



**HAL**  
open science

# Définition d'une solution de photogrammétrie par drone aérien : cahier des charges et protocoles de validation

Vincent Chatelon

## ► To cite this version:

Vincent Chatelon. Définition d'une solution de photogrammétrie par drone aérien : cahier des charges et protocoles de validation. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01334037

**HAL Id: dumas-01334037**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01334037>**

Submitted on 13 Feb 2017

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

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

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

---

**MÉMOIRE**

présenté en vue d'obtenir

**le Diplôme d'Ingénieur CNAM**

**SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe**

par

**Vincent CHATELON**

---

Définition d'une Solution de Photogrammétrie par Drone Aérien

*Cahier des Charges et Protocoles de Validation*

**Soutenu le Mercredi 9 Juillet 2014**

---

**JURY**

<b>PRÉSIDENT :</b>	<b>M. Laurent POLIDORI</b>	<b>Directeur de l'ESGT, Professeur</b>
<b>MEMBRES :</b>	<b>M. Jean-François BAUDET</b>	<b>Maitre de Stage</b>
	<b>M. José CALI</b>	<b>Co-Maitre de Stage</b>
	<b>Mme Elisabeth SIMONETTO</b>	<b>Professeur référent</b>
	<b>M. Mathieu BONNEFOND</b>	<b>Enseignant</b>
	<b>M. Philippe DESCHAMPS</b>	
	<b>M. Bertrand WARIN</b>	



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

---

**MÉMOIRE**

présenté en vue d'obtenir

**le Diplôme d'Ingénieur CNAM**

**SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe**

par

**Vincent CHATELON**

---

Définition d'une Solution de Photogrammétrie par Drone Aérien

*Cahier des Charges et Protocoles de Validation*

Soutenu le Mercredi 9 Juillet 2014

---

**JURY**

<b>PRÉSIDENT :</b>	<b>M. Laurent POLIDORI</b>	<b>Directeur de l'ESGT, Professeur</b>
<b>MEMBRES :</b>	<b>M. Jean-François BAUDET</b>	<b>Maitre de Stage</b>
	<b>M. José CALI</b>	<b>Co-Maitre de Stage</b>
	<b>Mme Elisabeth SIMONETTO</b>	<b>Professeur référent</b>
	<b>M. Mathieu BONNEFOND</b>	<b>Enseignant</b>
	<b>M. Philippe DESCHAMPS</b>	
	<b>M. Bertrand WARIN</b>	



## Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement monsieur Jean-François BAUDET, mon maître de stage pour la confiance et le soutien qu'il m'a apporté dans le cadre de ce stage, ainsi que mes collègues Olivier, Clément, Etienne et Vincent pour leur bonne humeur et leur aide chaque fois que nécessaire.

Je remercie également tous les professeurs qui auront su me soutenir ou m'aider durant ce stage effectué dans un contexte délicat, particulièrement M. José CALI qui m'aura reçu plusieurs fois et dont les nombreuses relectures m'auront été fortes utiles. Je remercie Mme Simonetto, mon professeur référent, pour ses encouragements. Enfin, M. Laurent POLIDORI qui m'aura gentiment reçu et pour son soutien lors des moments difficiles de mon stage.

Je tiens à remercier mes parents et grands-parents qui me supportent et m'apportent un soutien et une attention constants et très précieux.

Enfin, à toutes les personnes, famille, amis, connaissances, qui m'auront soutenu, de près ou de loin, dans l'élaboration de ce mémoire et sans lesquels je n'aurai sans doute pas pu mener à bien l'achèvement de ce travail. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance !

好好学习, 天天向上!<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> "Hao hao xuexi, tian tian xiang shang" : Proverbe Chinois, très célèbre en Chine. Intraduisible littéralement, son sens, en Français, serait proche de "Bien étudier, jour après jour, est la garantie d'une vie enrichissante".

## Liste des Abréviations, Sigles et Anglicismes :

	Littéral	Définition/traduction
aperture	Ouverture	Caractéristique de la prise de vue : diamètre du diaphragme (mm)
APN	Appareil Photographique Numérique	
càd	c'est-à-dire	
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile	
DGPS	Differential GPS (GNSS)	méthode de calcul de coordonnées GNSS par double différences
DOP	Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision
DSM	Digital Surface Model	cf MNS
FPV	First Person View	Vol en Immersion
GCP	Ground Control Point	Point de Contrôle Sol
GDOP	Global Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision globale
GIS	Geographic Information System	Système d'Information Géographique (cf 'SIG')
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema	Système de navigation satellitaires Russe
GNSS	Global Navigation Satellite System	Système de Navigation Mondial par Satellite
GPS	Global Positioning System (GNSS)	Système de Positionnement Mondial : constellation de satellites de navigation des E-U
GSD	Ground Sampling Distance	Résolution : dimension d'un pixel au sol
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision horizontale
IMU	Inertial Measurement Unit	Centrale inertielle
INS	Inertial Navigation System	Centrale inertielle
IRS	Inertial Reference System	Centrale inertielle
ISO (Sensibility)	International Organization for Standardization	"Sensibilité ISO" = Caractéristique de la prise de vue : sensibilité lumineuse du capteur
MNS	Modèle Numérique de Surface	
MNT	Modèle Numérique de Terrain	
NPPK	Network Post Processing Kinematic	Post-traitement Cinématique en Réseau (méthode de calcul de positionnement GNSS)
NRTK	Network Real Time Kinematic	Cinématique temps réel en réseau (méthode de calcul de positionnement GNSS)
offsets	Compensations	
overlap	recouvrement	taux de recouvrement entre les clichés et les bandes
PDOP	Position Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision de position
pix	pixel	unité élémentaire d'une image numérique ou d'un capteur
PPA	Point Principal d'Autocollimation	Projection orthogonal du centre optique de la caméra sur son plan image
PPK	Post Processing Kinematic	Post-traitement Cinématique (méthode de calcul de positionnement GNSS)
PPP	Precise Point Positionning (GNSS)	méthode GNSS de détermination de coordonnées (Positionnement de point précis)
PPP	Point Principal de Perspective	Point correspondant au centre optique de l'ensemble de l'optique de la caméra
RBF	Réseau de Base Français	
RDOP	Relative Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision relative (càd : entre récepteur mobile et sa base)
RGF	Réseau Géodésique Français	
RGP	Réseau GNSS Permanent	
RINEX	Receiver Independent Exchange Format	format d'échange indépendant pour les données d'observation brutes GNSS
RRF	Réseau de Référence Français	
RTK	Real Time Kinematic	Cinématique temps réel (méthode de calcul de positionnement GNSS)
SBAS	Satellite-Based Augmentation System (GNSS)	Système d'augmentation de performances basé sur les satellites
Shutter (speed)	Obturbateur (vitesse de l')	Caractéristique de la prise de vue : durée d'ouverture de l'obturbateur (s)
SIG	Système d'Information Géographique	Ensemble de couches de données géo-référencées
TDOP	Temporal Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision Temporelle
to offset	Compenser	
UAS	Unmanned Aerial System	Système Aérien sans Pilote embarqué
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Sigle militaire du drone (Véhicule Aérien sans Pilote embarqué)
UERE	User Equivalent Range Error	Erreur théorique de mesure de distance
VDOP	Vertical Dilution Of Precision (GNSS)	coefficients d'affaiblissement de la précision verticale
VTOL	Vertical Take Off and Landing	Décollage et Atterrissage Vertical
WAAS	Wide Area Augmentation System (GNSS)	Système d'aide à la navigation GPS
WGS 84	World Geodetic System (GNSS)	Système Géodésique mondial, mise à jour de 1984

## Glossaire

Aérotriangulation : définit la position et l'orientation du capteur et de l'ensemble optique au moment de la prise de vue.

Base photogrammétrique (B) : Distance (m) entre 2 sommets de prises de vue successives. Peut aussi s'exprimer en pourcentage par rapport à l'emprise du cliché au sol.

Corrélation : assemblage des clichés les uns par rapport aux autres par calcul de coefficients de corrélation permettant d'effectuer les transformations géométriques des images et de les assembler entre elles.

Ortho-photo : Photographie corrigée des déformations géométriques dues à la déformation optique, à l'effet de perspective de la prise de vue et au relief. La géométrie d'une ortho-photo est celle d'une carte.

Point d'appui : « point » du sol, visible sur un ou plusieurs clichés, et dont les coordonnées terrain sont connues.

Point homologue : élément visible sur plusieurs clichés et correspondant au même élément sur le terrain.

Recouvrement (Rlo et Rla) : portion d'un cliché dont l'emprise au sol est identique à un autre, par rapport à l'emprise totale. Il existe 2 types de recouvrements : longitudinal (entre 2 clichés successifs) et latéral ou « inter-bandes » (entre 2 bandes contigües). Ils peuvent s'exprimer en distance (m) ou en pourcentage et leur valeur vaut :  $Rlo = 1 - B$  ;

$$Rla = \text{Emprise latérale du cliché} - \text{Distance interbandes}$$

Résolution (R) : taille de la projection d'un pixel au sol :

$$R = \frac{\text{taille d'un photosite}}{\text{distance focale (F)}} * \text{hauteur terrain (H)}$$

Vitesse de finesse maximale : vitesse, d'un aéronef à voilure fixe, pour laquelle le rapport  $\frac{\text{taux de chute}}{\text{vitesse horizontale}}$  est minimum lorsque l'aéronef plane (moteur coupé). Le taux de chute est la vitesse verticale de descente. Concrètement cela correspond à la pente minimale du vecteur ayant une panne moteur et donc à la vitesse où il consommera le moins et sera le plus efficace.



## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des Abréviations, Sigles et Anglicismes :</b> .....	<b>6</b>
<b>Glossaire</b> .....	<b>7</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>8</b>
<b>Introduction :</b> .....	<b>10</b>
<b>I</b> <b><u>GENERALITE SUR LE MONDE DU DRONE :</u></b> .....	<b>12</b>
I.1    L'AEROMODELISME, DEFINITION : .....	12
I.2    UN PEU DE TECHNIQUE : .....	13
I.2.1    Moteur brushless et contrôleur associé : .....	13
I.2.2    Batterie Lithium-ion-polymère : .....	14
I.2.3    Couple émetteur/récepteur, télémétrie et vol immersif : .....	16
I.2.4    Forme du drone : .....	17
I.3    REGLEMENTATION : .....	18
I.4    BILAN : CONCEPTION DU VECTEUR .....	20
I.4.1    Test en soufflerie de la chaine de propulsion .....	20
I.4.2    Caractéristiques de forme, dimensionnement, masse : .....	21
I.4.3    Contrôle des données de vol en temps réel : .....	22
<b>II</b> <b><u>ÉLABORATION DU CAHIER DES CHARGES</u></b> .....	<b>24</b>
II.1    LA PHOTOGRAMMETRIE COURANTE : PARAMETRES ET RESULTATS ATTENDUS .....	24
II.2    ÉTAT DE L'ART ET DES BESOINS .....	25
II.3    APPORTS ET CONTRAINTES DU GEOREFERENCEMENT DIRECT .....	27
II.4    CAHIER DES CHARGES ET CARACTERISTIQUES REQUISES .....	28
II.4.1    Capteur - L'Appareil Photographique Numérique : .....	30
II.4.2    Localisation - le récepteur GNSS : .....	32
II.4.3    Orientation - la centrale inertielle : .....	33
II.5    CHOIX ET JUSTIFICATION DE L'INSTRUMENTATION.....	34
II.5.1    Appareil Photographique - Caractéristiques et Performances : .....	34
II.5.2    GNSS : méthodologie employée et choix du matériel .....	36
II.5.3    Affranchissement de l'IMU - solution de post-traitement photogrammétrique : .....	38

<b>III</b>	<b><u>PROTOCOLES EXPERIMENTAUX DE VALIDATION DE L'INSTRUMENTATION.....</u></b>	<b>40</b>
III.1	L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE NUMERIQUE.....	40
III.1.1	Réalisation d'un mur de calibration :.....	41
III.1.2	Logiciel de calibration retenu, méthodologie et résultats :.....	42
III.1.3	Conclusion : validation et limitation de l'APN.....	43
III.2	SOLUTION GNSS :.....	45
III.2.1	Création d'une zone de test, grandeur nature :.....	45
III.2.2	Point géodésique : Réseau de Base Français (RBF).....	46
III.2.3	Création d'un réseau de calibration de la solution dronistique : levé GNSS par méthode PPK.....	46
III.2.4	Et le PPP, pourquoi pas ? .....	47
III.3	CALIBRATION DE LA SOLUTION DRONE, PROTOCOLES A REALISER :.....	48
III.3.1	Vérification de fonctionnement de l'instrumentation :.....	48
III.3.2	Calibration automatique en conditions réelles de vol :.....	49
<b>IV</b>	<b><u>VALIDATION DE LA SOLUTION METIER DRONE TOPO.....</u></b>	<b>50</b>
IV.1	PROGRAMMATION DE MISSION ET INTERFACE DE CONTROLE : .....	50
IV.2	SURVOL AUTOMATIQUE DE LA ZONE DE POINTS DE CONTROLE : .....	50
IV.3	POST-TRAITEMENT GNSS ET PHOTOGRAMMETRIQUE - DETERMINATION DE LA PRECISION ...	52
	<b>Conclusion.....</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>54</b>
	<b>Table des annexes.....</b>	<b>56</b>
	<b>Liste des figures.....</b>	<b>79</b>
	<b>Liste des tableaux : .....</b>	<b>80</b>

## Introduction :

Le Travail de Fin d'Études (TFE), dont ce mémoire est issu, est effectué dans le cadre de la troisième et dernière année d'études à l'ESGT. Il vient en achèvement du cursus d'ingénieur et permet de mettre ses connaissances au service d'une entreprise au cours d'un stage de recherche thématique sur 5 mois. Le thème de mon stage est ainsi la définition d'une solution de photogrammétrie par drone ne nécessitant pas l'utilisation de points d'appui au sol et la conception du protocole d'exploitation pour l'entreprise Héliéco.



Figure 1 : Bâtiment des locaux Héliéco  
(sources : <http://www.mobiapps.fr>)

Héliéco est une start-up Nantaise créée officiellement le 18 Mars 2014 qui a pour objectif de concevoir, réaliser et vendre des drones de photogrammétrie aérienne de qualité professionnelle. Cette entreprise est basée au Nord de Nantes, dans le quartier de la Chantrerie, au sein d'un groupement de sociétés innovantes, le Hub-Creatic. Le projet est le fruit de plus d'une année de réflexion et d'étude de la part de son créateur Jean-François BAUDET, qui a voulu pousser l'exploitation des nouvelles technologies et les possibilités des drones, pour les mettre au service du géomètre-topographe (GT). En effet, en concevant un appareil performant capable d'effectuer des relevés photogrammétriques de précision centimétrique, l'apport d'Héliéco pour le monde de la topographie, par rapport à la photogrammétrie classique, est principalement de trois ordres. Tout d'abord la possibilité d'être entièrement autonome en fournissant une chaîne de solution métier complète qui va de la préparation du plan de vol au rendu photogrammétrique (stéréoscopie, nuage de points, ortho-photo, etc...) en passant par la réalisation des prises de vue et leur exploitation. Ensuite, de pouvoir fournir un rendu photogrammétrique complet de précision élevée et quantifiable grâce à des procédures simples et intuitives mais surtout complètes et précises, le tout sans nécessiter le besoin de points d'appui au sol.

Enfin, concernant la partie matérielle, le drone possède un concept novateur : permettre le décollage et l'atterrissage vertical sur un vecteur à voilure fixe, permettant ainsi d'élargir son champ d'exploitation à la quasi-totalité des besoins existants tout en fiabilisant le produit, réduisant par là même le coût d'exploitation global.

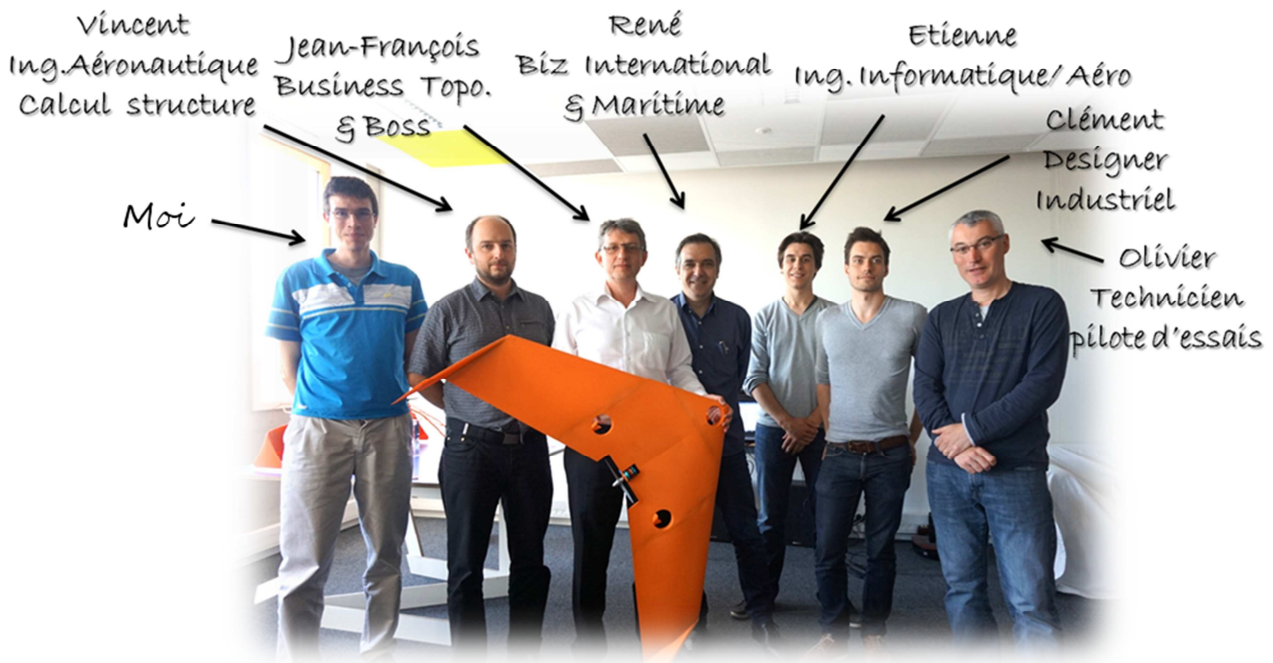


Figure 2 : Équipe Hélicéo - Mai 2014 -

Le présent mémoire, exposera dans un premier temps une introduction au monde technique du modélisme permettant ainsi au lecteur, potentiel utilisateur, de comprendre les notions de bases de fonctionnement et de conception du vecteur drone ainsi que la partie réglementaire indissociable. Ensuite seront présentées les techniques principales et l'instrumentation nécessaire à la photogrammétrie, puis la justification du choix des différents éléments. Après quoi des procédures de tests permettant la validation de cette instrumentation seront proposées, de même que des procédures permettant la mise en évidence de leurs qualité et précision. Enfin, si dans le contexte de début d'entreprise qui nous concerne, le vecteur peut être réalisé ainsi que toute l'instrumentation choisie acquise, nous pousserons l'analyse jusqu'au test final de la solution globale et la détermination de sa précision. Sinon nous nous limiterons à exposer, en fin de ce rapport, les protocoles nécessaires à suivre afin de valider la précision de la solution.

## I Généralité sur le Monde du Drone :

### I.1 L'Aéromodélisme, définition :

Le modélisme est le monde de la maquette (exposition) et du modèle réduit. L'aéromodélisme est une forme de modélisme aérien qui s'est développé en parallèle avec l'aviation. Grâce à l'électronique, ces appareils ont pu être également guidés à distance à l'aide d'un système de radiocommande. Ainsi il était possible d'obtenir un concept de pilotage réaliste et ressemblant aux modèles réels, rendant ainsi la conception et le pilotage accessible à la plupart des passionnés.



Figure 3 : Avion bi-moteur radiocommandé  
(sources : libertebonhomme.fr)



Figure 4 : Hélicoptère radiocommandé à moteur thermique  
(sources : <http://www.vrhc.co.uk>)

Historiquement l'essentiel des modèles étaient divisés en deux branches distinctes : les modèles de type avion (voir ci-dessus, figure 3) qui ont une voilure (les ailes) dite "fixe" et ceux de type hélicoptère (illustration ci-contre : figure 4) à voilure dite "tournante" (les pales).

Parallèlement à cela, les militaires ont travaillé sur des concepts de drones grandeur nature, qui sont des modèles de type avion pour la plupart, dont la caractéristique principale était d'être piloté à distance et non par une personne à bord, pour effectuer des missions sensibles, potentiellement à risque.

Les progrès électroniques de ces dernières années ont permis d'améliorer notablement les techniques de commande par onde, d'élargir les possibilités, de simplifier le pilotage (système de stabilisation et d'aide au pilotage embarqué) et surtout de réduire les coûts, rendant accessible l'activité au plus grand nombre. Aujourd'hui, le drone est une nouvelle branche de l'aéromodélisme orienté tout public ! C'est partant de cette base, que des drones professionnels se développent afin d'effectuer des opérations de plus en plus complexes.

## I.2 Un peu de Technique :

### I.2.1 Moteur brushless<sup>2</sup> et contrôleur associé :

L'élément permettant au drone de se mouvoir est son moteur. Le principe des moteurs électriques est de créer un champ électromagnétique tournant qui engendre un couple sur un axe (le rotor) doté d'électro-aimants (bobines de fil de cuivre parcourues par un courant électrique). Pour les moteurs classiques à courant continu, ces électro-aimants sont alternativement attirés par des aimants permanents fixés à la cage du moteur (le stator). Le courant étant continu, le passage de l'alimentation d'une bobine à l'autre se fait par le frottement de "balais" (contacts métalliques ou en carbone, conduisant l'électricité), alimentés en tension électrique, sur un collecteur fixé sur l'axe du moteur et dont chaque contact est relié à une des bobines. Cette technologie est simple à mettre en œuvre et à exploiter. Cependant elle engendre un rendement et des performances limitées dues aux pertes au niveau des contacts, ainsi qu'une usure de ces derniers à cause des frottements.

Le moteur Brushless utilise la technologie du courant alternatif, triphasé et synchrone. "Alternatif" signifie que le courant est variable selon une fonction périodique, de forme sinusoïdale la plupart du temps ( $f=A \cdot \sin(\omega t + \phi)$ ), avec A l'amplitude du signal,  $\omega$  la pulsation,  $\phi$  le déphasage (autrement dit la phase à  $t=0$ ). "Triphasé" : l'alimentation s'effectue par 3 pôles, comportant chacun un déphasage de valeur  $2\pi/3$  radian (soit  $120^\circ$  ou  $1/3$  de cercle) par rapport au suivant. "Synchrone" signifie que la vitesse de rotation du moteur est définie par le système de contrôle qui l'alimente. En régime établi, elle est synchronisée avec le champ magnétique.

Le moteur est caractérisé par sa courbe de rendement (efficacité en fonction du régime et du couple, soit :  $R = f(C, \omega) = P_u / P_c < 1$ , où C est le couple (N.m) ;  $\omega$  la vitesse de rotation (rad/s) ;  $P_c$  est la puissance instantanée consommée (W) et  $P_u$  la puissance mécanique fournie (W) ) et son  $K_v$  qui est la vitesse de rotation à vide en tr/min.V (tour par minute fois la tension).

Le moteur est alimenté et piloté par son contrôleur. Ce dernier est alimenté en courant continu (par une batterie ou une alimentation stabilisée) qu'il convertit en courant alternatif sur 3 phases. Il est caractérisé par une tension (U en Volt) et une intensité (I en Ampère) maximales, soit par une puissance (P en Watt) maximale :  $P = U \times I$ . Il est commandé par le récepteur. Son rendement n'est également pas parfait (donc forcément inférieur à 1) car de l'énergie est dissipée par effet Joule sous forme de chaleur.<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Anglicisme qui signifie "sans balais"

<sup>3</sup> pour en savoir plus, consulter le site « <http://www.moteurindustrie.com/brushless/technique.html> »



### I.2.2 Batterie Lithium-ion-polymère :

Les batteries utilisées sont constituées d'éléments au Lithium-ion-polymère (Li-po). Elles sont appréciées pour leur capacité massique relativement importante (jusqu'à 200 Wh/kg) et une constitution d'éléments solides ce qui permet d'adapter leur forme. Enfin, elles offrent un taux de décharge très important permettant ainsi de fournir des pics de puissance instantanée importants (plus de 65 C possible, où C est la capacité (Ah) de la batterie). Chaque élément possède une tension nominale de 3,7 V. On les associe en série pour obtenir une tension résultante égale à la somme des tensions des éléments, soit  $N \times 3,7 \text{ V}$ .

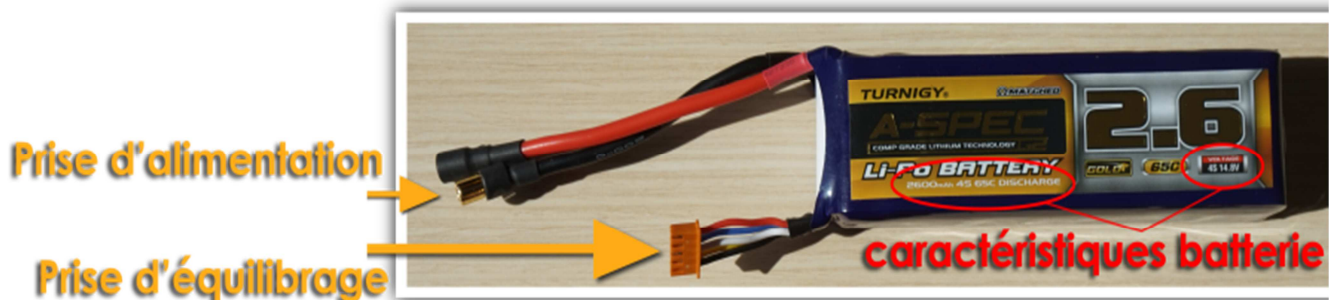


Figure 5 : Batterie Li-po

Cependant, ces accumulateurs nécessitent des conditions d'utilisation très strictes : lors de la recharge, la tension d'un élément ne doit pas dépasser 4,2 V, ni en décharge descendre sous 2,5 V. Si ces prescriptions ne sont pas respectées, l'élément subit une réaction chimique qui le détériore de façon irrémédiable. Ces accumulateurs acceptent des charges rapides si l'on respecte ces conditions. Aussi, lors de la charge chaque élément doit être contrôlé indépendamment. Le pack comporte pour cela une prise d'équilibrage. La recharge est faite par la méthode dite "courant constant, tension croissante", jusqu'à atteindre la tension maximale (4,2V) puis "tension constante, courant décroissant". La charge est considérée comme terminée lorsque le courant de charge descend sous la barre des C/30.

