

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

ÉCHANTILLONNAGE D'ARBRES À L'AIDE D'UN DRONE

Mémoire de maîtrise

Guillaume CHARRON

Sherbrooke (Québec) Canada
27 février 2020

MEMBRES DU JURY

X

Alexis Lussier Desbiens
Directeur

X

David Rancourt
Évaluateur

X

Alexandre Girard
Évaluateur

RÉSUMÉ

L'échantillonnage de la canopée des arbres est utile pour plusieurs disciplines : foresterie de précision, conservation de la biodiversité, étude des changements climatiques, analyse génétique, entomologie, etc. En effet, les nouvelles pousses foliaires contiennent la composition minérale reliée à la croissance de l'arbre durant l'année précédente. L'information fournie par ces échantillons est donc précieuse. Toutefois, leur accessibilité limitée est un problème majeur qui freine les applications pouvant bénéficier de ces informations. L'accès aux branches situées à plus de 10 mètres de hauteur est long, coûteux et parfois impossible. Dans certaines situations, la topographie ne permet tout simplement pas l'accès à l'échantillon (canyons, cours d'eau, etc.). Les techniques actuelles ont tous des limitations, soit leur manque de portée, leur complexité d'utilisation et leurs risques humains. C'est pour cette raison que le drone DeLeaves a été conçu. Sa première version a démontré que le concept de drone échantillonneur est viable. Cette nouvelle technologie a permis jusqu'à présent de récolter plus de 250 échantillons et été testée avec succès sur plus de 20 espèces d'arbres, feuillus et conifères, présents au Canada et au Vietnam. À la suite de son utilisation dans différents contextes réels d'échantillonnage, des opportunités d'améliorations ont été identifiées. Parmi celles-ci, l'oscillation de l'outil suspendu sous le drone augmente la complexité de la manœuvre et affecte le temps requis pour effectuer un échantillonnage. En effet, il peut être complexe de positionner l'ouverture du système de coupe autour de la branche sélectionnée alors que l'outil oscille sous le drone. L'implémentation préliminaire d'un système actif de stabilisation par propulseurs est démontrée ainsi que sa viabilité pour ce genre d'application d'outil aéroporté.

Mots clés : échantillonnage, UAV, drone, conservation, foresterie, stabilisation active.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.2 Question de recherche	4
1.3 Objectifs du projet de recherche	5
1.4 Contributions générales.....	6
1.5 Plan du mémoire	6
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
2.1 Les drones échantillonneurs.....	7
2.2 Stabilisation d'une charge suspendue sur un véhicule aérien	13
2.2.1 Stabilisation de la plateforme de vol avec retour d'information sur la charge	14
2.2.2 Stabilisation de la charge avec des actionneurs agissant sur la charge	15
3. ARTICLE.....	17
3.1 Avant-propos.....	17
3.2 Introduction.....	20
3.3 Requirements.....	23
3.4 Existing tree sampling UAVs	25
3.5 System Design.....	28
3.5.1 Cutting mechanism.....	28
3.5.2 Laterally vs downward-reaching sampler configuration	29
3.5.3 Rod length	30
3.6 Prototype Review	31
3.6.1 Components and technical specifications.....	32
3.6.2 Operation sequence.....	34
3.7 Results.....	35
3.7.1 Vietnam Expeditions with the UBC Botanical Garden	36
3.7.2 Assessment of fertilization effects on trees	37
3.7.3 Quantify intra-individual foliar spectral and functional trait variation with CABO.....	38
3.7.4 Ecosystems monitoring with NEON	39
3.8 Conclusion and future work	41
3.9 Acknowledgements.....	42
4. SYSTÈME DE STABILISATION.....	43

4.1 Preuve de concept préliminaire.....	44
4.1.1 Stratégie de contrôle.....	45
4.1.2 Montage expérimental et résultats.....	46
4.2 Modélisation du système.....	50
4.2.1 Système non linéaire.....	52
4.2.2 Linéarisation du système.....	54
4.3 Contrôleur linéaire quadratique (LQR).....	55
4.3.1 Contrôleur LQR par retour d'état.....	56
4.3.2 Ajout d'un observateur LQE.....	59
4.4 Évaluation de la performance du contrôleur LQR.....	61
4.4.1 Analyse de robustesse.....	61
4.4.2 Analyse du positionnement du point de pivot.....	63
4.4.3 Implémentation des résultats.....	65
5. CONCLUSION.....	66
6. LISTE DES RÉFÉRENCES.....	68
ANNEXE A – MODÈLE SIMULINK DU SYSTÈME.....	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : L’outil DeLeaves en action lors de l’échantillonnage d’un sapin Douglas	2
Figure 1.2 : Différentes techniques d’échantillonnage.....	2
Figure 2.1 : Premier concept développé par Jamie Hyneman (2015) [14].....	8
Figure 2.2 : Deuxième concept développé par Jamie Hyneman (2017) [15].....	8
Figure 2.3 : Le Sampler Drone for Forestry Research, Université Berkeley (2015) [16].....	9
Figure 2.4 : L’outil du UCSB sampling drone en vue rapprochée et en action (2018) [17]	10
Figure 2.5 : Prototype du projet Lucanus installé sur un drone Sky Hero Spyder X8 (2016) [18]	11
Figure 2.6 : Le FTTS avec un plan détaillé de son mécanisme de coupe (2018) [20]	12
Figure 2.7 : Le <i>Load Stability System</i> (LSS) montré dans un scénario de sauvetage.....	15
Figure 2.8 : Le concept de drone pour livraisons breveté par Amazon.....	16
Figure 3.1 : A UAV equipped with the DeLeaves tool	22
Figure 3.2 : Tree sampling techniques.	23
Figure 3.3 : Tree sampling UAVs from around the world.	26
Figure 3.4 : Laterally vs downward-reaching sampler positioning strategies,.....	30
Figure 3.5 : Takeoff sequence time lapse.....	31
Figure 3.6 : Prototype timeline.....	31
Figure 3.7 : (a) DeLeaves prototype overview.....	33
Figure 3.8 : The control station setup (Left) and an overview of a typical sampling operation (Right).	35
Figure 3.9 : Vietnam expedition in 2018.....	36
Figure 3.10 : The 40 maple foliage samples collected in early August 2018.....	37
Figure 3.11 : Comparison of representative sampling locations used with CABO.....	39
Figure 3.12 : View from the DeLeaves tool camera.....	40
Figure 3.13 : Recorded trajectories and statistics for 3 sampling flights	40
Figure 4.1 : Le drone DJI M200.....	43
Figure 4.2 : Montage expérimental détaillé.....	47
Figure 4.3 : Illustration des essais en vol à l’extérieur	47
Figure 4.4 : Position angulaire de la perche par rapport à la verticale durant un vol stationnaire	48
Figure 4.5 : Position angulaire de la perche lors d’un arrêt suivant un déplacement à 0.5 m/s.....	49
Figure 4.6 : Position angulaire de la perche lors d’un arrêt suivant un déplacement à 1 m/s.....	50
Figure 4.7 : Position angulaire de la perche lors d’un arrêt suivant un déplacement à 2 m/s.....	50
Figure 4.8 : Schématisation du système	52
Figure 4.9 : Structure du contrôleur par retour d’état.....	56
Figure 4.10 : Performance du retour d’état LQR sans stabilisation par propulseur.	58
Figure 4.11: Performance du retour d’état LQR avec stabilisation par propulseur.....	59
Figure 4.12 : Système en retour de sortie avec l’observateur LQE avec la stabilisation.....	61
Figure 4.13 : Angle du pendule avec une variation paramétrique.....	62
Figure 4.14 Analyse des objectifs initiaux sur le contrôleur LQR	63
Figure 4.15 : Angle du pendule avec une variation du décalage du point de pivot.....	64
Figure 4.16 : Adapteur pour l’installation de l’outil DeLeaves sur le DJI M200.....	64
Figure A.0.1 : Modèle Simulink du système.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison des drones d'échantillonnage existants	12
Tableau 3.1 : Summary of features of the various tree samplers.....	27
Tableau 3.2 : Technical specifications	32
Tableau 4.1 : Paramètres du système modélisé.....	52

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Les véhicules aériens sans pilote (UAV) sont susceptibles de jouer un rôle majeur dans la conservation de la biodiversité de la flore ainsi que dans la gestion des forêts. Par exemple, en agriculture et en foresterie, il est maintenant possible d'utiliser des UAVs munis de caméras multispectrales pour estimer le niveau d'azote dans les cultures [1]. De plus, avec les logiciels de cartographie et les caméras haute définition, il est maintenant possible d'établir une reproduction 3D d'une forêt ou même de la paroi d'une falaise afin d'identifier les populations d'espèces d'arbres et de plantes qui y vivent, leur nombre ainsi que leur distribution [2]. L'usage de plus en plus répandu des UAVs dans les secteurs de la foresterie et de l'agriculture simplifie son intégration dans les opérations actuelles et permet de révolutionner les techniques utilisées qui sont parfois désuètes ou limitées [3]. La grande majorité des applications actuellement utilisées consistent à faire de l'imagerie aérienne avec des caméras pouvant capter différents spectres de la lumière. Cela a pour but d'établir des modèles et ainsi poser des diagnostics utiles sur l'état de la végétation. Toutefois, grâce à l'évolution et à la miniaturisation des technologies utilisées dans le domaine des UAV, il est maintenant possible d'imaginer des applications où les UAV interagissent physiquement avec l'environnement pour effectuer des tâches. C'est dans cette optique que l'outil aéroporté DeLeaves a été conçu dans le cadre de ce projet pour récolter des échantillons foliaires de la cime des arbres. La dernière version de l'outil DeLeaves installée sur un Tarot 680 Pro est présentée en action lors de l'échantillonnage d'un sapin Douglas en Colombie-Britannique à la Figure 1.1.

