



Développement d'une méthode de cartographie de la canopée par drone léger

pour l'orientation ciblée de l'application SAVEWOOD

Étudiants :

Zineb Boutmir
Ilias Ougil
Saad Khattab

Encadrants :
Lionel Lacampagne
Gabriel Gouband

Formation :

Spécialité : CHP
ENSEIRB-MATMECA

Partenaire industriel :
SaveWood

Résumé

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre d'un Travail d'Étude et de Recherche (TER) visant à développer une méthode de cartographie de la canopée forestière par drone léger (<250g) pour optimiser l'utilisation de l'application SAVEWOOD.

SAVEWOOD est une application iOS qui utilise le LIDAR des iPhone Pro pour caractériser les arbres dans le sous-étage forestier (diamètre, hauteur, volume, qualité). Cependant, identifier les zones d'intérêt depuis le sol reste difficile. L'objectif de ce projet est de cartographier la canopée par drone pour guider les utilisateurs vers des zones précises à analyser.

Le projet a consisté à :

- Réaliser un état de l'art des méthodes de cartographie forestière par drone
- Concevoir et valider un protocole de vol adapté aux drones légers
- Acquérir des données terrain et les traiter par photogrammétrie
- Développer des méthodes d'analyse pour identifier les zones d'intérêt
- Proposer une intégration avec l'application SAVEWOOD

Les résultats démontrent la faisabilité de la cartographie de canopée avec un DJI Mini 3 Pro et ouvrent des perspectives d'amélioration de l'efficacité opérationnelle de SAVEWOOD.

Mots-clés : Photogrammétrie, Drone, Foresterie, Cartographie, Canopée, LIDAR, SAVEWOOD

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réussite de ce projet :

- Gabriel Gouband, notre encadrant académique à l'ENSEIRB-MATMECA, pour son accompagnement méthodologique et ses conseils tout au long du projet.
- Lionel Lacampagne et l'équipe SAVEWOOD, pour leur accueil, leur disponibilité et leur expertise dans le domaine de la qualification forestière.
- Les gestionnaires forestiers qui nous ont permis d'accéder aux parcelles pour nos campagnes de mesures.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Contexte général	6
1.2	Problématique	6
1.3	Objectif du projet	6
1.4	Structure du rapport	6
2	État de l'art	8
2.1	La photogrammétrie aérienne en foresterie	8
2.2	Drones en foresterie : état des lieux	8
2.3	Drones légers (<250g) : avantages et limitations	8
2.3.1	Avantages réglementaires	8
2.3.2	Capacités techniques	9
2.3.3	Limitations	9
2.4	Indices de végétation et analyse de canopée	9
2.4.1	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	9
2.4.2	Indices RGB alternatifs	9
2.5	Logiciels de traitement photogrammétrique	9
2.6	Synthèse et positionnement du projet	9
3	Matériel et méthodes	11
3.1	Matériel utilisé	11
3.1.1	Drone : DJI Mini 3 Pro	11
3.1.2	Caméra et caractéristiques optiques	11
3.1.3	Matériel complémentaire	12
3.2	Logiciels utilisés	12
3.2.1	Planification de mission	12
3.2.2	Traitement photogrammétrique	12
3.2.3	Analyse et SIG	12
3.3	Site d'étude	12
3.3.1	Localisation	12
3.3.2	Caractéristiques du peuplement	13
3.4	Approche méthodologique générale	13
4	Protocole de vol et acquisition des données	15
4.1	Conception du protocole de vol	15
4.1.1	Calcul du champ de vision (FOV)	15
4.1.2	Calcul de la résolution au sol (GSD)	15
4.1.3	Détermination du recouvrement	15
4.2	Paramètres de vol retenus	16
4.3	Planification de la mission	16
4.4	Procédure d'acquisition	17
4.4.1	Checklist pré-vol	17

Table des figures

1	Principe de la photogrammétrie par drone	8
2	Drone DJI Mini 3 Pro utilisé pour le projet	11
3	Localisation du site d'étude	13
4	Plan de vol de la mission	16

Liste des tableaux

1	Applications des drones en foresterie	8
2	Comparatif des logiciels de traitement	9
3	Spécifications du DJI Mini 3 Pro	11
4	Caractéristiques de la caméra	11
5	Paramètres de vol retenus	16

1 Introduction

1.1 Contexte général

La gestion forestière moderne nécessite une connaissance précise des peuplements pour optimiser leur valorisation économique tout en préservant l'équilibre écologique. La phrase « *Le meilleur parc à grumes est la forêt* » résume cette philosophie : il est plus efficace de caractériser les arbres sur pied que d'attendre leur abattage.