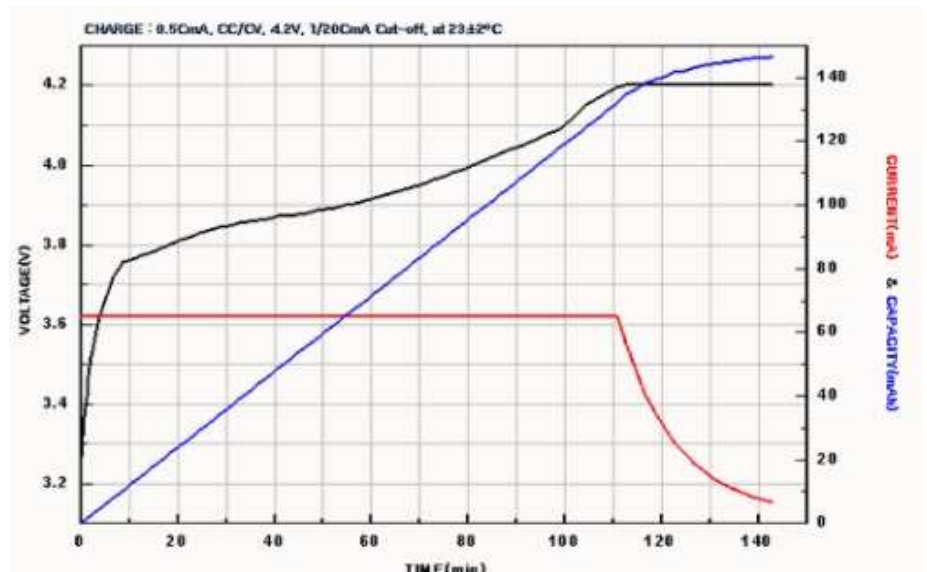


Figure 6 : Illustration de la fonction de charge d'un accumulateur de technologie Li-po (source : <http://www.pobot.org/Les-batteries-Li-Ion-et-Li-PO.html>)

Les caractéristiques permettant de choisir la batterie sont :

- son nombre d'éléments, qui détermine la tension nominale du pack. Par exemple : 4S, signifie qu'il y a 4 éléments, soit une tension nominale :  $U = 4 \times 3,7 = 14,8 \text{ V}$

- sa capacité (C, en Ah ou mAh),

- son taux de décharge maximum (en N C, par exemple : 65 C, si C = 4 Ah, la décharge instantanée maximale est  $I_{\text{max}} = 65 \times 4 = 260 \text{ A}$ , ce qui permet, pour un pack 4S de fournir une puissance maximale :  $P_{\text{max}} = U \times I_{\text{max}} = 14,8 \times 260 = 3848 \text{ W !}$ )

Deux autres éléments importants à connaître, mais non indiqués pour les batteries industrielles, sont :

- le rendement global sur un cycle d'utilisation (une charge et une décharge, en %),

- le nombre nominal de cycles possibles pour les utilisations courantes, autrement dit sa durée de vie.

Pour cela, il est nécessaire d'effectuer par nous-mêmes des tests en laboratoire afin de sélectionner nos batteries sur des critères de performance et de fiabilité.



### I.2.3 Couple émetteur/récepteur, télémétrie et vol immersif :

En modélisme radiocommandé, le principe de base de fonctionnement est la liaison par ondes électromagnétiques entre le pilote et l'appareil. Ainsi, le pilote utilise une télécommande, qui envoie à un récepteur, placé dans l'appareil, les informations de contrôle sur un certain nombre d'actionneurs, appelées "les voies". Ce récepteur décode et interprète les commandes et agit sur les fonctions.

Actuellement la plupart des systèmes radiocommandés fonctionnent à la même fréquence, identique au standard Wifi, c'est-à-dire à l'aide d'une porteuse à 2,4 GHz. Ce standard permet une portée jusqu'à 4 km en champ libre avec des émetteurs dont la puissance est définie par la législation (entre 10 et 100 mW en France, hors dérogation). Il sécurise également la transmission en codant le signal. Cela permet à un grand nombre d'ondes de transiter simultanément sur la même fréquence tout en garantissant une sécurité de contrôle, chaque récepteur étant appairé exclusivement avec son émetteur.

La télémétrie permet à l'appareil mobile de renvoyer au pilote certaines informations en temps réel. Par exemple, la consommation des moteurs, la tension de la batterie, la position GPS, l'altitude (altimètre), la vitesse du vent relatif (sonde Pitot), la puissance du signal de contrôle reçu, etc... Le fonctionnement est sur le même principe que l'émetteur/récepteur du drone, sauf que le signal se déplace dans le sens inverse, soit du drone à la station de contrôle au sol. Nous reviendrons plus loin sur la fonction de ces informations.

Enfin, certains appareils, y compris des drones professionnels, disposent d'un module dit FPV<sup>4</sup> (Vol en immersion) qui permet un retour vidéo en temps réel, issu du drone, vers la station sol. L'utilisateur peut, selon la configuration et les besoins, soit visionner un point de vue de l'appareil en mode "pilote" (vue du nez de l'aéronef) soit en mode "contrôle" qui permet de suivre la caméra de prise de vue dans les mêmes conditions que celles utilisées pour la prise des clichés.

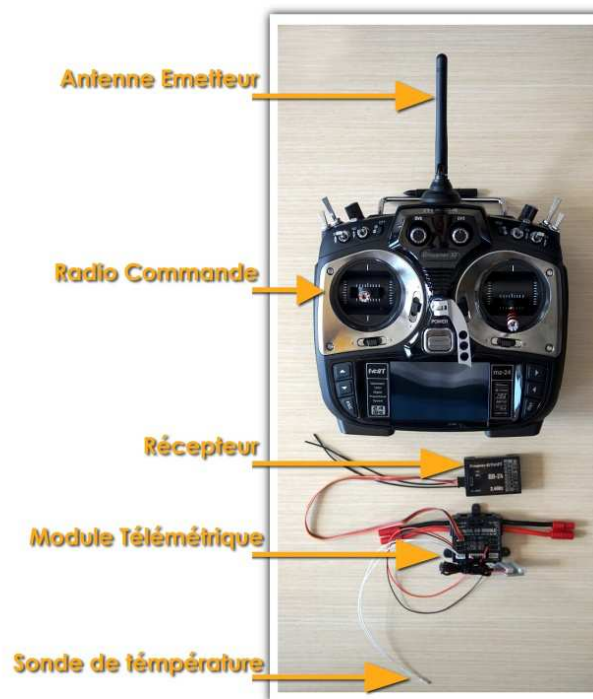


Figure 7 : Émetteur, Récepteur, Module télémétrique, sonde de température

<sup>4</sup> First Person View : "Vision à la Première Personne"

### I.2.4 Forme du drone :

Il existe 2 principaux types de drones sur le marché : ceux à voilure fixe, qui ressemblent à des avions, et ceux à voilure tournante, simple ou multi-rotor (couramment jusqu'à 8). Ces 2 types ont des performances et des caractéristiques très différentes.

Les drones à voilure fixe sont utilisés couramment pour effectuer de longues distances (ex : suivi de réseau EDF) ou faucher de grandes surfaces. Ils décollent, soit lancés à la main, soit par une catapulte. L'atterrissage se fait sur le ventre de l'appareil, à sa vitesse minimale de vol – ce qui engendre des problèmes de casse réguliers – après une procédure d'approche assez complexe.

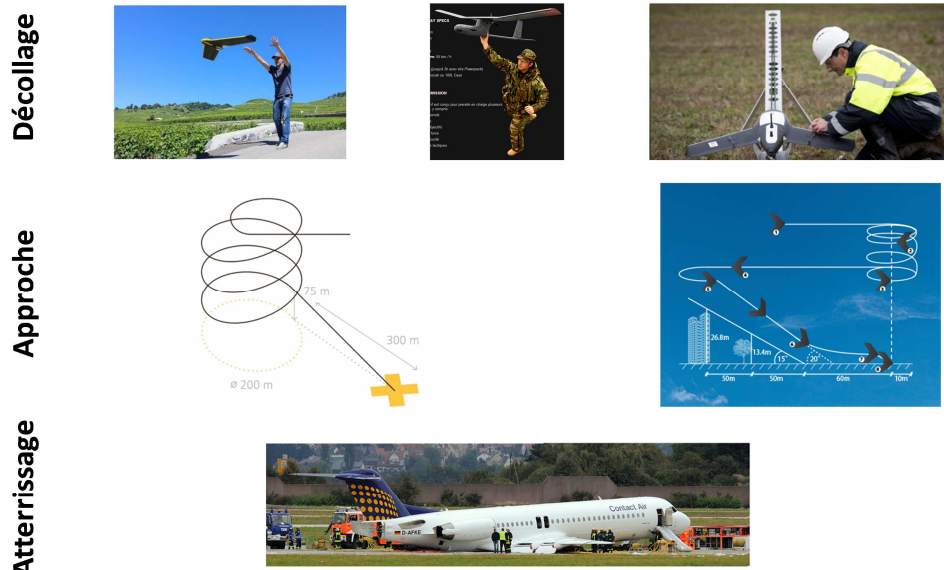


Figure 8 : Illustration des différentes phases de vol d'un drone à voilure fixe, problématiques associées (Sources : Trimble, USArmy, Youtube)

Les drones à voilure tournante sont plus polyvalents : ils peuvent être utilisés n'importe où, puisqu'ils décollent et atterrissent en douceur et verticalement. Cependant, ils sont moins efficaces car n'ont pas de voilure et donc ne planent pas. Ils doivent en permanence créer une poussée d'air pour compenser leur poids. Et se déplacent plus lentement. Ils ont donc moins d'autonomie (durée de vol : de 15 à 20 min) et une endurance (distance parcourue) très limitée. Dans le monde professionnel ils sont plus polyvalents et ne sont pas utilisés que pour de la photogrammétrie mais aussi et surtout pour effectuer des prises de vues aériennes, par les photographes, reporters ou cinéastes. L'objectif de ces appareils est plus souvent visuel que pour effectuer des mesures.



Figure 9: Quadri-rotor (sources : www.suasnews.com)

### I.3 Réglementation :

Si le drone ouvre la voie à un immense champ de possibilités, son utilisation est également susceptible d'engendrer nuisances et dérives, sans parler des menaces terroristes. Il est donc indispensable de prévoir des règles encadrant l'usage de cette pratique, surtout lorsqu'elle est utilisée dans un cadre professionnel.

La France a été le premier pays au monde à légiférer sur les drones - dès Avril 2012 - après plusieurs mois de concertation entre le gouvernement et la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) par l'arrêté du 11 Avril 2012 encadre les règles de conception, d'utilisation et d'autorisation de vol des drones aériens. Il fixe également les règles concernant les personnes autorisées et aptes à les piloter. Deux branches bien séparées sont prévues par ce texte : les aéronefs volant à but de loisir, d'une part, et à but professionnel, d'autre part. Vu le sujet de ce mémoire, et la complexité relative de l'arrêté, nous nous limiterons ici au cadre qui nous intéresse et nous contenterons ici d'effectuer une synthèse des éléments utiles à notre domaine.

L'arrêté classe tout d'abord les aéronefs en 7 catégories en fonction de leurs caractéristiques et prévoit 4 scénarios de vol principaux qui définissent le type de zones (urbaine, rurale ou protégée - club d'aéromodélisme) et les conditions de vol (distance du télé-pilote, vue directe ou non, vol automatique ou manuel, hauteur maximale de vol, etc...). Il reste possible de demander des dérogations afin d'élargir les possibilités d'utilisation des drones.

Globalement 2 scénarios intéressent particulièrement notre activité :

- S-2 : hors vue directe, hors zone peuplée, distance maximale drone / télé-pilote : 1 km, hauteur de vol maximale : 50 m (jusqu'à 150 m dans certaines conditions) ; ce scénario sera souvent utilisé en France pour des levés locaux en zone rurale ;
- S-3 : vue directe, en zone peuplée, distance horizontale maximale de 100 m, ce scénario sera souvent retenu pour des levés urbains d'architecture, par exemple.

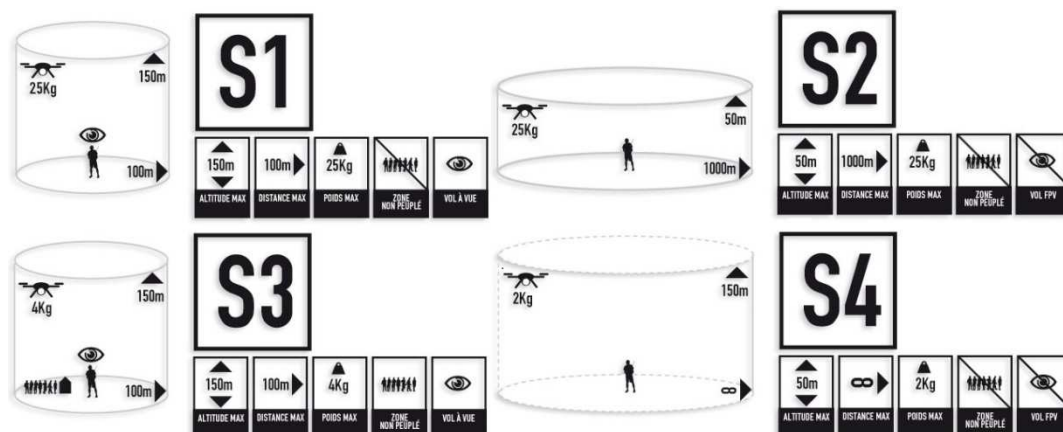


Figure 10 : Récapitulatif des différents Scénarios de vol (Sources : <http://www.agily-drones.com>)

- Le S1 est le cas du drone dans le cadre d'une enceinte d'aéromodélisme, donc à vue, et hors du public.

- Le S4 élargit l'utilisation du drone via une distance illimitée. Mais la masse au décollage est réduite à 2kg et les capacités du télé-pilote sont soumises à des conditions très strictes : détention d'un brevet d'aptitude au vol avion ou hélicoptère avec 100 h de pratique.

Il existe également un scénario S2+ qui est une extension du scénario S2 avec une hauteur de vol maximale élevée à 150m au lieu de 50.

L'exploitant est également soumis au respect d'obligations légales, dont les principales sont les suivantes :

- Déclaration Annuelle d'Activité (DAA) pour de la prise de vue aérienne,
- Dépôt d'un Manuel d'Activité Particulière (MAP) et d'une Déclaration de conformité (DC)
- Déclaration d'activité de prise de vue aérienne (formulaire Cerfa 12546\*01),
- Demande d'autorisation de vol préalable en Préfecture (scénario S3),
- Demande d'autorisation de vol préalable à la DGAC (scénario S2 ou S4),
- Brevet de pilote partie théorique (pour le télé-pilote),
- Respect de la réglementation sur les fréquences et puissances radio,
- Identification de l'aéronef apposée sur la structure (nom et coordonnées de l'exploitant),

Pour plus d'information, le lecteur pourra se référer au tableau récapitulatif de la DGAC complet (annexe 1).

Au niveau international, la législation concernant les drones est très variable selon les pays. Aux États-Unis par exemple, les drones existent depuis longtemps dans le monde militaire mais les drones civils sont, en l'état actuel, tout simplement interdits. Une ouverture du marché aux drones civils est prévu mais pas avant 2015. Dans d'autres pays, tel que le Pérou par exemple, les drones ne sont pas directement prévus par la législation et sont donc tolérés.

Enfin, afin d'être autorisé au pilotage d'un drone, la réglementation Française impose au télé-pilote une connaissance de base dans le domaine de l'aéronautique, validé par l'obtention d'un brevet théorique de pilote organisé par la DGAC : brevet ULM ou Pilote Privé Avion (PPL(A) ) ou Hélicoptère (PPL(H) ), afin de disposer des notions de bases aériennes, de climatologie et de fonctionnement mécanique.

L'examen est purement théorique : c'est un questionnaire à choix multiple de 40 questions dont il faut obtenir 75% de bonnes réponses au minimum afin de valider l'examen. Pour garantir la réussite à cet examen j'ai utilisé diverses sources de documentation, ainsi que des sites internet permettant de passer des sessions d'examens fictives (40 questions sur 1h) permettant de corriger au fur et à mesure ses erreurs et d'approfondir par la même occasion ses connaissances. Le diplôme a été passé le Mercredi 11 Juin avec succès (cf annexe2).

## I.4 Bilan : conception du vecteur

Les performances de vol du drone seront issues de ses caractéristiques intrinsèques de forme et masse : aérodynamisme (SCx), trainée induite (F en gramme de poussée), vitesse de vol (m/s) notamment, ainsi que du rendement global de tous les éléments de la chaîne de propulsion décrits dans les parties qui précèdent. L'objectif est ainsi de minimiser F, donc le SCx (Cx : coefficient de pénétration dans l'air, S : coefficient d'échelle) et dans le même temps de maximiser le rendement global,  $R_g$  où :

$$R_g = \text{Rendement global} = R_{\text{moteur}} * R_{\text{contrôleur}} * R_{\text{accu en décharge}} * R_{\text{hélice}} < 1$$

$$\text{Efficacité} = f(R_g, SCx)$$

Cela nous donnera, en conditions de vol réelles, les caractéristiques du vecteur en termes de performances de vol : autonomie, vitesse et donc l'endurance (distance parcourue par vol).

### I.4.1 Test en soufflerie de la chaîne de propulsion

Afin de concevoir la chaîne de propulsion la plus efficace possible, il est nécessaire de pouvoir sélectionner avec précision chacun des éléments de la chaîne (accumulateur - contrôleur - moteur - hélice) afin d'avoir les éléments les plus performants en terme de rendement. Afin de tester ces éléments, nous aurons recours à une soufflerie conçue et fabriquée par nous-mêmes.

Durant la première période de mon stage, lorsque tout était à créer, le gros de mon travail aura été de réaliser cette soufflerie : recherche et découpe d'un conduit de 31cm de section, commande de l'instrumentation (hélice et moteur propulsifs, contrôleur associé, banc dynamométrique, anémomètre) montage et sécurisation de l'ensemble. L'ensemble de ce travail m'aura pris environ 2 semaines à temps plein, de la conception, à la réalisation en passant par la recherche des équipements et outils nécessaires.

J'ai également effectué les premiers tests en soufflerie. Cependant, depuis Mai 2014, Olivier, technicien passionné de modèle réduit télécommandé de type planeur, également pilote aux championnats de France dans cette discipline, a été recruté par Héliéco afin entre autres, d'effectuer les différents tests en soufflerie. Son haut niveau de compétence et sa gentillesse le rendent d'une grande efficacité et d'une aide précieuse dans de nombreux domaines.



Figure 11: Photo de la soufflerie tubulaire



#### I.4.2 Caractéristiques de forme, dimensionnement, masse :

La conception de forme de notre vecteur a été réalisée par notre collègue Ingénieur en structure des matériaux et par ailleurs passionné de modélisme. La masse maximale souhaitée ne doit pas dépasser 4 kg pour satisfaire à certaines normes de la DGAC<sup>5</sup> (scénario S-3). La forme ainsi définie nous donne « la vitesse air » (vitesse relative non par rapport au sol mais par rapport à l'air) la plus efficace, qui correspond à la vitesse de finesse maximale (rapport entre la distance horizontale parcourue et l'altitude perdue, drone planant, moteur à l'arrêt) ainsi que la traînée induite. De là, en plus d'avoir un appareil performant, aérodynamiquement parlant, nous pouvons en déduire la poussée nécessaire du moteur sur la plage de fonctionnement nominale, ce qui nous permettra de sélectionner la chaîne de propulsion qui aura les meilleures performances autour de ce point de fonctionnement.

De plus, le drone Hélicéo exploite un concept novateur : le principe d'un vecteur à voilure fixe mais "V-TOL"<sup>6</sup>, c'est-à-dire à décollage et atterrissage verticaux, associant ainsi les performances des drones à voilure fixe, avec la fiabilité et la polyvalence des multi-rotors.

Type de Vecteur	Voilure Fixe	Multi-rotor	Drone Hélicéo	Critères de notation : (note de 0 à 10 en fonction des performances)
Décollage	3	9	9	Facilité, gestion des contraintes
Atterrissage	1	8	7	Fiabilité, précision,
Endurance	9	4	8	Distance parcourue, surface levée par mission
Autonomie	8	5	7	Durée du vol
Polyvalence	3	6	9	Diversité des missions possibles
Vol Statique	0	9	8	Capacité de travail en vol statique

Tableau 1 : Avantages/Inconvénients des différents types de Drones, devant conduire à la solution Hélicéo

Le drone Hélicéo est un aéronef à voilure fixe à part entière, mais pourvu de 3 turbines permettant les décollage et atterrissage verticaux. Dans les parties qui suivent nous nous contenterons donc de faire l'état de l'art des aéronefs à voilure fixe uniquement.

- Hélicéo réalise le 1<sup>er</sup> drone professionnel à Décollage et Atterrissage Vertical. VTOL

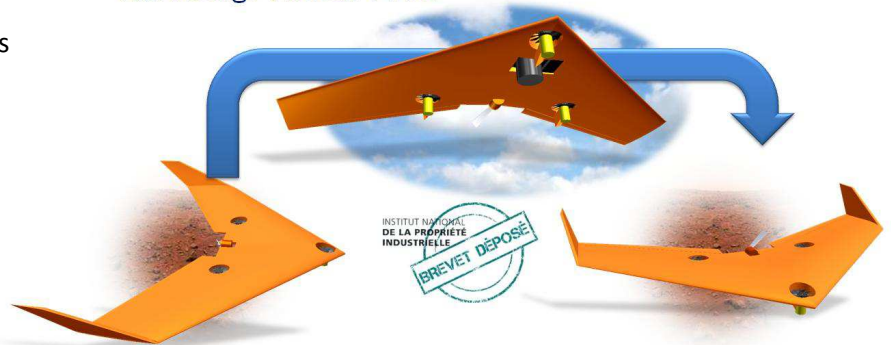


Figure 12: Illustration du concept Breveté VTOL Hélicéo

<sup>5</sup> Direction Générale de l'Aviation Civile

<sup>6</sup> Vertical Take-Off and Landing

### I.4.3 Contrôle des données de vol en temps réel :

Pour l'utilisation du drone, les informations de télémétrie sont capitales. Il faut en effet :

- 1) Garantir et assurer la sécurité du vol,
- 2) Assurer la fidélité du vol par rapport aux paramètres prédéfinis,
- 3) Garantir l'exploitation possible des données.

Cela est possible par un contrôle en temps réel des caractéristiques du vol grâce à l'instrumentation. Il ne reste qu'à fixer les indicateurs et programmer des seuils d'alerte au niveau de la station de contrôle à partir de laquelle l'utilisateur suivra en temps réel le déroulement de la mission du drone. Les paramètres à surveiller seront les suivants :

- Tension de batterie basse : pour une batterie 4S, la tension nominale est de 14,8 V. Nous fixerons un seuil d'alerte autour de 12,8 V (3,2 V/élément) soit 90 % de la capacité de la batterie, afin de conserver une marge de sécurité suffisante (10 %) pour permettre au drone de revenir à sa base, sachant que la tension de destruction serait de 10 V (2,5 V/élément).

- Puissance du signal reçu par le récepteur du drone (dB) ;

- Écart de position entre le plan de vol et la position réelle (DX,DY,DZ, à partir de la position GPS<sup>7</sup> temps réel, approximatives) avec un seuil d'alerte fixé de manière à garantir le recouvrement minimal prévu entre les bandes ;

- vitesse GPS (= Vitesse sol), afin de ne pas risquer une fréquence de prise de vue supérieure à la vitesse maximale de l'APN (Appareil Photographique Numérique) et de conserver les spécifications de la mission (position des photos, taux de recouvrement, effet de filé) ;

- qualité intrinsèque de réception du capteur GPS : GDOP < 4 ;

- vitesse air (grâce à une sonde Pitot qui détermine un différentiel entre une pression statique et une pression dynamique), dont les extrêmes sont définis par les caractéristiques structurelles et aérodynamiques du drone, notamment la  $V_{min}$  qui est égale à la vitesse de décrochage et la  $V_{max}$  correspondant à la vitesse maximale permise par le moteur de propulsion. La vitesse par défaut sera la vitesse\_de\_finesse\_maximale<sup>8</sup>, afin d'avoir la meilleure endurance possible.

Le contrôle de ces paramètres est fondamental afin de garantir un résultat exploitable, la fiabilité du drone et la sécurité du contrôle. Un crash, étant donné la technologie embarquée et le coût du drone, **ne doit pas être acceptable !**

---

<sup>7</sup> Global Positioning System

<sup>8</sup> Voir définition dans le Glossaire en p5

## Un pré-bilan peut dès lors être effectué :

### Définition et objectif du projet dronistique Hélicéo :

Le drone Hélicéo a l'ambition de fournir au client une solution métier complète permettant à l'utilisateur d'effectuer tout type de travaux photogrammétriques, de précision, quelles que soient les contraintes de situation grâce à la technologie VTOL, et avec grande efficacité grâce à l'affranchissement de la nécessité de points d'appui sol.