Cette nouvelle méthode développée à l'Université de Sherbrooke répond à un problème qui persiste depuis toujours : comment accéder aux branches situées au sommet des arbres? Les techniques actuellement utilisées présentent toutes des inconvénients. Ces méthodes, illustrées à la Figure 1.2, incluent les perches télescopiques (limitées à 10 mètres de portée en hauteur, utilisation exigeante et non ergonomique causant des blessures), les fusils à pompe (dangereux et maintenant illégal sur la majorité des territoires) [4], les grimpeurs (coûteux, physiquement exigeant, limité aux branches assez solides pour supporter le poids d'un humain) [5], les grues (coûteux, peu mobile, accès limité) [6], l'abattage d'arbre (complexe, impossible dans plusieurs

projets de suivi), l'hélicoptère (coûteux, complexe et dangereux) [4] ou encore les ballons dirigeables munis de plateformes gonflables [7].



Figure 1.1 : L'outil DeLeaves en action lors de l'échantillonnage d'un sapin Douglas



Figure 1.2 : Différentes techniques d'échantillonnage

Un outil d'échantillonnage aéroporté aurait une très grande valeur puisqu'il pourrait servir pour la foresterie de précision, la conservation de la biodiversité, l'étude des changements climatiques, l'analyse génétique ou encore l'entomologie. Ainsi, les applications possibles sont nombreuses et variées. Par exemple, DeLeaves peut être utilisé pour optimiser la productivité d'espèces d'arbres à croissance rapide (ex. : eucalyptus, peuplier hybride). En effet, ces plantations peuvent bénéficier de fertilisations pour accroître leur croissance jusqu'à 200% [8]. Pour tirer le maximum de bénéfices, l'ajustement de cette fertilisation nécessite l'analyse foliaire de la cime des arbres. De la même façon, l'analyse foliaire provenant de la canopée est utile pour calibrer les modèles basés sur l'imagerie aérienne accomplis à l'aide de UAVs, d'avions ou même de satellite (couramment référé au terme anglais *ground truthing*). Une autre sphère d'application est celle de l'analyse génétique. En effet, les échantillons peuvent servir à déterminer les spécifications génétiques des individus ayant des avantages biologiques (résistance aux maladies et insectes, croissance, densité du bois et rectitude du tronc). En général, pour qu'une telle étude soit possible, l'échantillonnage doit se faire sur de grandes populations d'arbres (environ 1000) [9]. Par la suite, la reproduction de cette espèce est possible afin d'obtenir des individus qui possèdent les propriétés avantageuses. Cela requiert, encore une fois, des échantillons provenant des arbres sélectionnés.

Du point de vue des biologistes, ceux-ci doivent parfois atteindre des zones très hasardeuses pour effectuer la collecte d'échantillons de plantes en voie de disparition dans le but d'assurer leur conservation. Depuis plus de quatre décennies, des botanistes de terrain ont risqué leur vie en effectuant des descentes en rappel, suspendus parfois à plus de 300 mètres, pour trouver des espèces de plantes ayant survécu grâce à leur emplacement éloigné des espèces invasives. Ils ont parfois recours à des hélicoptères en utilisant la méthode du « short line » pour atteindre ces zones, ce qui est normalement coûteux, complexe et risqué. Parfois, aucun moyen existant ne permet d'aller récolter du matériel végétal des espèces découvertes, comme c'est le cas d'une population récemment trouvée une falaise d'Hawaï : « *The bad news is this population (Laukahi) is spread across a vertical cliff face that is completely inaccessible to humans, at least with current technologies* » [10]. Le drone échantillonneur DeLeaves pourrait même éventuellement permettre de faire l'échantillonnage de plantes situées sur les falaises. L'écosystème sur les archipels d'Hawaï compte actuellement plus d'une centaine d'espèces en

danger d'extinction (avec moins de 50 représentants) qui pourraient éventuellement bénéficier de notre outil.

1.2 Question de recherche

Nos travaux ont décelé une panoplie d'usages possibles pour un nouvel outil d'échantillonnage aéroporté. Toutefois, la présence de plusieurs usagers potentiels de cette nouvelle technologie amène des défis reliés à la simplicité d'utilisation et à la polyvalence de l'outil. Afin de rendre l'outil accessible et de répondre à la majorité des besoins actuellement identifiés, la question de recherche suivante ainsi que les objectifs principaux et spécifiques ont été définis.

Est-il possible de concevoir un drone échantillonneur pouvant récolter des branches à la cime de diverses espèces d'arbres de manière rapide et robuste?

Dans cette question, il est important de définir quelques termes employés. Tout d'abord, les caractéristiques des branches visées doivent être établies. Grâce aux requis de l'industrie forestière et à une analyse de faisabilité de charge utile des drones actuels, le diamètre des branches récoltées devra être situé entre 10 mm et 25 mm et pourra avoir une masse allant jusqu'à 400 g. Enfin, la branche pourra avoir une orientation horizontale ou verticale et provenir d'un conifère ou d'un arbre feuillu, ce qui permet de couvrir la quasi-totalité des espèces d'arbres en provenance d'Amérique du Nord et d'Europe.

La rapidité de l'opération est jugée en fonction des autres techniques actuellement utilisées pour la récolte d'échantillons au sommet des arbres. La plus utilisée et la plus rapide est la perche, malgré sa limitation en hauteur et l'effort physique pour la manipuler. Pour échantillonner un arbre de 10 mètres de hauteur et situé à 100 mètres en forêt naturelle, cela prend au minimum 12 minutes, soit 4 minutes pour se rendre à l'arbre voulu, 1 minute de déploiement, 2 minutes de collecte, 1 minute de rangement, 4 minutes pour le retour. La technique d'échantillonnage par drone sera donc jugée rapide si elle s'effectue en moyenne en moins de 12 minutes. Il est intéressant de préciser que l'usage de la perche ne permet toutefois pas d'atteindre les branches situées à plus de 10 mètres de hauteur, contrairement au drone. Les autres techniques, comme le line-launcher, les grimpeurs et les fusils à pompe, prennent en moyenne plus de temps que l'usage de la perche.

La robustesse de la technique est évaluée selon le nombre de récoltes qui sera fait tout au long du projet. Des campagnes d'échantillonnage typiques peuvent nécessiter de 100 à 1000 échantillons afin d'effectuer des statistiques sur des populations représentatives. Puisque la récolte d'un seul échantillon à l'aide d'un drone serait impressionnante en soi, mais pourrait relever de la chance, il est jugé qu'un objectif d'au moins 100 récoltes réussies démontrerait la robustesse de la technique. Enfin, l'originalité de la question provient du fait qu'aucun système de récolte de branche par drone ne présente ces caractéristiques actuellement et que les outils existants sont encore trop complexes pour un usage à grande échelle.

1.3 Objectifs du projet de recherche

Ainsi, afin de bien répondre à la question de recherche, il faudra répondre aux quatre **objectifs principaux** :

1. Le système d'échantillonnage devra être capable de récolter des branches ayant une tige de 10-25 mm de diamètre et une masse pouvant aller jusqu'à 400 g.
2. Les échantillons peuvent être récoltés à une distance de 100 m du point de décollage.
3. Le temps moyen d'échantillonnage, du décollage à l'atterrissage, devra être inférieur à 12 minutes.
4. Au moins 100 échantillons sur plus de 10 espèces d'arbres, feuillus et conifères présentes au Canada devront être échantillonnés avec succès avec l'outil d'échantillonnage.

Au cours du projet, des expérimentations ont permis de conclure que l'oscillation de l'outil suspendu sous le drone complexifie l'alignement de l'ouverture de la tête d'échantillonnage avec la branche. Afin de rendre l'approche d'une branche plus intuitive, une nouvelle technique de stabilisation par propulseur sera explorée. Ainsi, le mouvement de balancier de l'outil devra être atténué avec un ou plusieurs propulseur(s). Un cinquième objectif principal est ainsi ajouté, soit de réduire considérablement l'oscillation de l'outil sous le drone.

1.4 Contributions générales

L'imagerie est la fonction utile la plus connue et répandue pour les UAV. Très peu de plateformes de drone peuvent échantillonner leur environnement, car ces plateformes ne sont typiquement pas conçues pour interagir en contact direct avec ses alentours. Actuellement, aucun système de récolte de branche par drone n'a démontré de la répétabilité ni de la rapidité d'opération sur une variété d'espèces d'arbres. Les outils existants sont encore trop complexes pour un usage à grande échelle en conditions réelles comme ce projet vise à démontrer. Lors de ma maîtrise, j'ai conçu une première version fonctionnelle d'échantillonneur qui s'attache sur un DJI F450. Par la suite, j'ai effectué des essais dans les plantations d'arbres de la compagnie Domtar sur des érables à sucre et des peupliers avec cette première version. Cela m'a permis de redéfinir les requis de l'outil afin de concevoir une deuxième version plus robuste et adaptée à un drone commercial du type DJI M200. Cette deuxième version m'a permis de mener des campagnes d'échantillonnage en Colombie-Britannique avec la compagnie forestière Weyerhaeuser et en Oregon avec le National Ecological Observatory Network. Enfin, j'ai aussi développé en parallèle un système de stabilisation de l'oscillation de l'outil muni de propulseurs ainsi qu'un modèle dynamique et un simulateur détaillé du système.

1.5 Plan du mémoire

Au cours du présent document, un aperçu de l'état de l'art sera couvert au Chapitre 2. Ensuite, un article publié en collaboration avec un autre étudiant de maîtrise ayant participé au projet, Thomas Robichaud-Courteau, sera présenté au Chapitre 3. Cet article soumis à la Revue des systèmes de véhicules télécommandés (RSVT), explore les requis du projet et la conception de l'outil DeLeaves. Par la suite, la méthode de stabilisation de l'outil par propulseur ainsi que la stratégie de contrôle seront abordées au Chapitre 4. Enfin, la conclusion fera un retour sur les objectifs principaux de la question de recherche, la pertinence de cette nouvelle technologie d'échantillonnage par drone ainsi que les travaux futurs.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

La revue de littérature qui suit fait une analyse en profondeur des systèmes d'échantillonnages par drone qui ont été développés afin de faire ressortir les différences de conception et de fonctionnalités. Il est intéressant de faire ensuite une comparaison des systèmes existants afin de tirer des conclusions sur les points à travailler pour le DeLeaves. Par la suite, une exploration des différentes stratégies et des concepts de stabilisation d'une charge suspendue en vol sera faite.

