pour une surface donnée sera alors celle qui prendra le moins de temps sur le terrain et qui coûtera le moins cher à l'entreprise. L'ensemble des paramètres pris en compte pour les calculs et la réalisation de ces graphiques sont présentés en annexe 4.⁶

Les figures 10 et 11 présentent le temps de travail sur le terrain, en fonction de la surface à lever et du mode de levé. Le calcul prend exclusivement en compte le temps passé sur le terrain pour effectuer les levés. Les figures 12 et 13 présentent le coût engendré par ces méthodes en fonction de la surface.

Pour une meilleure lecture des figures 11 et 13, la méthode de levé classique n'a pas été prise en compte. En effet, le temps de travail sur le terrain et son prix est trop élevés par rapport aux deux autres méthodes : pour lever 20 ha, il faut approximativement six jours aux opérateurs et déboursier presque 5400 € alors que le temps terrain drone et avion se compte en heures pour un prix maximal de 4000 €.

⁶ Confère annexe 4

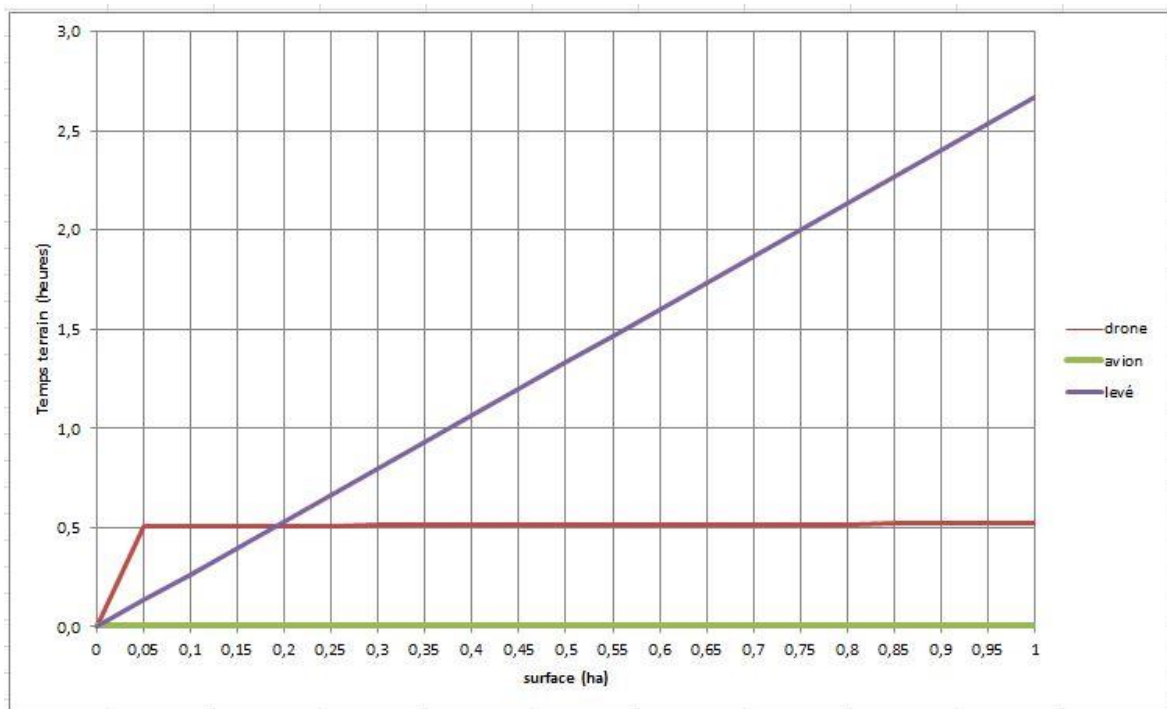


Figure 9: Temps terrain pour une surface < 10 000 m²

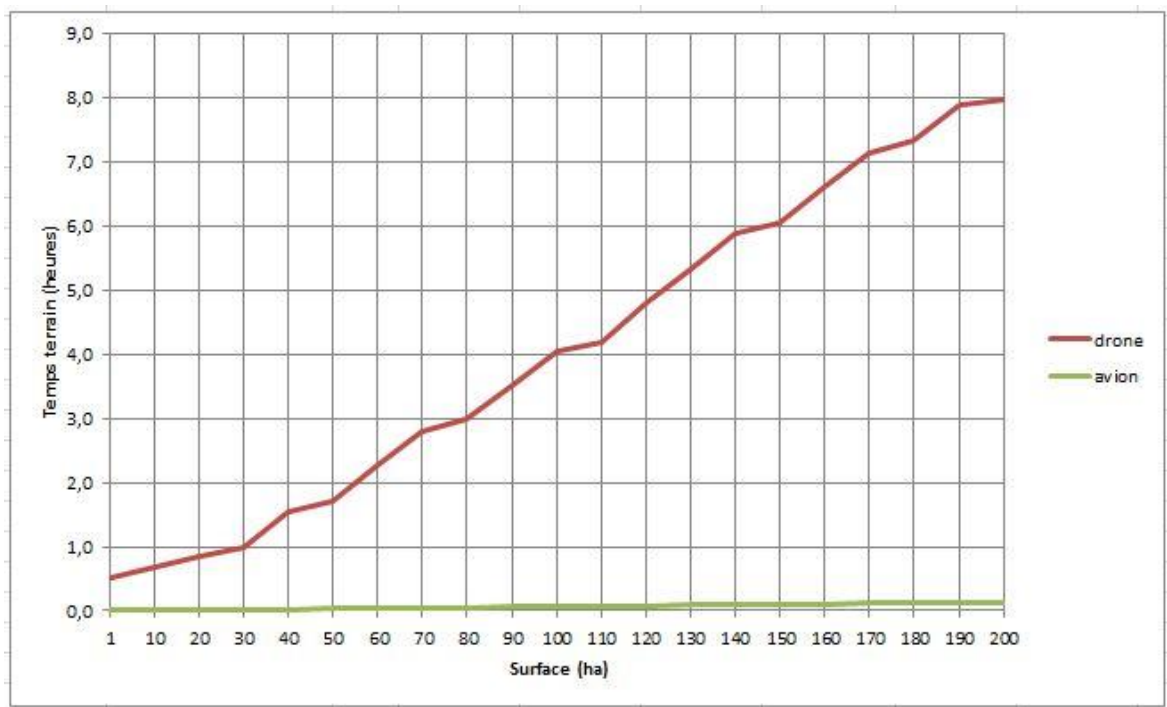


Figure 10: Temps terrain pour une surface comprise entre 1 ha et 200 ha.

Nous pouvons remarquer que les PDV par avion permettent de couvrir une grande surface très rapidement. Le levé classique, en comparaison avec les deux autres méthodes, peut être considéré comme une méthode lente d'acquisition des données.

Les prix des différentes prestations, présentés sur la figure 12 et 13, sont calculés en fonction des différents modes de levés. Pour l'avion, il prend en compte : l'affrètement, le déplacement de l'avion de la base vers le site et la surface de la zone à lever. Le mode de calcul des prix du drone et du levé sont différents : ils sont calculés à partir d'une base forfaitaire à la demi-journée. Dans ce prix, les déplacements sont pris en compte.

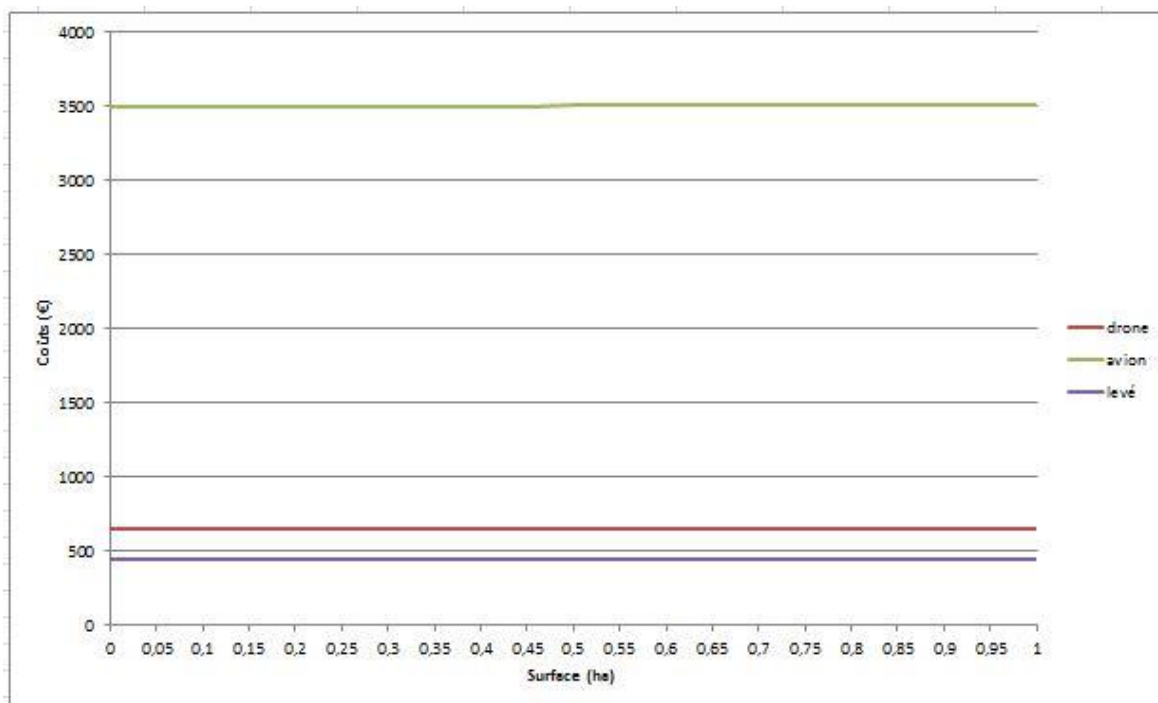


Figure 11: Prix pratiqués pour une surface < 10 000 m².