Dans ce contexte, SAVEWOOD a développé une application iOS innovante qui utilise le capteur LIDAR des iPhone Pro pour qualifier individuellement les arbres du sous-étage forestier. L'application permet de mesurer :

- Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP)
- La hauteur totale
- Le volume de bois
- La qualité (Q1, Q2, Q3)
- L'écartement entre arbres

1.2 Problématique

Malgré ses performances au niveau du sous-étage, l'application SAVEWOOD se heurte à une limitation majeure : **l'identification des zones d'intérêt depuis le sol est difficile**, car la canopée masque la vue d'ensemble de la parcelle.

Les utilisateurs doivent actuellement parcourir l'intégralité d'une parcelle pour identifier les zones les plus prometteuses, ce qui :

- Augmente considérablement le temps de travail
- Réduit l'efficacité des relevés
- Peut conduire à négliger certaines zones

1.3 Objectif du projet

Ce TER vise à développer une méthode de cartographie de la canopée par drone léger (<250g) pour :

1. Obtenir une vue d'ensemble de la parcelle forestière
2. Identifier automatiquement ou semi-automatiquement les zones d'intérêt
3. Guider les utilisateurs de SAVEWOOD vers ces zones pour optimiser leurs relevés au sol

Le choix d'un drone léger (<250g) est stratégique car il permet de s'affranchir d'une réglementation complexe tout en offrant des capacités de cartographie suffisantes.

1.4 Structure du rapport

Ce rapport s'organise comme suit :

- **Chapitre 2** : État de l'art sur la cartographie forestière par drone
- **Chapitre 3** : Matériel et méthodes utilisés
- **Chapitre 4** : Protocole de vol et acquisition des données
- **Chapitre 5** : Traitement et analyse des données
- **Chapitre 6** : Résultats et validation
- **Chapitre 7** : Discussion et perspectives

— **Chapitre 8 : Conclusion**

2 État de l'art

2.1 La photogrammétrie aérienne en foresterie

La photogrammétrie est une technique permettant de reconstruire la géométrie 3D d'une scène à partir d'images 2D prises sous différents angles. En foresterie, elle permet de :

- Générer des modèles numériques de surface (MNS)
- Créer des orthophotos géoréférencées
- Estimer la hauteur des arbres
- Calculer des indices de végétation

Principe : La technique repose sur l'algorithme Structure from Motion (SfM) qui identifie des points homologues entre plusieurs images pour reconstruire la scène en 3D.

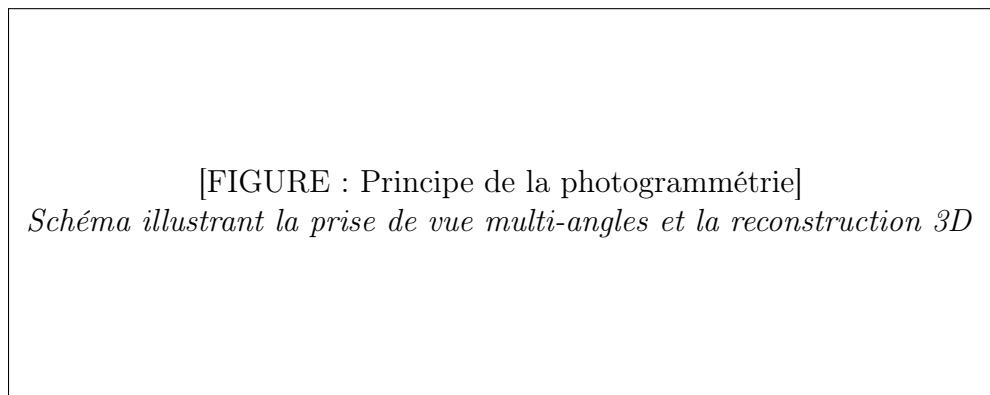


FIGURE 1 – Principe de la photogrammétrie par drone

2.2 Drones en foresterie : état des lieux

Les drones sont de plus en plus utilisés en foresterie pour diverses applications :