2.1 Les drones échantillonneurs

Puisque l'échantillonnage de branches est une problématique d'ordre mondiale, plusieurs groupes de recherche à travers le monde ont tenté de trouver des solutions qui permettraient de rendre accessible la canopée des arbres. Dans les cinq dernières années, divers concepts ont vu le jour avec des résultats très variables et ayant été développés dans des contextes souvent différents. En premier lieu, une revue des drones échantillonneurs existants est faite. En deuxième lieu, il est intéressant de se pencher sur les points forts et points faibles des différents concepts et de les comparer.

Tout d'abord, en Amérique du Nord, Jamie Hyneman, célèbre pour son émission Mythbusters, a conçu deux drones (Figure 2.1 et Figure 2.2) ayant pour but de couper des branches d'arbres. Ayant voulu relever un défi et n'étant pas un spécialiste dans les drones, la recherche effectuée pour construire ces modèles était minimale et peu de documentation est disponible, mis à part des vidéos des tests [14,15]. La plateforme de vol utilisée dans les deux cas est un DJI Inspire. Son premier concept est constitué d'une perche d'une longueur de 1 m, suspendue sous le drone sur laquelle une scie rotative est fixée à l'extrémité. Malgré un vol stable, le mécanisme ne comporte aucun moyen de maintenir la branche en place lors de la découpe. La découpe d'une branche est ainsi impossible puisque la perche est repoussée lors d'un contact de la scie avec la branche. De plus, aucun mécanisme pour conserver la branche n'est prévu et la vision est assurée par la caméra déjà disponible sur le drone. La deuxième version du drone opte pour un mécanisme complètement différent. Il s'agit d'une poutre horizontale munie d'un sécateur rigidement fixée sous le drone. Afin d'équilibrer la masse sous le drone et d'actionner le sécateur, un moteur d'une puissance de 900 W est installé à l'autre extrémité. Une transmission de réduction de type vis sans fin permet de

transmettre un maximum de couple au sécateur. Malgré une tige guide pour aligner la branche dans le sécateur, on remarque que l'ouverture du sécateur est petite, ce qui ajoute de la difficulté à aligner une branche dans le mécanisme. De plus, lors d'un contact avec une branche, les forces de contact sont directement transmises en couple sur le drone, risquant de le déstabiliser. Encore une fois, aucun mécanisme de récolte n'est prévu dans cette version qui n'a pas démontré que la découpe d'une branche est possible en vol.



Figure 2.1 : Premier concept développé par Jamie Hyneman (2015) [14]



Figure 2.2 : Deuxième concept développé par Jamie Hyneman (2017) [15]

Le Sampler Drone for Forestry Research (Figure 2.3) de l'Université Berkeley, en Californie, utilise aussi un principe de mécanisme à portée latérale pour récolter des branches. Celui-ci compte sur un système passif de lame pour effectuer l'échantillonnage. Aucun article n'est publié sur celui-ci et seulement des vidéos sont disponibles [16]. Le drone est bâti avec une plateforme DJI Phantom 2. Des gardes ont été installés autour des hélices du drone pour le protéger. Le mécanisme de découpe présente les mêmes désavantages que le deuxième drone développé par Jamie Hyneman. Le drone doit donc coincer une branche dans la lame en forme de V et tirer pour couper celle-ci. Le principe de devoir tirer sur une branche avec une perche fixe sur le drone le rend très vulnérable. De plus, pour effectuer des déplacements, le drone doit s'incliner ce qui fait aussi bouger la position de la pointe de la lame et rend ainsi l'approche difficile. Aucune récolte n'a été démontrée avec ce drone à ce jour.



Figure 2.3 : Le Sampler Drone for Forestry Research, Université Berkeley (2015) [16]

Récemment, l'Université de Santa Barbara en Californie a elle aussi fait son prototype d'échantillonnage de branches [17]. La plateforme utilisée est un 3DR X8+. Un Arduino est implémenté pour gérer la séquence de coupe qui capte les branches horizontales pour les amener dans une scie circulaire ainsi qu'un mécanisme de maintien (Figure 2.4). Les échantillons récoltés sont de petite taille (diamètre inférieur à 10 mm). Les matériaux ont été choisis dans le but d'optimiser la légèreté de l'outil. Une vidéo montre le mécanisme de découpe en fonctionnement, mais aucune découpe en vol n'est montrée.



Figure 2.4 : L'outil du UCSB sampling drone en vue rapprochée et en action (2018) [17]

Ensuite, du côté européen, le *Slovenian forestry Institute* a développé le drone Lucanus (Figure 2.5). Celui-ci utilise un mécanisme suspendu verticalement composé d'un sécateur. Le concept inclut les fonctionnalités suivantes : (1) un module d'attache qui agit comme joint universel et qui permet de relâcher la perche en cas d'urgence; (2) un système de caméra et de laser que permet de détecter si la branche est dans le sécateur pour actionner celui-ci automatiquement; et (3) un mécanisme qui retient la branche en place une fois la coupe terminée. Le sécateur est actionné grâce à un ressort, ce qui permet une seule tentative de coupe. Aucun actionneur ne permet l'ouverture du sécateur, ce qui augmente les risques de coincements dans l'arbre. Le mécanisme à ressort doit être réarmé manuellement au sol par la suite pour effectuer une nouvelle coupe. La perche, qui a une longueur d'environ 1 m, est située sous le centre de masse d'une plateforme Sky Hero Spyder X8. Des guides aident l'alignement dans le sécateur et la géométrie permet de couper des branches horizontales. L'auteur de l'article [18] paru à la suite de la mise en brevet en Europe [19] prétend avoir effectué une tentative d'échantillonnage réussie, sans plus de détails.



Figure 2.5 : Prototype du projet Lucanus installé sur un drone Sky Hero Spyder X8 (2016) [18]

L'institut des sciences agricoles de l'École polytechnique fédérale de Zurich a aussi développé un prototype fonctionnel, le Flying TreeTop Sampler (FTTS). Le mécanisme vertical suspendu sous le drone utilise le principe d'une scie rotative. [20] Le prototype utilisé pour le projet ainsi que son mécanisme de coupe est montré en détail à la Figure 2.6. Toutes les tentatives de récoltes n'ont été faites que sur des branches verticales. La séquence de coupe est entièrement automatisée, mais l'opérateur peut retourner en mode manuel lorsqu'il le souhaite. Un capteur ultrason permet de détecter si une branche est suffisamment près du système pour être coupée. Un contrôleur de vol Tarot ZYX-M est utilisé sur le FTTS. Le mécanisme de coupe du FTTS est situé sous le centre de masse du drone lorsque celui-ci est en vol. Il est constitué de trois tubes en aluminium mesurant 1 m chacun relié par des gaines thermo-rétractables remplies de sable afin de limiter l'effet de pendule du système lors des déplacements. Le prototype peut être opéré à distance puisqu'il est muni de caméras, ce qui augmente son rayon d'action. Le FTTS est aussi muni d'un système permettant de relâcher le système de coupe au cas où un problème surviendrait en vol, ce qui permet de sauver le drone quand le mécanisme de coupe reste pris dans un arbre. Le prototype a récolté 6 branches à une hauteur maximale de 10 m dans un érable de Norvège. La méthode utilisée est de balancer la perche dans l'arbre et un capteur laser détecte la proximité d'une branche pour fermer le système sur celle-ci, ce qui ne permet pas un choix précis de la branche. Le drone utilise un GPS avec une précision limitée comparativement à un GPS RTK. Ceci limite la précision des

mouvements du drone. Le prototype doit être opéré par deux opérateurs expérimentés: un contrôlant le drone et l'autre contrôlant le mécanisme de coupe.

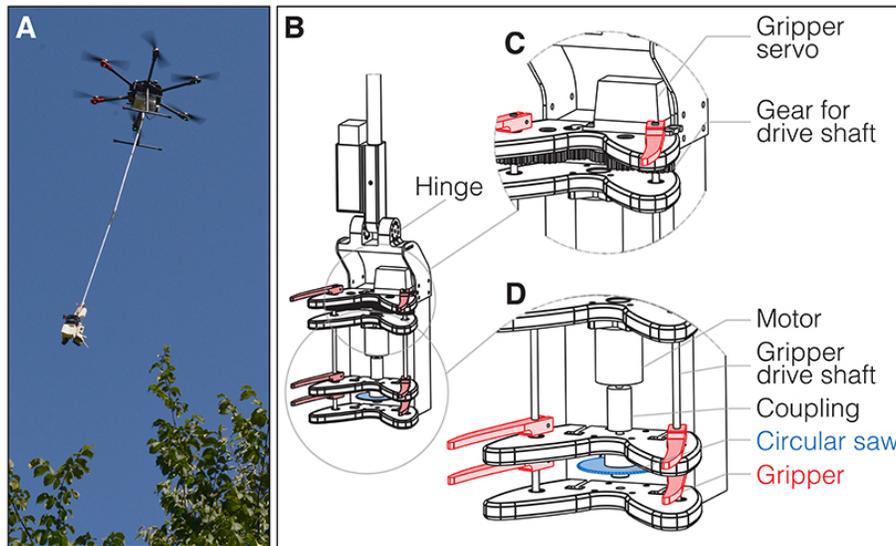


Figure 2.6 : Le FTTS avec un plan détaillé de son mécanisme de coupe (2018) [20]

Le Tableau 2.1 suivant présente un résumé des différents drones permettant de couper ou récolter une branche au sommet d'un arbre. Plusieurs autres prototypes se démarquent avec leur séquence de coupe automatisée, qui apporte une aide à l'opérateur de l'outil. Enfin, tous les prototypes peuvent soit récolter des branches verticales ou horizontales, mais pas les deux.