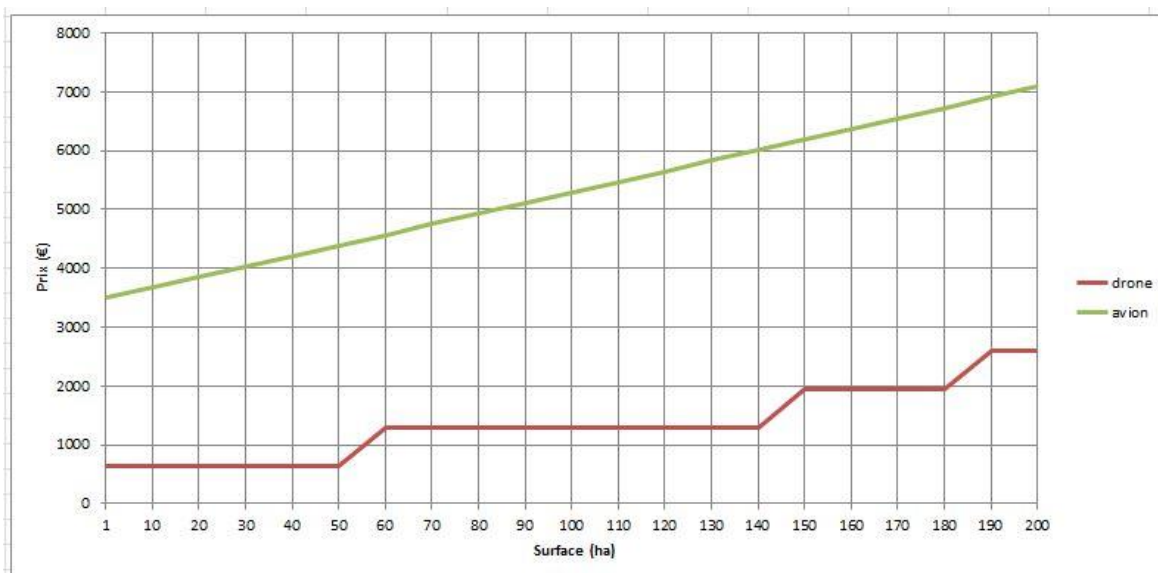


Figure 12: Tarifs pratiqués en fonction des prestations pour une surface entre 1 et 200 ha.

Pour déterminer quelle méthode sera la plus avantageuse pour l'entreprise en fonction de la surface, un système de notation par points a été mis en place : le mode de levé le plus avantageux pour l'entreprise sera celui qui a le plus de points, c'est-à-dire la méthode la plus rapide et la moins chère.

Les points pour le temps passé sur le terrain ont été répartis de la manière suivante :

- < 1h : 4 points
- Entre 1h et 4h : 3 points
- Entre 4h et 8h : 2 points
- Entre 1 jour et 2 jours : 1 point
- Au-delà de 2 jours : 0 points

Cette notation permet de favoriser les techniques rapides sur le terrain.

Les points attribués au montant du prix de la prestation ont quant à eux été répartis pour défavoriser la méthode la plus chère, c'est-à-dire que la méthode la plus chère aura le moins de points :

- Entre 450 et 649 € : 4 points
- Entre 650 et 1299€ : 3 points
- Entre 1300 et 2600€ : 2 points
- Au-delà de 2600€ : 1 point

Le tableau 11 présente les résultats de cette étude. Les détails des résultats sont présentés en annexe 5.⁷

Tableau 11: Méthode de lever la plus avantageuse.

Surface (ha)	drone	avion	Levé classique	Méthode de lever
0 - 0.4	8	4	8	Drone ou levé
0.4 - 1.6			7	Drone ou levé
1.6 - 3			5	Drone
3 - 6			3	Drone
6 - 30			1	Drone
30 - 50	7			Drone
50 - 100	5			Drone ou avion
100 - 180	4			Drone ou avion
180 - 200	3			Drone ou avion
> 200	2			avion

A travers le tableau 11, nous remarquons que le drone permet de couvrir une large surface à moindres coût. Pour des petites surfaces, jusqu'à 16 000 m², le levé par drone ou le levé

⁷ Confère annexe 5

classique sont équivalents. Pour des plus grandes surfaces, à partir de 100 hectares, le drone ou l'avion sont équivalents : dans cette situation, il faudra faire le choix entre une méthode qui coûte moins cher mais prend du temps, ou une méthode rapide mais un peu plus coûteuse.

III.2 Préparation des missions

III.2.1 Fiche de préparation de vol

La préparation de vol est une étape importante qui permet de connaître, en amont des missions, différentes informations. Elle est réglementée en partie par la législation qui préconise plusieurs vérifications pré-vol.

La mise en place d'une fiche de préparation de vol semble être un outil pertinent. Elle permettra à la fois d'être sûr que tous les aspects réglementaires soient respectés et que le futur vol se passe dans les conditions les plus favorables possibles. Elle permettrait aussi à l'entreprise de rester dans son « certificat qualité ».

La fiche de préparation de vol établie est présentée en annexe 6.⁸ Pour être valide, elle devra être complétée avant chaque mission et être annexée au dossier. Elle est composée des éléments suivants :

- Les références du dossier (numéro de dossier, lieu, commanditaire),
- Le type de matériel utilisé, la date du vol, le lieu du vol et le nom du télépilote,
- Les autorisations réglementaires obtenues si besoin,
- Les éléments issus du logiciel de planification de vol (hauteur de vol, vitesse de vol, résolution,...)
- La consultation des cartes aéronautiques : le site AIP Drone permet de visualiser les espaces aériens réglementés. La cartographie a été effectuée en suivant les réglementations énoncées dans les annexes de l'arrêté du 17 décembre 2015 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord.
- La définition du volume de vol en s'assurant que celui rentre en compatibilité avec le volume de vol maximal induit par la réglementation : le volume de vol maximal est le volume cylindrique formé par la distance maximale d'éloignement du télépilote au drone et la hauteur de vol maximale.
- La vérification des conditions météo pour le jour de l'intervention prévue : pour pouvoir voler, et prendre des images convenables, le drone doit avoir des conditions de vol favorables. Il faut éviter les journées pour lesquelles les rafales de vent sont trop importantes ou des averses sont prévues.

⁸ Cf. annexe 6

- Le calcul de la surface de protection des tiers au sol : cette surface est défini par un rayon autour du drone dans lequel aucuns tiers ne doit se trouver. Les modalités de calcul de ce rayon sont définies dans le tableau 12.

Scénario	Zone minimale d'exclusion	Conditions
S1	Disque de 30 m de rayon (centré sur la projection au sol de l'aéronef) OU Réduit $R < 30$ m par application du calcul du 3.7.5 ⁹	Info vitesse vol + masse < 2 kg + H < 50 m
S2	Projection au sol du volume maximal + 30m	
S3	Disque de 30 m de rayon (centré sur la projection au sol de l'aéronef) OU Réduit $R < 30$ m par application du calcul du 3.7.5 ⁹	Info vitesse vol + masse < 2 kg + H < 50 m
Autoroutes et routes express + Voies ferrées ouvertes à la circulation ferroviaire	Distance horizontale de 30 m.	

Tableau 12: Surface de protection des tiers au sol - DGAC

⁹ Annexe III de l'arrêté relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans personne à bord, paragraphe 3.7.5. concernant la protection des tiers au sol

$R = v * \text{racine}(2H/g)$ en mètres

$G = 9.81 \text{ m/s}^2$, H = hauteur de vol, v = vitesse de vol

III.2.2 Plan de vol

Le plan de vol dans le cadre de la photogrammétrie est indispensable et ses avantages non négligeables.

Il permet au drone d'avoir une position planimétrique et altimétrique stable, ce qui facilite par la suite les calculs d'aérotriangulation. Il permet aussi d'assurer le recouvrement nécessaire à la vue stéréoscopique, très importante pour la restitution.