Application	Utilisation
Inventaire forestier	Comptage d'arbres, estimation de densité
Santé des peuplements	Détection de stress hydrique, maladies
Surveillance	Détection d'incendies, contrôle d'exploitation
Cartographie	Orthophotos, MNT, MNS
Planification	Optimisation des chemins d'exploitation

TABLE 1 – Applications des drones en foresterie

2.3 Drones légers (<250g) : avantages et limitations

2.3.1 Avantages réglementaires

En Europe, les drones de moins de 250g bénéficient d'une réglementation allégée :

- Pas de déclaration obligatoire dans certains cas
- Formation simplifiée
- Moins de restrictions de vol

2.3.2 Capacités techniques

Les drones légers modernes, comme le DJI Mini 3/4 Pro, offrent :

- Capteurs photo haute résolution (48 MP)
- Stabilisation 3 axes
- GPS et vol autonome
- Autonomie suffisante (30-40 minutes)

2.3.3 Limitations

- Sensibilité au vent
- Absence de capteur LIDAR embarqué
- Portée réduite du signal
- Charge utile limitée (pas de capteurs supplémentaires)

2.4 Indices de végétation et analyse de canopée

2.4.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'indice NDVI permet d'évaluer la vigueur de la végétation :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Cependant, les caméras RGB classiques ne capturent pas le proche infrarouge (NIR), limitant le calcul du NDVI traditionnel.

2.4.2 Indices RGB alternatifs

Plusieurs indices peuvent être calculés à partir d'images RGB :

- **ExG (Excess Green)** : $ExG = 2G - R - B$
- **VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)** : $VARI = \frac{G-R}{G+R-B}$
- **GLI (Green Leaf Index)** : $GLI = \frac{2G-R-B}{2G+R+B}$

2.5 Logiciels de traitement photogrammétrique

Logiciel	Caractéristiques	Type	Coût
Pix4D	Solution professionnelle complète	Commercial	€€€
Agisoft Metashape	Haute précision, très utilisé	Commercial	€€
WebODM	Open source, basé sur OpenDroneMap	Open source	Gratuit
DroneDeploy	Cloud, interface simple	SaaS	€
QGIS	SIG open source pour post-traitement	Open source	Gratuit

TABLE 2 – Comparatif des logiciels de traitement

2.6 Synthèse et positionnement du projet

Notre projet se positionne à l'intersection de plusieurs domaines :

- Utilisation de drones légers pour la flexibilité réglementaire
- Photogrammétrie RGB pour la cartographie de canopée

- Analyse d'images pour l'identification de zones d'intérêt
- Intégration avec une application mobile (SAVEWOOD)

L'originalité réside dans l'approche intégrée : le drone n'est pas une fin en soi, mais un outil de pré-localisation pour optimiser l'utilisation du LIDAR au sol.

3 Matériel et méthodes

3.1 Matériel utilisé

3.1.1 Drone : DJI Mini 3 Pro

Caractéristique	Valeur
Poids	249 g (avec batterie standard)
Capteur photo	1/1.3" CMOS, 48 MP
Résolution vidéo	4K60 / 4K30 HDR
Stabilisation	Nacelle 3 axes
Autonomie	Environ 34 minutes
Vitesse max	16 m/s (mode Sport)
Résistance au vent	10.7 m/s (niveau 5)
GPS	GPS + GLONASS + Galileo