Tableau 2.1 : Comparaison des drones d'échantillonnage existants

Projet	Outil de coupe	Portée	Orientation des branches	Système de détachement	Collecte assistée	Mécanisme de maintien	Masse	Plateforme de drone
UC Berkeley	Lame	Latérale	Horizontale				N/A	DJI Phantom
Hyneman 1	Scie	Verticale	Verticale				N/A	DJI Inspire
Hyneman 2	Sécateur	Latérale	Verticale				N/A	DJI Inspire
UCSB	Scie	Verticale	Horizontale		✓	✓	0.9 kg	3DR X8+
Lucanus	Sécateur	Verticale	Horizontale	✓	✓	✓	N/A	Sky Hero X8
FTTS	Scie	Verticale	Verticale	✓	✓	✓	1.25 kg	Tarot X6

2.2 Stabilisation d'une charge suspendue sur un véhicule aérien

Selon les conclusions tirées à la section 2.1, un concept devra être utilisé pour pouvoir stabiliser la charge suspendue sous le drone. Parmi les principales solutions proposées dans la littérature pour stabiliser les charges suspendues transportées par hélicoptère, la publication *Stabilization of Externally Slung Helicopter Loads* de Watkins les subdivise en 6 catégories [21]:

1. Optimisation du système de suspension avec une attache permettant différents degrés de liberté supplémentaires ou l'ajout de forces passives;
2. Changements dans la manière de piloter l'hélicoptère pour tirer « avantage » des propriétés que la charge donne à l'aéronef ;
3. Modifier la forme de la charge transportée pour lui donner des propriétés plus aérodynamiques ;
4. Utilisation d'un système actif d'augmentation de la stabilité employant des actionneurs sur les câbles ;
5. Modifier le système d'augmentation de la stabilité de l'hélicoptère pour y inclure un retour d'informations sur les mouvements de la charge ;
6. Utilisation d'un système d'augmentation de stabilité actif utilisant des moments aérodynamiques créés par des dispositifs additionnels (tels que des ailettes).

Il est possible d'éliminer certaines de ces solutions qui ne s'appliquent pas dans la situation du drone DeLeaves. Tout d'abord, le changement de la manière de piloter le UAV (solution 2) sans ajouter d'assistance n'est pas possible puisque le pilote n'est pas à bord de l'engin, mais plutôt au sol avec comme seuls repères la vision de ses caméras. Il serait difficile de demander au pilote de s'adapter pour prendre en compte la charge suspendue, et le but du présent projet de recherche est de rendre plus facile l'opération du système DeLeaves pour le pilote, ce qui va à l'encontre de cette solution.

De plus, les propriétés plus aérodynamiques à la charge (solution 3) ou l'utilisation des moments aérodynamiques créés par des dispositifs additionnels (solution 6) sont des solutions qui peuvent

être rejetées, car la charge sous le drone DeLeaves ne se déplace pas à des vitesses assez importantes pour utiliser la vitesse relative de l'air comme moyen de contrôle.

Enfin, concernant la solution 1 pour l'optimisation du système de suspension, nous sommes limités par la fonctionnalité de l'outil DeLeaves. Nous devons absolument avoir un joint de type universel (2 degrés de liberté, aucune translation et aucun tangage) situé le plus près possible du centre de masse de la plateforme de vol. Autrement, des moments sont induits sur le UAV et on déstabilise le vol du drone. Il y a la possibilité d'ajouter de l'amortissement dans le joint, mais cela est limité par les moments que l'on peut transmettre au drone. Cette solution a été utilisée dans les joints de la tige du drone échantillonneur FTTS vu à la section 2.1. On voit dans les vidéos que l'amortissement est minime et que l'outil se balance tout de même. Il reste les solutions 4 et 5.

2.2.1 Stabilisation de la plateforme de vol avec retour d'information sur la charge

Cette approche est actuellement étudiée par Thomas Robichaud-Courteau dans le cadre de sa maîtrise. La méthode consiste à modifier le contrôleur du drone pour qu'il stabilise une charge suspendue. Il s'agit d'une solution logicielle qui a pour avantage un très faible impact d'ajout de masse (principalement un capteur du mouvement de la charge).

Par le passé, certaines recherches se sont penchées sur le contrôle d'une charge suspendue sous un drone. Palunko et coll. [22, 23] proposent de minimiser l'oscillation du pendule à la fin d'un déplacement en combinant un contrôleur adaptatif avec une génération de trajectoire optimale effectuée à l'aide de la programmation dynamique.

Sreenath et coll. [24, 25] proposent quant à eux un contrôleur géométrique non linéaire pour asservir la position de la masse suspendue. Pour ce faire, les auteurs commencent par le développement des équations de mouvement du drone avec la méthode de Lagrange. Ils développent ensuite les équations d'un contrôleur pour asservir la position de la masse suspendue. Finalement, la trajectoire est déterminée en minimisant une fonction objective. Cette approche a permis l'annulation complète des oscillations et permet d'effectuer des manœuvres agressives lorsque la trajectoire est planifiée à l'avance.

2.2.2 Stabilisation de la charge avec des actionneurs agissant sur la charge

Cette solution nécessite l'ajout de mécanismes, actionneurs et capteurs de position de la charge. Lorsque c'est possible, cette méthode peut s'avérer très efficace et elle ne requiert pas de modifications dans le contrôleur de vol du drone.

Par exemple, une compagnie vient de mettre sur le marché le *Load Stability System* (LSS) [26]. Le système alimenté à l'aide d'une pile est composé de quatre propulseurs, une paire orientée vers l'avant et une paire orientée vers l'arrière. Il se fixe sur le câble de traction au-dessus de la charge, comme il est possible de voir à la Figure 2.7 ci-dessous. Aucun article scientifique n'a été recensé à ce sujet jusqu'à présent. On sait cependant que l'objectif est notamment de stabiliser le transport de personnes blessées lors de missions de sauvetage.



Figure 2.7 : Le *Load Stability System* (LSS) montré dans un scénario de sauvetage [26]

Les requis pour un drone de la taille du DeLeaves sont différents puisqu'il s'agit d'un UAV. De plus, leur système s'ajoute à un câble, alors que le DeLeaves est suspendu grâce à une tige fixée sous un joint universel, ce qui enlève un degré de liberté en torsion.

Un brevet détenu par Amazon [27] vise à utiliser des propulseurs pour stabiliser une charge sous un drone cette fois-ci. Il s'agit d'un concept de drone pour faire la livraison de colis. La première revendication du brevet mentionne qu'il s'agit d'un appareil qui comprend : un UAV, un contrôleur de vol, un mécanisme de treuil pour hisser la charge suspendue, une plateforme au bout de ce treuil qui permet d'agripper un objet et un système de stabilisation de charge (incluant au moins un propulseur, un capteur d'orientation et un contrôleur). Puisque le concept comprend des treuils

pour attacher la charge sous le drone, l'ajout de propulseurs sur le DeLeaves n'enfreint pas ce brevet. La Figure 2.8 montre une image tirée du brevet qui a été octroyé en 2017.

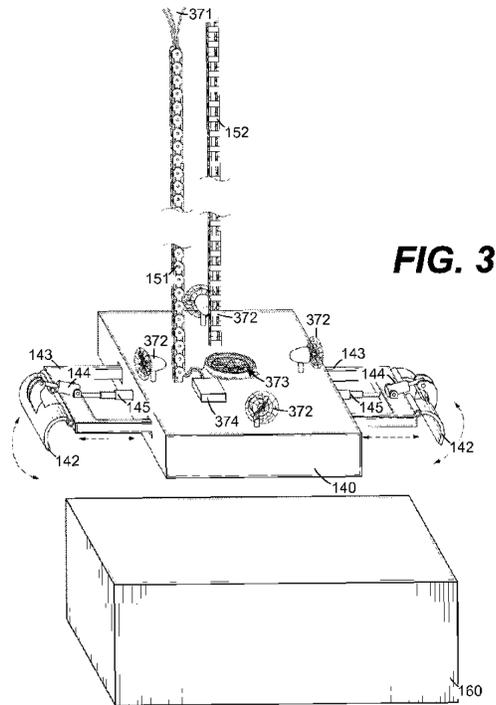


Figure 2.8 : Le concept de drone pour livraisons breveté par Amazon [27]

En conclusion, il semble que le transport de charge suspendu à l'aide d'un drone est un sujet qui commence à être exploré de plus en plus. Toutefois, peu de solutions ont été développées pour limiter l'oscillation de la charge. Peut-être que la plupart des applications ne nécessitent pas de positionnement précis de la charge lors du vol contrairement au DeLeaves. Toutefois, on estime que pour toutes les opérations nécessitant d'effectuer une tâche de précision, cette oscillation sera une limitation à laquelle l'ajout d'un système de propulseurs pourrait être la solution.

3. ARTICLE

3.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation :

G. Charron : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

T. Robichaud-Courteau : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique.

H. La Vigne : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique.

S. Weintraub: National Ecology Observatory Network, Battelle, États-Unis

A. Hill : horticulteur, Jardin Botanique de l'Université de la Colombie-Britannique

D. Justice: professeur adjoint et horticulteur, Jardin Botanique de l'Université de la Colombie-Britannique, Département des sciences

N. Bélanger : professeur, Centre d'étude de la forêt, TELUQ, Université du Québec

A. Lussier Desbiens : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique et robotique

Date de soumission : 21 janvier 2020

Revue : Journal of Unmanned Vehicles Systems (JUVS)

Titre français : Le DeLeaves : Un outil efficace pour l'échantillonnage de la canopée à l'aide d'un drone

Contribution au document :

Cet article contribue au mémoire, car il élabore sur l'atteinte des objectifs principaux 1 à 4 en détaillant les requis du projet et la conception de l'outil DeLeaves.

Résumé:

L'échantillonnage de la canopée des arbres est critique pour plusieurs applications reliées à la foresterie, incluant le diagnostic de la composition en nutriments du feuillage, le développement de modèles de télédétection, l'analyse génétique ainsi que le suivi de la biodiversité et la conservation. Pour plusieurs de ces applications, l'échantillonnage du feuillage exposé au soleil est essentiel. Malheureusement, les techniques d'échantillonnage actuelles ont toutes d'importantes limitations. L'accès aux branches situées à plus de 10 m de hauteur est hasardeux, long et coûteux. Dans plusieurs situations, la hauteur de l'arbre, la topographie (ex., cours d'eau, falaises, canyon) empêche l'accès et l'échantillonnage est simplement impossible. Cet article passe en revue les développements récents reliés à l'échantillonnage d'arbres à l'aide de UAVs et présente l'outil DeLeaves, un accessoire qui peut être installé sous un UAV pour échantillonner de manière efficace de petites branches situées dans la canopée des forêts (c.-à-d., < 25 mm de diamètre, < 500 g, toutes orientations). Quatre différentes campagnes d'échantillonnages utilisant l'outil DeLeaves dans des contextes d'échantillonnages réels seront présentées. Jusqu'à présent, l'outil DeLeaves a récolté plus de 250 échantillons sur plus de 20 espèces d'arbres différentes en un temps moyen de 6 minutes par échantillon. Ces résultats démontrent clairement le potentiel de l'échantillonnage d'arbre à l'aide de UAV pour améliorer considérablement des applications clés en foresterie, en botanique et en écologie.