De nombreux logiciels et applications de planifications de vol ont été développés suite à l'explosion de la vente de drone. La plupart permettent de faire des plans de vol « simple », c'est-à-dire des plans de vol dessinés par l'utilisateur qui positionne de manière grossière les waypoints¹⁰ par lesquels le drone devra passer. Cette méthode pourrait être utilisée mais elle demanderait une préparation supplémentaire puisqu'il faudrait calculer par avance l'emplacement de waypoints souhaités.

Heureusement des logiciels ont été développés pour faire ces calculs et répondre spécifiquement aux besoins des photogrammètres. Ils permettent de calculer automatiquement les plans de vol. Pour cela, il suffit que l'utilisateur rentre les paramètres de vol connus.

Les constructeurs des drones DJI ont développé DJI GO qui permet la planification de vol « simple ». Il a donc fallu trouver un logiciel compatible DJI et mieux adapté pour les travaux de photogrammétrie.

Le tableau 13 présente le résultat des recherches effectuées sur ce type de logiciel. Ils ont été sélectionnés car ils sont compatibles avec les drones DJI et téléchargeables gratuitement.

Caractéristiques	UgCS 	Ground Station 	Pix4D Capture 
PARAMETRE DE VOL			
Hauteur de vol	Non	oui	oui
Résolution au sol	oui	Non	Non
Vitesse de vol	oui	Oui	oui
Recouvrement latéral	oui	Oui	Oui (une commande pour les deux, ils ont donc obligatoirement la même valeur)
Recouvrement longitudinal	oui	Oui	
Zone de lever	oui	Oui	oui
Type de caméra (focale, taille capteur)	A entrer manuellement	A entrer manuellement	Prédéfini

¹⁰ Waypoints = points de passages

OPTIONS			
Positionnement des sommets de PDV	Oui	oui	Non
Empreinte des photos au sol	non	oui	non
Nombre de waypoints	limités à 50	illimités	illimités
Mode de fonctionnement	Logiciel de calcul puis application android	Logiciel de calcul puis application IOS ou android	Application IOS ou android
Autres caractéristiques	Zones interdites de vol prédéfinies (aéroports) + Possibilité d'ajouter ses propres zones		Préviens lorsque la zone de levé programmée est trop grande pour la batterie

Tableau 13: Comparaison des logiciels de planification de vol

On remarque que les logiciels ne fonctionnent pas tous de la même manière puisque les paramètres d'entrée à sélectionner varient d'un logiciel à l'autre, il y a deux façon de procéder :

- Catégorie 1 : (comme dans UgCS) on entre la résolution souhaitée et le logiciel détermine la hauteur de vol.
- Catégorie 2 : (comme dans Pix4D Capture), on entre la hauteur de vol et le logiciel calcule le GSD qui en découle.

Pour notre sujet, il serait plus intéressant d'utiliser un logiciel de la première catégorie car les logiciels de la deuxième catégorie impliquent un calcul préalable de la hauteur de vol pour répondre à la demande du client.

Un autre critère de sélection pour le choix du logiciel a été le support de calcul. En effet, la tablette fixée à la télécommande est une tablette Apple. Il faut donc que le logiciel utilisé existe sous forma IOS. Ce critère très important élimine malheureusement l'utilisation du logiciel UgCS.

Le dernier critère de sélection s'est porté sur la compatibilité du phantom 4 au logiciel. En effet, le Phantom 4 est un drone récent et un logiciel trop ancien ne détectera pas la présence du drone.

Finalement, le logiciel retenu pour la planification de vol est Pix4D Capture car il répond à tous les critères recherchés.

III.2.3 Mise en place d'un tableur excel

Beaucoup d'outils ont été développés pour améliorer l'utilisation du drone dans le cadre de travaux de photogrammétrie. Cependant, ces outils ne permettent pas un contrôle optimal de l'utilisation du drone.

La mise en place d'un tableur excel dans ce projet permet notamment :

- de vérifier les résultats et de compléter l'outil de planification de vol en calculant la hauteur de vol nécessaire,
- de vérifier que les conditions réglementaires soient respectées (hauteur de vol maximale, volume de vol, etc.)
- de vérifier que les conditions « photogrammétriques » de vol soient respectées.

Il peut également être une aide pour la réalisation des devis.

Les données en entrées :

Les données utilisées en entrée sont identiques à celle utilisées par les logiciels de planification de vol. En fonction de la mission, il faut compléter le recouvrement voulu, la surface approximative à traiter, la vitesse de vol de l'appareil et la résolution demandée par le client.

Paramètres variables

Paramètres de vol (à compléter)		
recouvrement (%)	latéral	0,8
	longitudinal	0,8
surface (m²)		129600
	longueur	360
	largeur	360
résolution (m)		0,0205
vitesse de vol (m/s)		3

Paramètres fixes

APN: Sony Alpha 7		
focale (m)	min	0,035
	max	
nombre de photosites (résolution px)	longueur	7360
	largeur	4912
taille capteur (m)	longueur	0,036
	largeur	0,024
cadence max (images par secondes)		5
cadence max (sec)		0,02
tp		4,89E-06
Drone: DJI A2 S1000+		
temps de charge batterie (min)		60
temps d'utilisation/ batterie (min)		15
nombre de jeux batteries		2

Figure 13: Données d'entrée du tableur excel

Les données en sortie

En données de sortie, on trouve plusieurs styles d'informations :

- la hauteur de vol : cette information permet de compléter le logiciel de planification de vol et d'obtenir la meilleure hauteur de vol pour répondre à l'attente du client.
Sur cette cellule, une mise en forme conditionnelle a été appliquée : cela permet, en fonction du scénario établi de vérifier que la hauteur de vol ne dépasse pas la hauteur de vol autorisée par la loi. Si la hauteur de vol est trop grande, la cellule se colore en rouge, si la hauteur de vol est inférieure au seuil réglementaire, la cellule se colore en vert.
- les informations du plan de vol : le tableur Excel permet de calculer l'ensemble des paramètres déterminés par le logiciel de vol. Cela permet d'avoir un contrôle sur les données qui sortent du logiciel de planification de vol.
- le contrôle de la réglementation : ce tableur calcule à partir des données saisies en entrée, le volume de vol du drone à respecter.
Le principe de mise en forme conditionnelle a été appliqué sur cette cellule aussi pour être sûr de respecter la réglementation.
- le contrôle des paramètres de photogrammétrie : pour obtenir une bonne vision stéréoscopique et mieux pointer en altimétrie, le rapport Base / Hauteur doit être compris entre 1/4 et 1/15.

Dans les figures 15 et 16 ci-dessus, le principe de mise en forme conditionnelle est illustré. Dans la figure 15, les données en entrée impose une hauteur de vol supérieure à la réglementation, ce qui se voit par la couleur rouge de la case. Dans la figure 16, les conditions sont respectées et la couleur des cases est verte.

Hauteur vol (m)	154,6222			
emprise au sol	longueur (m)	153,04		
	largeur (m)	106,0267		
base (m)	42,41067			
cadence (s)	14,13689			
nb de passage	7,215795			
	721,6	12,0	0,2	
temps de vol total				
	sec	min	h	
nombre de décollage du drone	0,8			
temps total pour les levés		16,8	0,3	0,0
		minutes	heures	journée de travail

Figure 14: illustration des données de sortie : calcul de la hauteur de vol et des informations du plan de vol.

Conditions			
Hauteur vol maximale (m)	150		
Volume de vol maximal (m3)	18849555,00		
Bi/H compris entre	0,25	0,066666667	
tolérance recouvrement entre	-0,05	0,05	
Bi/H	0,274285714		
Volume vol (m3)	13916000		

Figure 15: illustration des données de sortie: contrôle des paramètres de photogrammétrie et de la réglementation.

Conclusion

Ce mémoire permet de compléter les études déjà réalisées dans les matières et d'apporter une dimension financière à l'intégration de l'outil « drone » dans un cabinet de géomètres. Il permet de démontrer qu'au-delà d'un nouvel outil aux performances intéressantes, l'addition d'un savoir-faire est primordiale pour que l'entreprise puisse vendre ce service et donc rentabiliser son achat.

Un outil adapté pour la gestion des dossiers EDF.

L'étude des spécificités des dossiers EDF a montré en quoi le drone peut-être un outil adapté. Ces avantages servent autant le client, qui voit le coût de l'intervention du géomètre diminuer, que l'entreprise qui peut, quant à elle, utiliser son temps libre à la réalisation d'autres chantiers.

L'outil drone est un outil adapté pour des chantiers de taille intermédiaire comme les terrains EDF, qui sont trop grands pour du levé classique et trop petits pour du levé photogrammétrique par avion.

En plus d'optimiser le temps, cet outil permet d'améliorer la qualité des plans lors de la phase de préparation des bornages. Grâce à son adaptabilité au terrain, il permet de rendre la précision sur les mesures uniforme partout sur le plan et de créer une orthophotographies à jour.

Si son utilisation est utile pour les dossiers EDF, qui demande une précision modérée, tous les types de dossiers ne sont pas réalisables par cette technique. Il n'est pas l'outil permettant de répondre à des dossiers qui demandent une grande précision et les chantiers avec une grande surface de levé seront trop chronophages.