\*\*\*

### La Professionnalisation :

Le drone sera un produit de qualité, fiable, efficace, simple et ergonomique.

\*\*\*

### Verticalisation :

Les domaines d'emploi du drone seront ciblés par la livraison d'une solution métier pour le Géomètre-Topographe. L'objectif est de couvrir la totalité des besoins du marché de la topographie : longue distance, précision, polyvalence, fiabilité et optimisation de tous les éléments de la chaîne : efficacité vecteur, performance de restitution, simplicité d'emploi.

\*\*\*\*\*

Dès lors, après avoir vu dans le premier chapitre la définition du monde de l'aéromodélisme amenant à la conception d'un vecteur efficace, nous allons voir, dans les 3 chapitres qui suivent, les éléments nécessaires aux choix de l'instrumentation, de la méthodologie de travail et des protocoles de validation de la solution à travers l'étude des différents éléments la composant : capteur, instrumentation GPS, traitement (logiciel), rendu final (MNS, ortho-photo...).



## II Élaboration du Cahier des Charges

### II.1 La Photogrammétrie courante : paramètres et résultats attendus

"La **photogrammétrie** est une technique qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Recopiant la vision stéréoscopique humaine, elle a longtemps exploité celle-ci pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue. Actuellement, elle exploite de plus en plus les calculs de corrélation entre des images désormais numériques. Cette technique repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité."<sup>9</sup>

Ainsi, la photogrammétrie courante actuelle utilise comme données d'entrée :

- des photographies numériques,
- les caractéristiques d'orientations interne et externe des prises de vue (caractéristiques de calibration géométrique de l'APN, position du centre optique et orientation du capteur dans le repère terrain),
- un ensemble de points d'appui.

En sortie, elle permet d'obtenir l'ortho-mosaïque de la zone couverte (assemblage des images et corrections géométriques),

- son géoréférencement (ce qui la rend superposable à une carte, avec la possibilité de pouvoir associer à chaque pixel ses coordonnées terrain dans le système de référence local),
- le modèle numérique de surface (MNS) : altitude (Z) des éléments de surface pour chaque couple de coordonnées (X,Y) de l'image.

Ainsi, le résultat final est identique à un nuage de points colorisés des éléments de surface dont le modèle est 2D +1, c'est à dire qu'à chaque (X,Y) au sol, on admet qu'il n'existe qu'un seul Z. Ce qui est une simplification de la réalité mais permet un traitement efficace de la plupart des éléments.

La solution Hélicéo souhaite s'affranchir des points d'appui sol ce qui correspond à effectuer un géoréférencement direct des images. Nous verrons dans le troisième chapitre la méthodologie imposée pour parvenir à cet objectif.

---

<sup>9</sup> Très bonne définition du site Wikipedia au 16 Février 2014.

## II.2 État de l'art et des besoins

Les besoins en photogrammétrie aérienne sont de plusieurs natures et d'ordres variés, selon la grandeur de la surface à relever, la précision et la résolution<sup>10</sup> voulue, et la situation ou la forme du lieu. Les exécutants de ces travaux disposent de plusieurs outils que sont principalement les avions et hélicoptères, les satellites et enfin les drones.

Il existe également plusieurs types de capteurs : capteur classique RVB<sup>11</sup> (permettant de mesurer la couleur), caméra thermique (capteur infrarouge thermique qui mesure une température), le LIDAR<sup>12</sup> ou le RADAR (mesure les distances par la réflexion sur l'objet respectivement d'un signal visible ou d'ondes électromagnétiques). Actuellement, les drones sont essentiellement équipés de capteurs classiques RVB.

Chaque type de besoin nécessite l'emploi de l'outil approprié, essentiellement pour des raisons économiques. Actuellement les drones émergent et sont surtout employés sur des chantiers de taille réduite. L'avion ou l'hélicoptère de photogrammétrie demeurent d'actualité. Cependant, avec la raréfaction des carburants, et l'amélioration des performances dronistiques, il est prévisible qu'à moyen et long terme, les drones grignotent petit à petit des parts de marché aux aéronefs plus lourds. Quant aux satellites, les marchés ne sont, pour le moment pas compatibles : des satellites sont en permanence employés mais pour des utilisations souvent très spécifiques nécessitant des capteurs complexes et lourds. Souvent pour des chantiers de très grande taille, à l'échelle d'un pays ou de la planète notamment (cf avènement de l'image aérienne avec Google Earth).

Voici un exemple de mission de photogrammétrie aérienne proposée par le service du cadastre de Rennes, qui fait effectuer actuellement ce genre d'opération par un avion de photogrammétrie spécialisé et qui se montre intéressé par la solution

Mission type :		
Résolution		< 8 cm
Surface		3 à 12 km <sup>2</sup>
Recouvrement	Longitudinal	80 %
	Latéral	60 %

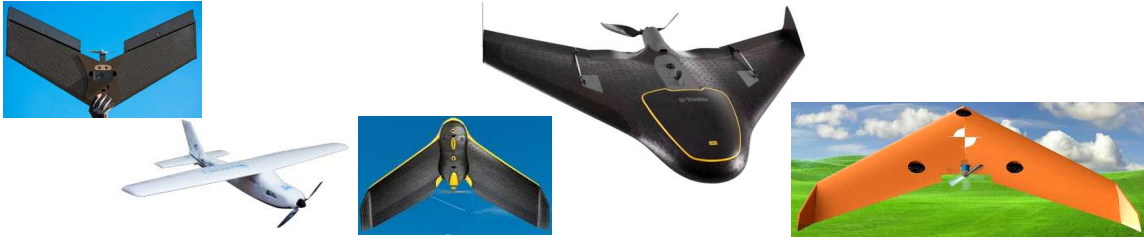
Tableau 2 : Nature de travail photogrammétrique courant

Nous allons à présent dresser un état de l'art des drones de photogrammétrie à voilure fixe existant actuellement et comparer leurs différentes caractéristiques avec le projet Hélicéo :

<sup>10</sup> Rappels : la résolution est la taille de la projection d'un pixel au sol ; la précision, relative ou absolue, est la valeur de l'écart entre les valeurs calculées et les valeurs vraies.

<sup>11</sup> RVB = Rouge, Vert et Bleu : les 3 couleurs élémentaires qui composent la lumière visible

<sup>12</sup> Light Detecting And Ranging : méthode de mesure de distance par faisceaux laser



Marque	Lehmann Aviation	MAVinci	SenseFly	Trimble	Hélicéo	
Modèle	LA300	Sirius UAS	eBee	UX5	Fox	
Matériaux	EPP	Elapor	EPP & Carbon	Carbon	Carbon & Composite	
Poids (kg)	0.95	2.7	0.7	2.5	4	
Envergure (cm)	92	163	96	100	120	
Vitesse de vol (km/h)	80	65	57	80	80	
Résolution (cm)	min	0.5	1.6	3	2.4	1
	max	4	10	30	24	20
Autonomie (min)	30	55	50		60	
Endurance	(km)	40		60	80	
	(km <sup>2</sup> )	20	10		15	60
Portée (km)	15	4	3	5	10	
Altitude (m)	min	20	100	50	75	0
	max	500		300	750	1000
Type de	décollage	lancé à main			Catapulte	VTOL automatique
	atterrissage	Ventre				
Vent max (km/h)	35	65	45	60	60	
Nécessité de pt d'appuis sol	oui/NON	oui	non	oui		non
	si NON, comment ?		GPS RTK			GPS PPK
Caméra (Mpix)	41	16		16.1	20	
Lien (sources)	<a href="http://lehmannaviation.com">lehmannaviation.com</a>	<a href="http://mavinci.de">mavinci.de</a>	<a href="http://sensefly.com">sensefly.com</a>	<a href="http://uas.trimble.com">uas.trimble.com</a>	<a href="http://heliceo.net">heliceo.net</a>	
Prix	6900	27000	16500	31000	27000	

Tableau 3 : Etat de l'art de l'existant. Principales caractéristiques. (Sources : sites constructeurs).

Le Sirius de MAVinci est le seul drone à proposer un géoréférencement direct des images sans point d'appui sol. Il utilise pour cela un récepteur GNSS RTK mais l'analyse du site du constructeur ne fait ni apparaître la méthodologie utilisée, ni les tests effectués leur permettant de justifier leur précision de 5 cm et l'on ne sait pas s'il s'agit d'une précision absolue ou relative.

Le Lehmann fait apparaître un capteur de 41 Mpix ce qui est énorme et peut paraître très intéressant, surtout compte tenu du prix. Cependant, il s'agit en fait d'un capteur miniature issu d'un Smartphone Nokia, ce qui doit interpeler quant à la possibilité de pouvoir exploiter réellement une telle finesse. Surtout pour ensuite permettre d'en extrapoler des mesures. Et quid du traitement de l'effet de filé ? Contacté sur ces questions, le fabricant n'a pas donné de réponses.

L'on peut remarquer que les caractéristiques de vol et de tenue au vent sont globalement du même ordre d'un appareil à l'autre. Les 2 sont liés : plus le drone volera vite, moins il sera sensible au vent. Les indications de tenue au vent, sur les sites constructeurs, sont souvent flatteuses. Qu'en est-il de la réalité ? Et quand bien même le vol serait possible, les données resteraient-elles exploitables ? Les performances annoncées auront été testées par Hélicéo au préalable. En outre, à l'issue des premiers tests, le potentiel de vitesse maximale du vecteur est supérieur à 200 km/h !

### II.3 Apports et contraintes du géoréférencement direct

Le Géoréférencement direct est le fait de pouvoir géoréférencer l'orthophoto finale obtenue sans nécessiter l'emploi de points d'appui au sol, dont la mise en place nécessite du temps et donc génère un surcoût substantiel.

Le principe de cette opération consiste donc à redéfinir les paramètres de prises de vue de manière à déduire l'aérotriangulation préalablement à la création de l'orthophoto. C'est-à-dire qu'il faut que pour chaque cliché, l'on puisse connaître avec précision la position du centre optique ainsi que l'orientation de la matrice du capteur dans le repère terrain. Pour cela, nous devons appareiller notre drone avec un récepteur GNSS très précis ainsi qu'une centrale inertielle (IMU). Ces appareillages ne peuvent pas, par nature, nous donner les informations qui nous intéressent (le centre de phase de l'antenne GNSS n'est pas au même point que le centre optique, et l'IMU ne donne pas directement les angles de tendance de la matrice de l'APN), il est donc nécessaire d'effectuer un calibrage global de l'instrumentation dans le drone de manière à déterminer les formules de passage permettant d'obtenir les données nécessaires à partir de celles mesurées par l'instrumentation. Bien sûr, l'APN sera calibré afin que les clichés obtenus puissent être corrigés des déformations optiques de manière à pouvoir utiliser les modèles mathématiques de la perspective conique pour chaque image.

L'appellation courante des 3 angles d'attitude est : roulis, tangage et cap (ou dérive ou lacet), respectivement en anglais : Roll, Pitch, Yaw/Heading. En mathématique, les notations respectives sont les lettres Grecques suivantes :  $\omega$  (petit omega),  $\varphi$  (petit phi),  $\kappa$  (petit kappa) (cf figure 10, ci-contre).

En photogrammétrie il existe également une autre appellation courante pour ces 3 angles, qui sont respectivement : le site, la convergence et le déversement. L'angle de convergence est alors mesuré positivement dans le sens dextrogyre (sens horaire) et non plus dans le sens trigonométrique

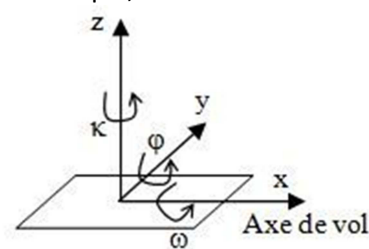


Figure 13 : Angles d'attitude  
 (sources : Cours ENSG, Laure Chandelier)

## II.4 Cahier des charges et caractéristiques requises

La précision du géoréférencement des images sera dégradée par l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure et de traitement, et dépendra de façon très importante de la méthodologie utilisée.

L'erreur résultante entre les coordonnées d'un point terrain calculé par rapport à ses coordonnées réelles, peuvent se déterminer en corrigeant toutes les erreurs selon l'équation suivante :

$$e_{X,Y,Z} = (X, Y, Z)_{mesuré} - (X, Y, Z)_{vrai}$$

$$= f(e_{GPS(X,Y,Z)}, e_{ori(\omega,\varphi,\kappa)}, e_{calibAPN}, e_{boresight}, RésO_{APN(i,j)}, \Delta t_{PdV/GPS}, \Delta t_{vObt/vDrone})$$

Avec :  $e_{GPS(X,Y,Z)}$  : erreur de positionnement absolu du GPS embarqué ;

$e_{ori(\omega,\varphi,\kappa)}$  : erreur d'orientation lors de la prise de vue ;

$e_{calibAPN}$  : erreur de calibration de l'APN ;

$e_{boresight}$  : erreur de rattachement entre le repère GPS et le repère APN

$RésO_{APN(i,j)}$  : erreur de pointé issue de la résolution de la solution (taille du pixel au sol)

$\Delta t_{PdV/GPS}$  : erreur due à la synchronisation entre l'APN et le GPS

$\Delta t_{vObt/vDrone}$  : erreur de filé due au déplacement du drone durant le temps d'ouverture de l'obturateur. (Sources disponibles dans la section bibliographie, en fin de rapport)

Pour un traitement rigoureux, il faudrait être en mesure de déterminer avec précision l'impact de chacun de ces paramètres, être capable de les quantifier puis de les corriger.

Le schéma suivant (figure 14) montre le principe de synchronisation à mettre en œuvre pour obtenir la position précise réelle du drone au moment de la prise du cliché :

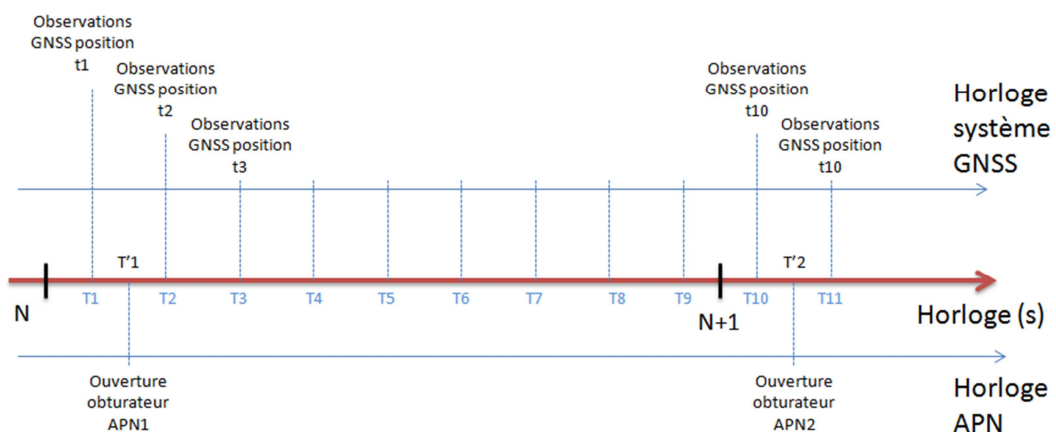


Figure 14 : Schéma de principe de la synchronisation de l'instrumentation

La "date" du cliché correspond au moment précis de l'ouverture de l'obturateur, au temps d'exposition (typiquement inférieur à 1 ms) près, et non pas au moment où l'ordre est envoyé, car comme pour tout système électro-mécanique, l'on peut s'attendre à l'existence d'un délai entre ces 2 évènements (ordre-action). Sur la même horloge l'on doit être capable de situer les informations de positionnements données par le GPS. Ainsi, dans l'exemple de la figure 14, nous avons une horloge commune sur laquelle sont synchronisés l'APN et le récepteur GNSS. Ce dernier travaille à une fréquence d'environ 10 Hz (dans l'exemple) et nous prenons environ une photo par seconde. L'APN envoie un "top" à l'horloge au moment où l'obturateur s'ouvre (cette procédure consiste à implanter dans l'appareil 2 fils en parallèle de l'obturateur). Pour le récepteur GNSS, le "top" est connu avec précision car l'horloge GNSS est très précise. Il suffit donc de synchroniser l'horloge principale sur l'horloge GNSS.

Dans notre exemple, le cliché APN1, pris à l'instant T'1, se trouve entre les positions GNSS T1 et T2. Pour connaître la position "GNSS" à l'instant précis T'1, l'on effectuera une simple

$$\text{interpolation : } (X_{T'1}, Y_{T'1}, Z_{T'1}) = \frac{(X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}) + (X_{T2}, Y_{T2}, Z_{T2})}{2}$$

Et l'on raisonne de même pour T'2, dont la position sera interpolée entre T10 et T11 et ainsi de suite...

Les coordonnées ainsi obtenues seront celles utilisées et à partir desquelles nous effectuerons les transformations dues aux offsets de positionnement entre les points GNSS et le centre optique de la caméra. Puis pour obtenir le fichier de coordonnées des clichés qui comprendra 4 colonnes de ce type : N° du cliché - latitude - longitude - hauteur ellipsoïdale.

Le référentiel utilisé est donc dans un premier temps celui du récepteur soit le WGS 84.

### II.4.1 Capteur - L'Appareil Photographique Numérique :

Aujourd'hui certains appareils grand public haut de gamme sont suffisamment performants pour pouvoir être utilisés de façon pertinente pour nos besoins. L'une de mes premières activités au sein d'Hélicéo aura été d'établir un tableau comparatif concernant l'existant en APN, de manière à pouvoir les sélectionner sur des critères à établir.

Ceux-ci sont de 2 types : les performances (qualité, taille et résolution du capteur, qualité de l'optique, largeur de la prise de vue, rapidité) pour la qualité photogrammétrique d'une part et la forme (dimension, poids, solidité), pour l'intégration de l'appareil dans le drone d'autre part.

En terme de performances et de qualité brute, les appareils de type Reflex sont les meilleurs (résolution capteur élevée, optique de qualité, capteur plein format...), cependant leur poids et volume demeurent actuellement encore trop élevés et grèveraient de manière rédhibitoire les performances du drone (poids, aérodynamisme donc : autonomie, endurance, maniabilité, etc...). Cependant les APN compacts ont évolués de manière importante et des modèles quasi-professionnels, à optique interchangeable et grand capteur (APS-C<sup>13</sup> de la société Sony, notamment) sont apparus, concurrençant directement, en termes de qualité et performance les APN reflex, tout en permettant un gain de poids et de volume remarquable.

Le graphique ci-dessous (figure 15) montre l'intérêt d'un grand capteur et notamment l'intérêt du capteur APS-C qui offre un ratio 3/2, comme le 24x36, et non 4/3, ce qui est plus intéressant pour une utilisation photogrammétrique. En effet, en mettant la grande longueur perpendiculairement à l'axe du vol, l'impact sur la largeur de fauchée est plus important. Les clichés seront pris à une fréquence plus élevée mais le nombre de bandes, donc d'allers-retours, effectués par le drone seront réduits et le plan de vol sera ainsi optimisé (Surface fauchée maximale pour distance et temps de vol minimaux). Contrairement aux capteurs plus petits qui, pour les hautes résolutions, engendrent une taille de photosites si fine qu'ils sont souvent inexploitable à 100%.

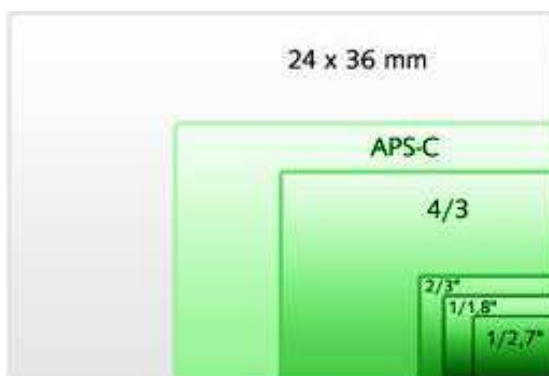


Figure 15: Taille relative des différents capteurs

<sup>13</sup> Advanced Photo System type Compact

De plus, les dimensions du capteur sont nécessairement à connaître afin de pouvoir convertir la distance focale réelle en distance focale équivalente pour un capteur 24x36 et ainsi en déduire l'angle d'ouverture : la largeur du capteur APS-C de Sony, par exemple mesure 23,5 mm, le rapport de conversion est donc :  $Rap = \frac{36}{23,5} = 1,53$ .

Cela nous permet de calculer l'équivalence en distance focale par rapport aux capteurs 24x36 mm<sup>2</sup> : Pour le 10 mm, l'équivalence est de  $10 \times 1,53 = 15,3$  mm et pour le 16 mm, elle est de  $16 \times 1,53 = 24,5$  mm.

De plus, la réglementation concernant l'utilisation des drones impose des hauteurs de vol maximales (50 ou 150 m). Le drone étant limité en autonomie, la surface fauchable par vol est donc directement liée à l'angle d'ouverture de l'objectif, car l'on fera moins d'allers-retours sur une zone donnée en fauchant large qu'en fauchant étroit. Un objectif grand-angle est donc à privilégier afin de satisfaire à ce besoin, au détriment de la résolution, pour une hauteur de vol et un capteur donnés.

Il sera également nécessaire de tenir compte de la combinaison entre la vitesse d'obturation et le diamètre de l'ouverture, afin de ne pas être trop impacté par l'effet de filé (ouverture durant 1 ms engendre, à 80 km/h un filé au sol de :  $f = \frac{80}{3600} * 10^{-3} = 2,2$  cm ce qui reste acceptable pour une résolution de 5 à 10 cm. Il faudra par contre veiller à ne pas trop dépasser cette durée d'ouverture), tout en gardant une luminosité de l'image importante pour avoir un contraste et un résultat exploitable. Pour ce critère, la taille de la matrice même - et pas seulement sa définition - doit être nécessairement prise en compte : plus le capteur sera grand, plus la luminosité captée sera importante, et donc la qualité du cliché. En partie pour les mêmes raisons - vitesse de déplacement et pourcentage de recouvrement - il faudra tenir compte de l'intervalle de temps entre chaque prise de vue. En poussant même jusqu'à la prise en compte du vent, étant donné que la constante de vol sera plus une vitesse air qu'une vitesse sol<sup>14</sup> !

A l'issue de ces constatations, le cahier des charges retenu imposera donc :

- une définition minimale de 18 Mpix (avantage concurrentiel, cf tableau 3),
- l'angle de prise de vue le plus large possible (donc : focale la plus courte possible),
- un capteur de "grande taille" (si possible APS-C pour une largeur optimale),
- un intervalle de prise de vue entre deux clichés strictement inférieur à la seconde,
- un poids de préférence inférieur à 500 g (contrainte du vecteur),

<sup>14</sup> Voir Chapitre 1-4.2 concernant les informations de vol des aéronefs.



## II.4.2 Localisation - le récepteur GNSS :

Le cahier des charges impose, pour le récepteur GNSS une précision centimétrique, la plus fine possible, ainsi qu'un poids le plus faible possible pour l'implémentation dans le drone.

Le besoin de précision a lieu lors du post-traitement des images. Ainsi, il n'est pas nécessaire de recourir à des méthodes GNSS temps réel. S'il n'en est pas besoin, nous nous en passerons volontiers car ces méthodes imposent des contraintes supplémentaires liées à la communication en temps réel entre la base et le mobile et l'impossibilité éventuelle de liaisons radio dans certaines zones (montagnes, proximité de lignes à haute tension, de transformateurs, etc...). De plus existe-t-il de potentiels risques de perturbations et d'interférences pouvant fausser les valeurs de l'instrumentation ou les données de contrôle, tous ces éléments transitant également par onde. S'affranchissant des méthodes temps réel, nous limitons les risques et garantissons l'autonomie de l'utilisateur. De plus, les méthodes utilisant le post-traitement sont toujours plus précises que leurs homologues temps réel, car le fait de traiter les données en différé permet de s'affranchir de certaines erreurs susceptibles d'intervenir et potentiellement indétectables et incorrigibles sur le fait.

En temps réel, il est cependant nécessaire d'avoir un contrôle permanent du drone durant toute la durée de sa mission, dès lors qu'il est sous tension, et à fortiori du décollage à l'atterrissage. Ce contrôle doit permettre, via la télémétrie, de surveiller le bon déroulement de la mission. Le système d'autopilotage en a également besoin pour orienter le cheminement du drone. Pour cela une précision métrique suffit et il n'y a donc pas besoin d'effectuer de mesures différentielles, ni d'avoir un capteur de haute précision. Dès lors, deux choix sont possibles : soit l'utilisation du même récepteur précis renvoyant en temps réel la position, de précision métrique, à la station sol et au module d'autopilotage, soit ce dernier intègrera son propre récepteur.