Abstract:

Tree canopy sampling is critical in many forestry-related applications including foliar nutrient diagnostics, remote sensing model development, genetic analysis as well as biodiversity monitoring and conservation. For many of these applications, sampling foliage that is exposed to full sunlight is essential. Unfortunately, current sampling techniques have severe limitations. Access to tree branches located higher than 10 m is hazardous, time-consuming and expensive. In many situations, the height of the tree or the site topography (e.g., river, cliff, canyon) prevent access and sampling is simply impossible. This paper reviews the recent developments related to UAV-based tree sampling and present the DeLeaves tool, a new device that can be installed under

a small UAV to efficiently sample small branches in the uppermost canopy (i.e., < 25 mm stem diameter < 500 g total weight, any orientation). Four different campaigns using the DeLeaves tool are presented to illustrate its real-life use in various environments. So far, the DeLeaves tool has been able to collect more than 250 samples from over 20 different species in an average sampling time of 6 min per sample. These results clearly demonstrate the potential of UAV-based tree sampling to greatly enhance key forestry, botany, and ecological applications.

The DeLeaves: A UAV device for efficient tree canopy sampling

3.2 Introduction

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are poised to play a major part in plant biodiversity conservation and sustainable forest management. Indeed, their use is becoming ubiquitous due to decreasing purchase prices and increasing applications potential [28,29]. Equipped with the appropriate cameras, it is now possible for UAVs to map land use [30] and canopy gaps [31,32], to detect standing deadwood [33], as well as to assess canopy structure [34] and species composition [35]. In some remote or difficult to access areas, such as cliffs, UAVs can also be used to identify the distribution of certain rare plant species [2].

Beyond imagery, UAVs are also being considered for other tasks like inspection, maintenance or sampling. For many forestry and conservation applications, the development of a UAV that could efficiently sample foliage from the tree canopy would be invaluable. For example, such a flight platform could be used to optimize the productivity of fast-growing tree species plantations (e.g., pine, eucalyptus, and hybrid poplars). Indeed, those plantations have high nutrient demand and as such, are often fertilized to increase both productivity and profitability, e.g., [36] in North America, [37] in Scandinavia, and [38] in Europe. In some cases, growth can increase by 200% following fertilization [8]. Although other methods are available to plan fertilization treatments (i.e., soil analysis), foliar analysis is the most direct way to monitor the trees' nutritional needs [39]. Tree canopy samples could also be used to develop and calibrate models of leaf chemistry based on hyperspectral imagery, enabling the monitoring of ecosystems at large scale [40–42]. Foliar samples are particularly useful for the accurate interpretation of spectral data toward mapping nutrients like nitrogen and phosphorus [43,44].

Finally, canopy sampling with UAV could be used by horticulturists and botanists to collect stem cuttings for vegetative propagation. For example, the University of British Columbia (UBC) Botanical Garden often organizes expeditions in different regions of the world to document, discover and collect propagules from various tree species [45,46]. Unfortunately, the ability to collect propagules is often severely limited in the field, as many of the samples of interest are

located high up in tree canopies. Furthermore, the trees of interest are often inaccessible, being located on steep slopes or across rivers/canyons.

Since canopy sampling is useful for many applications, several different approaches are used to achieve this hazardous task. The pole pruner technique is low cost and simple. However, very few pole pruners extend past 10 m due to the difficulty in manipulating them. Furthermore, their repeated usage is often associated with neck and back injuries. Tree climbing facilitates access to higher branches, but it requires specialized skills, additional equipment and takes longer to set up [5]. Moreover, tree climbing is risky, and it is not always possible for a climber to reach the terminal branches. In some situations, the tree could be cut down, but obviously, destructive sampling is not ideal. The usage of a shotgun is widespread but is now prohibited in many forests for security reasons [4]. This technique is also inefficient to cut flexible branches and its repeated usage can damage other parts of the tree. The line launcher consists of a shotgun using a blank bullet to propel a weight and a cable over the branches. This approach gets complex in the field due to the cable management, as well as the direct viewpoint and the shooting accuracy required. Similar to the line launcher, large slingshots can also be used to propel the weight. Some techniques are used especially for cone collection, like using a large sampler operated by helicopter [47]. To complete the list of techniques, canopy cranes [48] and canopy rafts [49] have been used. These massive and fixed infrastructures are typically used for long-term experiments. In short, these techniques all present an array of drawbacks ranging from dangerous to limited in range, while also often being difficult to deploy and expensive.



Figure 3.1 : A UAV equipped with the DeLeaves tool after collecting a red spruce (*Picea rubens*) in Quebec.

In this article, the DExtrous Leaf Extracting Aerial VEHicle from Sherbrooke (DeLeaves) is presented. This novel tree sampling tool, illustrated in Figure 3.1, has been developed to complement or even replace the existing sampling techniques. Section 3.3 of this paper describes the general requirements for UAV-based tree sampling. Recent UAV sampling developments are reviewed in Section 3.4. Section 3.5 discusses the system level choices involved in the design of the aerial tree sampler, while Section 3.6 presents the prototypes that lead to the DeLeaves tool. Section 3.7 concludes by presenting the use of the DeLeaves in 4 specific scenarios: propagules sampling in Vietnam with the UBC Botanical Garden, foliar analysis to monitor fertilization effects on trees, sampling of sunlit tree foliage for measurement of spectral-optical properties with the Canadian Airborne Biodiversity Observatory (CABO) and, finally, canopy sampling for the long-term assessment of ecosystems changes with the National Ecological Observatory Network (NEON).



Figure 3.2 : Tree sampling techniques. From left to right, top to bottom: pole pruner, climbing [5], shot gun [4], line launchers, slingshots [50], lift [20], helicopters [4], canopy crane [48], canopy raft [7].

3.3 Requirements

This project was initiated from the needs of the UBC Botanical Garden, to support their sampling efforts during expeditions in Southeast Asia. As this work matured through various field missions, the understanding of the major requirements for tree canopy sampling evolved. The main requirements identified include: (1) collect samples located in the upper canopy, (2) collect samples that meet a minimum size, (3) be able to collect from diverse tree species, (4) be able to deal with variable weather conditions, (5) operate at a range of 300 m from the launch point, (6) collect samples in a short amount of time.

Accurate sampling location on a tree is often very important. At first glance, there may seem to be plenty of branches to sample from. Samples could come from the lower, more accessible part of the canopy, from the side of the crown, from the very top, or could even be picked up from the

ground in some cases. Although different applications may require different branch locations, for most applications, such as foliar analysis and propagate collection, typical sampling protocols recommend sampling of leaves exposed to direct sunlight [51]. For most trees within natural forests, this exposed foliage is found only in the uppermost part of the tree crown. These leaves have the nutrient composition most representative of the last growing season. Older leaves exhibit strong variations in N, P, K, Mg and Ca [39]. Similarly, the best samples for field identification, vegetative propagation and herbarium specimens (e.g., seeds, flowers, fruits, stems or leaves) are generally found in the youngest branches at the top of a tree.

The UAV should also be able to collect sufficiently large samples for analysis, identification or propagation, without negatively affecting the tree. According to the sampling protocol of the National Ecological Observatory Network (NEON), 30-40 g of fresh plant material is sufficient to perform chemical analyses and measure leaves mass per area and leaf water content [51]. In most cases, that means that a UAV must collect a sample ranging from 100 g to 400 g, including foliage, stem, cone, flowers and fruits. In many cases, the UAV must also carry the sample down to ensure that it will reach the ground. For specific applications, the exposure of the sample to the environment (e.g., ground, other branches/trees) should also be minimized to avoid contamination. With these requirements in mind, it is possible to design the capability of the cutting and holding mechanisms and select the appropriate UAV to carry such samples.

Moreover, the sampling tool must be able to sample a wide variety of species. Since a canopy structure greatly differs from a tree species to another, the sampling tool must be able to collect small branches in any orientation, ranging from branches growing vertically as is typical with deciduous trees, to branches growing horizontally as is more common in conifers. Also of importance is the structure of the branches and their distribution within the canopy to allow access of the sampling tool (i.e., number and length of branches, stem diameter, wood hardness, foliage density).

Weather conditions are also a concern for UAV sampling. Indeed, sampling with a UAV requires precision control. The design of the UAV should use the best sensors and control system possible to stabilize the device and allow it to sample in moderate winds and light rain (drizzle). However, moving branches in the wind adds complexity to UAV sampling. According to the Beaufort scale,

small branches begin to move in wind between 20 and 28 km/h (i.e., moderate breeze)); as such this is likely the upper limit for sampling.

The sampling UAV remote operation using a video stream allows the user to collect samples beyond visual line of sight (BVLOS), which is extremely valuable as it can represent significant savings in time and resources. In many field situations, the forest density and topography simply do not allow for a suitable takeoff location near the tree of interest, nor even easy access to the targeted tree. BVLOS operation, even with distributed ground observers (a regulatory requirement in Canada and the United States), could allow a UAV to rapidly fly over the forest to collect hard-to-reach samples while the operator remains in easily accessible locations. For example, most managed forests have their own road infrastructure distributed evenly across the territory. However, as a sampler UAV is flying near the canopy, the radio signal used for control has to pass through the forest. This greatly reduces the range of reliable radio control. Our discussions with practitioners revealed that an operating range of 300 m would represent a good objective.

Finally, sampling with a UAV needs to be efficient enough to justify its use. Sampling requirements for genomic selection applications necessitate as much as 1000 samples [9]. Different sampling techniques vary greatly in terms of efficiency. NEON provides some estimates in their sampling protocols [51]. They estimate that the sampling time required in tall stature, closed canopy forest using a line launcher can be up to 2h per sample with a staff of 2 to 3 persons. To be competitive with other sampling techniques, when it is possible to use them, a sampling UAV should be faster than these estimates.