La photogrammétrie par drone, un nouveau métier.

Cet outil se révèle être le parfait intermédiaire entre le levé classique et le levé photogrammétrique par avion: il permet l'acquisition de données de haute résolution avec une rapidité et une adaptabilité au terrain impressionnante.

Grâce aux outils de planification, son utilisation semble simple et à la portée de tous. Cependant les procédures à mettre en place sont très contraignantes et très réglementées. Le drone ne peut pas voler n'importe où, n'importe quand. La personne qui le pilote doit justifier de formations spécifiques et de connaissances en aéronautique, autant technique qu'administrative (réglementation, demande d'autorisation de vol,...). De plus, pour fournir des données de qualité, la maîtrise de l'ensemble des notions de photogrammétrie est indispensable.

Le drone n'est donc pas qu'un simple outil, c'est un véritable savoir-faire à acquérir.

Une étude probante pour GE-Infra.

GE Infra possède tous les atouts pour proposer à ses clients des prestations de qualités avec le drone. Depuis plus de 40 ans, ce cabinet maîtrise la théorie et la pratique de la photogrammétrie. Il possède déjà une équipe formée à ces techniques et traitements, ce qui lui permet d'anticiper toutes les contraintes associées à ce savoir-faire.

De plus, avec les dossiers EDF, GE Infra détient un marché adapté pour la mise en place de la photogrammétrie par drone. Bien que les seuls dossiers EDF ne permettent pas de rentabiliser cet achat car les ouvertures de dossier sont trop variables (9 dossiers en 2016, 1 dossier en 2014 et 6 dossiers en 2015), GE Infra a la possibilité de développer cette activité à de nouveaux secteur, ce qui lui permettrait de diversifier encore ses activités. L'entreprise travaille d'ailleurs actuellement sur le développement d'un lidar embarqué par drone à des fins de suivis agricoles.

En conclusion, l'achat d'un drone par un cabinet doit être un acte bien réfléchi par la société. Derrière sa facilité d'accès et son coté innovant, il se cache une rigueur d'utilisation qui fait de cet outil tout sauf un jouet.

Cette technologie est en pleine expansion et tend à évoluer très vite dans les prochaines années. Nous pouvons imaginer que dans le futur des solutions seront trouvées pour améliorer l'autonomie des batteries ou encore améliorer le positionnement du GPS pour permettre un géoréférencement direct de qualité et donc un gain de temps précieux sur le terrain.

Bibliographie

[BARRY, 2013]

P.BARRY, R.COAKLEY, 2013, Field Accuracy Test of RPAS Photogrammetry, Baseline Surveys Ltd, 6p.

[BERGE, 2016]

F. BERGE, *Le marché des drones s'envole chez les professionnels*, BFMTV [en ligne] 27/12/2015 Disponible sur : < www.bfmbuisness.bfmtv.com > (consulté le 16/06/2016)

[CDC, 2009]

Les concessions hydroélectriques, Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. [en ligne]

12/03/2009, mis à jour le 2/01/2015. Disponible sur : < www.developpement-durable.gouv.fr > (Consulté le 16/06/2016)

[DAAKIR, 2015]

M. DAAKIR, M. PIERROT-DESEILLIGNY, P.BOSSER, Métrologie en terrassement par couplage Caméra/GPS embarqués sur un drone, séminaire du 24 septembre 2015

[DALBIN, 2015] (Publication)

2014-2015, Un an avec les géomètres-experts : Rapport d'activité et de développement durable, 2015. 17 pages page 4.

[DGAC, 2015]

12/2015. Guide des aéronefs circulants sans personne à bord : activités particulières. Edition 1, Version 0. 47 p.

[DICTIONNAIRE]

Dictionnaire Larousse en ligne.

[FEHRENBACH, 2014]

Fehrenbach Nicolas, 2014, Création de modèles numériques d'élévation pour intégration de projets architecturaux via l'acquisition de données photogrammétriques par drone, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 59p.

[GLOSSAIRE, 2016]

Ordre des Géomètres Experts, 2016, Glossaire 3D de l'Ordre des Géomètres Experts.

[GROB, 2014]

M.GROB, 2014, Protocole de qualification d'un système de lever par drone pour les géomètres, Application au drone Aibot X6, spécialité topographie, Conservatoire National des Arts et Métiers Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 47p.

[HOUIN, 2014]

G.HOUIN, S.HOPP, D.DESBUISSON, 2014, Drones : quels usages pour la topographie ?, XYZ n° 141 – 4°trimestre 2014, p. 38 à 41.

[JAMES, 2016]

OLIVIER JAMES, *Le marché français des drones civils pourrait dépasser 650 millions d'euros en 2025*, L'usine Nouvelle [en ligne]

01/03/2016 Disponible sur : < www.usinenouvelle.com > (Consulté le 16/06/2016)

[KELM 1, 2014]

K.KELM, 2014, Les drones révolutionnent l'administration foncière : une cartographie sur mesure, GIM INTERNATIONAL

[KELM 2, 2016]

Le drone, une solution innovante pour la cartographie locale, La banque mondiale [en ligne] 07/01/2016, Disponible sur < www.labanquemonddiale.org > (Consulté le 16/06/2016)

[LEGIFRANCE1]

Legifrance, Code général de la propriété des personnes publiques, article L211-1 [en ligne]. Disponible sur : < www.legifrance.gouv.fr > (consulté le 05 février 2016)

[LEGIFRANCE2]

Legifrance, Conseil d'Etat N°78352 du 21 avril 1971 [en ligne]. Disponible sur : < www.legifrance.gouv.fr > (consulté le 05 février 2016)

[LEGIFRANCE3]

Legifrance, *Code général de la propriété des personnes publiques, Domaine public naturel*, article L2111-9 [en ligne]. Disponible sur : < www.legifrance.gouv.fr > (consulté le 05 février 2016)

[LEGIFRANCE4]

Legifrance, *Arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat [...] ou exécutés pour leur compte*, article 5 [en ligne]. Disponible sur : < www.legifrance.gouv.fr > (consulté le 16/06/ 2016)

[MANUEL, 1997]

Conseil International de la langue Française, 1997. Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie.

[RAPPORT, 2015]

2014-2015, Un an avec les géomètres-experts : Rapport d'activité et de développement durable, 2015. 17 pages page 2

[SENAT]

2013, *Biens non délimités*, Sénat, [en ligne] Disponible sur : < www.senat.fr > (Consulté le 10 février 2016)

[SCHMITT, 2016]

F. SCHMITT, Le marché prometteur des drones professionnels, Les Echos [en ligne] 09/01/2016, Disponible sur : < www.lesechos.fr > (consulté le 16/06/2016)

[UPSO, 2006]

03/2016. Plaque de présentation UPSO, Unité de Production Sud-Ouest, EDF. 7p.

[VARIN, 2015]

B.VARIN, 2015, Les opportunités de l'utilisation de la photogrammétrie aérienne par drone dans la réalisation d'un procès-verbal de bornage et de reconnaissance de limites, spécialité topographie, Conservatoire National des Arts et Métiers Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 46p.

[XERFI, 2015]

Le marché français des drones professionnels e de loisir en France, Groupe Xerfi [en ligne] 13/09/2015 Disponible sur : < www.xerfi.com > (Consulté le 16/06/2016)

Table des annexes

Annexe 1 : Extrait du guide des activités particulières, DGAC : synthèse des exigences applicables à l'exploitant.....	57
Annexe 2 Présentation de l'entreprise.....	58
Annexe 3 Levés de la chute de Nouaux	62
Annexe 4 Détail des calculs des temps passés sur le terrain et de l'estimation des coûts engendrés.	65
Annexe 5 Fiche de préparation de vol.....	68

Annexe 1 : Extrait du guide des activités particulières, DGAC : synthèse des exigences applicables à l'exploitant.