TABLE 3 – Spécifications du DJI Mini 3 Pro

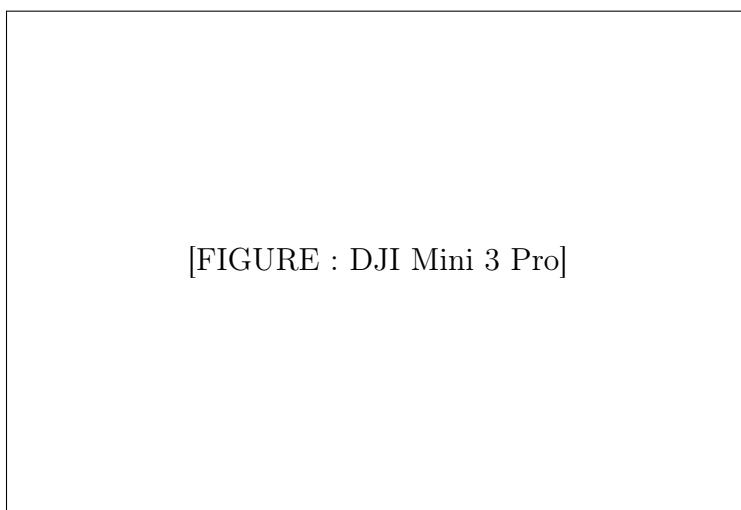


FIGURE 2 – Drone DJI Mini 3 Pro utilisé pour le projet

3.1.2 Caméra et caractéristiques optiques

Paramètre	Valeur
Taille du capteur	1/1.3" (9.7 × 7.3 mm)
Largeur capteur	6.17 mm
Hauteur capteur	4.55 mm
Focale	4.5 mm (équivalent 24 mm)
Ouverture	f/1.7
Résolution maximale	8064 × 6048 pixels
Format	JPEG / DNG (RAW)

TABLE 4 – Caractéristiques de la caméra

3.1.3 Matériel complémentaire

- **Batteries** : 3 batteries intelligentes DJI (autonomie totale ~ 100 min)
- **Télécommande** : DJI RC (écran intégré 5.5", 700 nits)
- **Cartes SD** : SanDisk Extreme Pro 128 GB (lecture 170 MB/s)
- **Mallette de transport** : Fly More Combo
- **Hélices de rechange** : 2 jeux

3.2 Logiciels utilisés

3.2.1 Planification de mission

- **Litchi** : Application tierce pour la planification de missions Waypoints complexes
- **DJI Fly** : Application officielle DJI (missions simples)
- **Google Earth Pro** : Pré-visualisation des sites

3.2.2 Traitement photogrammétrique

- **WebODM / OpenDroneMap** : Traitement open source des images
- **Pix4D Mapper** (version d'essai) : Comparaison et validation

3.2.3 Analyse et SIG

- **QGIS 3.x** : Analyse spatiale, calcul d'indices, production de cartes
- **Python 3.x** : Scripts personnalisés (OpenCV, NumPy, GDAL)
- **CloudCompare** : Analyse de nuages de points 3D

3.3 Site d'étude

3.3.1 Localisation

Le site principal d'étude se situe à proximité de l'ENSEIRB-MATMECA, Bordeaux-Talence :

- **Coordonnées approximatives** : 44.8067° N, 0.6048° W
- **Altitude** : ~ 50 m
- **Surface** : ~ 8.5 hectares