3.4 Existing tree sampling UAVs

As shown in Figure 3.3, several research groups around the world have developed UAV devices for tree sampling. Since these samplers have only been developed recently, the information available on them is still fairly limited. Some of these projects were developed with different applications in mind (e.g., arborist), which lead to different design choices. This section compares these different designs.



Figure 3.3 : Tree sampling UAVs from around the world. From left to right, top to bottom: UC Berkeley [16], Arborist II from Jamie Hyneman [15], FTTS from ETH Zurich [20], Lucanus from Slovenian Forestry Institute [18], Arborist I from Jamie Hyneman [14], UC Santa Barbara [17].

The first tree sampling UAV was created at UC Berkeley [16]. It consists of a laterally reaching lightweight rod with a razor blade at the end. The razor blade forms a hook that can cut leaves. This passive solution requires the pilot to fly the hook into a tree and catch a twig with the hook on the way out, which is a complex operation. Since the mechanism is attached rigidly on the UAV, the vertical positioning of the end effector is coupled with the pitch motion required to approach the sample. This complicates the alignment of the sampler with a specific leaf.

Jamie Hyneman, from the Mythbusters's TV show, developed two different designs to create an arborist UAV [14,15]. The first design used a rotating saw suspended at the end of a rod under a UAV. However, without any mechanism holding the branch, the saw constantly slipped around the branch without cutting it. The second design uses a laterally reaching configuration with shears actuated by a powerful electric motor connected to a heavy gearbox. The prototype was able to cut one branch before crashing. The UAV had the same end-defector positioning challenges as the Berkeley design due to the horizontal arm being rigidly attached to the UAV.

A third project, named Lucanus, was developed by the Slovenian Forestry Institute [18]. It uses a vertically suspended tool design with shears oriented to cut small horizontal branches by approaching them from the side. These shears are spring-loaded manually before each attempt. They are activated automatically by a proximity sensor. A camera is installed on the mechanism to help with the remote operation and alignment. Finally, a safety release mechanism allows the operator to detach the sampler from the UAV in case of an emergency.

More recently, the Flying Tree Top Sampler (FTTS) was introduced by the Institute of Agricultural Sciences of ETH Zurich [20]. Their design is vertically suspended under a UAV and uses a small circular saw to cut vertical branches. A proximity sensor detects when a branch is close enough and automatically close the grippers to grab it. Their first design required the device to be swung into the canopy to capture a branch. A camera is present to allow the pilot to operate the mechanism remotely and a safety release mechanism can be activated in case of an emergency.

The latest project from the University of California in Santa Barbara (UCSB) uses a vertically suspended design to sample horizontal branches [17]. The design was implemented on a 3DR X8+ UAV. It consists of a rotating saw capable of cutting small branches. The saw is protected by a spring-loaded guard and an embedded system controls their automated cutting sequence. A summary of all the UAV sampling systems, including DeLeaves, is presented in Table 1.

Tableau 3.1 : Summary of features of the various tree samplers.

Project	Cutting Device	Sampler Configuration	Sample Orientation	Safety Release	Assisted Sampling Sequence	Sample Holding Mechanism	Tool Weight	UAV Platform
UC Berkeley	Blade	Lateral	Horizontal				N/A	DJI Phantom
Hyneman 1	Saw	Down	Vertical				N/A	DJI Inspire
Hyneman 2	Shears	Lateral	Vertical				N/A	DJI Inspire
UCSB	Saw	Down	Horizontal		√	√	0.9kg	3DR X8+
Lucanus	Shears	Down	Horizontal	√	√	√	N/A	Sky Hero X8
FTTS	Saw	Down	Vertical	√	√	√	1.25kg	Tarot X6
DeLeaves	Saw	Down	Any	√	√	√	1.1kg	Tarot 680 or similar

Given the relatively recent development of the majority of these various tree sampling concepts, many of the design choices made by each team are still not well documented. The following section compares the most important designs for a tree sampling drone: the choice of cutting device and the sampler position with respect to the drone. Furthermore, the field performance of most of these

systems is still fairly unclear. In most cases, the performance can only be assessed from edited videos. This paper provides details about the DeLeaves sampler and its field performance/limitations so that efficient sampling campaigns can be planned accordingly.

3.5 System Design

As pointed out in the literature review, a number of strategies have been used to collect small branches with a UAV. This section discusses the trade-offs of the main strategies, including the choice of the cutting mechanism, the lateral vs downward-reaching configurations, and the length of the rod used to suspend a tool in the downward-reaching configuration.

3.5.1 Cutting mechanism

Two options were mostly considered in previous designs, e.i., shears and circular saw. Shears are used in many gardening tools. However, when operated on a UAV, the geometry of shears tends to push the stem away. The shear force required to cut branches is also proportional to the square of the stem diameter and the alignment between the two blades is critical. To achieve the forces and alignment needed, stiff and heavy parts are typically used. A long lever arm is also used to provide sufficient force. To create the required force on a UAV, a strong motor with a heavy gearbox would be needed, as implemented the Arborist II. A spring could also be used to provide the required cutting force, as done by Lucanus. However, given the limited payload capacity of UAVs, shears tend to be too heavy for aerial tree sampling.

In contrast, the circular saw provides much more flexibility. The cutting strategy can rely on a large number of small teeth, a high rotation speed and a slow feed rate to minimize the torque needed to cut off a branch. These parameters can be varied to match the motor with the saw to accommodate the desired stem diameter. Both DC or Brushless DC (BLDC) motors can be used. DC motors typically have faster rotation speed at lower torque, which might necessitate a gearbox. BLDC motors commonly rotate at slower speed with higher torque, which often eliminates the need for a gearbox. However, without added sensors to measure the rotor position at slow speed, the stall torque of BLDC is limited by the drive. Also, in a configuration where the saw is mounted directly on the motor axis, the maximum stem diameter that can be cut is limited by the saw clearance over the motor. Finally, the rotating components associated with the saw create gyroscopic effects. However, this was not a concern in the various prototypes built to date.

3.5.2 Laterally vs downward-reaching sampler configuration

Two different positioning of the sampler has been explored in the literature, either a laterally reaching or a downward-reaching configuration. The laterally reaching design is advantageous for applications where samples need to be collected on the side of the tree. However, this design implies that counterweight must be used to balance the system or that some propellers reach their maximum thrust prematurely to compensate for the offset centre of mass. This impacts the system by reducing the maximum payload capacity and the manoeuvrability of the UAV. When rigidly connected to the UAV, this extra mass modifies the inertia of the whole system which can make the UAV's control system unstable. Vibrations can also be caused by the sampler mass added at the end of the pole which, by its finite stiffness, creates a mass-spring system. These vibrations could require additional signal filtering. When a collision will occur with a branch, the contact force at the far end of the sampling mechanism will also create destabilizing moments of force on the UAV. Finally, a UAV must change its attitude in order to move in the horizontal plane. These rotations will affect the positioning of the end effector while trying to reach a target, making the operation of the device by the pilot more complex.

A downward-reaching design has the advantage of keeping the centre of mass centred under the propellers. When connected to the UAV with a universal joint (no rotation in yaw axis allowed), the system will act as a pendulum under the UAV so that no additional inertia is perceived by the UAV system. Figure 3.4 illustrates these basic concepts. It will also eliminate destabilizing moments created by interaction forces, while trading the high-frequency oscillations of a mass-spring system for the slow pendulum oscillations. This enables the use of a commercial UAV controller without any adjustments.

The pendulum motion could decrease the position precision of the sampler, but slow displacements of the UAV can limit these effects. Finally, the main advantage of a suspended mechanism is to allow sampling of canopy branches while the UAV safely hovers above the trees. This reduces the cognitive load on the pilot for operating such a system.

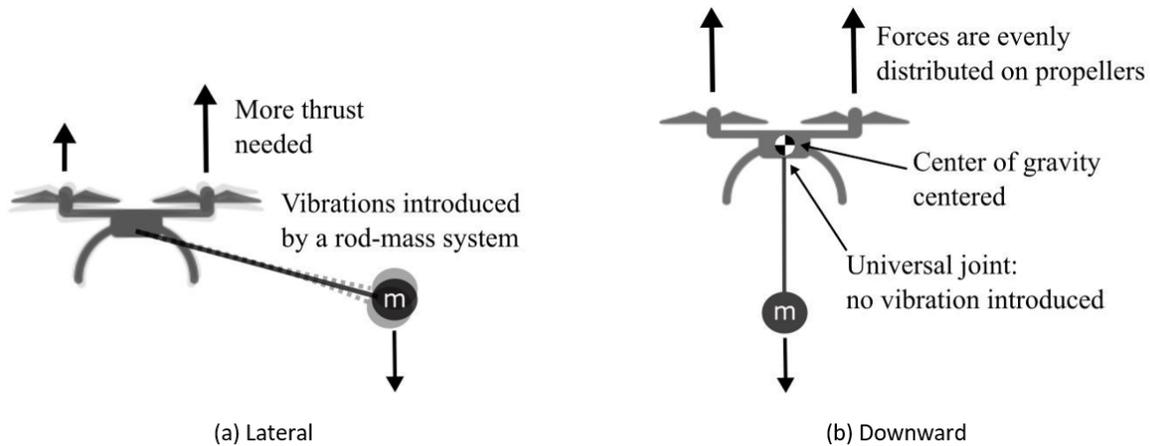


Figure 3.4 : Laterally vs downward-reaching sampler positioning strategies, and their effect on the thrust, inertia and vibrations.