(M : masse totale de l'aéronef)		Charge utile ≤ 1 kg, H ≤ 50 m	M ≤ 2 kg	2 kg < M ≤ 8 kg	8 kg < M ≤ 25 kg	25 kg < M ≤ 150 kg ¹	
Exigences communes à tous les scénarios		Apposer sur chaque aéronef une plaquette identifiant le nom et l'adresse de l'exploitant					
		Déclaration de Niveau de Compétence (DNC) pour chaque télépilote					
		Déclaration d'activité tous les 24 mois (ou en cas de modification) et Bilan annuel d'activité en janvier					
S-1 Hors zone peuplée ² En vue, D ≤ 200 m H ≤ 150 m ³	Aérostaf captif	Non concernés	-			Attestation de conception MAP	
	Autres aéronefs De jour	-	-			Attestation de conception	
		Aptitude théorique ⁵			Aptitude théorique ⁵ et attestation de compétence ⁶		
S-2 Hors zone peuplée ² De jour, D ≤ 1000 m		MAP					
		Attestation de conception					
		Aptitude théorique ⁵		Aptitude théorique ⁵ et attestation de compétence ⁶			
		MAP					
		H ≤ 150 m ³			H ≤ 50 m		
S-3 En zone peuplée ² En vue, D ≤ 100 m H ≤ 150 m ³ Déclaration des vols à la préfecture	Aérostaf captif	Non concernés	-			Attestation de conception MAP	
	Aérodvne captif De jour	-	-				Attestation de conception
		Aptitude théorique ⁵				Aptitude théorique ⁵ et attestation de compétence ⁶	
		MAP					
	Autres aéronefs De jour	-	Attestation de conception			Interdit sauf autorisation spécifique	
		Aptitude théorique ⁵					
		MAP					
S-4 Hors zone peuplée ² De jour, H ≤ 150 m ³		Attestation de conception			Interdit sauf autorisation spécifique		
		Licence pilote et expérience ⁷					
		MAP + dossier par opération					

Code couleurs :

Navigabilité (An. III, Ch. 2 de l'arrêté Aéronefs)

Télépilote (An. III, Ch. 4 de l'arrêté Aéronefs)

Exploitant (An. III, Ch. 3 de l'arrêté Aéronefs)

Espace aérien (arrêté Espace)

MAP : manuel d'activités particulières

D : distance maximale au télépilote

H : hauteur de survol par rapport à la surface

Code couleurs : Navigabilité (An. III, Ch. 2 de l'arrêté Aéronefs) | Télépilote (An. III, Ch. 4 de l'arrêté Aéronefs) | Exploitant (An. III, Ch. 3 de l'arrêté Aéronefs) | Espace aérien (arrêté Espace)

MAP : manuel d'activités particulières | D : distance maximale au télépilote | H : hauteur de survol par rapport à la surface

¹ Les aéronefs de plus de 25 kg sont soumis à des exigences techniques complémentaires à définir au cas par cas

² Zone peuplée : un aéronef est dit évoluer en « zone peuplée » lorsqu'il évolue :

- au sein ou à une distance horizontale inférieure à 50 mètres d'une agglomération figurant sur les cartes aéronautiques ;
- à une distance horizontale inférieure à 150 mètres d'un rassemblement de personnes (50 mètres dans le cas du scénario S-4)

³ H ≤ 150 m au-dessus de la surface ou ≤ 50 m au-dessus d'un obstacle artificiel de plus de 100 m, sauf accord du comité régional de gestion de l'espace aérien concerné pour les vols en vue

⁴ Les opérateurs d'aérostats captifs utilisés de manière autonome (i.e. sans la présence d'un télépilote) doivent toutefois rédiger un MAP (limité à la description des procédures de protection des tiers au sol) et doivent contacter la DGAC pour déterminer si leur aéronef constitue un obstacle nécessitant une information aéronautique

⁵ Certificat d'aptitude théorique de pilote civil ou militaire (y compris ULM)

⁶ Attestation de compétence délivrée par la DGAC après une évaluation de la compétence pratique du télépilote par un agent de la DGAC au travers d'un programme de démonstration en vol

⁷ Licence de pilote de planeur, d'avion ou d'hélicoptère (au moins pilote privé) avec au moins 100 heures de vol en tant que commandant de bord + expérience récente sur l'aéronef télépilote

Annexe 2

Présentation de l'entreprise

Situation géographique :

La SELARL GE-INFRA est située dans le Sud-Ouest de la France en Région Midi Pyrénées. Elle est implantée en Haute Garonne (31) dans la ville de Toulouse, au 55 avenue Louis Breguet.

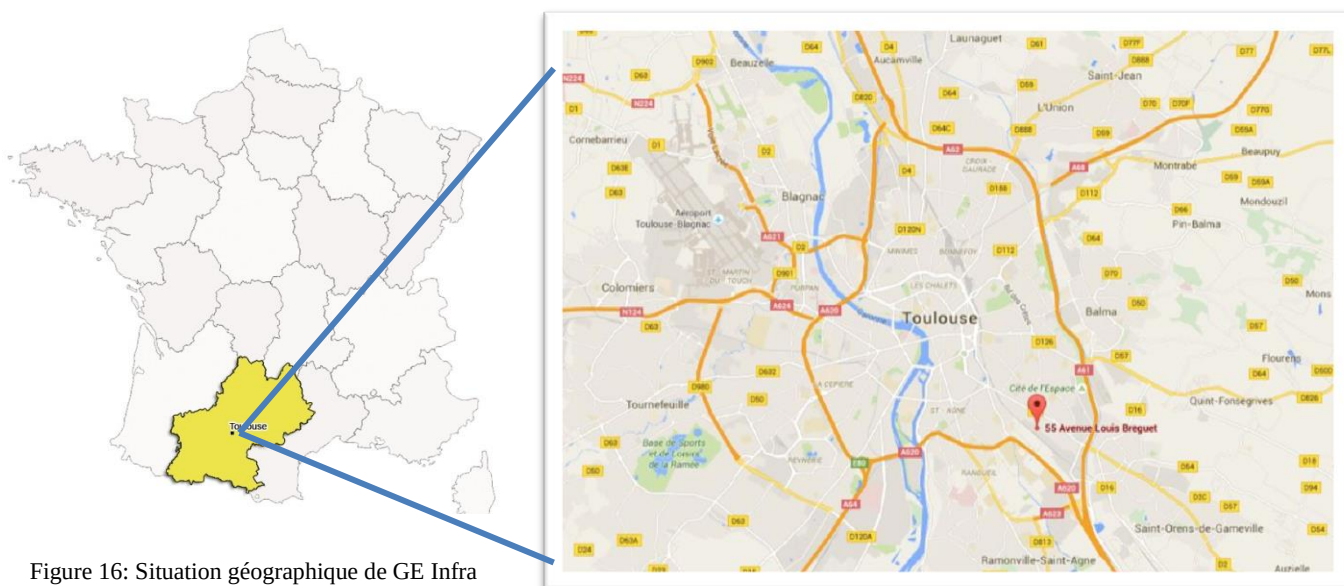


Figure 16: Situation géographique de GE Infra

Historique :

Le cabinet a été initialement créé en 1966 par Monsieur Lebel, Géomètre expert. Treize ans plus tard, en 1979, suite à l'association de Messieurs Lebel et Trenque, la société change de statut et devient la SCP Lebel – Trenque.

En 1984, un troisième géomètre-expert, Monsieur Rives, s'associe à la SCP. Deux annexes sont alors en places dans la ville de Toulouse.

A la retraite du fondateur de la société en 1994, le géomètre expert Monsieur Saint-Chamant reprend le cabinet aux côtés de Monsieur Trenque et Monsieur Rives. C'est à la suite de cette association que le cabinet change de statut et de nom : elle devient la SELARL GE-INFRA le 1^{er} juin 2000.

Le 15 septembre 2011, Madame Alajouanine, géomètre-expert, remplace Monsieur Rives. Depuis décembre 2012 suite au départ à la retraite de Monsieur Trenque, la société est dirigée par les cogérants Monsieur Saint-Chamant et Madame Alajouanine. Ce n'est qu'en juin 2014 que la société regroupe ses services en un même lieu, au 55 avenue Louis Breguet.

Organisation :

En 2015, la société est composée de l'effectif suivant : deux Géomètres-Experts, trois ingénieurs, une secrétaire-comptable, six techniciens « terrain », cinq techniciens « DAO », et deux restituteurs.

L'organigramme ci-dessous présente l'organisation de l'entreprise:

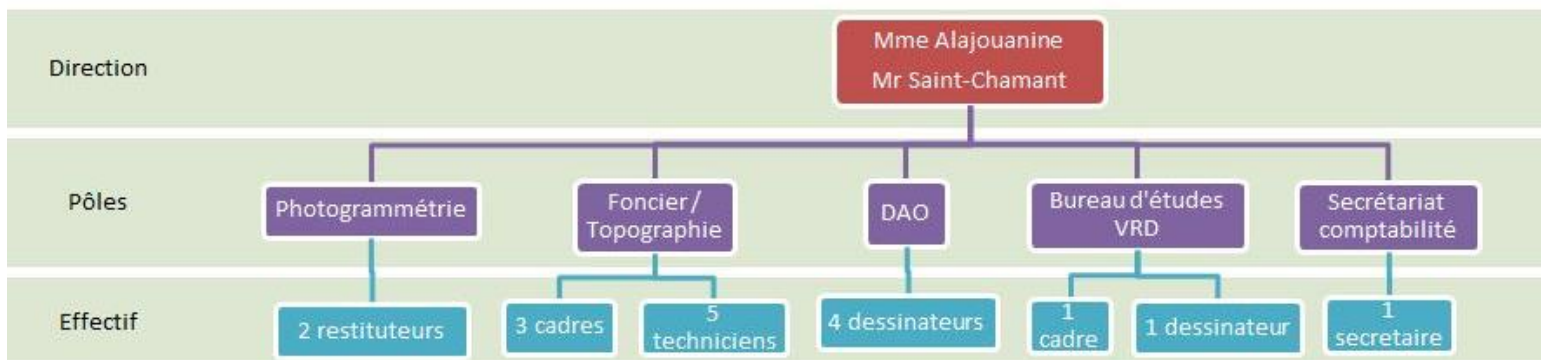


Figure 17: Organisation de la société GE-Infra

La société propose une grande diversité d'activités :

- Activités « traditionnelles » : Topographie terrestre, GNSS, Lever de bâtiment, foncier, Bureau étude VRD.
- Précision : topométrie de précision, auscultation.
- Activités « particulières » : bathymétrie, lever 3D HD, photogrammétrie, géomatique, détection de réseaux.