Le cahier des charges ainsi retenu imposera l'utilisation d'un **récepteur GNSS bi-fréquence** avec une antenne dont le **centre de phase est de précision sub-centimétrique**. L'utilisation d'un récepteur compatible uniquement avec la constellation GPS peut suffire à obtenir la précision voulue. Cependant nous veillerons à avoir un système compatible avec les autres (GLONASS - Russe, Galiléo - Européen, Compass - Chinois) pour des raisons de redondance satellitaire suffisante. Nous développerons d'avantage ce sujet, ainsi que la méthodologie devant être employée dans le chapitre suivant. Enfin, nous veillerons à avoir un taux de rafraichissement supérieur à 20 Hz (50 ms, soit à 80 km/h, un déplacement du drone de :  $\frac{80}{3.6} * 5 * 10^{-2} = 1,1$  m), afin de pouvoir interpoler la position du drone au moment précis de la prise du cliché, en admettant que ce dernier ait une trajectoire rectiligne sur 0,05 s. (Seuls les tests permettront de valider ou non cette hypothèse)

### II.4.3 Orientation - la centrale inertielle :

La centrale inertielle (nommée couramment IMU : Inertial Measurement Unit) est un appareil capable de déterminer des accélérations linéaires et angulaires avec une précision donnée. L'inconvénient de cet appareil est qu'il génère une erreur qui augmente de façon exponentielle avec le temps. D'où la nécessité de le coupler avec un GPS afin de recalibrer cette erreur avec un filtre de Kalman<sup>15</sup>. Le principe de ce système est de recalibrer la dérive au cours du temps. Cependant un problème demeure :

celui de la précision relative sur les IMU de petite taille. Le tableau 5 (ci-dessous) illustre l'impact de cette imprécision sur le géoréférencement des pixels, dans les conditions de prises de vue générales spécifiés dans le tableau ci-contre (Tableau 4) :

Distance focale min	10 mm
" en équivalent 24x36	15.3 mm
Angle d'ouverture	66.68 °
L bande sol max	352.5 m
l bande sol max	234.0 m
Résolution min	6.38 cm
L matrice	23.5 mm
l matrice	15.6 mm

Tableau 4 : Conditions de prise de vue - exemple pour l'utilisation avec l'APN Sony Alpha5000

Hauteur de vol (m)	err d'angle (°)	ero (cm)		erop (cm)		i  (mm)	j  (mm)	D (mm)	ek (°)	erk (cm)	ER (cm)
		ero = h * tan(ea)	erp = ero	erop = (ero <sup>2</sup> +erp <sup>2</sup> )^(1/2)							
50	0.01	0.87	0.87	1.234		11	7	13.038405	0.05	5.689	6.92
100	0.01	1.75	1.75	2.468		11	7	13.038405	0.05	11.378	13.85
150	0.01	2.62	2.62	3.702		11	7	13.038405	0.05	17.067	20.77
150	0.02	5.24	5.24	7.405		11	7	13.038405	0.05	17.067	24.47
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	0.05	17.067	35.58
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	0.02	6.827	25.34
150	0.05	13.09	13.09	18.512		0	0	0	0.05	0.000	18.51
150	0.05	13.09	13.09	18.512		5.5	3.5	6.5192024	0.05	8.534	27.05
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	0.05	17.067	35.58
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	0.1	34.134	52.65
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	0.2	68.269	86.78
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	0.5	170.677	189.19
150	0.05	13.09	13.09	18.512		11	7	13.038405	1	341.379	359.89

Tableau 5: Influence de l'erreur de géoréférencement consécutive à la précision d'orientation du capteur

Où : ea/ek = erreur d'angle ω (autour de l'axe x, roulis) ou φ (axe y, tangage)/ erreur d'angle κ (autour de z : axe de lacet) ;

ero/erp : erreur résiduelle due à ω / à φ ; erop : erreur résiduelle cumulée selon ω et φ ;

erk=f(i,j) : erreur selon κ (fonction de la position du pixel dans la matrice avec (i,j) tels que pour PPA, (i,j) = (0,0), en mm) ;

ER : erreur résiduelle globale due aux imprécisions d'orientations angulaires externes

La formule générale de cette erreur (ER, ici en mètre) en fonction de la hauteur de vol (h), de la distance focale de l'APN (F), des erreurs d'angle d'attitude (sur ω, φ et κ) ainsi que de la position du pixel sur la matrice (donc sa distance avec le PPA) est : (démonstration en annexe 3)

$$ER = h * \left( \sqrt{2} * \tan(e_{\omega,\phi}) + \frac{\sqrt{|i|^2 + |j|^2} * \tan e_{\kappa}}{F} \right)$$

<sup>15</sup> Plus d'info sur <http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/05/le-filtre-de-kalman-etendu-principe-et-exemple/>

## II.5 Choix et Justification de l'Instrumentation

### II.5.1 Appareil Photographique - Caractéristiques et Performances :

Marque	Modèle	Capteur	Def	D (f/)	Poids (g)	1->2 (intervalle de pdV)	Focale eq 35 mm	angle max	bande sol max à h=150m	(Zoom)	ISO (exploitable)	Vidéo	Prix (€)	+	-
Sony	RX1R	CMOS	24	1.70	482	0.6	35	45.8	154.3	1.00	100-1600	Full HD 28ips	2500	qualité capteur et optique, capteur plein format	pas de grand angle, poids, prix
Sony	NEX-7	CMOS, APS-C	24	1.11	516	0.6	24	56.3	225.0	1.80	100-800	Full HD 50ips	750	super qualité, grand angle eq 15mm possible	fin de série
Sony	HX-50V	BSI CMOS	20	0.43	245	0.8	24	56.3	225.0	30.00	80-400	Full HD 50ips	272	qualité image 20Mpix et zoom 30x !	taille capteur
Sony	RX100 II	BSI CMOS	20	1.00	269	0.24	28	52.1	192.9	3.57	100-1600	Full HD 28ips	557	compact, qualité, capteur micro 4/3	lourd et zoom limité de série
Sony	Alpha 5000	CMOS, APS-C	20	1.11	398	0.89	24	56.3	225.0	3.13	100-1600	Full HD 50ips	465	bonne perf, entièrement paramétrable	qualité de l'optique de série
<b>Sony</b>	<b>Alpha 5000</b>	<b>CMOS, APS-C</b>	<b>20</b>	<b>1.11</b>	<b>494</b>	<b>0.89</b>	<b>15</b>	<b>67.4</b>	<b>360.0</b>	<b>1.80</b>	<b>100-1600</b>	<b>Full HD 50ips</b>	<b>1265</b>	<b>Ultra grand angle, capteur APS-C, 20 Mpix</b>	<b>un peu lourd</b>
Sony	WX300	BSI CMOS	18.2	0.43	166	0.81	25	55.2	216.0	20.00	80-400	Full HD 50ips	215	bonne qualité d'image, bon zoom et léger	taille capteur
Panasonic	Lumix TZ40	BSI CMOS	18.1	0.43	198	0.81	24	56.3	225.0	20.00	100-400	Full HD 60ips	270	réactivité, stabilisateur, "LEICA"	lissage excessif
Panasonic	Lumix TZ60	BSI CMOS	18.1	0.43	240	0.62	24	56.3	225.0	30.00	100-400	Full HD 50ips	400	réactivité, stabilisateur, "LEICA"	lissage excessif
Ricoh	GR	CMOS, APS-C	16.2	1.11	245	0.38	28	52.1	192.9	1.00	100-1600	Full HD 50ips	590	capteur APS-C, focale fixe	grand angle limité

Tableau 6 : Extrait du comparatif justifiant la sélection de l'APN (Sources : Lesnumeriques.com et sites constructeurs APN)

A l'issu du comparatif (voir tableau 6), le Sony Alpha 5000 couplé à l'objectif SEL\_10-18 semble être le bon compromis sur les rapports qualité/définition et poids/largeur\_fauchée, avec les caractéristiques suivantes : Capteur APS-C, 20 Mpix, ultra grand-angle équivalent à 15,3 mm, intervalle de prise de vue inférieure à une seconde (0,89 s). Il dispose également d'une sensibilité ISO réellement exploitable de 100 à 1600, essentiellement due à son capteur APS-C. Cela nous permettra de régler l'ouverture du diaphragme sur une valeur faible de manière à améliorer la netteté des images, malgré l'irrégularité possible du relief

Il dispose d'un bloc optique interchangeable. Son point faible est son poids de 494 g avec l'objectif 10-18. L'idéal aurait été d'avoir des objectifs à focale fixe, mais j'ai découvert, après de longues recherches, que paradoxalement un objectif à focale fixe était toujours plus lourd et plus volumineux. Du reste, les ultra grand-angle à focale aussi courte que le SEL 10-18 de chez



Figure 16 : Sony Alpha 5000 (Source : Clubi.com)

Sony sont très peu courants sur le marché. Nous avons donc opté pour ce choix. Il est fourni de série avec un objectif à focale 16/50, 16 équivalent à 24,5 mm, est un grand angle classique. Cet objectif est plus léger et pourra être utilisé en remplacement du 10/18 pour certaines missions.

Une matrice de calcul (cf annexe 4), entièrement créée pour Héliéo permet de mettre en évidence le gain que permet l'objectif ultra grand-angle, par rapport à ce que promet la concurrence. Héliéo sera pour le moment le seul fabricant de drone à proposer une fauchée de prise de vue aussi large. Voici un extrait de ce tableur, pour une mission type de 2x3 km<sup>2</sup> de surface avec un recouvrement longitudinal de 80% et transversal de 60 %, à titre d'illustration :

Objectif :	16-50	10-18	Ecart (%)
focale éq 35mm, minimale (mm)	24.5	15.3	<b>-38</b>
angle d'ouverture (°)	74.8	98.5	<b>32</b>
largeur fauchée à h=150m (m)	217.5	348.0	<b>60</b>
résolution induite (cm)	4.0	6.4	<b>60</b>
durée mission (Z=2x3km <sup>2</sup> ) (min)	108.18	68.86	<b>-36</b>
nombre de photos nécessaires	4865	1914	<b>-61</b>

Tableau 7 : Extrait du tableur de planification de mission : comparaison focales 10/16mm

On voit que le temps de mission est largement plus faible (-36 %) et le nombre de photos est divisé par 2,5 (ce qui correspond à une réduction de 61%) en passant de près de 5000 clichés à moins de 2000 ! On passe d'une résolution de 4 à 6,4 cm (+ 60 %) ce qui reste une valeur tout à fait acceptable.

Le tableur de planification de mission, dont est issu le tableau 7, est fourni en annexe 4.

## II.5.2 GNSS : méthodologie employée et choix du matériel

Le GPS doit nécessairement être de qualité centimétrique car de sa précision dépendront les performances de la corrélation automatique et la qualité du géoréférencement. Aujourd'hui en topographie diverses méthodologies existent (voir tableau 8 ci-dessous) permettant d'atteindre les précisions requises. Le tableau 8 présente les différentes méthodes, encadrées en rouge sont les caractéristiques de la méthode PPK "pivot libre" que nous retiendrons pour le drone :

	Fiche 1	Fiche 2	Fiche 3	Fiche 4	Fiche 5	Fiche 6	Fiche 7
Méthode	Cinématique				Statique		
	Temps réel		Post-traitement		Temps réel	Post-traitement	
	NRTK	RTK "pivot libre"	NPPK	PPK "pivot libre"	NRTK moyenné	Pivot central	Multi-stations
Moyens matériels (capteurs, logiciels, abonnement)	+ / ++	+++	+ / ++	+++	+ / ++	+ / ++	+++
Savoir-faire	+	++	++	++	+	++	+++
Moyens humains (personnel, temps passé)	+	+ / ++	+	+ / ++	+	++ / +++	+++
Gamme de précision (1 $\sigma$ )	2-5 cm				2-3 cm	< 2cm	
Types de travaux	Lever cinématique, implantation		Lever cinématique, contrôle levers temps réel		Lever, contrôle, rattachement	Canevas, contrôle	Contrôle, auscultation
Limitations	Couverture du réseau GNSS Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches)	Disponibilité UHF (avec possibilité de faire du GSM/GPRS)	Pas d'implantation possible Calcul du point non garanti avant traitement		Couverture du réseau GNSS Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches)	Pas d'implantation possible, Calcul du point non garanti avant traitement	
		Précision dépendant de la ligne de base Stabilité du pivot durant le lever Surveillance éventuelle du pivot	Lors du lever : Surveillance poussée des conditions d'acquisition (sauts de cycle, constellation)			Calcul de courtes lignes de base uniquement (<5km)	
				Stabilité et surveillance du pivot	Lors du lever : Mise en station irréprochable et surveillance de la stabilité des équipements		
Avantages	Simplicité de mise en œuvre	Fonctionne partout en UHF	Pas d'abonnement nécessaire en France Pas de limitations télécoms		Bon compromis simplicité de mise en œuvre / précision	Temps d'occupation réduit	Précision et exactitude "ultimes"

Tableau 8 : Récapitulatif des différentes méthodes GNSS différentielles et de précision

(Sources : *Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*, Romain LEGROS, paru dans la revue "XYZ", Février 2013)

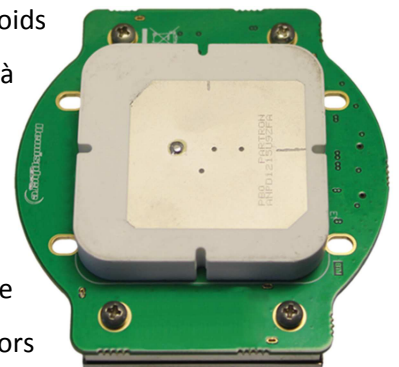
Cette méthode de calcul de position GNSS permet d'obtenir des coordonnées précises jusqu'à 2 cm en (X,Y) et 5 cm en Z, par post-traitement, en respectant certaines conditions et procédures. Le drone étant en mouvement, il sera nécessaire de pouvoir enregistrer les données satellitaires à une fréquence suffisante afin de pouvoir ensuite interpoler de façon précise la position du centre de perspective de l'APN, au moment précis de la prise de vue. La fréquence d'échantillonnage doit donc être d'environ 20 Hz, car en dessous de 50 ms nous pouvons admettre que le déplacement du drone est exactement linéaire et donc interpoler "exactement" la position du capteur au moment précis de la photographie, entre 2 positions GPS (à 10 Hz : 2,2 m ; à 20 Hz : 1,1 m, etc...). Les tests en vol permettront de définir la fréquence d'échantillonnage nécessaire du récepteur GNSS (10Hz, 20Hz, 50Hz, peut-être...).

Cette méthodologie GNSS nécessite l'utilisation simultanée de 2 récepteurs GNSS précis ; une base, fixe durant toute la durée de la mission ; et un mobile qui sera fixe dans le repère du drone, permettant donc le positionnement précis de ce dernier pour finalement connaître la position précise du centre optique au moment de la prise de vue. La base sera de préférence

positionnée sur un point connu, afin de faciliter son rattachement. En cas d'impossibilité (pas de point connu à proximité ou doute sur sa précision) il sera toujours possible d'effectuer le rattachement par post-traitement via la méthode du NPPK<sup>16</sup> entre la base et des stations du RGP<sup>17</sup>. A l'international, l'on pourra prévoir d'exploiter la méthode PPP<sup>18</sup> qui est une méthode cinématique, temps réel, ne nécessitant qu'un seul récepteur. Cette méthode utilise des données d'amélioration satellitaire, comme le WAAS ou le SBAS<sup>19</sup>. Elle est d'autant plus fiable et précise que les observations sont moyennées sur une période importante, mais tout de même moins que les méthodes différentielles classiques.

Le choix de la solution a été fait conformément au cahier des charges explicité au chapitre II. Nous avons étudié les récepteurs GNSS de 3 marques : Trimble, Septentrio et Hemisphere. Globalement les spécifications sont, aux choix du client et identiques d'une marque à l'autre, la compatibilité avec les constellations existantes (GPS, GLONASS) ou à venir (Galiléo, Compass), la précision du centre de phase de l'antenne, le format des données en sortie (NMEA pour le positionnement temps réel et Rinex pour le post-traitement), et la nature (RS232) et le nombre de ports de sortie, pour l'enregistrement et l'exploitation des données.

Ce qui a le plus guidé notre choix a été la contrainte de masse nécessaire pour l'intégration dans le drone. En effet, au delà du récepteur (dont le poids dépasse rarement quelques dizaines de grammes) l'antenne GNSS est à considérer dans le bilan de masse. Ces dernières font couramment plusieurs centaines de grammes, mais l'une d'entre elles sort du lot : il s'agit de la solution PA300 de la marque Hemisphere (illustration ci-contre), qui est un récepteur GNSS dont l'antenne est intégrée. Le centre de phase est de précision centimétrique. L'ensemble ne pesant que 133g, alors



que le poids minimum d'une antenne de précision, seule, est de près de 200g (Trimble travaille actuellement sur

Figure 17 : Récepteur GNSS PA300 avec antenne intégrée  
Sources : <http://hemispheregnss.com>

une antenne miniature qui ne pèsera que 120g). Il est bi-fréquence (L1, L2), compatible GPS, GLONASS, et Galiléo, possède un taux d'échantillonnage de 20Hz, 2 sorties RS232. Il est également compatible avec les techniques d'amélioration de positionnement temps réel SBAS (précision jusqu'à 30cm) ce qui pourra être un plus appréciable pour la fiabilité du contrôle du pilotage en mode automatique.

Fiche Technique complète disponible en annexe 5

<sup>16</sup> Network Post-Processing Kinematik : méthode de levé cinématique par post-traitement en réseau

<sup>17</sup> Réseau GNSS Permanent

<sup>18</sup> Precise Point Positioning : Positionnement de point précis

<sup>19</sup> Systèmes d'amélioration de positionnement GNSS temps réel



### II.5.3 Affranchissement de l'IMU - solution de post-traitement photogrammétrique :

L'utilisation d'une IMU sur le drone pose un problème de poids (c'est le cas de le dire !) : une centrale inertielle précise, comme celle illustrée sur la figure 13 (ci-contre), est très lourde et très couteuse. Seuls les avions destinés à la photogrammétrie peuvent se permettre d'en transporter une. Généralement elles pèsent quelques dizaines de kilogrammes et coûtent plusieurs dizaines de milliers d'euros, mais permettent alors d'obtenir les précisions nécessaires à une orientation externe suffisamment précise. Il existe de petites IMU mais ces dernières n'ont pas les précisions nécessaires : pour une IMU de quelques centaines de gramme, il est possible d'avoir une précision relative<sup>20</sup> descendant jusqu'à 0,05 ° en roulis/tangage et 0,1° en lacet. Mais comme l'illustre le tableau 5 (Partie II.4.3, justifié en annexe 3)), ces écarts types peuvent conduire à des imprécisions allant jusqu'à 36 cm.



Figure 18 : IMU hautes performances (sources : <http://www.safran-group.com>)

La photo ci-contre représente la centrale inertielle IGB 500, une des plus petites centrales inertielles existantes sur le marché, et qui possède la précision précédemment évoquée.



Figure 19 : IMU compacte (sources : <http://www.hellopro.fr>)

L'idée est donc de pouvoir s'affranchir de l'utilisation de la centrale inertielle pour le traitement du géoréférencement des photos. Le principe de calcul est que connaissant la base photogrammétrique de façon précise grâce au GPS, et étant donné le recouvrement important qui existe entre images (60% min) et entre bandes d'images (20% min.), il est possible de faire la corrélation, c'est-à-dire l'assemblage des images entres-elles par la reconnaissance d'un grand nombre de points homologues entres les clichés. Cette reconnaissance peut se faire manuellement mais aussi automatiquement grâce à des fonctionnalités intégrées aux logiciels de photogrammétrie le permettant. C'est le cas de MicMac, Photomodeler, Photoscan et Pix 4D, notamment, qui peuvent, à partir de clichés du même objet ayant un taux de recouvrement suffisant (supérieur à 50%), créer un modèle numérique donc un nuage de points en 3 dimensions de l'objet. La limitation est que, sans point d'appui et sans information d'aérotriangulation, ces logiciels ne peuvent donc définir l'échelle ni le géoréférencement de l'objet.

<sup>20</sup> les IMU dérivant avec le temps, elles ne fournissent pas d'orientations absolues, mais une tendance d'accélération angulaire

Ainsi si nous n'utilisons pas de point d'appui, il est nécessaire de trouver une autre solution afin d'effectuer les orientations externes qui permettront d'aboutir à un géoréférencement direct des images de qualité.

Après l'étape de correction géométrique des images, la corrélation automatique des images, que certains logiciels de photogrammétrie permettent d'effectuer, utilise une détection automatique d'un grand nombre de points homologues, c'est à dire des pixels, vus sur plusieurs images voisines, dont les objets au sol sont identiques, afin d'associer les images entre elles permettant ainsi d'obtenir en sortie une seule grande image. Cette étape permet donc le positionnement relatif.

Le GPS embarqué quant à lui permet de définir l'ordre de traitement des images, en plus de donner l'échelle donc le géoréférencement des images.

Pour permettre cette procédure de travail, il faut bien entendu un logiciel de traitement compatible avec les données en entrée, qui soit capable d'effectuer une corrélation automatique sans point d'appui sol et sans données inertielles. Nous avons évalué plusieurs logiciels de photogrammétrie dont Micmac<sup>21</sup>, Photomodeler<sup>22</sup>, PMS3D<sup>23</sup>, Photoscan<sup>24</sup> et Pix4D. Nous avons retenu ce dernier logiciel Pix4D, Suisse, qui permet de faire de la photogrammétrie rapprochée et verticale, possède un support utilisateur efficace ainsi qu'un bon tutoriel en ligne. Son principal défaut d'être entièrement en Anglais (support, tutoriel et mode d'emploi) et de ne proposer aucun service en Français ce qui pourra être un frein pour l'utilisateur final confronté à d'éventuel questionnement concernant le logiciel.

Le fonctionnement de ce logiciel pour notre utilisation sera introduit en annexe 7

---

<sup>21</sup> logiciel gratuit mais dont le fonctionnement est optimisé pour un environnement Linux d'où un manque d'ergonomie sous Windows, sources : <http://combienaporte.blogspot.fr/2013/10/micmac-tutoriel-de-photogrammetrie-sous.html>

<sup>22</sup> Logiciel de photogrammétrie rapprochée, typiquement pour obtenir des nuages de points d'objets proches. N'est pas optimal pour de la photogrammétrie aérienne verticale : <http://www.photomodeler.com/index.html>

<sup>23</sup> Très bon logiciel, mais nécessite le moteur graphique d'Autocad (Geomedica SA) pour fonctionner et ne sait pas faire de corrélation automatique ce qui pour nous est rédhibitoire.

<sup>24</sup> Logiciel de photogrammétrie rapproché, essentiellement. Il permet également la calibration automatique et manuel des APN.



### III Protocoles Expérimentaux de Validation de l'Instrumentation

#### III.1 L'Appareil Photographique Numérique

Une image photographique, est la représentation en 2 dimensions (2D) de l'espace en 3 dimensions (3D).

La calibration consiste à déterminer les paramètres internes de l'appareil photo que sont les coordonnées du centre de perspective (projection du point S sur la matrice du capteur (P), voir figure 20, ci-dessous), la distance focale, ainsi que les paramètres de la distorsion due aux imperfections des éléments de l'objectif (coefficients du polynôme de distorsion, radiaux (K1,K2,K3) et transversaux (T1, T2)). Pour cela nous allons photographier un réseaux de cibles connues précisément sur le terrain.

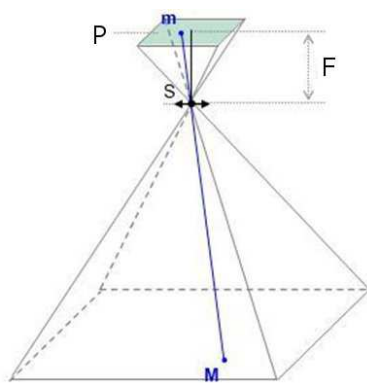


Figure 20 : Schéma de la Perspective Conique  
 (sources : inspiré du cours de Mme L.CHANDELIER)

Le schéma ci-contre illustre le principe de la Perspective conique ;

où : S, centre optique de l'APN ; P, Plan de projection (càd la matrice du capteur) ; M, point du terrain dont l'image sur P est m ; (SM) est le rayon perspectif.

En connaissant les formules de passage des coordonnées d'un point M (X,Y,Z) vers les coordonnées de son image m (x,y) sur le capteur (matrice de pixels), ainsi que les valeurs des coordonnées de plusieurs points de l'espace, et mesurés dans l'image, nous pouvons en déterminer les constantes de l'APN pour les mêmes caractéristiques de prise de vue (ensemble [capteur + objectif] avec diamètre de l'ouverture et distance focale précis et identiques pour chaque cliché).<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Plus d'information concernant la géométrie de l'image et les formules de projection : <http://fad.ensg.eu/moodle/course/view.php?id=314> (cours en ligne de Mme Laure CHANDELIER, ENSG)

### III.1.1 Réalisation d'un mur de calibration :

Un mur de calibration est un polygone dont des points caractéristiques, régulièrement répartis dans l'espace et bien visibles sont connus en coordonnées



Figure 21 : cible de calibration géométrique

terrain avec précision. Le polygone idéal est un objet en 3 dimensions de grande taille afin de pouvoir obtenir un recul suffisant de manière à se trouver

dans les mêmes conditions de prises de vue que celles envisagées. De la sorte, les paramètres de prise de vue ( focale, notamment) doivent être strictement identiques. Les points de ce polygone doivent être régulièrement répartis dans l'espace et sur plusieurs plans. Idéalement, on dispose de cibles types fixées de manière pérenne puis mesurées avec précision.

Le mur choisi est la façade Est du bâtiment où se trouvent les locaux de l'entreprise Hélicéo. Ce mur est intéressant car il dispose d'éléments visibles pérennes et pointables assez précisément tels que des angles de fenêtre, les coins des panneaux bétons, les angles de façade. De plus, les piliers visibles au fond du parking permettent d'obtenir une différence de profondeur. L'intérêt est également de disposer d'un mur fixe dans le temps (à moins que le bâtiment soit démoli...) disposant de points caractéristiques ne nécessitant pas de positionner des cibles, et très proches des locaux pour des questions pratiques.

Le relevé de points rayonnés est effectué par visées laser à l'aide d'un tachéomètre Leica TCRP1201 et porte sur les points de l'image suivante :



Figure 22 : Mur de Calibration Hélicéo, croix violette : points levés (angles de fenêtres, de bloc béton ou pilier)

Les coordonnées calculées des points sont listées dans l'annexe 6, ainsi qu'un descriptif plus précis de la procédure.

### III.1.2 Logiciel de calibration retenu, méthodologie et résultats :

Afin d'effectuer la calibration nous avons testé plusieurs logiciels : Photomodeler tout d'abord est un logiciel qui permet essentiellement la calibration d'APN utilisé pour de la photogrammétrie rapprochée : l'étape consiste en l'analyse de photographies d'une mire de taille A0 dont la surface est imprimée de cibles noires sur fond blanc, régulièrement réparties sur la feuille. La nécessité de régler la mise au point de l'objectif sur le papier situé relativement proche est incompatible avec les caractéristiques de l'APN en mission sur drone. Une fois la calibration effectuée, Photomodeler permet de réaliser des nuages de points d'objet 3D, typiquement de l'architecture ou des œuvres d'arts.