3.5.3 Rod length

When using a downward-reaching sampler configuration, the rod length controls directly three main effects: the motion of the branches resulting from the prop wash of the UAV, the pendulum oscillation frequency and, finally, the downward reach of the cutting tool while keeping the UAV above obstacles (e.g., treetops). For all these considerations, a longer rod length is desirable, up to the mechanical limits of the rod (e.g., stiffness, buckling, strength) and the added mass that is acceptable to respect the payload weight requirement. Although it is difficult to model or establish general relations, the prop wash effect diminishes with the distance from the UAV. A reasonable objective is to maintain the prop wash velocity below the moderate breeze level according to the Beaufort scale to limit the motion of small branches. According to our tests on several tree species with UAVs between 1.2 kg and 4.5 kg (e.g., DJI F450, DJI M210), 2.5 m between the propellers and the branches is suitable to limit the canopy motion. Lastly, the rod length also affects the mechanism's oscillation frequency, which is proportional to $1/L$. A longer rod will reduce the oscillation frequency, making it easier for the operator to align the grasping mechanism with a target. Having a long rod seems difficult to manage during takeoff and landing but has proven to be quite easy to perform with a forward/backward motion (Figure 3.5).



Figure 3.5 : Takeoff sequence time lapse

3.6 Prototype Review

The DeLeaves tool evolved through several prototypes that were refined through field trials. Figure 3.6 shows some of these iterations. The evolution and refinement of these prototypes led to two functional devices of different sizes. The “Expedition Edition”, shown in Figure 3.6 (c), is optimized to be carried with a backpack for expeditions in remote areas and is installed under a DJI F450 drone. The “Forestry Edition”, shown in Figure 3.6 (d), is designed to collect larger samples and be installed on drones such as the DJI M200 or M600. Table 2 lists the main specifications of both editions as a comparison. Even if the weight difference between both tools is only 565 g, this allows the Expedition Edition to be installed on much smaller drones that use lighter batteries, resulting in significant size/weight savings during field operations. This section will describe in detail the “Forestry Edition”, the latest version of the DeLeaves sampling tool.



Figure 3.6 : Prototype timeline. (a) passive holding mechanism, actuated by light muscle wire, (b) servo actuated holding mechanism, grasping mechanism semi-actuated with return-spring.

- (c) “Expedition Edition”, servo actuated grasping with memory foam for additional grip, and
 (d) “Forestry Edition”, a scaled-up version for forestry applications with direct actuation of the gripper.

Tableau 3.2 : Technical specifications

Specifications	Expedition Edition	Forestry Edition
Operating range	up to 150 m	up to 150 m
Max. cutting diameter	12 mm	25 m
Max. sample weight	150 g	500 g
Tool weight	535 g	1100 g
Tool length	2.6 m	2.6 m

3.6.1 Components and technical specifications

The DeLeaves Forestry Edition is illustrated in Figure 3.7 (a) It consists of a grasping mechanism, a rotating saw, a branch holding mechanism, and a camera. This hardware is installed at the end of a 2.6 m carbon fibre rod fixed to the drone through a universal joint in series with a custom quick-release mechanism that can be remotely activated. The DeLeaves is built mostly from 3D printed parts that use embedded continuous fibre for high stiffness-to-weight ratio. The grasping mechanism is actuated by a Dynamixel X1430-W250, allowing position control of the grasping mechanism during the approach as well as control of the feed rate during the cutting phase to prevent the saw from stalling. The geometry of the lower gripper/cutter is carefully designed to rapidly capture a branch and guide it toward the rotating saw. A fixed stopper guide allows the stem to be stabilized while it is getting cut, while also orienting the cutting forces. The saw has a carbide grit blade mounted on a BLDC motor. The upper branch holding mechanism is actuated by a servomotor. It corrects the orientation of the sample to ensure an efficient cutting process in addition to holding the branch during the flight back to the ground station. Both grippers can be opened at any time, either to let go of a branch that is too difficult to cut or to drop the collected sample to the ground to speed up the operations. To collect branches with different orientations, a pivoting joint allowing 10° increments have been added to manually adjust the orientation of the end effector before taking off.

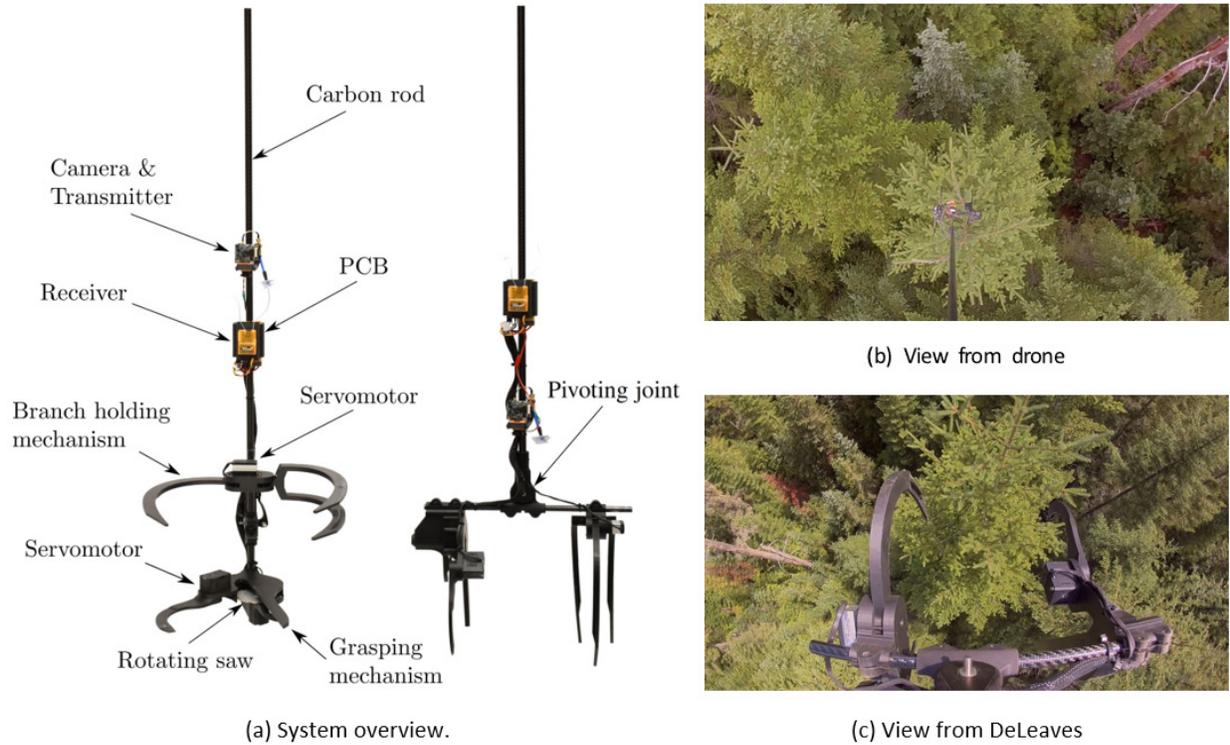


Figure 3.7 : (a) DeLeaves prototype overview. (b) Perspective from the camera on the UAV. (c) Perspective from DeLeaves.

To allow the use of the DeLeaves on many different commercial UAVs, the sampling device is completely independent of the UAV platform. A 1000 mAh, 3 S (11.1 V) battery is included to power the sampler’s electronics, grippers and saw. This battery was chosen to match the autonomy of most UAVs (e.g., 18-30 min). The Deleaves is controlled through a separate RC remote operated by a second operator. Although full control of each actuator is possible, an on-board computer can also perform a fully automated grasping and cutting sequence. This allows the second operator to use a single switch to activate the full sequence. Finally, a downward-facing camera is installed above the sampler to clearly identify the targets, position the sampler and observe the operations. This close view is also complemented by a camera installed on the UAV, which provides an overview of the situation to the pilot (e.g., avoid surrounding obstacles). Figure 3.7 (b,c) illustrates both camera perspectives that are available to the drone pilot and the DeLeaves operator.

Considering the total mass of the system, including the tool (1100 g) and the added mass from the sample (i.e., less than 500 g), the UAV needs to have a minimal payload allowance of 1500 g. The Tarot 680 pro hexacopter with a PixHawk flight controller was used during most of the prototyping

and field trials due to the versatility offered by this affordable and open-source platform. However, the DeLeaves tool is now mostly used with the DJI M200 series and M600, which are off-the-shelf commercially available UAVs that are simpler to use, more reliable and better performing.

As described before, flying beyond visual line of sight (BVLOS) can considerably speed up the operations but presents a challenge since flying close to the trees significantly reduces the radio range. The current 5.8 GHz, 600 mW analogue video transmission system with mushroom type antennas were tested up to 150 m. This was evaluated for a base station located on a forestry road, with the drone flying 3 m to 5 m above a maple forest containing 20 m high trees with fully grown leaves. Beyond this distance, the camera's signal was lost. Actual developments are made to extend this range.

3.6.2 Operation sequence

In order to achieve efficient tree sampling, common automated flight features are used to help the operators. After manual takeoff, automated guidance is used to bring the drone just above the targeted tree with GPS coordinates. After sampling a tree through manual flight, the return-to-home function of the drone is activated to automatically return to the base station. To support the pilot and sampler operator during manual flight, a control station is set up as shown in Figure 3.8. For safe operations, a visual observer is located near the targeted tree and ensures a direct line of sight with the UAV at all time. This observer also confirms that the right tree is being sampled and can inform the pilot about the surrounding obstacles using radio communication when needed.