Le cabinet a souhaité mettre en place une « assurance qualité ». Ce système de management de la qualité suit le référentiel ISO 9001 :2008.

Les dispositions mises en place sont transcrites sur un manuel. Elles permettent de garantir la qualité sur les prestations fournies par GE-infra afin qu'elles soient conformes aux exigences réglementaires mais aussi aux exigences des clients.

L'entreprise en quelques chiffres :

Le cabinet a un Chiffre d'Affaire (CA) de 1 787 801€ en 2015. En moyenne, entre 550 et 600 dossiers par an sont ouverts.

Actuellement, les dossiers qui génèrent le plus de CA sont ceux issus des travaux topographiques et photogrammétriques. (Respectivement 705 577€ et 535 940€)

En 2013, pour un CA total de 2 086 654€, l'activité de photogrammétrie ne représentait que 456 459€ (22%) du CA total après les travaux topographiques (36%) et les études d'aménagement (23%).

On remarque que le secteur de la photogrammétrie est un secteur en pleine expansion.

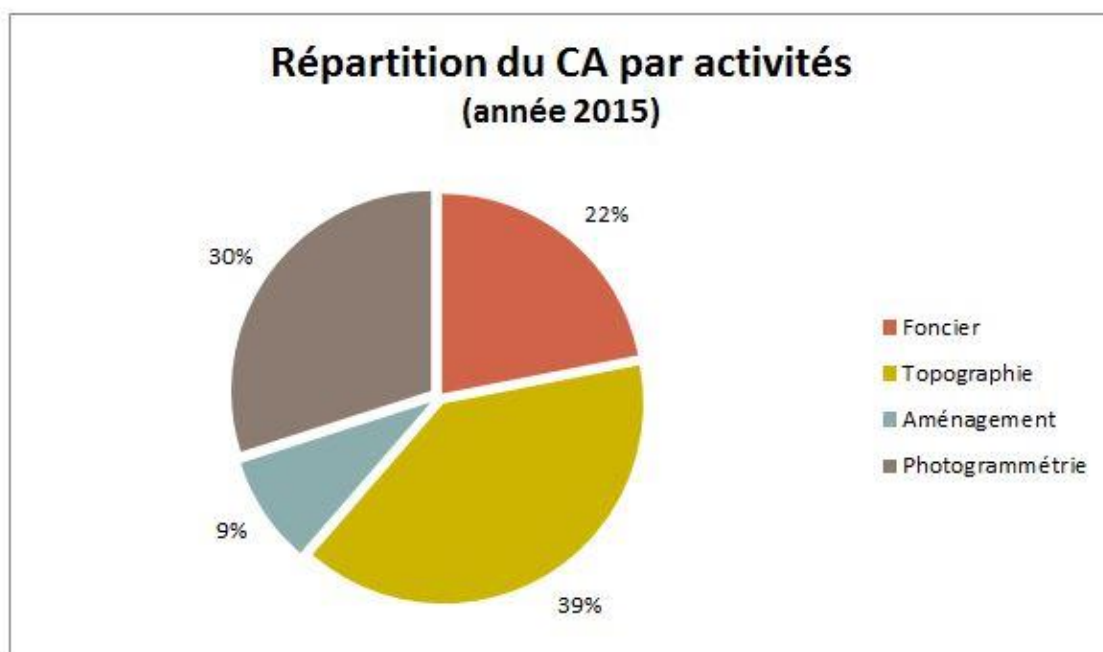


Figure 18 : Répartition du CA par activités en 2015

La société travaille en majorité avec des acteurs privés (aménageurs, promoteur, sociétés, particuliers) mais il arrive aussi que des acteurs publics tels que l'Etat, les ministères ou les collectivités locales lui commandent des travaux. La figure suivante montre la répartition des donneurs d'ordres en pourcentage sur l'année 2015 :

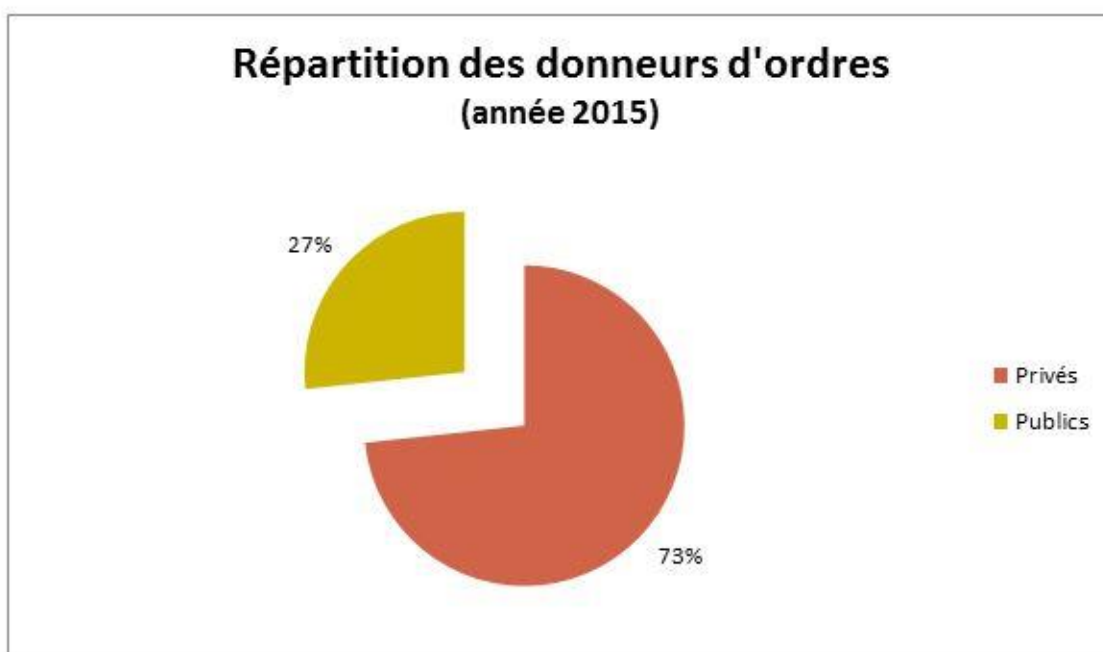


Figure 19: Répartition des donneurs d'ordres en 2015

Zone d'influence et marché concurrentiel :

Le cabinet est implanté dans une zone très concurrentielle. En effet, dans Toulouse et ses environs, on dénombre une quinzaine de cabinets de géomètres-experts.

En plus des confrères, le cabinet doit faire face aux cabinets spécialisés dans la topographie, la VRD et les Travaux Publics.

Cependant, grâce à ses activités particulières comme la photogrammétrie ou la bathymétrie, GE-infra arrive à étendre sa zone d'influence et décroche des marchés à l'échelle nationale.

Ceci est dû à une faible concurrence dans ses domaines : en France, seuls une dizaine de cabinets de géomètres proposent ce type de prestations.

Contexte économique :

Le contexte économique actuel est assez difficile à cause des effets de la crise sur l'immobilier. Cela s'est fait ressentir sur le CA qui a diminué mais aussi sur les effectifs puisque les départs d'employés ne sont pas renouvelés (28 personnes en 2013 pour 19 aujourd'hui).