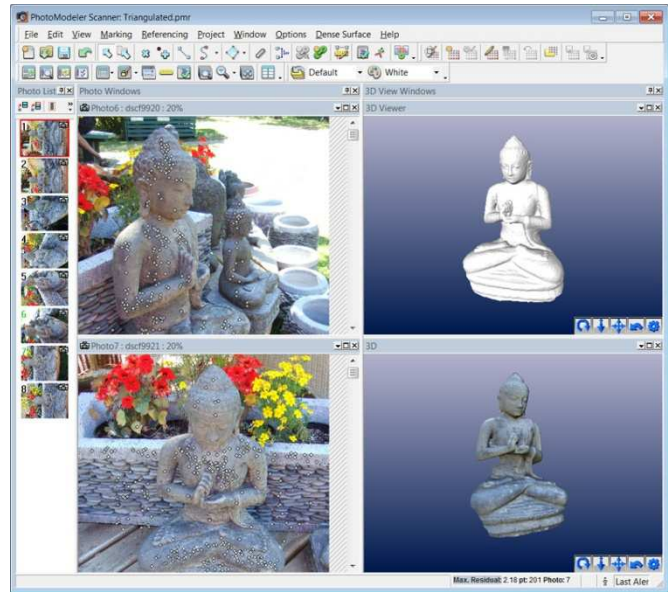


Figure 23 : Illustration du logiciel Photomodeler, Photogrammétrie rapprochée  
(Sources : <http://en.wikipedia.org/wiki/PhotoModeler>)

Finalement le logiciel de calibration utilisé est PhotoScan. Ce logiciel utilise le mur d'étalonnage défini ci-dessus. On effectue une calibration par ensemble optique, c'est à dire pour une configuration donnée : un capteur + un objectif. La focale doit être fixe, l'APN doit donc être mis en mode manuel concernant le réglage de la mise au point, et de tout autre paramètre de prises de vue, comme cela devrait être le cas en vol pour mission (plus de précision sur la méthodologie employée au Chapitre suivant : IV.2).

On commence par photographier le mur sous différents angles puis l'on effectue un assemblage des images après avoir éventuellement sélectionné les points d'appui relevés sur le mur. Plus le nombre de points et la redondance d'informations seront élevés, meilleure sera la qualité de la calibration. Quand à la précision de pointé nécessaire, il faut qu'elle soit cohérente avec les besoins : ici le mur mesure 52.15 m de largeur, la largeur de la matrice est de 5456 pix. En ayant un recul de sorte à ce que toute la largeur du bâtiment soit vue sur la largeur de la matrice, la résolution d'un pixel sur le mur est donc de

$$R = \frac{52.15}{5456} = 0.00956 \frac{m}{pix} \approx 1 \text{ cm/pix}, \text{ ce qui doit correspondre à la précision de la}$$

mesure puis du pointé sur les images à l'étape de calibration. A l'issue du traitement on obtient un nuage de points du mur de calibration, ainsi que les paramètres de calibration de l'APN Alpha 5000 avec l'objectif 10 mm en mode focale fixe, mise au point à l'infini.

### III.1.3 Conclusion : validation et limitation de l'APN

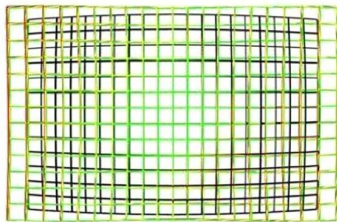
A l'issue du traitement, nous obtenons donc les valeurs de calibration suivantes résumées dans le tableau ci-contre :

Voici une explication du traitement géométrique réalisé sur les clichés afin de pouvoir utiliser les formules mathématiques de la perspective conique de façon cohérente de manière à partir des clichés à obtenir les coordonnées terrain (X,Y,Z) :

Capteur	largeur (mm)	23.2543
	hauteur (mm)	15.4987
taille pixel (,um)		4,246
distance focale (mm)		10,341124
position du PPA	x (mm)	11.62715
	y (mm)	7.74935
Coeff distortion	K1	-0.051256
	K2	-0.042918
	K3	0.0947995
	T1	-0.002619
	T2	-2.49E-05

Tableau 9 : Fiche de calibration SonyAlpha5000

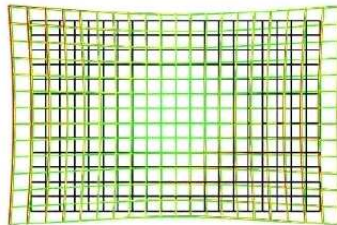
Forme de l'image avant calibrage :



La matrice du capteur (en vert) est de forme rectangulaire « parfaite ». On peut remarquer une déformation de l'image (en noir) en forme de barillet, représentant un objet de forme géométrique rectangulaire.

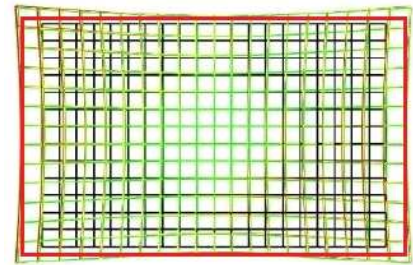
Ce défaut géométrique est dû à l'imperfection de l'ensemble optique et à sa non prise en compte lors de la prise et de l'enregistrement des photos.

Forme de l'image après calibrage :



La correction géométrique obtenue est effectuée en utilisant les coefficients du polynôme de distorsion K1, K2 et K3 qui sont spécifiques pour une distance focale donnée. Elle permet de corriger la géométrie de l'image par un ré-échantillonnage de l'image de manière à ce que la photographie soit vraiment la projection d'un monde en 3D sur une matrice de pixels 2D, selon la formule mathématique de la perspective conique.

Le résultat donne une forme d'image non régulière (la matrice n'est plus de forme rectangulaire) mais l'image a une géométrie juste par rapport au monde réel.



Le principe du ré-échantillonnage bicubique utilisé est fiable et permet la transformation géométrique sans qu'il y ait de perte d'informations notable.

Cependant, l'on voit que les bords deviennent des pointes et une image étant par défaut de forme rectangulaire, un recadrage (bordure rouge) est nécessaire afin de ne conserver que la partie de l'image juste et exploitable, c'est-à-dire où tous les pixels contiendront des données géométriquement justes. En toute rigueur, la fiche de calibration finale du capteur devra intégrer, et éventuellement pour plusieurs configurations (distances focales, objectif, capteur), la résolution résiduelle du capteur. L'on voit sur le schéma que le centre de l'image ne subit quasiment pas de modification contrairement aux bords où les pixels sont étirés. De cette manière, la finesse du capteur n'est plus la même sur toute sa surface et il pourra être nécessaire de déterminer dans quelles proportions cette dégradation a lieu.

Cette étape est soit réalisée directement par le logiciel de photogrammétrie utilisé, et ainsi transparente pour l'utilisateur, soit elle sera à développer informatiquement, puis à intégrer à notre solution, n'étant pas exclu qu'Hélicéo développe son propre logiciel de photogrammétrie dans le futur. La gestion des déformations géométriques pour tous les clichés, préalablement aux traitements photogrammétriques, devraient conduire à un gain sensible d'efficacité et de rapidité de traitement pour le logiciel traitant ensuite la corrélation automatique.



*Edition du 27-06-2014 : Au fur et à mesure de l'avancement du projet un problème est apparu concernant la complexité de la mise en œuvre du déclenchement automatique de l'Alpha 5000. Sur requête de l'ingénieur Informaticien, j'ai donc cherché un autre appareil photo présentant des performances similaires ne présentant pas ce problème. Un autre choix à donc été rapidement proposé : l'Alpha 6000, petit frère de l'Alpha 5000, qui a terme viendra en remplacement de ce dernier. C'est un appareil très récent puisque commercialisé à partir de Mai 2014. Il reprend en grande partie les caractéristiques de son prédécesseur, est compatible avec les mêmes objectifs (type E, Sony), ce qui nous permettra de réutiliser notre ultra grand-angle 10mm. Le capteur est également de format APS-C, mais possède une résolution de 24 Mpix au lieu de 20 ce qui offre un gain de 20%. Il est plus réactif avec une photo prise toutes les 0,63s contre 0,89s pour le 5000. Le seul inconvénient pour nous de cet APN comparativement à son prédécesseur est un surpoids de 50g environ, soit une dizaine de pourcents. Ce surpoids correspondant à moins de 2% sur le poids total du drone prévu (environ 4kg) il n'a pas été retenue comme véritablement limitant, et le fait d'avoir un capteur plus fin et conservant d'excellentes performances en terme de qualité et de paramétrages possibles, fait qu'il reste pour le cadre de notre utilisation, l'APN le plus intéressant du marché.*

*Par contre, étant donnée l'arrivée tardive (mi-Juin) de cette problématique, remettant en cause le choix de l'Alpha 5000, aucun test présenté dans ce rapport n'aura été effectué avec l'Alpha 6000, acquis le 21 Juin. Cependant, les procédures mises en œuvre sont bien sûr extrapolables au nouveau matériel.*



Figure 24 : Sony Alpha 6000 (Sources : <http://www.lesnumeriques.com>)

## III.2 Solution GNSS :

Le but de la validation de la solution GNSS est de 3 ordres :

- Valider l'instrumentation GNSS au sol, manuellement
- Valider la solution drone par survol et mesure d'un réseau de points connus
- Créer un gabarit de fiche de calibration type qui sera fourni au client avec chaque appareil, indiquant, entre autres les performances de l'appareil en terme de précision. Chaque fiche devra être effectuée avant la vente de chaque appareil, et avant/après le passage en révision (cf annexe 10).

### III.2.1 Création d'une zone de test, grandeur nature :

Le principe est de créer un réseau de points connus, relevable au sol par GPS (donc en faisant attention aux occlusions : arbres, bâtiments, etc...) et dans l'optique qu'ils soient visibles du ciel, par l'APN jusqu'à au moins 150 m de hauteur. On veillera donc que la représentation du point au sol soit d'une dimension et présente un contraste suffisant pour pouvoir être pointé manuellement de façon précise. Par exemple, si l'on veut une précision de pointé de 5 cm, on essaiera de prendre un point au sol au milieu d'un élément d'une taille 2 ou 3 fois plus grande. (la résolution sol peut descendre autour de 5 cm) En pointant le centre de la tache visible du ciel, la précision de pointé par rapport au sol sera ainsi de l'ordre de quelques cm.

La zone choisie est illustrée ci-dessous, avec en rouge, les croix des positions approximatives des points levés ainsi que leur numéro. Le point RBF utilisé est la base gauche de la droite jaune, qui ne sert qu'à donner une idée des dimensions de la zone, qui fera environ 2 km par 1 km. 37 points ont ainsi été mesurés.



Figure 25 : Zone de points connus pour tests de la solution

### III.2.2 Point géodésique : Réseau de Base Français (RBF)

Afin de déterminer un réseau de points connus, dans un référentiel donné, en l'occurrence le RGF93, il est nécessaire de partir d'un point de départ suffisamment précis. Pour ce faire, nous allons partir d'un point RBF, réseau comportant environ 1000 sites. Ce sont des points géodésiques d'exactitude centimétrique, issus d'une densification du Réseau de Référence Français (RRF) qui ne comportait lui que 23 sites.



Figure 26 : Plaque apposée sur tout point géodésique IGN

Le GPS<sup>26</sup> nous donne des coordonnées absolues dans le système géodésique WGS 84 (*World Geodetic System 1984*) avec l'ellipsoïde de révolution IAG GRS 80 comme référence. Il sera nécessaire d'effectuer la conversion de coordonnées afin d'obtenir les valeurs en coordonnées Lambert 93, système de coordonnées Français légal. Nous utiliserons pour cela le logiciel libre Circé.

### III.2.3 Création d'un réseau de calibration de la solution dronistique : levé GNSS par méthode PPK

Le levé GPS a été effectué le 18-06-2014 à l'aide de 2 récepteurs GNSS bi-fréquence Leica GPS System 500. Nous avons stationné la base sur le point RBF 4412204 situé au Nord de la commune de Petit Mars. (fiche de la station en annexe 10) durant toute la durée du levé, fractionné en 2 parties : une le matin, une l'après-midi. La base sera rattachée en Lambert93 grâce aux stations du RGP de Carquefou (CARQ) et de Châteaubriant (CHBR) située à respectivement 11 km au Sud et 37 km au Nord. De cette manière nous pourrions évaluer la qualité du rattachement par réseau RGP, étant donné que nous connaissons la position de la station réelle.

Exploitation avec RTK lib après récupération des données GPS mesurée à la base et au mobile, et conversion du format propriétaire Leica vers le format standard Rinex.

Démarche et calcul des coordonnées GPS des points (-> annexe 9). Traitement GNSS en 3 étapes :

1- Rattachement de la Base avec les stations RGP (méthode NPPK) : CARQ seul/CHBR seul/CARQ+CHBR -> comparaisons des résultats avec les coordonnées réelles, conclusion.

<sup>26</sup> Abus de langage courant signifiant : "récepteur GNSS". Historiquement le système GPS ayant été le 1er à être opérationnel, et étant toujours le plus utilisé, la très grande majorité des récepteurs GNSS utilise le système GPS. D'où cet abus de langage qui perdure dans la vie courante ("GPS" de voiture, de téléphone...)

2- Rattachement du mobile avec la base comme pivot (PPK) : calcul et listing des coordonnées, en fonction des distances des lignes de base.

3- Rattachement du mobile avec les stations du RGP (en utilisant la solution donnant le meilleur résultat, vu en 1-) NPPK : calcul des coordonnées, et comparaison avec la méthode précédente.

### III.2.4 Et le PPP, pourquoi pas ?

Une autre méthode de levé GNSS existe, il s'agit du "Precise Point Positioning" (Positionnement Précis de Point ou PPP). Cette méthode est en pleine effervescence car elle apporte aux méthodes courantes (RTK, NRTK, PPK et NPPK) quelques avantages dont le principal est de ne nécessiter l'utilisation que d'un seul appareil d'où, réduction du coût d'exploitation, indépendance vis-à-vis des réseaux permanents et affranchissement des liaisons GSM ou modem. Cependant, après recherches sur le sujet, cette méthode n'est actuellement pas aussi précise que les méthodes différentielles (de l'ordre de 10 cm au mieux contre 2 à 3 cm par post-traitement en différentiel). C'est pourquoi durant ce stage nous n'aurons pas approfondi cette méthode. Le but du mémoire n'étant pas d'effectuer des approfondissements sur le fonctionnement de toutes les méthodes, mais la mise en œuvre de la meilleure solution exploitable pour notre solution drone.

Cependant, cette méthode pourra éventuellement être utilisée pour rattacher la station de base GNSS dans le cas où cette dernière serait dans une zone totalement dépourvue de réseau de stations permanentes et où il ne soit pas possible de la stationner sur un point connu fiable, ce qui peut être un cas courant dans de nombreux pays.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Plus d'info sur cette méthode : lire l'article de la revue XYZ N°138, p41 à 49.



### III.3 Calibration de la solution drone, protocoles à réaliser :

Les prérequis généraux sont les suivants :

- Station mobile de contrôle : permet le suivi en temps réel des caractéristiques du vol, de l'état du drone et de l'avancement de la mission grâce aux informations de télémétrie (voir § I.4.3). Elle est également reliée à la base GNSS servant de pivot pour la mission dont elle effectue l'enregistrement des données d'observation. Via cette station nous contrôlerons les étapes d'initialisation, la vérification du GDOP de la base (pivot) et du mobile (drone) GNSS.

- Drone : achevé et fonctionnel du point de vue de l'instrumentation, du moins. Selon le type de validation à effectuer, l'appareil peut nécessiter d'être tenu en main par un opérateur. Dans ce cas, toute la partie propulsion et motorisation sera désactivée grâce à un coupe-circuit de sécurité dédié. Les parties contrôle et instrumentation (récepteur, contrôleur - comportant le module d'enregistrement des données, de déclenchement de l'APN et l'horloge de synchronisation - APN, récepteur GNSS) doivent, elles, être alimentées et fonctionnelles. Lors de l'initialisation du récepteur GNSS, préalable à toute mission, le drone sera positionné de façon précise sur un support conçu à cet effet, fixé de manière mécanique au sol durant la durée de la mission. A la fin du levé, avant l'extinction du drone, on le reposera de manière identique sur son support. Cela permettra de valider la précision de positionnement relative et la qualité des coordonnées GPS : le drone retrouvant sa position initiale, ses coordonnées doivent être identiques à celles de départ à la précision GNSS près.

- Récepteur GNSS base "pivot" : il s'agit d'une antenne GNSS fixe durant toute la durée de la mission. De préférence positionnée sur un point connu, elle peut également être rattachée par post-traitement, soit en NPPK si des réseaux sont disponibles, soit en PPP dans le cas contraire, avec une précision moindre dans ce cas.

#### III.3.1 Vérification de fonctionnement de l'instrumentation :

La solution n'ayant pu être obtenue dans le délai imparti, et les contretemps dus aux problèmes techniques liés à l'APN (alpha 5000) ont fait que ces tests n'auront pu être effectués. Sera décrite dans les lignes qui suivent, la procédure de vérification du fonctionnement de l'instrumentation de la solution drone finale, étape préalable à la calibration en vol.

L'appareillage (APN, récepteur GNSS et interface d'enregistrement des données, télémétrie) doit-être fonctionnel et actif. Cette procédure utilisera le mur de calibration précédemment décrit, comme objet visé.

On débute par les prérequis décrits ci-dessus.

- Une fois l'instrumentation du drone opérationnelle et les phases validées d'initialisation, un opérateur A vient prendre en main le drone, de façon à ce que le nez de l'appareil soit dirigé vers le ciel, tandis qu'un second opérateur B reste à la base pour contrôler les paramètres, essentiellement la réception GNSS. Tandis que A se déplace latéralement face au mur de calibration de manière à ce que l'objectif de l'APN voit le mur, B déclenche manuellement l'APN. Une dizaine de clichés suffisent à cette procédure. Le résultat en sortie doit être le mur de calibration vu sous différents angles avec la position GNSS précise pour chaque cliché. On peut ensuite traiter les données via Pix4D, grâce à ses fonctionnalités de génération d'un nuage de points pour de la photogrammétrie terrestre. Cette étape permettra de fournir les premières valeurs de calibration de l'ensemble du drone (APN, offsets antenne GNSS - centre optique de l'APN) sans nécessité que celui-ci soit déjà apte à voler.

### **III.3.2 Calibration automatique en conditions réelles de vol :**

Une fois le drone opérationnel, la procédure consiste à effectuer le survol de la zone de calibration drone grandeur nature (voir § III.2.1 et annexe 9). Pour l'étape de calibration nous utiliserons un taux de recouvrement élevé : 80 % en longitudinal et 60 % en latéral, de manière à assurer une redondance des informations suffisante et avoir ainsi la meilleure précision possible. On souligne le fait que cette étape de calibration n'aura lieu, par défaut, qu'une seule fois préalablement à la vente de chaque drone, et que de sa qualité dépendront sa précision de restitution et donc ses performances. Ainsi il faut qu'elle soit faite le plus sérieusement possible.

Via le logiciel de Photogrammétrie Pix4D nous effectuons la calibration du drone avec l'ensemble des données (données de calibration APN effectué au préalable), position GNSS précise pour chaque cliché après interpolation), ensuite nous utilisons les points cibles connus comme points d'appui sol (ou points de calage). Le logiciel s'occupe de fournir une restitution automatique du nuage de points de la zone et détermine les paramètres des offsets qui existent entre la position exacte de l'antenne GNSS et le centre optique de l'APN. Ces paramètres seront des constantes pour chaque drone, mais il faudra éventuellement faire cette étape pour chaque combinaison de mise en œuvre du drone : selon la focale utilisé (10mm ou 16mm) et selon la cale de positionnement de l'APN (photographie aérienne à visée verticale ou cale de précision à différents angles (de 20 à 45°) pour de la photogrammétrie oblique)

## **IV Validation de la Solution Métier Drone Topo**

### **IV.1 Programmation de mission et interface de contrôle :**

Le logiciel de programmation de mission qui fera l'implémentation des données du pilotage automatique et permettra la surveillance des données télémétriques de contrôle en temps réel de la mission aérienne en cours, sera un logiciel complet et exclusif, fourni avec la solution. Actuellement en développement, il part de la matrice de Calcul Excel créée pour le projet (cf annexe 4), permet d'intégrer toutes ces informations dans le drone, qui ensuite volera de façon autonome, et fournira une interface visuelle à l'utilisateur.

L'utilisateur peut donc prévoir à l'avance la durée de son vol, et s'assurer qu'elle est compatible avec l'autonomie de son appareil. Tous ces éléments devront être implémentés dans le programme d'autopilotage afin d'être transparents à l'utilisateur, ce dernier pouvant y avoir accès. Le programme traitera également les données de télémétrie, et les alertes nécessaires au bon déroulement de la mission, décrites au Chapitre I. Actuellement il s'agit d'une solution existante via le logiciel Mission Planner (cf quelques illustrations de la planification de mission annexe 11). Ce logiciel est libre mais n'est pas très efficace et présente divers défauts ergonomiques. C'est de lui que seront définies toutes les positions GPS de prise des clichés.

En outre, nous n'avons pas encore pu tester le fonctionnement réel de la solution. L'ingénieur informaticien en est actuellement aux étapes de décryptage et d'implémentation du logiciel dans notre solution.

### **IV.2 Survol automatique de la zone de points de contrôle :**

La méthodologie et la mise en œuvre de la mission sont les mêmes que celles détaillée § III.3.

Le point stationné par le pivot GNSS sera le point géodésique N° 4412204 du RBF. Se trouvant dans une zone dégagée, donc de qualité pour la réception des satellites, nous implanterons à quelques mètres de là le trièdre support du drone. Nous démarrons l'initialisation de ces 2 appareils (récepteurs GNSS) puis nous installons la station de contrôle à proximité, de préférence dans une zone ombragée pour assurer le confort de l'utilisateur. Si l'on imagine la station comme étant une table pliante ergonomique avec siège intégré, nous pourrions également prévoir en option la présence d'un parasol. L'utilisateur suivra, sur un écran d'ordinateur portable, l'avancement de la mission, et devant l'importance de ces informations, il est crucial de prévoir un système complet où l'utilisateur n'aura pas de problème pour visionner les éléments, donc il faut fournir les moyens de s'affranchir des reflets lumineux de quelque sorte qu'ils soient.

La base est reliée de manière filaire à la station, et le drone communique par onde. Cependant, pour des questions de fiabilité et d'efficacité, toutes les données photogrammétriques du drone (photos et observations GNSS) sont enregistrées dans ce dernier et ne transitent pas par onde. Une fois l'initialisation des récepteurs validée, on peut démarrer la mission, en cliquant sur le bouton "Démarrer mission" :

- démarrage d'un compte à rebours visuel et sonore de 10 s que l'on peut interrompre à tout moment. Cela permet à l'opérateur de surveiller le bon déroulement.

- Démarrage des turbines à pleine puissance pour le décollage verticale : accélération constante verticale d'environ  $3 \text{ m/s}^2$ .

- Dès que le drone dépasse 2 m de hauteur (environ 1 s), les turbines commencent à ralentir, pour stopper l'accélération, mais continuent de compenser le poids du drone.

- Lorsque la hauteur de 3 m est atteinte (hauteur de sécurité), le moteur de propulsion démarre à pleine puissance, conduisant à une accélération horizontale constante (environ  $5 \text{ m/s}^2$ ) et verticale (selon la pente de montée) et donc à un transfert progressif de la force de sustentation des turbines vers la voilure fixe, conduisant à une décélération dans les mêmes proportions de la vitesse de rotation des turbines jusqu'à leur arrêt complet, une fois la vitesse minimale de décrochage atteinte (environ 15 m/s, soit 3 s d'accélération). Durant toute cette période le drone aura pris de l'altitude. Une fois les turbines coupées il monte à plein régime selon une pente d'environ  $45^\circ$ , ce qui lui permet dans le même temps d'atteindre sa vitesse de vol de croisière : 22 m/s (soit environ 80km/h, vitesse air).

- Le drone effectue donc sa mission de prise de clichés sur toute la zone. L'ordre de déclenchement des clichés est envoyé par le contrôleur intégré au drone, de façon automatique, connaissant sa position approximative grâce au positionnement GNSS temps réel.

- A la fin de la mission, le drone va approcher de la zone d'atterrissage à sa vitesse de vol minimale, en position cabrée afin d'avoir un maximum de prise au vent. Puis, les turbines vont se remettre en action et permettre l'atterrissage vertical. Ne connaissant pas sa position précise, les informations de hauteur par rapport au sol sont données grâce à un sonar à ultrasons et le télépilote peut alors reprendre la main pour effectuer le positionnement final du drone au sol.

Une fois cela fait, il désactive la propulsion du drone mais n'éteint pas l'instrumentation : il repositionne le drone sur son support tel qu'il était dans sa position de départ et le laisse observer les satellites quelques instant avant d'achever la mission.

### IV.3 Post-traitement GNSS et photogrammétrique - détermination de la précision

Les données acquises sont les observations brutes GNSS de la base et du drone ainsi que les clichés. Le post-traitement consistera à effectuer les opérations suivantes :

- détermination des coordonnées de la base, par méthode NPPK ou PPP (facultative, si elle est stationnée sur un point connu)

- rattachement du drone par méthode PPK avec la base comme pivot

- création du fichier de positionnement précis des clichés par interpolation (cf § II.4)

- Traitement des données via Pix 4D (cf annexe 7) et obtention du nuage de points, MNS, et de l'orthophoto.

- Manuellement on pointe ensuite sur le nuage de points, les points connus de la zone de calibration : ce ne sont pas des points d'appui mais bien des points de contrôle dont le but est de déterminer la précision effective de la solution photogrammétrique. A l'issue, on remplit le second tableau de la fiche de calibration Hélicéo (cf annexe 10) et l'on obtient la précision.