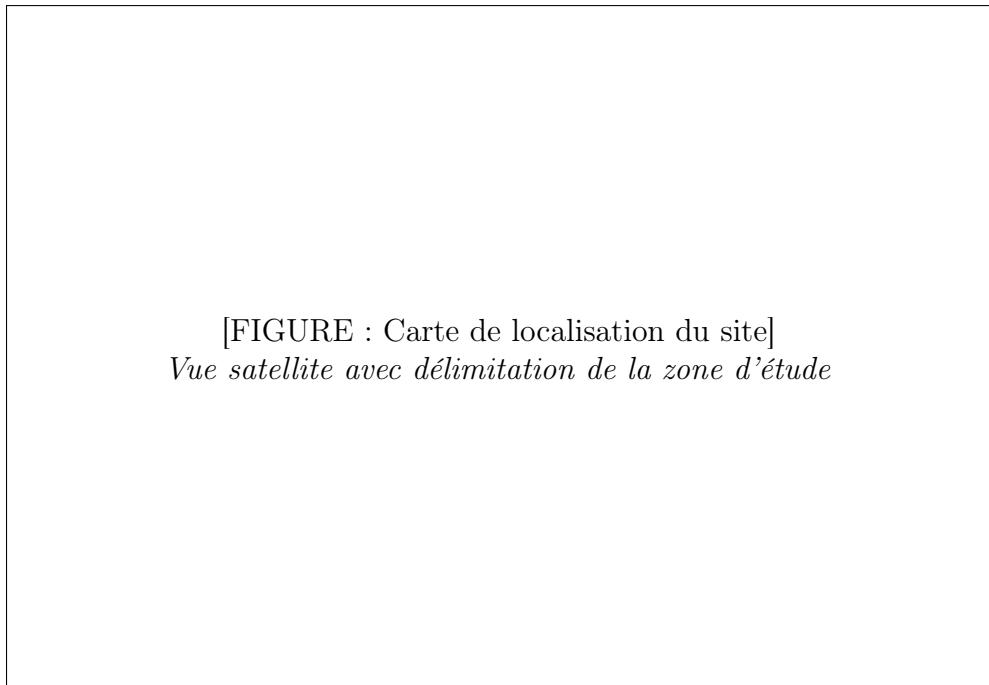


FIGURE 3 – Localisation du site d'étude

3.3.2 Caractéristiques du peuplement

- **Essence principale** : Pin maritime (*Pinus pinaster*)
- **Âge moyen** : 30-40 ans
- **Densité** : Écartement moyen de 6 m
- **Hauteur moyenne** : 15-20 m
- **Sous-étage** : Modéré, présence de fougères et arbustes

3.4 Approche méthodologique générale

Notre approche s'articule en 5 phases :

1. Phase 1 : Conception du protocole

- Définition des paramètres de vol optimaux
- Calculs théoriques (FOV, recouvrement, nombre d'images)
- Planification de la mission

2. Phase 2 : Acquisition terrain

- Vérifications pré-vol
- Réalisation des vols
- Collecte de points de contrôle au sol (GCP)

3. Phase 3 : Traitement photogrammétrique

- Alignement des images
- Génération du nuage de points dense
- Production d'orthophoto et de MNS

4. Phase 4 : Analyse et identification des zones

- Calcul d'indices de végétation
- Segmentation de la canopée
- Identification des zones d'intérêt

5. Phase 5 : Validation et intégration

- Validation terrain avec SAVEWOOD
- Évaluation de la précision
- Proposition d'intégration

4 Protocole de vol et acquisition des données

4.1 Conception du protocole de vol

4.1.1 Calcul du champ de vision (FOV)

Le FOV dépend de l'altitude de vol et des caractéristiques de la caméra.

Formules utilisées :

$$\text{FOV}_{\text{largeur}} = 2 \times h \times \frac{w_{\text{capteur}}}{2 \times f} \quad (2)$$

$$\text{FOV}_{\text{hauteur}} = 2 \times h \times \frac{h_{\text{capteur}}}{2 \times f} \quad (3)$$

Avec :

- h = altitude de vol (m)
- w_{capteur} = largeur du capteur (6.17 mm)
- h_{capteur} = hauteur du capteur (4.55 mm)
- f = focale (4.5 mm)

Pour une altitude de 50 m :

$$\text{FOV}_{\text{largeur}} = 2 \times 50 \times \frac{6.17}{2 \times 4.5} = 68.5 \text{ m} \quad (4)$$

$$\text{FOV}_{\text{hauteur}} = 2 \times 50 \times \frac{4.55}{2 \times 4.5} = 50.6 \text{ m} \quad (5)$$

4.1.2 Calcul de la résolution au sol (GSD)

La résolution au sol (Ground Sample Distance) détermine la taille d'un pixel projeté au sol :

$$GSD = \frac{h \times w_{\text{pixel}}}{f} \quad (6)$$

Avec $w_{\text{pixel}} = \frac{6.17}{8064} = 0.000765 \text{ mm}$

$$GSD = \frac{50000 \times 0.000765}{4.5} = 8.5 \text{ mm/pixel} \quad (7)$$

4.1.3 Détermination du recouvrement

Pour la photogrammétrie, un recouvrement élevé est essentiel :

- **Recouvrement frontal** : 80% (entre images consécutives)
- **Recouvrement latéral** : 80% (entre lignes de vol)

Espacement calculé :

$$\Delta x = \text{FOV}_{\text{largeur}} \times (1 - R_{\text{frontal}}) = 68.5 \times 0.20 = 13.7 \text{ m} \quad (8)$$

$$\Delta y = \text{FOV}_{\text{hauteur}} \times (1 - R_{\text{latéral}}) = 50.6 \times 0.20 = 10.1 \text{ m} \quad (9)$$