Matériel :

- 2 Station GPS : Leica et trimble + abonnement teria
- 5 théodolites : TCRM1201- TCA1800 – TCRA 1101 , TS15 – Trimble S6
- 3 niveaux automatiques leica
- 1 scanner laser 3d Faro
- Drone airod, caméra sony A7R

Annexe 3 Levés de la chute de Nouaux

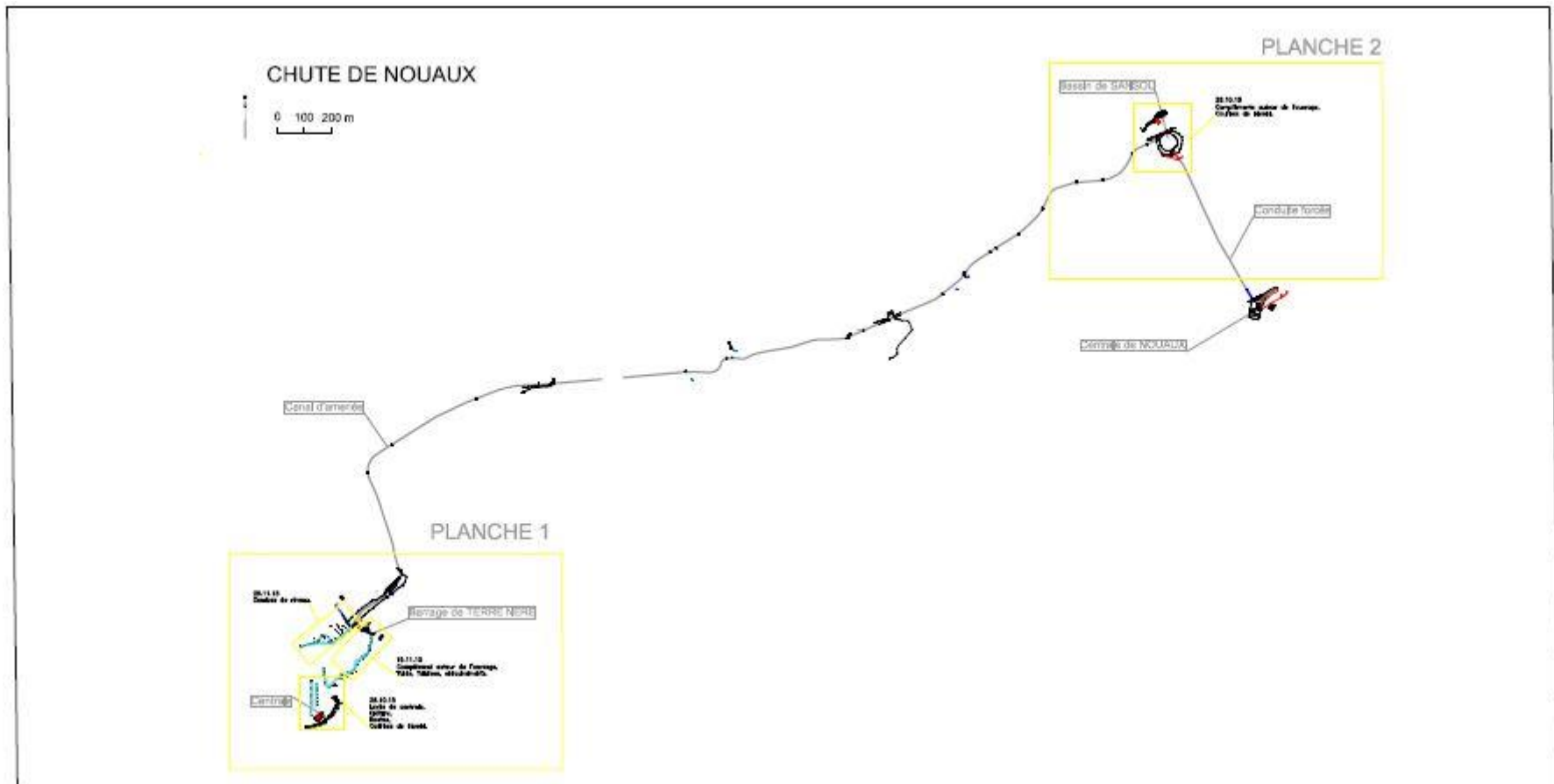


PLANCHE 1

25.11.15
Courbes de niveau.

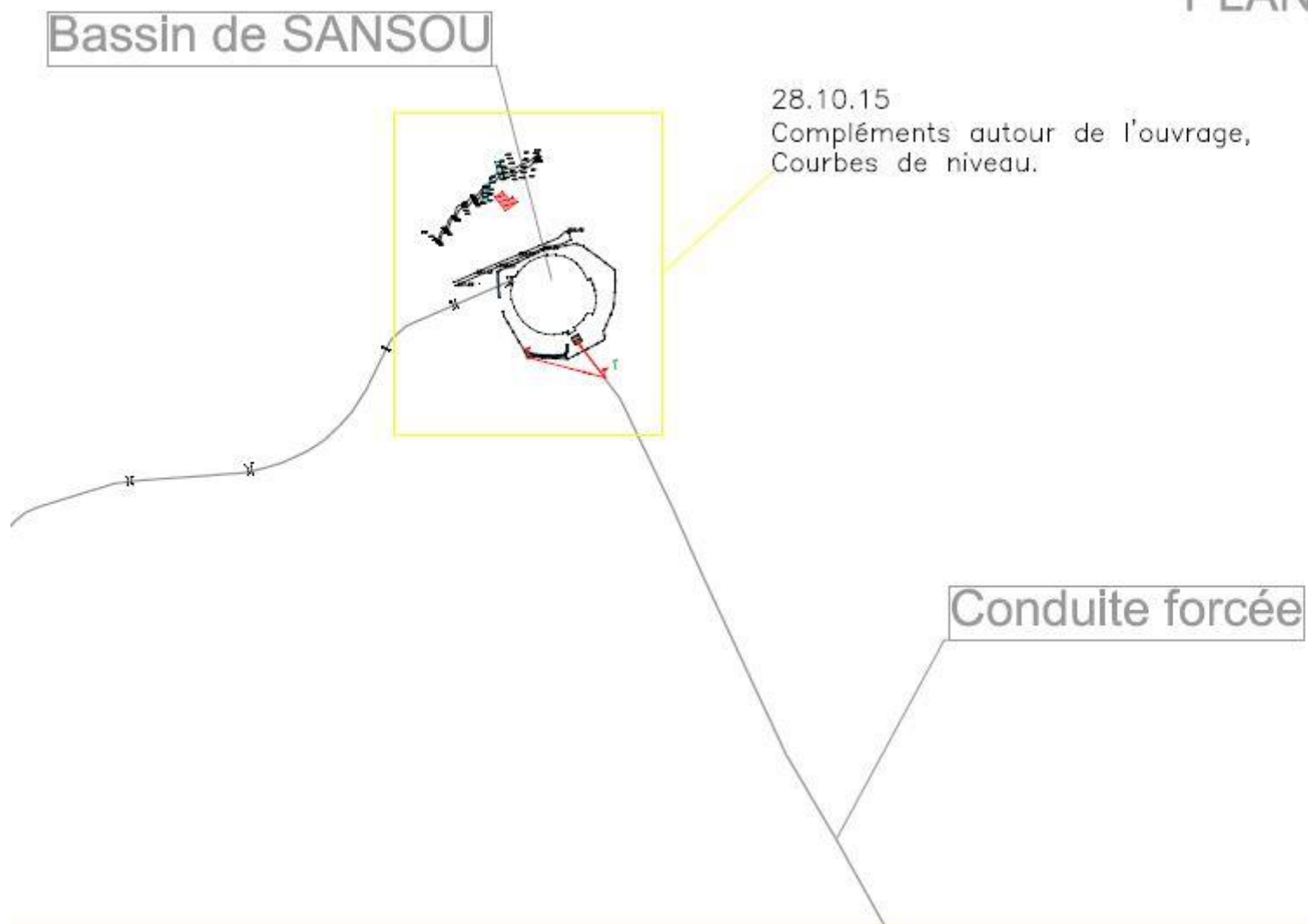
Barrage de TERRE NERE

19.11.15
Complément autour de l'ouvrage,
Talus, falaises, enrochements.

Centrale

26.10.15
Levés de centrale,
Clôture,
Routes,
Courbes de niveau.

PLANCHE 2



Annexe 4

Détail des calculs des temps passés sur le terrain et de l'estimation des coûts engendrés.

Cette annexe présente les modalités de calcul qui ont permis de mettre en place les graphiques de la partie III.1.

Calcul pour le drone :

1- Calcul des temps passés :



Données :

Hauteur vol (m)	H	100
focale (m)	f	0,035
recouvrement latéral	r	0,6
vitesse m/s	v	4
taille capteur (m)	Lc	0,036
	lc	0,024

1- Calcul de l'emprise au sol d'une image:

$$L_{sol} (m) = \frac{H \times Lc}{f}$$

2- Calcul du nombre de passages du drone pour couvrir la zone: pour optimiser le nombre de passages, le côté Lc du capteur sera perpendiculaire à l'axe de vol.

$$\text{nombre de passage } (n) = \frac{Ls - r}{L_{sol} - r} + 1$$

3- Calcul du temps de vol : le temps de vol correspond au temps nécessaire pour le drone pour parcourir la distance du nombre de passage.

$$\text{temps de vol } (t1 \text{ en min}) = \frac{n (Ls + \text{dist interbande})}{v \times 60}$$

Cependant le temps de vol du drone va dépendre du temps d'utilisation et de charge des batteries (respectivement 15 min et 60 min). Afin d'estimer le temps vrai de vol du drone, le nombre de décollage a été calculé :

$$Nb \text{ décollage} = \frac{t}{15}$$

Le temps de vol vrai doit donc prendre en compte les changements de batteries mais surtout le temps d'attente lors des recharges des batteries, soit :

$$t2 (min) = t + \left(\frac{Nb \text{ décollage}}{2} - 1 \right) \times 45$$

2- Calcul du coût estimé:

Le prix utilisé pour le calcul du coût de la prestation est celui établi dans la partie II.2.1. Ce forfait a été décliné à la demi-journée.

$$Prix (\text{€}) = 1300 * \frac{t2}{8}$$

Calcul pour l'utilisation de l'avion :

1- Calcul des temps passés :

Données :

Hauteur vol (m)	H	600
focale (m)	f	0,035
recouvrement	r	0,6
vitesse (m/s)	v	15
taille capteur (m)	Lc	0,036
	lc	0,024

1- Calcul de l'emprise d'une image au sol :

$$L_{sol} (m) = \frac{H \times Lc}{f}$$

2- Calcul du nombre de passages : pour optimiser le nombre de passage, le coté L du capteur est orienté perpendiculaire à l'axe de vol.

$$n = \frac{Ls - r}{L_{sol} - r} + 1$$

3- Calcul du temps de vol :

$$t (min) = \frac{n \times Ls}{v \times 60}$$

2- Calcul du coût estimé:

Le prix a été calculé à partir du bordereau des prix fixé entre EDF et GE Infra, il comprend :

- l'affrètement : 2 500 €
- le temps de trajet : 3,3 € / km
- la surface à lever (S) : 18 € / ha

$$Prix (\text{€}) = 2\,500 + 3.3 * 300 + 18 * S$$

Calcul pour le levé classique :

1- Calcul des temps passés :

Pour effectuer ce calcul, nous sommes partis du constat suivant : en règle générale, quand tout se déroule bien sur le terrain, la surface levée sur une journée est environ de 3ha.