- On peut évaluer l'impact de l'amélioration du système en utilisant comme point d'appui le sommet de l'antenne GNSS du pivot, utilisé lors de la mission. Utilisant ce point d'appui, on relance le calcul et on peut analyser la variation de la précision. Éventuellement l'utilisation d'un unique point d'appui peut permettre d'améliorer le recalage linéaire des points. On remplit alors le 3ème tableau de l'annexe 10 et on en conclue la précision finale de la solution.

## Conclusion

Ce TFE aura été pour moi une expérience unique et très enrichissante !

Tout d'abord, l'entreprise m'accueillant étant en cours de création lors du début de mon stage (l'immatriculation officielle a eu lieu le 18 Mars 2014) j'ai eu la chance de pouvoir vivre en direct l'histoire passionnante qu'est la création d'entreprise, étant le premier "employé" de l'entreprise. M. BAUDET, son PDG, m'a également fait confiance à de nombreuses reprises en me consultant pour certaines questions techniques ou pour me faire rencontrer des intervenants externes (fournisseurs, industriels...) ou assister à des salons. Ces témoignages de confiance à mon égard ont été pour moi très gratifiants, et je l'en remercie encore.

Ensuite, ce stage m'aura permis de mettre mes compétences au service d'une entreprise dont le cadre d'activité m'intéresse beaucoup, ayant depuis très jeune une passion pour le modélisme et un intérêt particulier pour les aéronefs volants. Et qui plus est recoupant nombre de domaines d'activités de ma formation initiale.

Il m'a, par là-même, permis de montrer mes capacités techniques de futur ingénieur-géomètre et mon savoir faire autour d'une variété de domaines importante (levé topographique de précision, relevé et traitement GNSS, traitement et principe photogrammétriques, approfondissement de notions aérodynamiques et de pilotage), ayant dû, en l'occurrence, effectuer mes recherches et mes travaux topographiques et photogrammétriques de manière totalement autonome, étant le seul topographe de l'entreprise.

En ce qui concerne les objectifs à atteindre, le résultat conduit à une solution qui n'a pas encore pu être testée ! Les 20 semaines consacrées à la mission, entre autres, de définir une solution de photogrammétrie par drone aérien ne nécessitant pas l'utilisation de point d'appui, ainsi que d'explicitier des protocoles de contrôle et de validation, auront été intenses mais le résultat correspondant à l'attente de mon maitre de stage a tout lieu de me satisfaire et j'ai hâte de suivre et de participer à la suite de ce travail. Il ne reste plus qu'à finir d'acquérir tous les éléments constitutifs de la solution, à les interfacier et à mettre en œuvre le système d'autopilotage. A cette issue, les premiers tests pourront être effectués et leurs résultats me permettront de finaliser la mise au point de la solution. Dans cette optique j'aurai la chance de pouvoir continuer sur le sujet étant donné que M. BAUDET m'a offert la possibilité d'intégrer l'entreprise à l'issue de mon stage.

Merci à tous de votre lecture, m'excusant par avance des éventuelles imperfections sur le fond ou la forme que je m'efforcerai de corriger si besoin.

## Bibliographie

### Drones :

<http://dronologue.fr/category/applications-civiles/topographie-applications-civiles/>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Aviation-et-developpement-durable,7307-.html>

<http://homepages.laas.fr/bvandepo/wiki/doku.php?id=descriptionmanta>

### Préparation à l'examen théorique ULM :

**Le Précis du Pilote ULM et Avion léger**, Thierry du Puy de Goynes, Yves Plays, Patrice Barcouda, 224p, Juil 2003, édition Cépaduès ;

**La réglementation ULM - Pilotés et Télépilotes : Drones**, Daniel Casanova et Patrick Vacher, 132p, Déc 2013, édition Cépaduès ;

**Manuel du Pilote ULM**, 343p, 2013, édition Cépaduès ;

**400 Questions, Pilotes ULM et Drones**, Thierry Gobert, 171p, Déc 2013, édition Cépaduès

### Site internet :

<http://ulm-acupt.com/qcm/qcm.html>

<http://fly.azur.free.fr/FlyAzur-QCM.html>

<http://www.etampes-formation-ulm.com/qcm/>

[http://www.airshoot-technologie.com/contents/fr/d66\\_reglementation-drone.html](http://www.airshoot-technologie.com/contents/fr/d66_reglementation-drone.html)

<http://blogs.univ-tlse2.fr/archeodrone/photogrammetrie-par-correlation-dense/>

### Photogrammétrie :

Le géoréférencement direct de prises de vues aériennes stéréoscopiques - TFE ESGT, Marc DURAND, 2012

La Géométrie d'une image, Laure Chandelier, 2012

Le Géoréférencement d'Images, Laure Chandelier, 2012

définition de la photogrammétrie : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photogramm%C3%A9trie>

<http://www.pms3d.com/Telechargement-fr.htm>

<https://support.pix4d.com/categories/20101483-Knowledge-Base>

<http://combiencaporte.blogspot.fr/2013/10/micmac-tutoriel-de-photogrammetrie-sous.html>

<https://sites.google.com/site/ltgefi/basedocs/informatique-de-a-a-z/forme/acquisition-d-image-par-analyse-de-flux-video/de-la-deuxieme-a-la-troisieme-dimension#TOC-parametres>

B.2 Modélisation 3D automatique terrestre d'environnements urbains et complexes à très grande échelle	Nicolas Paparoditis	janv-06
Automatic geo-referencing by integrating camera vision and inertial measurements	Duminda I. B Randeniya	06/01/2007
Calibration and Georeferencing of Aerial Digital Cameras	OTTO HOFMANN, Brunthal	2005
Intégration d'un odomètre optique dans un système de mobile mapping, Géodésie/Mensuration	D. Eberhart, H. Gontran	juil-03
LAND-BASED MOBILE MAPPING SYSTEMS	Cameron Ellum and Naser El-Shei	janv-02
BRIDGING LAND-BASED MOBILE MAPPING USING PHOTOGRAMMETRIC ADJUSTMENTS	Taher Hassan, Cameron Ellum and	2006
Photogrammétrie numérique	Raphaële Héno – Dias	oct-08
New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data	M. Bäumker and F.J. Heimes	
MOBILE MAPPING SYSTEMS – STATE OF THE ART AND FUTURE TRENDS	Dr. Klaus Peter Schwarz and Dr. N	2005

### IMU/GNSS :

Géoréférencement direct des images par GPS/INS: Approche rigoureuse pour le calibrage des excentricités angulaires	Philipp Schaer, EPFL-TOPO	
GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery	Sultan Kocaman	30/01/2003
High Accuracy Autonomous Image Georeferencing Using a GPS/Inertial-Aided Digital Imaging System	Daniel Sullivan and Alison Brown	janv-02
Direct Exterior Orientation of Airborne Imagery with GPS/INS System : Performance Analysis	Dorota A. Grejner-Brzezinska	1999
Image Georeferencing Using Attitude Orbit Control System	Mohammad A. Rajabi	2012
Directly Georeferencing Terrestrial Imagery using MEMS-based INS/GNSS Integrated Systems	Xiaoji NIU, Taher HASSAN, Camer	oct-06
Direct Sensor Orientation of a Land-Based Mobile Mapping System	Jiann-Yeou Rau 1,*, Ayman F. Hab	2011
Trajectory Determination and Analysis in Sports by Satellite and Inertial Navigation	Adrian Wägli	janv-09

<http://www.safran-group.com/site-safran/defense/defense-aeronautique/modernisation/avions-54/>)

<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>



## Table des annexes

Annexe 1 : Récapitulatif de la Réglementation Française concernant les Drones Civils .....	53
Annexe 2 : Attestation de Réussite à l'examen théorique commun ULM et Diplômes obtenus.....	54
Annexe 3 : Démonstration de l'Impact de l'erreur angulaire sur le positionnement du pixel au sol .....	57
Annexe 4 : Matrice de calcul des données de planification du vol, et constante de photogrammétrie .....	58
Annexe 5: Fiche technique module GNSS PA300 .....	59
Annexe 6 : Levé du mur de Calibration "Hub-Creatic" et listing des coordonnées.....	61
Annexe 7: Utilisation du logiciel Pix4D .....	65
Annexe 8 : Levé de la zone de calibration par GPS ; méthodologie et mise en œuvre .....	67
Annexe 9 : Fiche de station Point Géodésique RBF N°4412204 .....	69
Annexe 10 : Fiche de calibration de la solution de photogrammétrie par drone Hélicéo .....	72
Annexe 11 : Illustration du logiciel de planification de mission "Mission Planner" .....	73

## Annexe 1 : Récapitulatif de la Réglementation Française concernant les Drones Civils

## Conditions d'emploi des aéronefs civils télépilotés

(v6-4)

=> Deux textes : (1) { **navigabilité** - **opération** - **télépilote**, en remplacement de 21 mars 2007} et (2) { **espace aérien** : en remplacement de 21 décembre 2009}

AEROMODELES – Activité de loisir ou de compétition (Voir Annexe I du texte 1)			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deux catégories : A et B (critère principal de masse inférieure ou supérieure à 25 kg)</li> <li>- Exigences de <b>navigabilité</b> et de <b>pilotage</b> imposées par le ministre chargé de l'aviation civile uniquement pour les aéronefs de catégorie B.</li> <li>- Exigences de l' <b>espace aérien</b> : si H &gt; 150 m: espace ségrégué ou protocole avec les autorités compétentes + information aéronautique ; (voir article 4 du texte (2))</li> <li>- Le travail aérien est interdit</li> <li>- Le vol hors vue est interdit ; Le vol « en immersion » se fait avec 2 personnes, en double commande avec priorité à celui qui assure le « voir et éviter »</li> </ul>			
Activités particulières /Travail aérien (voir Annexe II du texte 1)			
Scénarios opérationnels envisagés : <b>simples S-1 à S-3 + cas S-4 plus complexe initiant le futur.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>S-1</b> : opération en vue directe du télépilote se déroulant hors zone peuplée, à une distance horizontale maximale de 100 mètres du télépilote ;</li> <li>- <b>S-2</b> : opération se déroulant hors vue directe, hors zone peuplée, dans un volume de dimension horizontale maximale de rayon d'un kilomètre et de hauteur inférieure à 50 m /sol et obstacles artificiels, sans aucune personne au sol dans cette zone d'évolution. ;</li> <li>- <b>S-3</b> : opération se déroulant en agglomération ou à proximité de personnes ou d'animaux, en vue directe et à une distance horizontale maximale de 100m du télépilote</li> <li>- <b>S-4</b> : activité particulière (relevés, photographies, observations et surveillances aériennes) hors vue directe, hors zone peuplée et ne répondant pas aux critères du scénario S-2 .</li> </ul> Catégorie d'aéronefs : C : aéronefs captifs, D : Moins de 2 kg, E : Entre 2 et 25 kg, F : Plus de 25 kg et moins de 150 kg, G Plus de 150 kg : traité par l'AESA <sup>(2)</sup>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Document de Navigabilité pour les aéronefs de plus de 25 kg Identification pour les plus de 25 kg</li> <li>- Autorisations particulières : <b>S-2 / S-3 après vérifications spécifiques des équipements de l'aéronef / S-4 après analyse de sécurité globale de chaque cas</b></li> <li>- Manuel d'activités particulières (MAP) + déclaration de conformité aux exigences</li> <li>- <b>En plus pour S-4 : Accord sur le dossier cosigné par l'exploitant et le donneur d'ordre de la mission pour la mission considérée</b></li> <li>- Formation théorique au pilotage pour tous les télépilotes (1), sauf catégorie C (niveau de formation minimale : théorique PPL, planeur, FCL, ...</li> <li>- Démonstration pratique au ministre chargé de l'aviation civile des compétences des télépilotes des aéronefs de plus de 25kg ;</li> <li>- Des exigences pratiques à l'activité particulière sous responsabilités de l'exploitant (Déclaration Niveau Compétence)</li> <li>- <b>En plus, pour S-4 : PPL avion, hélico, planeur et 100 h vol CdB sur ces aéronefs, puis 20 h vol avec l'aéronef télépilote, en vue.</b></li> </ul>			
Cas possibles sans évaluation supplémentaire, sinon dossier à soumettre au ministre chargé de l'aviation civile -			
	exigences spécifiques scénario S-4		
	S-4		
	D		
	- Hors espace aérien contrôlé (ou réglementé), et éloigné de tout aéroport, et - Hauteur de vol < 150 m par rapport au sol ou aux obstacles artificiels		
Scénario	S-1	S-3	S-2
Avec un aéronef	C, D, E,	C : aérostats de moins de 25 kg, D ; E de moins de 4 kg et 69 J d'énergie maximale à l'impact, ainsi que ceux captifs de même caractéristiques.	D, E
Espace :	Hors espace aérien contrôlé (ou réglementé) et Hors "aire d'atterrissage/décollage, et Hauteur de vol < 150m (voir article 4)		Hors espace aérien contrôlé (ou réglementé), et éloigné de tout aéroport, Hauteur de vol < 50 m par rapport au sol ou aux obstacles artificiels (voir article 5)
Information aux usagers	- pour les clubs d'aéromodélisme et les vols > 150m : Comité Régional de Gestion de l'Espace Aérien (CRG) et information aéronautique (article 4 point 2 et article 7)		Sans objet
Autres cas :	Ségrégation espace aérien (voir article 3, point 3 et article 6) requise		
Autorisation préfectorale	Sans objet	Oui, car survol de rassemblement de personnes, animaux ou agglomération	Sans objet
PROTOTYPES (voir annexe III du texte 1)			
- Traitement au cas par cas par le ministre chargé de l'aviation civile pour tous les aspects du sujet.			

(1) Le terme « télépilote » va désigner dans la terminologie préconisée par l'OACI la personne qui a le contrôle de la trajectoire de l'aéronef télépilote ;

(2) La navigabilité est généralement traitée par l'AESA. Les autres exigences (pilotage, opérations) sont couvertes pour l'instant par la DGAC tant que les règles de l'AESA n'existent pas en la matière.

## Annexe 2 : Attestation de Réussite à l'examen théorique commun ULM et Diplômes obtenus



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE,  
DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT

*Direction générale de l'aviation civile*

BOUGUENAIS, le 11 juin 2014

*Direction de la sécurité de l'Aviation civile*

*direction de la sécurité de l'Aviation civile Ouest*

*délégation Pays de la Loire*

**Monsieur Vincent CHATELON**  
**14bis ru des Elzevirs**

**94350 VILLIERS SUR MARNE**

**Référence :**

Affaire suivie par : Marc PROVOST  
marc.provost@aviation-civile.gouv.fr

Monsieur,

J'ai l'honneur de vous communiquer ci-après le résultat que vous avez obtenu à l'épreuve de l'examen théorique commun de pilote d'aéronef ultraléger motorisé de la session du 11 Juin 2014 au centre de NANTES.

Epreuve	Note obtenue	Note minimale à obtenir	Résultat
Epreuve complète	39	30	réussite

**CE DOCUMENT A VALEUR D'ATTESTATION DE REUSSITE POUR L'EPREUVE OBTENUE.**

Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Le Responsable des Examens Aéronautiques

Marc PROVOST



Le Diplôme suivant est délivré pour un résultat à l'examen supérieur ou égal à 75 %. Il donne droit au pilotage de drone radiocommandé sur la voie publique (ne dispense pas des assurances et demandes d'autorisation le cas échéant !)



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE,  
DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT



## CERTIFICAT D'APTITUDE

N° 0109-ULM-00003136

Délivré à Monsieur Vincent CHATELON, né le 9 Avril 1989,

qui a satisfait à l'épreuve

**de l'examen théorique commun de pilote  
d'aéronef ultraléger motorisé**

conforme à l'arrêté du 4 mai 2000.

Date d'effet : 11 Juin 2014

Fait à Nantes, le 11/06/2014

Le responsable des examens théoriques



[www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)

Aérodrome de Nantes-  
Atlantique  
BP 4309  
44343 BOUGUENAIS  
téléphone : 0228002481  
télécopie : 0228002489  
mél. marc.provost  
@aviation-civile.gouv.fr

**AVIS IMPORTANTS :**

- ⇒ Ce présent certificat original sera exigé pour la délivrance du brevet et de la licence de pilote d'ULM.
- ⇒ Il n'en sera délivré aucune duplication.



Le Diplôme suivant est délivré pour un résultat à l'examen supérieur à 90%. Il est nécessaire afin de pouvoir donner des cours d'instruction théorique en étant reconnu par la DGAC. (càd : formation agréée DGAC)



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE,  
DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT



## CERTIFICAT D'APTITUDE

N° 0109-IULM-00003136

Délivré à Monsieur Vincent CHATELON, né le 9 Avril 1989,

qui a satisfait à :

**l'évaluation théorique d'instructeur de pilote  
d'aéronef ultraléger motorisé**

conforme à l'arrêté du 4 mai 2000.

Date d'effet : 11 Juin 2014

Fait à Nantes, le 11/06/2014

Le responsable des examens théoriques



[www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)

Aérodrome de Nantes-  
Atlantique  
BP 4309  
44345 BOUGUENAIS  
téléphone : 0228002481  
télécopie : 0228002489  
mél. marc.provost  
@aviation-civile.gouv.fr

**AVIS IMPORTANTS :**

- ⇒ Ce présent certificat original sera exigé pour la reconnaissance de la qualité d'instructeur stagiaire de pilote d'IULM
- ⇒ Il n'en sera délivré aucune duplication.

### Annexe 3 : Démonstration de l'Impact de l'erreur angulaire sur le positionnement du pixel au sol

Notations : dans ce qui suit, seront admis les notations suivantes :

$E_a/E_\kappa$  = erreur d'angle  $\omega$  (autour de l'axe x, roulis) ou  $\varphi$  (axe y, tangage) car généralement  $e_\omega$  et  $e_\varphi$  sont égaux / erreur d'angle  $\kappa$  (autour de z : axe de lacet) ;

$ER_\omega / ER_\varphi$  : erreur résiduelle due à  $\omega$  / à  $\varphi$  ;  $ER_{\omega\varphi}$  : erreur résiduelle cumulée selon  $\omega$  et  $\varphi$  ;

$ER_\kappa = f(i,j)$  : erreur résiduelle due à  $\kappa$  (fonction de la position du pixel dans la matrice, avec  $(i,j)$  tels que pour PPA,  $(i,j) = (0,0)$ , en mm) ; D est la distance sol entre un point M et le nadir (verticale du sommet de la photo)

ER : erreur résiduelle globale due aux imprécisions d'orientations angulaires

$$(1) : ER_\omega = h * \tan e_\omega, \text{ or } e_\omega \text{ est petit, d'où : } \tan e_\omega = e_\omega, \text{ soit : } ER_\omega = h * e_\omega$$

$$(2) : ER_\varphi = h * \tan e_\varphi \text{ or } e_\varphi = e_\omega, \text{ soit : } ER_\varphi = h * e_\omega = ER_\omega, \text{ on posera : } e_{\omega,\varphi} = e_\varphi = e_\omega$$

$$(1)\&(2) \Rightarrow (3) : ER_{\omega\varphi} = \sqrt{ER_\omega^2 + ER_\varphi^2} = \sqrt{(h * \tan e_\omega)^2 + (h * \tan e_\varphi)^2}$$

$$ER_{\omega\varphi} = \sqrt{2} * h * \tan(e_{\omega,\varphi})$$

(4) :  $\tan e_\kappa = \frac{ER_\kappa}{D}$  avec  $D = \frac{h}{F} * \sqrt{|i|^2 + |j|^2}$ , où D est la distance sol (m),  $(i,j)$  la position du pixel sur la matrice ( $\text{mm}^2$ ), F est la distance focale (mm) et h la hauteur de vol (m)

$$(4) \Leftrightarrow ER_\kappa = \frac{h}{F} * \sqrt{|i|^2 + |j|^2} * \tan e_\kappa$$

On souligne que l'erreur résiduelle selon Kappa est fonction **essentiellement** de la position du pixel sur la matrice par rapport à l'image du nadir.

(5) :  $ER = ER_{\omega,\varphi} + ER_\kappa$  est l'erreur **maximale** que peut atteindre la position horizontale (X,Y) du point au sol déterminée à partir d'une prise de vue aérienne et des valeurs d'orientation externe données par l'instrumentation de bord (valeurs IMU d'attitude), soit :

$$(5) \Leftrightarrow ER = \sqrt{2} * h * \tan(e_{\omega,\varphi}) + \frac{h}{F} * \sqrt{|i|^2 + |j|^2} * \tan e_\kappa$$

$$\Leftrightarrow ER = h * \left( \sqrt{2} * \tan(e_{\omega,\varphi}) + \frac{\sqrt{|i|^2 + |j|^2} * \tan e_\kappa}{F} \right)$$

## Annexe 4 : Matrice de calcul interactive des données de planification du vol, et constante de photogrammétrie (exemple donnée avec les valeur des missions types *cadastre de Rennes*)

Préparation mission : données fondamentales, plan de vol

	<b>Sony Alpha 5000</b>
<b>L (pix)</b>	5456 pix
<b>l (pix)</b>	3632 pix
<b>déf (Mpix)</b>	19.816192 Mpix
<b>format</b>	1.502 (APS-C)
<b>L (mm)</b>	23.2 mm
<b>l (mm)</b>	15.4 mm
<b>D (mm)</b>	27.846 mm
<b>D (")</b>	1.10 pouce
<b>taille photosite</b>	4.246 micron (E-6m)

<b>Données entrées</b>
<b>Données sorties fondamentales</b>

Caractéristiques de la zone et du vol :	
Longueur	4 km
Largeur	3 km
Surface	12 km <sup>2</sup>
Vitesse v :	80.00 km/h
R de virage	30 m

22.2 m/s

Principales caractéristiques mission et prise de vue :								
			Longitudinal	Latéral	Constantes de vol :			
Objectif 1 h = 150 m	distance focale min	10 mm	Recouvrement  Base  soit, à vitesse v nombre/bande durée/bande  distance perdue temps perdu durée totale de vol nombre de photos en tout	80 %	60 %	Virage et demi-tour : π x R : 94 m dist interbandes : 139 m cumul /demi-tour : 173 m		
	éq 24x36	15 mm		184.8 m	208.8 m			
	angle d'ouverture	98.5 °		20 %	40 %			
	L sol max	348.0 m		46.2 m	139.2 m			
	l sol max	231.0 m		2.079 s	-			
	Résolution min	6.4 cm		87 clichés	22 bandes			
				180 s/bande	3 min			
				3815.85 m				
				171.71 s	2.86 min			4.16 % mission
				4131.71 s	68.86 min			1.15 h
		1914 photos	15.0 Go					
péna 1/2tour								
Objectif 2 h = 150 m	distance focale min	16 mm	Recouvrement R  Base B  soit, à vitesse v nombre/bande durée  distance perdue temps perdu durée totale de vol nombre de photos en tout	80 %	60 %	Virage et demi-tour : π x R : 94 m dist interbandes : 87 m cumul /demi-tour : 121 m		
	éq 24x36	24 mm		115.5 m	130.5 m			
	angle d'ouverture	73.7 °		20 %	40 %			
	L sol max	217.5 m		28.875 m	87 m			
	l sol max	144.4 m		1.299375 s	-			
	Résolution min	4.0 cm		139 clichés	35 bandes			
				180 s/bande	3 min			
				4243.67 m				
				190.97 s	3.18 min			2.94 % mission
				6490.97 s	108.18 min			1.80 h
		4865 photos	38.0 Go					
péna 1/2tour								

Le tableur ci-dessus utilise en entrée : un périmètre simplifié de la zone de survol (rectangle), les caractéristiques du capteur et des 2 focales possibles, les paramètres principaux de vol (hauteur de vol, vitesse et rayon de virage) et de photogrammétrie (recouvrements longitudinal et latéral) ; et donne en sortie les informations principales de la mission : nombre de photos total et volume de données, durée du vol et résolution. Ainsi que d'autres informations intermédiaires telles que : le nombre de bandes, de clichés par bande, l'intervalle de temps entre 2 clichés, la base photogramétrique, distance interbande, information concernant les temps et distances perdus à cause des virages.

## Annexe 5: Fiche technique module GNSS PA300

# PA300™ GNSS Smart Antenna Module

## GNSS compact antenna integrated with Eclipse™ technology

### key features

- Improved GPS performance, particularly with long-range RTK applications up to 50 km
- Extremely affordable dual-frequency, dual-GNSS solution with update rates of up to 20 Hz
- Compatible with other RTK sources including Hemisphere GNSS' ROX, RTCM v3 (RTK), CMR, CMR+
- Reliable DGPS accuracy for up to 40 minutes using Hemisphere GNSS' COAST technology
- RTK fix times provide fast solutions
- Utilize the built-in multi-frequency, multi-GNSS antenna or connect to an optional external antenna



The PA300™ is a complete GNSS receiver and antenna OEM package offered to integrators for high precision applications where integration space is limited. Integrated with Hemisphere GNSS' multi-frequency GNSS Eclipse™ receiver and dual-frequency patch antenna, the PA300 is ideal for portable systems that requires RTK or differential accuracy. The PA300 also features excellent noise and multi-path rejection.

#### DGPS and SBAS with COAST™

Patented COAST™ software enables select Hemisphere GNSS receivers to utilize previous differential correction data during times of interference, signal blockage and weak signal. The receiver will coast and continue to maintain sub-meter positioning for up to 40 minutes without any differential signal.