4.2 Paramètres de vol retenus

Paramètre	Justification	Valeur
Altitude (AGL)	Compromis résolution / couverture	50 m
Vitesse	Stabilité et qualité d'image	2.5 m/s
Angle nacelle	Vue nadir pour cartographie	-90°
Recouvrement frontal	Photogrammétrie robuste	80%
Recouvrement latéral	Photogrammétrie robuste	80%
Pattern de vol	Efficacité	Boustrophédon
Mode déclenchement	Espacement régulier	Distance (13.7 m)
Format photo	Données brutes	DNG + JPEG

TABLE 5 – Paramètres de vol retenus

4.3 Planification de la mission

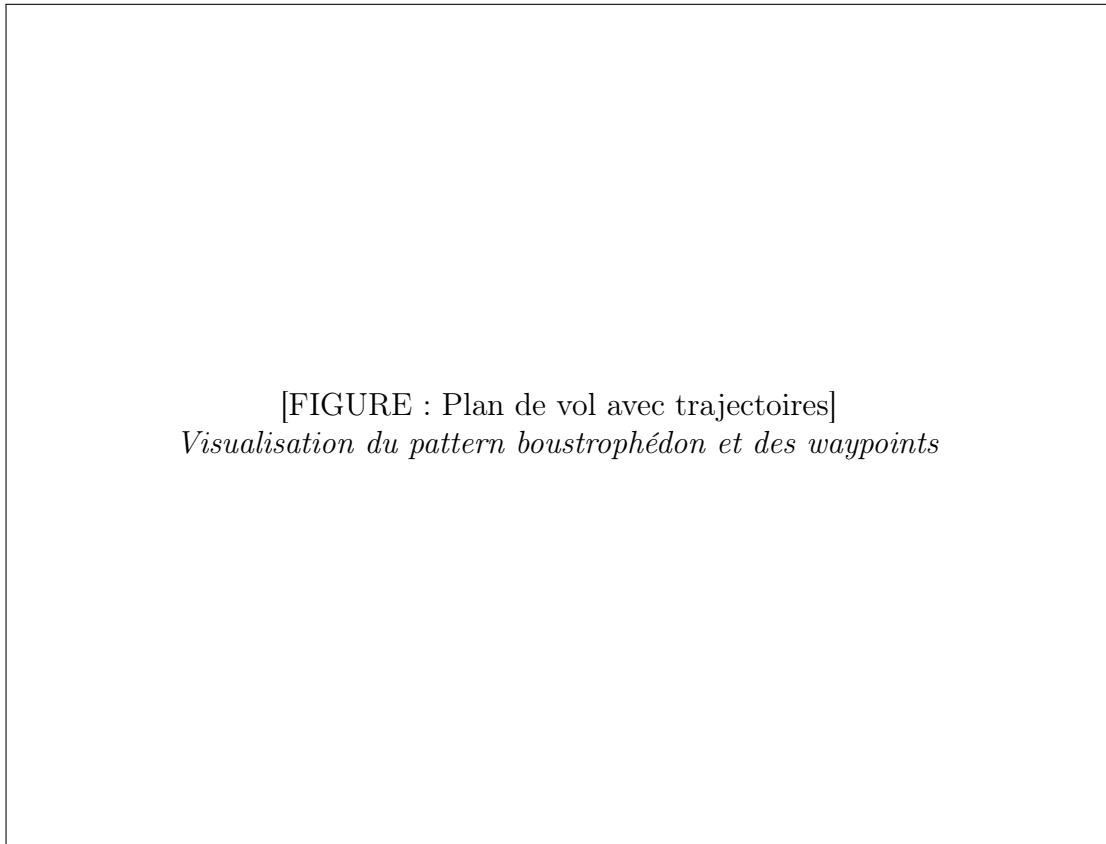


FIGURE 4 – Plan de vol de la mission

Statistiques de la mission :

- Nombre de waypoints : 156
- Nombre de passes : 12
- Distance totale : 2.8 km
- Temps de vol estimé : 18 min 40 s
- Nombre de photos : ~185
- Surface couverte : 8.5 ha

4.4 Procédure d'acquisition

4.4.1 Checklist pré-vol