A partir de cette base, nous avons calculé le temps pour toutes les surfaces :

$$t \text{ (jours)} = \frac{S}{30000}$$

2- Calcul du coût estimé:

Le prix utilisé pour le calcul du coût de la prestation est celui du bordereau des prix fixé entre EDF et GE Infra. Ce forfait a été décliné à la demi-journée pour l'intervention de deux personnes sur le terrain, soit :

$$Prix (\text{€}) = 450 * t$$

Annexe 5

Fiche de préparation de vol

N° dossier : Département : Commune :	Pour le compte de :
--	---------------------

Matériel utilisé :

Phantom 4
S1000+

Date du vol	
Adresse :	
Nom du télépilote	

Type de scénario	
Demande d'autorisation :	
A l'autorité compétente	
En date du	
Reçu le	

Planification de vol :

Surface à lever	
Hauteur de vol	
Vitesse de vol	

Repérage de la zone de travail : *(périmètre de vol, zone de décollage estimée, dangers et obstacles éventuels)*

Consultation des cartes aéronautiques

Date :	
Observations : (restrictions temporaires ou permanente de vol)	

Volume de vol :**Phantom 4 :**

Volume de vol maximal	Volume chantier
S1 : 18 849 555 m3	
S2 : 471 238 898 m3	
S3 : 4 712 388 m3	

S1000+

Volume de vol maximal	Volume chantier
S1 : 18 849 555 m3	
S2 : 157 079 632 m3	

Zone de protection des tiers au sol : Calcul du rayon de la zone d'exclusion, centré sur la projection au sol de l'aéronef.

Scénario	Zone minimale d'exclusion	Résultats
S1	30m OU <i>Si vitesse vol connue + masse < 2kg + H < 50m</i> Voir abaque 1	
S2	Projection au sol du volume maximal + 30m	
S3	30m OU <i>Si vitesse vol connue + masse < 2kg + H < 50m</i> Voir abaque 1	
Autoroutes et routes express Voie ferrée ouverte à la circulation ferroviaire	30m	

Consultation des conditions climatiques pour le jour de levé prévu :

Vent :	

Abaque 1 : Calcul de la zone de protection des tiers au sol Avec Phantom 4 – scénario S1 et S3

Aéronef < 2kg et information sur la vitesse de vol

Si H<50m alors le disque de protection autour du drone est égal à :

$$R = \text{vitesse de vol} \times \sqrt{(2 \times \text{hauteur de vol} / g)}$$

Avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Vitesse de vol	1	2	2	3	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Hauteur de vol																			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,7	11,4	12,1	12,9	13,6	14,3
15	10	10	10	10	10	10	10	10	10,0	10,0	10,5	11,4	12,2	13,1	14,0	14,9	15,7	16,6	17,5
20	10	10	10	10	10	10	10	10	10,1	11,1	12,1	13,1	14,1	15,1	16,2	17,2	18,2	19,2	20,2
25	10	10	10	10	10	10	10	10,2	11,3	12,4	13,5	14,7	15,8	16,9	18,1	19,2	20,3	21,4	22,6
30	10	10	10	10	10	10	10	11,1	12,4	13,6	14,8	16,1	17,3	18,5	19,8	21,0	22,3	23,5	24,7
35	10	10	10	10	10	10	10,7	12,0	13,4	14,7	16,0	17,4	18,7	20,0	21,4	22,7	24,0	25,4	26,7
40	10	10	10	10	10	10	11,4	12,9	14,3	15,7	17,1	18,6	20,0	21,4	22,8	24,3	25,7	27,1	28,6
45	10	10	10	10	10	10,6	12,1	13,6	15,1	16,7	18,2	19,7	21,2	22,7	24,2	25,7	27,3	28,8	30
50	10	10	10	10	10	11,2	12,8	14,4	16,0	17,6	19,2	20,8	22,3	23,9	25,5	27,1	28,7	30,0	30
60	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
70	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
80	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
90	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
100	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
110	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
120	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
130	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
140	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
150	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Liste des figures

Figure 1: Evolution du CA photogrammétrique chez GE Infra	14
Figure 2: DJI Phantom 4 (à gauche) et DJI S1000+ (à droite), source : www.dji.com	15
Figure 3: Répartition des GEH du lot Sud-Ouest, source : plaquette présentation UPSO	17
Figure 4: répartition du temps de travail sur les journées « TERRAIN » de la chute de Nouaux ...	24
Figure 5: Optimisation du temps de travail sur la chute de Nouaux	24
Figure 6: Profil d'élévation issu du logiciel UgCS	32
Figure 7: Effet de roulis, lacet et tangage.....	32
Figure 8: Variation de position du drone horizontale (à gauche) ou verticale (à droite).	33
Figure 10: Temps terrain pour une surface < 10 000 m ²	42
Figure 11: Temps terrain pour une surface comprise entre 1 ha et 200 ha.	42
Figure 12: Prix pratiqués pour une surface < 10 000 m ²	43
Figure 13: Tarifs pratiqués en fonction des prestations pour une surface entre 1 et 200 ha.	43
Figure 14: Données d'entrée du tableur excel	50
Figure 15: illustration des données de sortie : calcul de la hauteur de vol et des informations du plan de vol.	51
Figure 16: illustration des données de sortie: contrôle des paramètres de photogrammétrie et de la réglementation.	51
Figure 17: Situation géographique de GE Infra	58
Figure 18: Organisation de la société GE-Infra.....	59
Figure 19 : Répartition du CA par activités en 2015.....	60
Figure 20: Répartition des donneurs d'ordres en 2015.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1: Type de scénarii de vol pour activités particulières - DGAC.....	12
Tableau 2: Caractéristique des drones DJI, sources : www.dji.com et www.sony.fr	16
Tableau 3: Caractéristique des dossiers EDF	21
Tableau 4: Déroulement de la chute de Nouaux	22
Tableau 5: Investissement matériel	26
Tableau 6: Concurrence	27
Tableau 7 : Résolution de l'image.....	30
Tableau 8 : Taille des éléments sur le terrain.....	31
Tableau 9: Résultats d'un calcul d'aérottriangulation par drone.....	39
Tableau 10: Résultats d'un calcul d'aérottriangulation par avion.....	39
Tableau 11: Méthode de lever la plus avantageuse.....	44
Tableau 12: Surface de protection des tiers au sol - DGAC.....	47
Tableau 13: Comparaison des logiciels de planification de vol.....	49

Utilisation des drones pour la définition du domaine public hydraulique : étude d'une concession hydraulique dans les Pyrénées.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 1992

RESUME

Depuis plus de 40 ans, GE Infra est un spécialiste de la photogrammétrie. Le drone est pour cette société un outil innovant mais surtout un outil beaucoup moins cher que les moyens actuellement utilisés pour la réalisation des prises de vues. Il permettra d'ouvrir la prestation à une nouvelle clientèle et de fidéliser la clientèle déjà présente.

A travers une analyse financière, réglementaire et technique du drone, nous avons cherché à savoir si cet outil avait sa place dans le cabinet et s'il permettait d'améliorer la gestion de dossiers particuliers : les dossiers de bornage des aménagements hydroélectriques EDF (Electricité De France).

Mots clés : Drone, Géomètre, Photogrammétrie, Bornage, DPH .

SUMMARY

For over 40 years, GE Infra is an expert in photogrammetry. The drone is an innovative tool for this company but also a lot cheaper than the tool currently used means for achieving the shots. It will open the service to new customers and retain the customer already has.

Through financial analysis, regulatory and technical drone, we investigated whether this tool had its place in the cabinet, and if possible to improve the management of specific issues: EDF files regarding the boundary of hydroelectric arrangements.

Key words: Drone, Land Surveyor, Photogrammetry, Boundary, DPH.