#### Eclipse GNSS RTK with SureTrack™

The PA300 is scalable. Utilize the same centimeter-level accuracy in either L1-only mode, or employ the full performance of fast RTK performance over long distances with L1 and L2 GNSS signals. Our exclusive SureTrack™ technology gives peace of mind knowing your RTK rover is making use of every satellite it is tracking, even satellites not tracked at the base. Benefit from fewer RTK dropouts in congested environments, faster re-acquisitions and more robust solutions. SureTrack also removes concerns with mixing GNSS data from various manufacturers. Even if your base is only L1 and L2 GPS capable, the PA300 with SureTrack delivers complete GNSS performance where others cannot. Rely on SureTrack technology from Hemisphere GNSS.



precision@hemispheregnss.com  
www.hemispheregnss.com



# PA300 GNSS Smart Antenna Module

## GNSS Sensor Specifications

Receiver Type:	L1/L2 GPS and L1/L2 GLONASS, RTK with carrier phase	
Signals Received:	GPS, GLONASS and GALILEO <sup>1</sup>	
Channels:	270	
GPS Sensitivity:	-142 dBm	
SBAS Tracking:	3-channel, parallel tracking	
Update Rate:	1 Hz standard, 10 Hz and 20 Hz optional	
Horizontal Accuracy:	RMS (67%)	2DRMS (95%)
RTK: <sup>2,4</sup>	10 mm + 1 ppm	20 mm + 2 ppm
SBAS (WAAS): <sup>3</sup>	0.3 m	0.6 m
Autonomous, no SA: <sup>2</sup>	1.2 m	2.5 m
Cold Start:	< 60 s typical (no almanac or RTC)	
Warm Start:	< 30 s typical (almanac and RTC)	
Hot Start:	< 10 s typical (almanac, RTC and position)	
Maximum Speed:	1,850 kph (999 kts)	
Maximum Altitude:	18,288 m (60,000 ft)	

## Communications

Serial Ports:	2 RS232 3.3 V CMOS
Baud Rates:	4800 - 115200
Correction I/O Protocol:	Hemisphere GPS <sup>5</sup> ROX, RTCM v2 (DGPS), RTCM v3 (RTK), CMR, CMR+
Data I/O Protocol:	NMEA 0183, Hemisphere GPS binary <sup>5</sup>

## Environmental

Operating Temperature:	-40°C to +70°C (-40°F to +158°F)
Storage Temperature:	-40°C to +85°C (-40°F to +185°F)
Humidity:	95% non-condensing <sup>6</sup>
Shock and Vibration:	Mechanical Shock: EP455 Section 5.14.1 Operational <sup>6</sup> Vibration: EP455 Section 5.15.1 Random

## EMC:

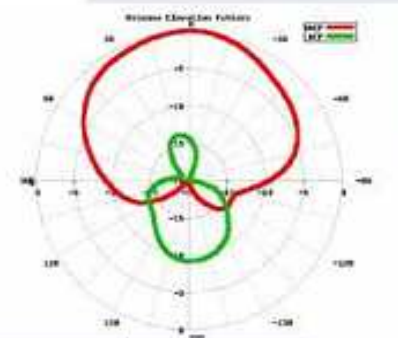
CE (IEC 60945 Emissions and Immunity)  
FCC Part 15, Subpart B  
CISPR22

## Power

Input Voltage:	3.3 VDC ±4-5%
Power Consumption:	< 1.9 W nominal GPS (L1/L2) and GLONASS (L1/L2)
Current Consumption:	550 mA nominal GPS (L1/L2) and GLONASS (L1/L2)
Antenna Voltage:	3.3 V
External Antenna Voltage:	3.3 V 50 mA
Antenna Short Circuit Protection:	Yes
Antenna Gain Input Range:	24 dB gain at L1, 29 dB for L2
Antenna Input Impedance:	50 Ω

## Mechanical

Dimensions:	8.0 L X 5.2 - 7.7 W X 2.35 - H (cm) 3.14 L X 2.04-3.03 W X 0.92 H (in)
Weight:	< 133 g (< 4.7 oz)
Status Indications (LED):	Power, GPS lock, differential lock, DGPS position
Power/Data Connector:	20-pin LVDS connector (Honda LVC-D20SFYG3)
Antenna Connectors:	MCX, female, straight



- <sup>1</sup> Receive only; does not transmit this format
- <sup>2</sup> Depends on multipath environment, number of satellites in view, and satellite geometry
- <sup>3</sup> Hemisphere GPS proprietary
- <sup>4</sup> Upgrade required
- <sup>5</sup> When installed in an enclosure
- <sup>6</sup> When mounted in an enclosure with screw mounting holes utilized

## Authorized Distributor:



Copyright Hemisphere GNSS, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice.  
Hemisphere GNSS and Hemisphere GNSS logo are trademarks of Hemisphere GNSS, Inc.  
Rev. 06/16



Hemisphere GNSS, Inc.  
8444 N 90th Street, Suite 120  
Scottsdale, AZ, USA 85258

Toll-Free: +1-855-203-1770  
Phone: +1-480-348-6380  
Fax: +1-480-270-5070  
precision@hemispheregnss.com  
www.hemispheregnss.com

## Annexe 6 : Descriptif du levé du mur de Calibration "Hub-Creatic" et listing des coordonnées :

Levé effectué en date du 28 Mai 2014.

- appareil utilisé : Leica TCRP 1201
- Type de levé : points rayonnés, visée laser
- Type de coordonnées : locales
- Coordonnée origine (X,Y,Z) : (1000,5000,100)
- Hauteur de la station : 1,428 m
- nombre de points levés : 92
- précision du pointé : < 1cm



Figure 27 : Situation du Tachéomètre

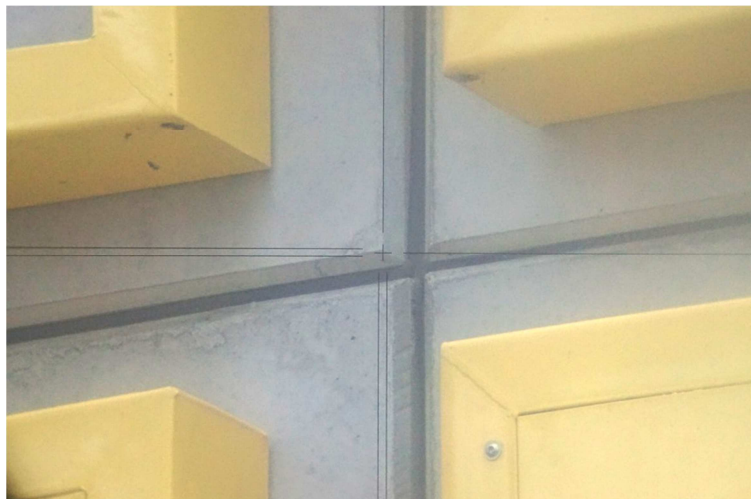


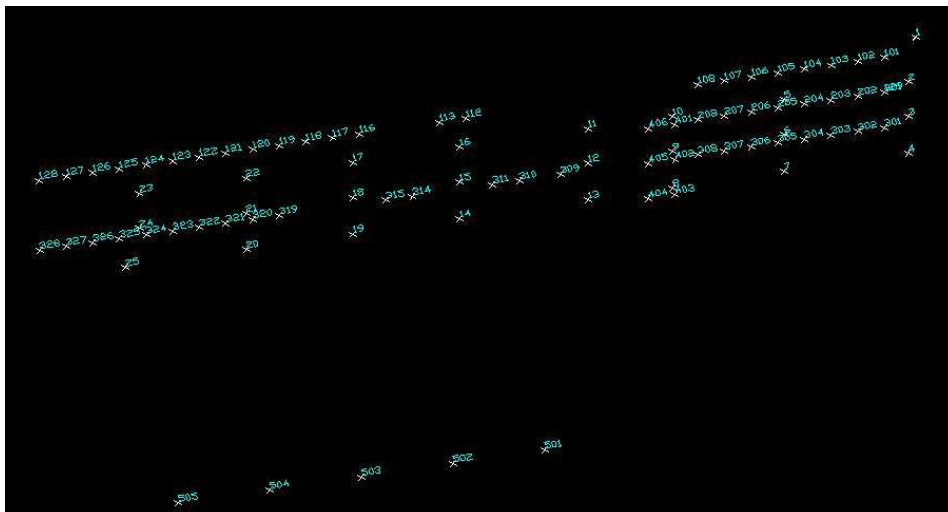
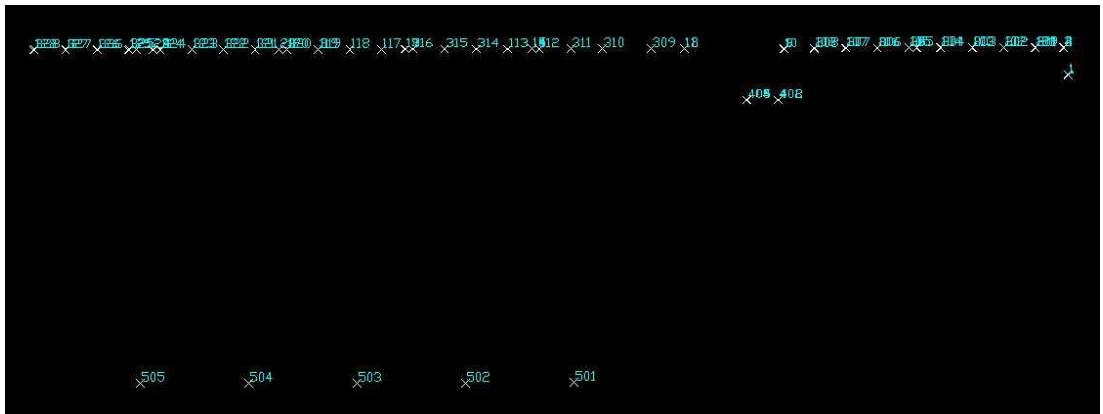
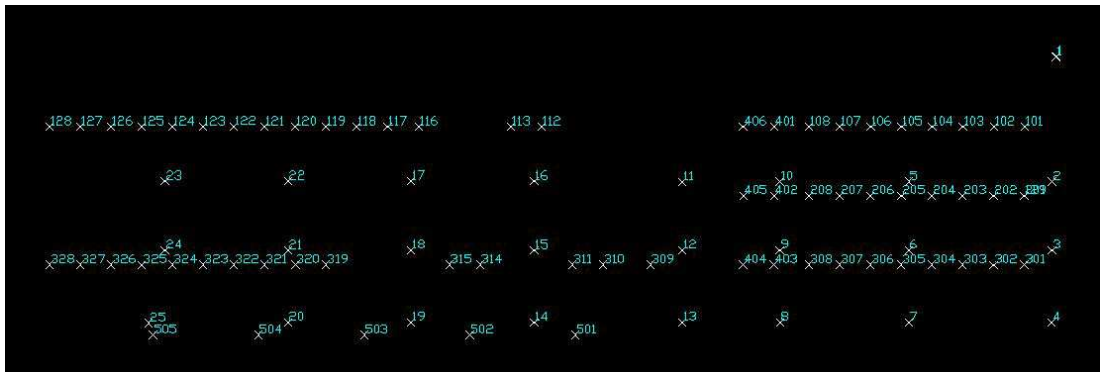
Figure 28 : Illustration du pointé, vue de l'objectif de visée

Point	X	Y	Z	Gi	Dh
001a	1021.998	4971.626	115.607	158.0153	35.903
002	1021.812	4972.91	109.526	156.8447	34.78
003	1021.807	4972.911	106.162	156.8505	34.776
004	1021.795	4972.907	102.646	156.8716	34.772
005	1014.827	4972.899	109.523	168.1306	30.891
006	1014.816	4972.894	106.16	168.1544	30.891
007	1014.817	4972.892	102.642	168.1541	30.893
008	1008.542	4972.842	102.649	180.6	28.47
009	1008.534	4972.842	106.165	180.6162	28.467
010	1008.532	4972.838	109.526	180.6231	28.471
011	1003.779	4972.863	109.497	191.1912	27.399
012	1003.783	4972.865	106.163	191.1821	27.397
013	1003.783	4972.866	102.647	191.1813	27.396
014	996.545	4972.85	102.642	208.0571	27.369
015	996.546	4972.846	106.157	208.0555	27.373
016	996.545	4972.843	109.533	208.0568	27.376
017	990.536	4972.833	109.533	221.3409	28.769
018	990.543	4972.831	106.16	221.3238	28.768
019	990.546	4972.827	102.648	221.3165	28.77
020	984.544	4972.813	102.646	232.9096	31.273
021	984.538	4972.811	106.155	232.9176	31.278
022	984.537	4972.81	109.534	232.9179	31.279
023	978.541	4972.792	109.533	242.5142	34.653
024	978.543	4972.803	106.163	242.5234	34.642
025	977.754	4972.804	102.613	243.6475	35.136
101	1020.47	4972.906	112.184	158.809	33.957
102	1018.97	4972.905	112.186	161.1154	33.076
103	1017.467	4972.901	112.188	163.5505	32.24
104	1015.965	4972.898	112.188	166.1095	31.455
105	1014.466	4972.895	112.188	168.7899	30.724
106	1012.964	4972.886	112.189	171.6074	30.053
107	1011.465	4972.88	112.184	174.5379	29.444
108	1009.964	4972.875	112.186	177.588	28.898
112	996.898	4972.84	112.193	207.24	27.337
113	995.406	4972.834	112.194	210.6651	27.552
116	990.908	4972.83	112.195	220.5583	28.651
117	989.399	4972.824	112.19	223.6779	29.17
118	987.896	4972.82	112.19	226.671	29.754
119	986.395	4972.817	112.192	229.5419	30.397
120	984.9	4972.816	112.194	232.2792	31.097

121	983.398	4972.81	112.194	234.8974	31.858
122	981.896	4972.803	112.197	237.39	32.671
123	980.398	4972.798	112.195	239.7526	33.529
124	978.9	4972.792	112.196	241.9943	34.431
125	977.401	4972.791	112.191	244.1243	35.37
126	975.897	4972.791	112.193	246.1506	36.35
127	974.401	4972.788	112.195	248.056	37.36
128	972.903	4972.792	112.195	249.8702	38.399
129	1020.451	4972.908	108.821	158.8349	33.945
201	1020.451	4972.909	108.821	158.835	33.944
202	1018.953	4972.904	108.82	161.1424	33.067
203	1017.453	4972.901	108.822	163.5746	32.233
204	1015.953	4972.9	108.82	166.1291	31.446
205	1014.461	4972.894	108.822	168.7998	30.723
206	1012.96	4972.884	108.825	171.6161	30.054
207	1011.46	4972.877	108.827	174.5505	29.445
208	1009.962	4972.872	108.826	177.5955	28.899
301	1020.455	4972.902	105.457	158.8361	33.951
302	1018.956	4972.897	105.455	161.1444	33.074
303	1017.454	4972.893	105.456	163.5806	32.241
304	1015.954	4972.892	105.455	166.1345	31.454
305	1014.455	4972.891	105.456	168.8139	30.722
306	1012.954	4972.883	105.457	171.6296	30.053
307	1011.456	4972.875	105.458	174.5596	29.445
308	1009.956	4972.87	105.459	177.6088	28.899
309	1002.221	4972.86	105.458	194.8006	27.23
310	999.906	4972.855	105.459	200.2193	27.145
311	998.407	4972.847	105.459	203.7305	27.2
314	993.906	4972.836	105.455	214.0486	27.839
315	992.408	4972.834	105.456	217.3495	28.207
319	986.4	4972.814	105.457	229.5291	30.398
320	984.904	4972.811	105.46	232.2671	31.098
321	983.403	4972.804	105.458	234.8826	31.86
322	981.905	4972.802	105.46	237.3737	32.668
323	980.403	4972.803	105.457	239.7492	33.522
324	978.902	4972.804	105.457	242.0037	34.42
325	977.412	4972.799	105.452	244.1184	35.357
326	975.913	4972.796	105.457	246.1357	36.335
327	974.41	4972.796	105.458	248.0536	37.348
328	972.911	4972.796	105.459	249.8649	38.391
401	1008.246	4970.42	112.194	182.6923	30.708

402	1008.251	4970.421	108.822	182.6814	30.708
403	1008.239	4970.416	105.457	182.7083	30.71
404	1006.737	4970.415	105.455	185.7457	30.343
405	1006.75	4970.417	108.821	185.7183	30.344
406	1006.743	4970.417	112.195	185.7324	30.342
501	998.563	4957.034	102.029	202.1283	42.99
502	993.405	4956.999	102.028	209.6876	43.504
503	988.253	4956.984	102.029	216.9714	44.591
504	983.096	4956.977	102.026	223.8342	46.225
505	977.959	4956.996	102.033	230.1513	48.323
001b	1022.003	4971.627	115.607	158.0079	35.904
Écart de fermeture/précision pointé :					
1b-1a	0.005	0.001	0		

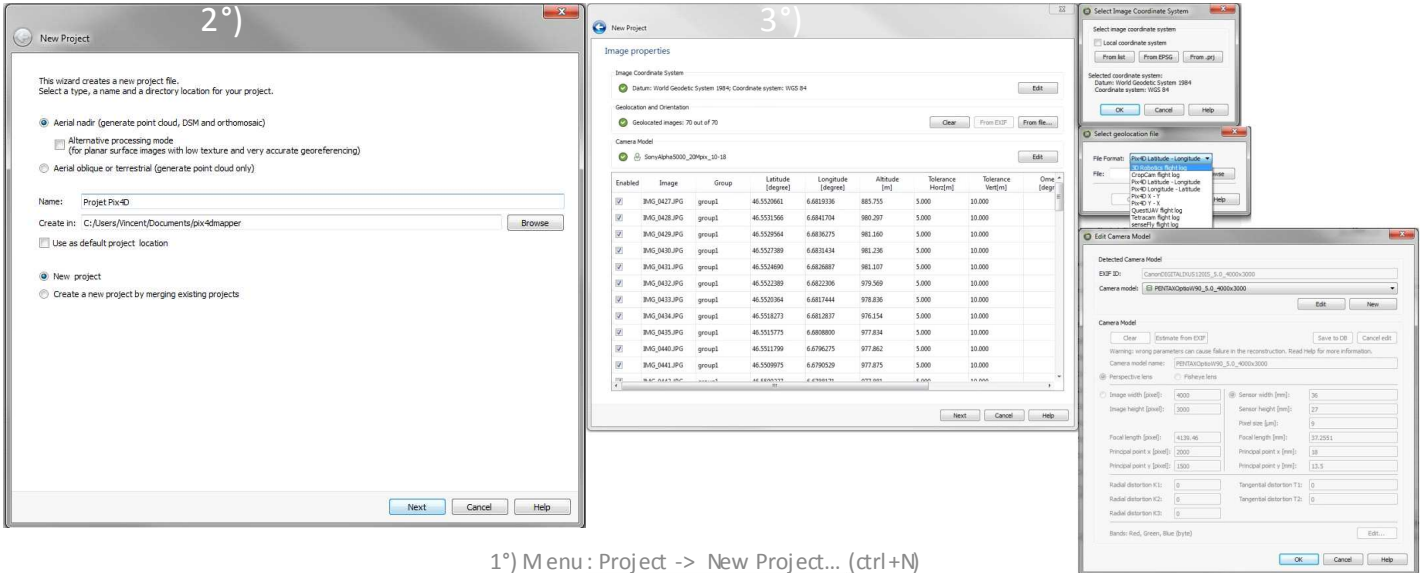
Vues sous Autocad des points relevés : (dans l'ordre : de face, de dessus, perspective)





## Annexe 7: Utilisation du logiciel Pix4D

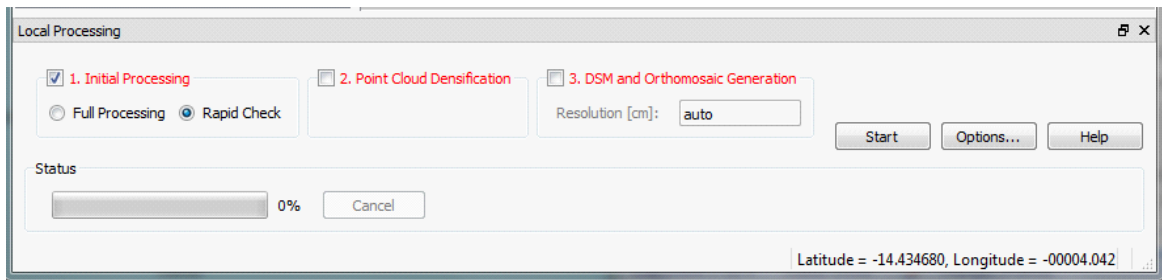
### Création d'un nouveau projet :



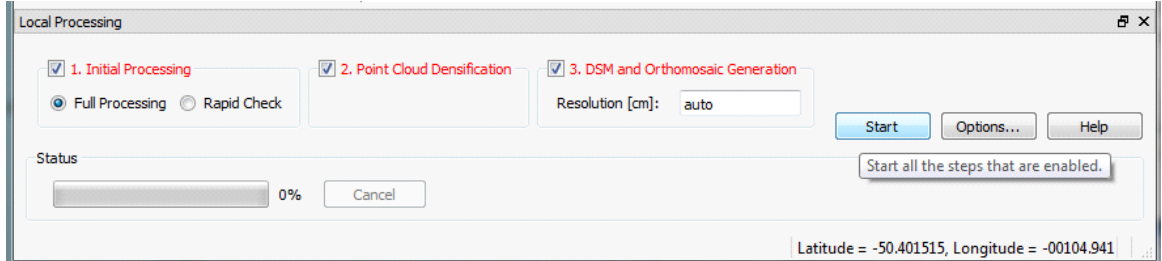
- 1°) Menu : Project -> New Project... (ctrl+N)
- 2°) Sélection du type de travail photogrammétrique : Nadirale ou Oblique  
Choix du nom du projet et du lieu de destination  
« Next »
- 3°) Sélection des images constitutives du projet : « Add images » - Sélection - « Ouvrir »  
« Next »
- 4°) Choix du système de coordonnées dans lequel sont géoréférencées les images
- 5°) Choix éventuel du fichier de géoréférencement des images
- 6°) Choix du fichier de calibration de l'appareil photographique  
« Next » - « Finish »

## Traitement : Création du nuage de point, de l'Orthomosaïque et du MNS

8°)



9°)



7°) Menu : Process -> Local Processing

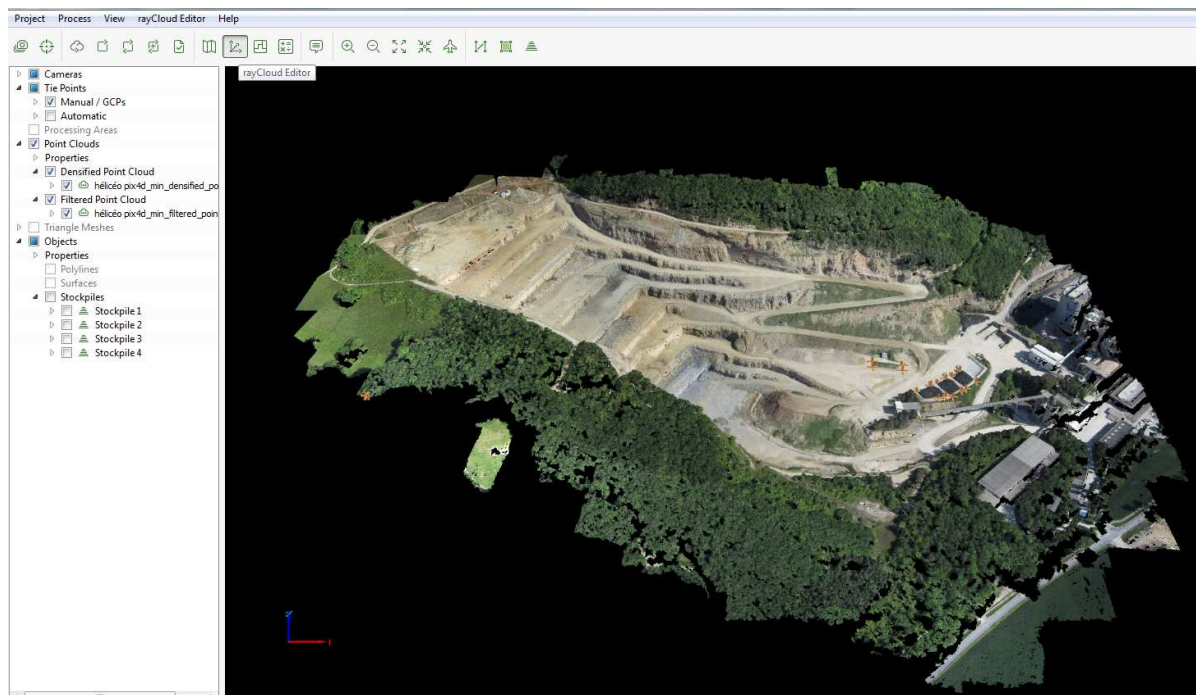
8°) Vérification de la validité des données (procédure à effectuer sur le terrain) : Initial Processing -> Rapid Check

« Start » (le logiciel sous-échantillonne les images, lance un prétraitement qui vérifie que les données sont exploitables)

9°) Traitement Complet : 1. -> Full Processing + 2. + 3.

« Start » (le logiciel réalise tous les traitements photogrammétriques, dont la corrélation automatique d'image, cette étape nécessite de lourds calculs, soit une puissance informatique élevée et un temps de calcul important)

## Visualisation, Exploitation du nuage de point :



10°) Cliquer sur le RayCloud Editor :

on obtient l'affichage du nuage de point, qu'il est alors possible de visualiser en 3D sous tous les angles.

Possibilité d'ajout de points (de contrôles ou pas), de ligne (calcul de distance) de polygone (calcul de surface terrain ou de volume à la verticale au dessus de la surface)

## Annexe 8 : Levé de la zone de calibration par GPS ; méthodologie et mise en oeuvre

La méthode GNSS par post-traitement PPK a été utilisée pour ce levé. Le but est d'obtenir les coordonnées précises du réseau de points que nous utiliserons plus tard pour la calibration du drone, puis pour l'évaluation de sa précision. Faute de disposer d'un récepteur GNSS fournissant des données dans un format standard (RINEX<sup>28</sup>), et ne possédant pas le logiciel payant (en l'occurrence *Leica Géo Office*, (LGO) ) permettant de traiter les données. J'ai en vain essayé de traiter les données avec le logiciel gratuit *RTKlib* ainsi que de les convertir via le convertisseur *Rinexpresso*. N'ayant pas eu le temps de revenir faire ce traitement à l'ESGT avant l'issue du rendu de ce mémoire, je me contenterai donc de décrire ici la méthode et le principe du travail.

Nous disposons d'une base et d'un mobile bi-fréquence de type Leica System 500. La base sert de pivot et est stationnée avec précision sur le point géodésique N° 4412204 du RBF (cf annexe 9). On effectue l'enregistrement des observations brutes de la base et du mobile une fois leur période d'initialisation achevée avec une fréquence de 1Hz sur L1 et L2.

Pour la base, l'enregistrement des données est continu sur toute la période d'observation. Nous contrôlons et notons tous les quarts d'heure, le nombre de satellites visibles et le cas échéant calculés sur L1 et sur L2 (si différents), ainsi que la valeur du GDOP. Pour le mobile, l'enregistrement se fait par séquence de 30 s minimum, stationné sur le point, après vérification d'un GDOP <3 et d'une réception d'au moins 6 satellites sur L1 et L2. Un peu d'attente s'avéra parfois nécessaire. Parfois également, à cause des occlusions, ces prescriptions n'auront pu être atteintes, et les points en questions auront donc été abandonnés. L'essentiel n'étant pas le nombre de points levés mais leur qualité (**précision**, visibilité et pérennité).

Concernant le post-traitement, il s'agit de recalculer les coordonnées de la base, puis celles des points levés avec le mobile.

1° Détermination du pivot : La base, étant stationnée sur un point connu, nous connaissons directement ses coordonnées. Cependant, les redéterminer nous permettra de vérifier la qualité de la méthode ici utilisée : NPPK.

a) On récupère les données des stations permanentes. Nous utiliserons les stations du RGP, étant un réseau d'utilisation libre (fourni par l'IGN) : "<http://rgp.ign.fr/DONNEES/diffusion/>", on précise : l'intervalle de volume des données (début fin d'observation) et leur type : ici GPS seul

---

<sup>28</sup> Description du format RINEX 2.10 : <http://rgp.ign.fr/DONNEES/format/rinex.php>



L1+L2. Nous utiliserons les stations de Carquefou (CARQ) et de Châteaubriant (CHBR) située à respectivement 11 km au Sud et 37 km au Nord.

b) Déchargement des données brutes du GPS et traitement de l'ensemble des données sous LGO. A ce stade, on a accès aux coordonnées calculées du pivot en WGS 84, qu'il n'y a plus qu'à convertir via le logiciel libre Circé, en coordonnée Lambert 93, RGF 93.

c) Comparaison avec les coordonnées réelles du point levé grâce aux coordonnées ETRS89, indiquées sur la fiche de station. Conclusion et validation le cas échéant.

2° Rattachement du mobile avec la base comme pivot (méthode PPK) : traitement via LGO sur le même principe. Calcul et listing des coordonnées, en indiquant les distances des lignes de base (ldb) pour chaque point.

3° Rattachement du mobile avec les stations du RGP (méthode NPPK) : calcul des coordonnées, et comparaison avec la méthode précédente.

Conclusion : sortie d'un tableau contenant :

- Numéros des points (37 points levés) -  $(X,Y,Z)^{2^{\circ}}$  -  $(X,Y,Z)^{3^{\circ}}$  - écart obtenu  $(DX,DY,DZ)$  - distance ldb -

Cela pourra mettre en évidence une corrélation de l'erreur de positionnement avec la taille de la ldb. Le fait de déterminer les coordonnées par 2 méthodes différentes permettra également d'avoir une idée de la précision de détermination des coordonnées pour chaque point.

Annexe 9 : Fiche de station Point Géodésique RBF N°4412204 :



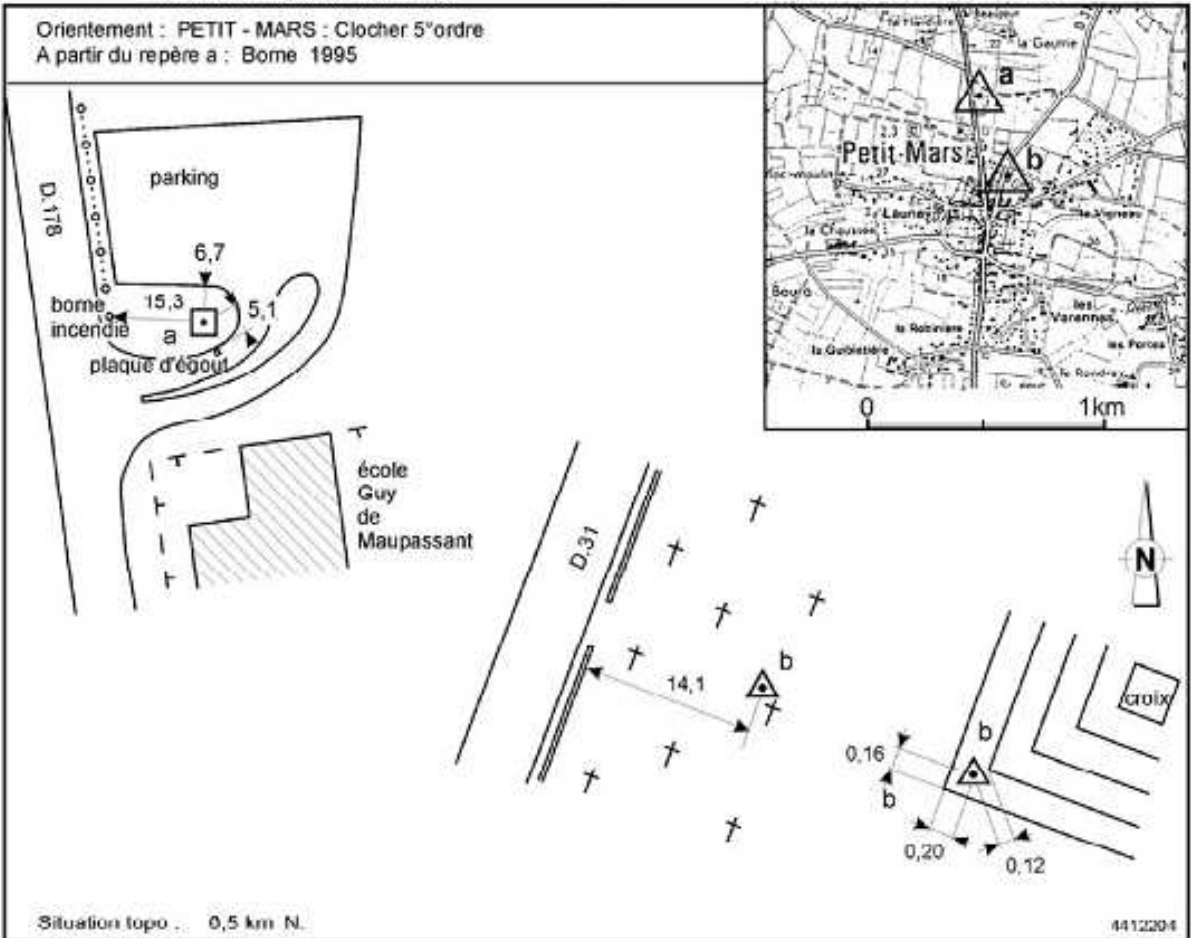
Réseau Géodésique Français

# PETIT-MARS IV

Département : LOIRE-ATLANTIQUE (44) No du Site **4412204**  
Commune : PETIT-MARS Site du Réseau de base  
Lieu-dit :



Azimut de la prise de vue : 35 gr





Réseau Géodésique Français

## PETIT-MARS IV

### Point : a

Borne 1995 en béton : Repère hémisphérique en laiton de 18 mm de diamètre

Point vu en place en 2012

Exploitable directement par GPS

Repère de nivellement : U.B.Q3 - 6-I

Azimut de la prise de vue : 174 gr

Le repère est au centre de la photo



### Point : b

Croix : Socle : Repère hémisphérique 1995 en laiton de 25 mm de diamètre

Point vu en place en 2011

Exploitable directement par GPS

Repère de nivellement : U.B.Q3 - 6a-I

Azimut de la prise de vue : 340 gr

Le repère est au centre de la photo



### Avertissement

Compte-tenu des risques de déplacement des bornes ou autres points géodésiques, il est indispensable de rattacher vos opérations de topométrie à plusieurs points géodésiques proches, ceci afin de s'assurer de leur stabilité.

La responsabilité de l'IGN ne saurait être engagée en l'absence d'un tel contrôle.

Toute remarque concernant la destruction, la disparition ou le mauvais état des points géodésiques doit être signalée au Service de la Géodésie et du Nivellement : [sgn@ign.fr](mailto:sgn@ign.fr)

**Système : ETRS 89 - Ellipsoïde : IAG GRS 1980 - Méridien origine : GREENWICH**

Point	Longitude (dms)	Latitude (dms)	Hauteur (m)	Précision
a	1° 27' 18.80267" O	47° 24' 00.66974" N	59.591	< 1 cm
b	1° 27' 13.06659" O	47° 23' 49.97506" N	61.839	< 5 cm

**Système : ETRS 89 - Projection : LAMBERT-93 - Système altimétrique : NGF-IGN 1969**

Point	e (m)	n (m)	Précision plani	Altitude (m)	Précision alti
a	364149.528	6709459.649	< 1 cm	12.283	< 5 mm
b	364250.911	6709123.389	< 5 cm	14.601	< 5 mm

**Réseau de référence gravimétrique : France métropolitaine 2012**

Point	g (mGal)	Précision (ugal)	g (m.s <sup>-2</sup> )	Précision	Année
a	980828.947	20	9.80828947	2.10 <sup>-7</sup>	2012



Point vu en place le 18-06-2014 :



**Annexe 10 : Fiche de calibration de la solution de photogrammétrie par drone Hélicéo**

**Fiche de calibrage drone Hélicéo**

Calibration solution finale sur banc :

Calibration APN :

Caractéristiques Effectives :

Définition Capteur		largeur	hauteur
Taille Capteur	mm		
	pixel		
Taille Photosite	mm		
Focale	mm		
	pixel		
Position du PPA	mm		
	pixel		
Coeff de Distorsion	K1		
	K2		
	K3		
	T1		
	T2		

Listing de points : (Système de coordonnées : RGF93, projection Lambert 93, Système altimétrique NGF-IGN 1969)

N° points	Coordonnées Réelles/Tolérances						Coordonnées Brutes/Ecarts (ss points d'appuis)						Coordonnées Brutes/Ecarts (av base = pt d'appuis)						
	X		Y		Z		X		Y		Z		X		Y		Z		
	Coord.	sigma	Coord.	sigma	Coord.	sigma	Coord.	Ecart	Coord.	Ecart	Coord.	Ecart	Coord.	Ecart	Coord.	Ecart	Coord.	Ecart	
BASE	364149.528	0.01	6709459.649	0.01	12.283	0.005													
01																			
02																			
03																			
04																			
05																			
06																			
07																			
08																			
09																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36																			
37																			

Précision Globale :	X/Y		Z	
	Constante	ppm	Constante	ppm
Sans point d'appui				
Avec pt d'appui base				



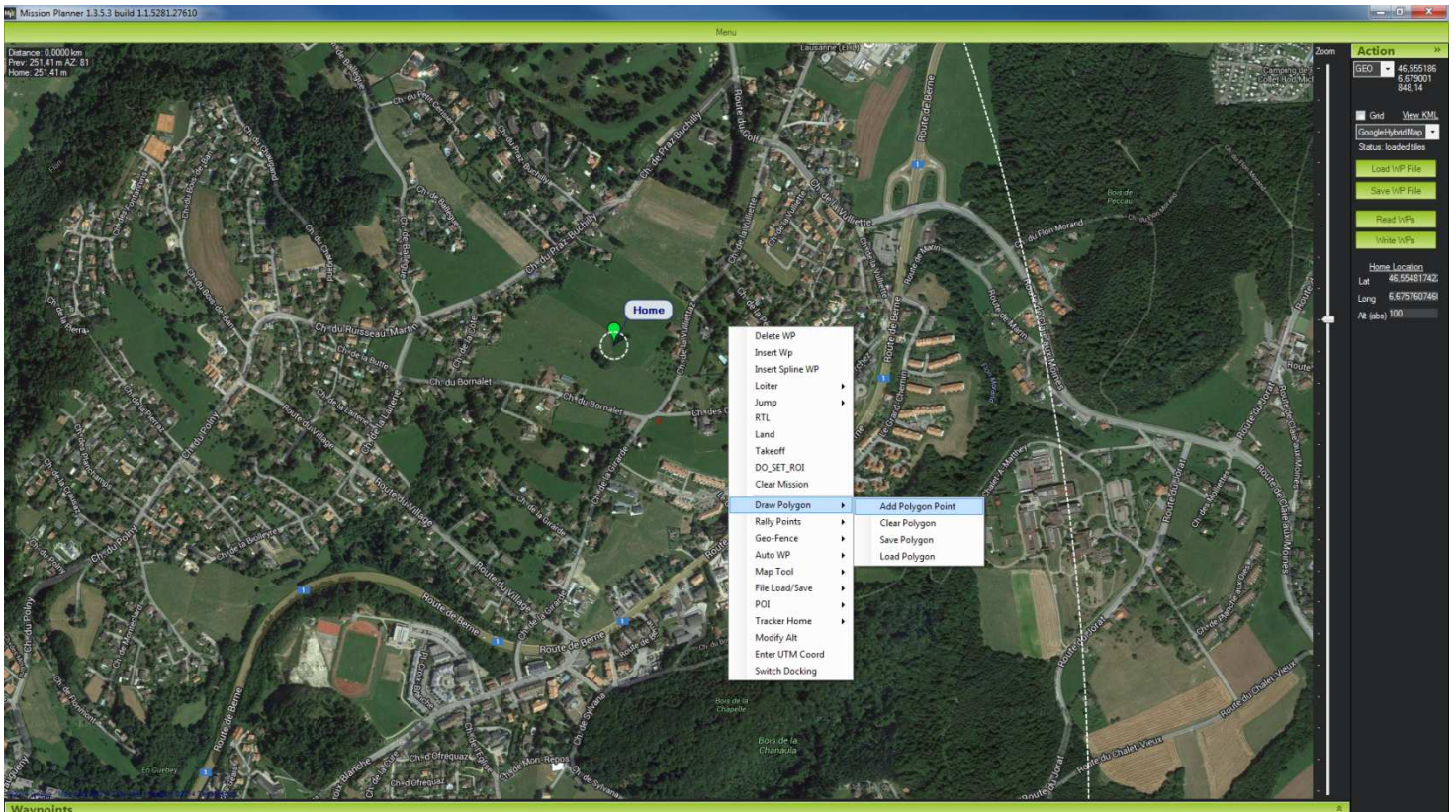
## Annexe 11 : Illustration du logiciel de planification de mission

### Mission Planner

1ère étape, définition de la zone de décollage :

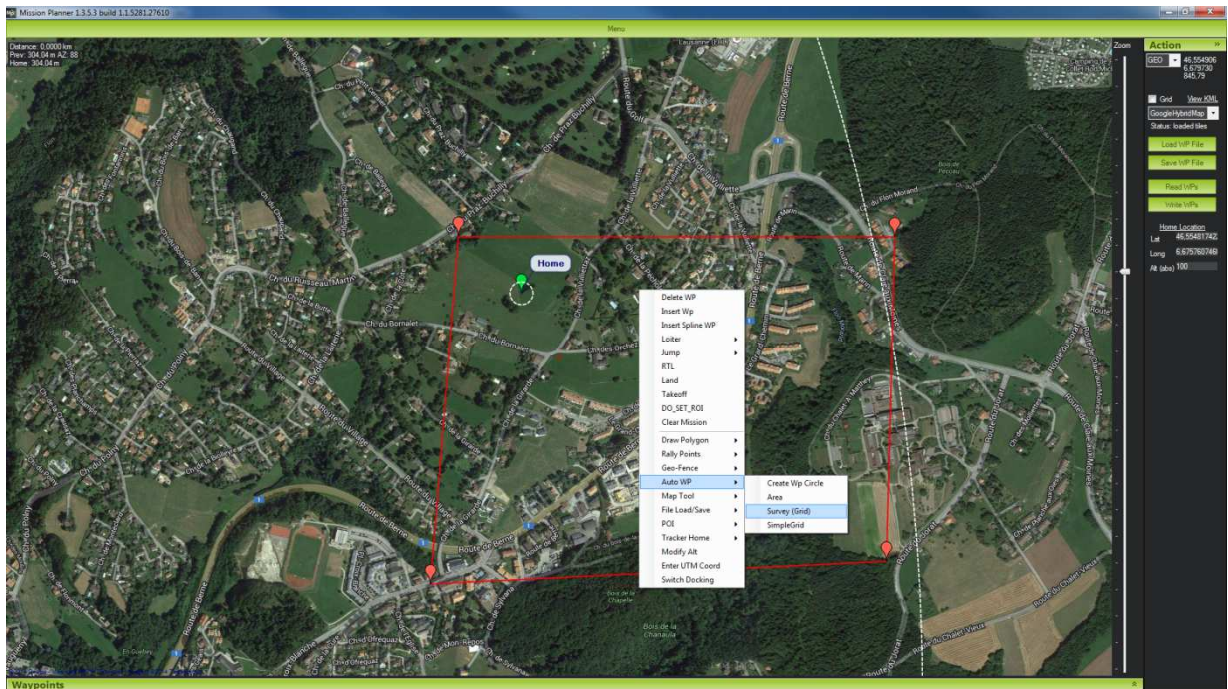


- 2ème étape, création du périmètre :



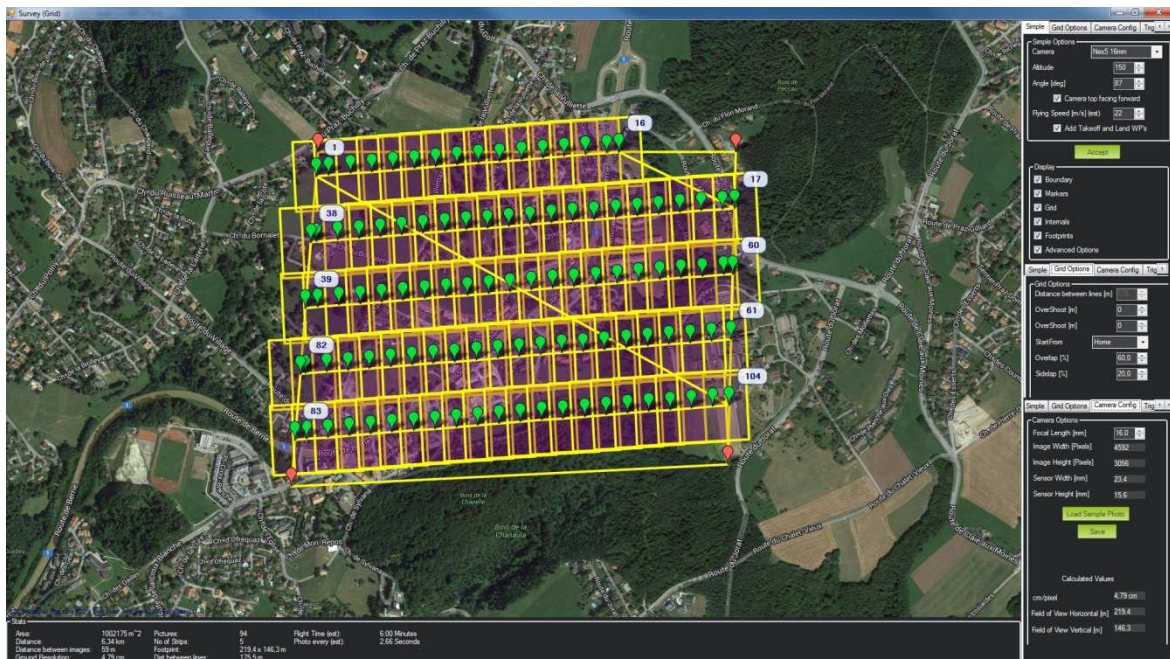


3ème étape : création du plan de vol



4ème étape : illustration du plan de vol, de la position de prise des clichés, avec illustration de l'emprise des cliché sur la zone. Possibilité de paramétrer les éléments à l'aide des différents onglets :

- "Simple" permet le paramétrage du plan de vol, à l'aide du choix de la caméra, de l'orientation et de la vitesse du vol et le choix des éléments à afficher à l'écran
- "Grid Option" permet le paramétrage du taux de recouvrement ainsi que le débord du périmètre de la zone
- Le dernier Onglet, "Camera Config" permet d'introduire toutes les informations de la caméra (taille capteur, définition et distance focale) et calcul l'emprise au sol et la Résolution.





## Liste des figures :

Figure 1 : Bâtiment des locaux Hélicéo .....	10
Figure 2 : Équipe Hélicéo - Mai 2014 -.....	11
Figure 3 : Avion bi-moteur radiocommandé.....	12
Figure 4 : Hélicoptère radiocommandé à moteur thermique.....	12
Figure 5 : Batterie Li-po.....	14
Figure 6 : Illustration de la fonction de charge d'un accumulateur de technologie Li-po .....	14
Figure 7 : Émetteur, Récepteur, Module télémétrique, sonde de température .....	16
Figure 8 : Illustration des différentes phases de vol d'un drone à voilure fixe, problématiques associées .....	17
Figure 9: Quadri-rotor (sources : <a href="http://www.suasnews.com">www.suasnews.com</a> ).....	17
Figure 10 : Récapitulatif des différents Scénarios de vol.....	18
Figure 11: Photo de la soufflerie tubulaire.....	20
Figure 12: Illustration du concept Breveté VTOL Hélicéo.....	21
Figure 13 : Angles d'attitude .....	27
Figure 14 : Schéma de principe de la synchronisation de l'instrumentation .....	28
Figure 15: Taille relative des différents capteurs .....	30
Figure 16 : Sony Alpha 5000 (Source : <a href="http://Clubi.com">Clubi.com</a> ).....	34
Figure 17 : Récepteur GNSS PA300 avec antenne intégrée .....	37
Figure 18 : IMU hautes performances.....	38
Figure 19 : IMU compacte .....	38
Figure 20 : Schéma de la Perspective Conique .....	40
Figure 21 : cible de calibration géométrique.....	41
Figure 22 : Mur de Calibration Hélicéo, croix violette : points levés (angles de fenêtres, de bloc béton ou pilier) .....	41
Figure 23 : Illustration du logiciel Photomodeler, Photogrammétrie rapprochée .....	42
Figure 24 : Sony Alpha 6000 (Sources : <a href="http://www.lesnumeriques.com">http://www.lesnumeriques.com</a> ) .....	44
Figure 25 : Zone de points connus pour tests de la solution .....	45
Figure 26 : Plaque apposée sur tout point géodésique IGN .....	46
Figure 27 : Situation du Tachéomètre .....	65
Figure 28 : Illustration du pointé, vue de l'objectif de visée .....	65

## Liste des tableaux :

Tableau 1 : Avantages/Inconvénients des différents types de Drones, devant conduire à la solution Hélicéo .....	21
Tableau 2 : Nature de travail photogrammétrique courant.....	25
Tableau 3 : Etat de l'art de l'existant. Principales caractéristiques. (Sources : sites constructeurs). 26	
Tableau 4 : Conditions de prise de vue - exemple pour l'utilisation avec l'APN Sony Alpha5000 . 33	
Tableau 5: Influence de l'erreur de géoréférencement consécutive à la précision d'orientation du capteur .....	33
Tableau 6 : Extrait du comparatif justifiant la sélection de l'APN (Sources : Lesnumeriques.com et sites constructeurs APN) .....	34
Tableau 7 : Extrait du tableur de planification de mission : comparaison focales 10/16mm.....	35
Tableau 8 : Récapitulatif des différentes méthodes GNSS différentielles et de précision .....	36
Tableau 9 : Fiche de calibration SonyAlpha5000 .....	43

## **Définition d'une Solution de Photogrammétrie par Drone Aérien**

**Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M. - E.S.G.T, Le Mans, 2014**

---

### **RESUME**

La photogrammétrie est une méthodologie qui utilise les caractéristiques de la parallaxe pour reproduire le relief, donc la 3ème dimension. Les drones permettent l'embarquement d'instrumentation via un vecteur aérien. L'accouplement de ces 2 concepts donne l'idée de la photogrammétrie par drone.

Au cours de ce mémoire, seront présentés les raisonnements conduisant à la réalisation d'un vecteur drone efficace, et toute la méthodologie nécessaire aux fonctions de photogrammétrie, allant des protocoles de choix de l'instrumentation à la validation de la solution en passant par toutes les procédures de validation individuelles, de mise en œuvre et de contrôle. Le tout conduisant à une solution dronistique de photogrammétrie opérationnelle, s'affranchissant de l'utilisation de point d'appui et s'autocontrôlant grâce à un protocole dédié. Ce TFE a été effectué dans le contexte d'une création d'entreprise.

**Mots clés : photogrammétrie, drone, MNS, APN, capteur, GNSS, perspective, géoréférencement direct**

---

### **SUMMARY**

**Photogrammetry is a methodology which uses the characteristics of reproducing the parallax for the relief, so the third dimension. UAVs allow boarding instrumentation via an air carrier. The coupling of these two concepts gives the idea of photogrammetry by drone.**

**In this thesis, will be presented the arguments leading to the achievement of an effective drone vector, and all the methodology needed for the performance of the solution. From protocols choice of instrumentation to the validation of the solution, through all procedures for individual validation, implementation and control. All leading to dronistique operatively photogrammetry solution, dispensing with the use of ground control point and control their behavior using a dedicated protocol. This internship was made in the context of entrepreneurship.**

**Key words : Photogrammetry, UAV, parallax, drone,**