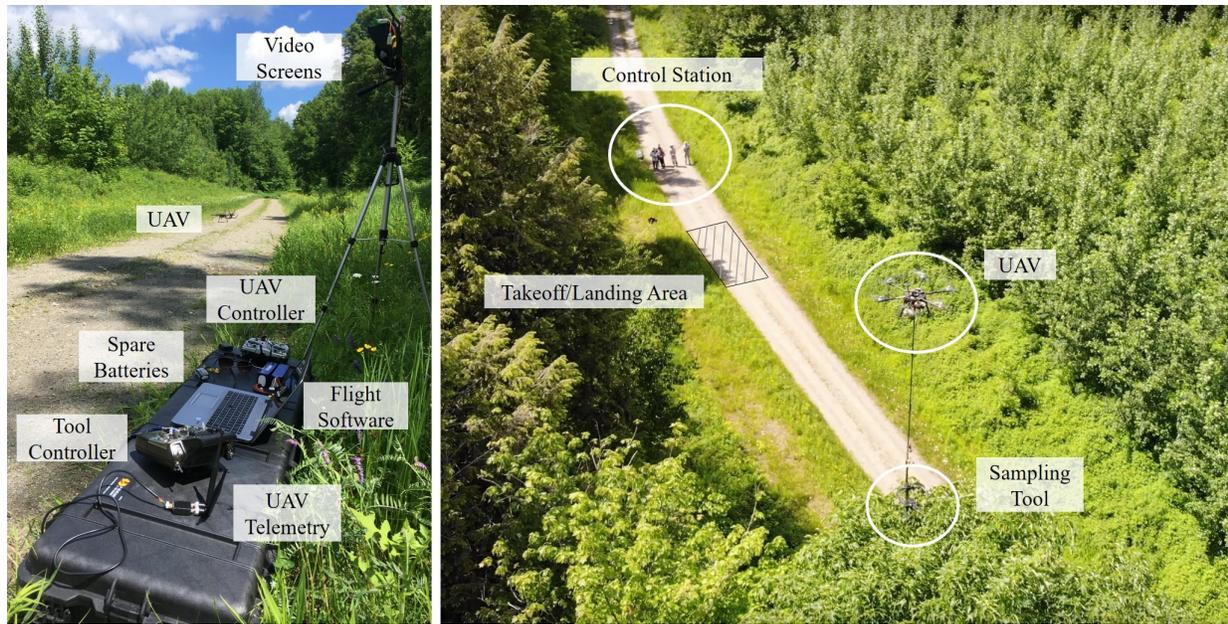


Figure 3.8 : The control station setup (Left) and an overview of a typical sampling operation (Right).

3.7 Results

As of January 2020, the DeLeaves tool has successfully sampled more than 250 individual trees from more than 20 different species, including maples (e.g., *Acer saccharum*, *Acer rubrum*, *Acer saccharinum*), poplars (e.g., *Populus balsamifera*, *Populus deltoides*, *Populus tremuloides*), pines (e.g., *Pinus strobus*, *Pinus resinosa*, *Pseudotsuga menziesii*), spruces (e.g., *Picea abies*, *Picea glauca*), and others (e.g., *Juniperus virginiana*, *Larix laricina*, *Tsuga canadensis*). This section will present the results from four sampling campaigns that used the DeLeaves for different projects: propagule sampling during the UBC Botanical Garden’s yearly expeditions, assessment of fertilization effects on trees through foliar sampling and nutrient analysis, sampling of sunlit foliage for measurements of spectral-optical properties with the Canadian Airborne Biodiversity Observatory (CABO), and canopy sampling to support the assessment of ecosystems changes with the National Ecological Observatory Network (NEON). Footage from these sampling campaigns have also been made available online to complement the following descriptions¹.

¹ <https://www.youtube.com/channel/UCJITBxzErHHCuvLLb5MzmjQ>

3.7.1 Vietnam Expeditions with the UBC Botanical Garden

During the springs of 2017 and 2018, the Sherbrooke team was invited to test the DeLeaves sampler for the yearly Vietnam expedition of the UBC Botanical Garden. The goal of these expeditions was to document, study and collect rare species from this region of the world. During these expeditions, interesting specimens are often out of reach, either on dangerous slopes/terrain/cliffs, high up in a tree, or across a river. The reach of a UAV is thus invaluable in many of these situations. Takeoffs are particularly challenging as the terrain in Northern Vietnam is often steep with few flat spots large enough for a UAV equipped with a sampler to takeoff/land. Despite that difficulty, the team was able to collect 3 native species (i.e., *Aesculus assamica*, *Azadirachta indica*, *Aesculus wangii*) with the 2017's version of the DeLeaves (Figure 3.6 (b)). The field operations realized during the 2018 expedition is illustrated in Figure 3.9. Further information about this expedition is available online².



Figure 3.9 : Vietnam expedition in 2018. From left to right, top to bottom: hiking with the DeLeaves to access remote areas, Thomas holding a freshly collected *Azadirachta indica* sample, an improvised takeoff area in the dense vegetation, and the collection of a twig/flower of *Aesculus wangii* from the DeLeaves's camera.

² <https://botanicalgarden.ubc.ca/trekking-in-the-mountains-of-northern-vietnam/>

3.7.2 Assessment of fertilization effects on trees

During the summer of 2018, a sampling campaign was performed in sugar maple (*Acer saccharum*) stands of southern Quebec. The purpose of this project was to assess fertilization effects of 5 stands by sampling paired, fertilized and unfertilized (control), plots. In each plot, 2 canopy samples were collected using the DeLeaves tool on 2 mature maple trees, thus totalling 40 samples. This sampling campaign required 53 flights with a prototype of the Expedition Edition (Figure 3.6 (c)). The 40 samples collected are shown in Figure 3.10. Overall, the operations required a total flight time of 4.5 h performed over 4 days distributed over 2 weeks, to allow for travel between the various sites, inclement weather and the team's availability. The main causes of the 13 flights that didn't bring back a sample on that early version of the DeLeaves tool were: (1) the operator did not locate an accessible sample in time (i.e., this early version had a shorter maximum flight duration of about 10 min); (2) the operator targeted an oversize sample; and (3) a poor signal reception of the camera.



Figure 3.10 : The 40 maple foliage samples collected in early August 2018. The samples have an average diameter of 5.1 mm (min: 2.1 mm, max: 7.9 mm), an average length of 24 cm (min: 8 cm, max: 50 cm) and an average weight of 24 g (min: 8 g, max: 70 g).

The GPS coordinates of each flight were recorded to quantify the DeLeaves's performance. On average, it took 5 min to collect a sample. The average distance of the trees from the base station was 80 m and the trees had an average height of 20 m. More than 70% of the mission time was

used to confirm the target tree with a ground observer, identify a suitable branch that DeLeaves could sample and align the tool to grab the desired branch. Macronutrients (N, P, K, Ca and Mg) concentrations of all the samples collected have been successfully measured and the results will be published soon.

3.7.3 Quantify intra-individual foliar spectral and functional trait variation with CABO

The Canadian Airborne Biodiversity Observatory (CABO) (<https://www.caboscience.org/>) has the overall objective to study and understand changes in plant biodiversity across Canada using spectranomics, and more particularly to improve our ability to forecast the response of biosystems to environmental changes [52]. To do so, they map plant species and functional traits using imaging spectroscopy. The purpose of the sampling campaign performed with the DeLeaves tool was to quantify intra-individual trait variation of an important regional tree. The chemical and structural leaf traits, as well as spectra, were measured between paired leaf samples from the canopy of 10 mature sugar maples (*Acer saccharum*). One set of leaves were collected with the DeLeaves tool in the upper and mid-tier canopy, whereas the other set was collected from the crown periphery using a pole pruner (Figure 3.11). Both sets of leaves were exposed to sunlight. This research project took place in June 2019 in southern Quebec. The results showed significant differences in many leaf traits resulting from the sampling location within the canopy. More details are available in *Schweiger et al. (2020)* [42].



Figure 3.11 : Comparison of representative sampling locations used with CABO on sugar maples in Quebec. The pole pruner is illustrated on the left and the DeLeaves tool is on the right.

3.7.4 Ecosystems monitoring with NEON

The latest sampling campaign was performed in partnership with the National Ecological Observatory Network during the summer of 2019. NEON is a large-scale ecological initiative that collects environmental data to characterize 81 field sites strategically located in various ecosystems across the U.S. (<https://www.neonscience.org/>). According to their canopy foliage sampling protocol [51], canopy measurements are collected at each field site once every five years. Leaves must be collected at peak greenness from sunlit canopy positions, with 20-60 samples collected per site covering the range of canopy species and environmental gradient present. Coincident with the sampling campaign, airborne remote sensing data is collected with their Airborne Observation Platform (AOP). All foliar traits and remote sensing data are publicly available on the NEON data portal (<https://data.neonscience.org/home>).



Figure 3.12 : View from the DeLeaves tool camera before collecting a branch from a 40-meter Douglas Fir.

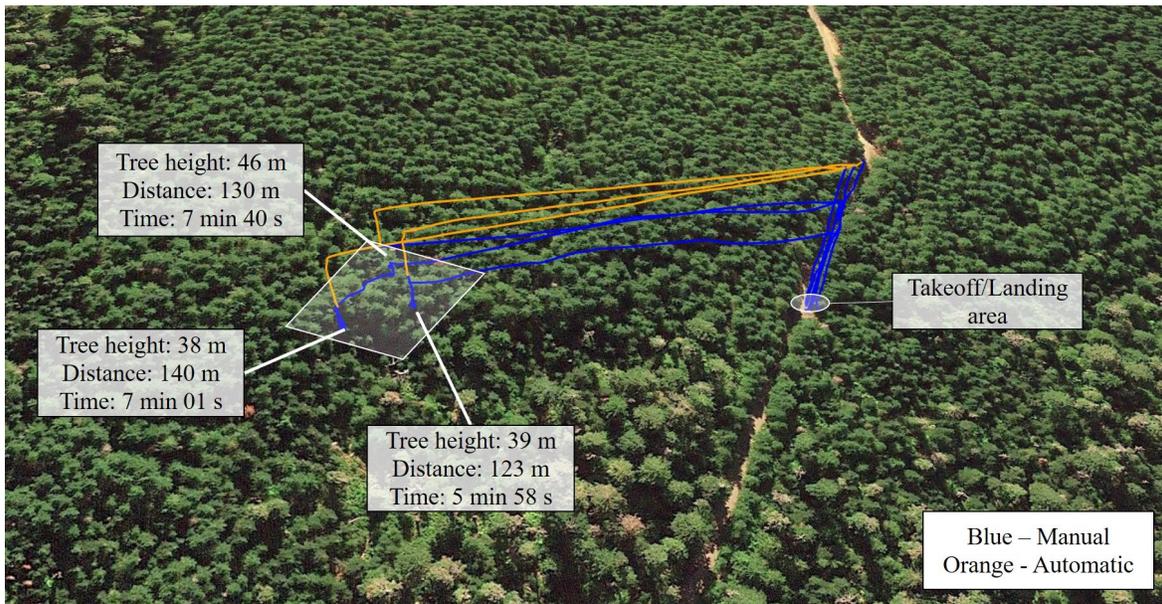


Figure 3.13 : Recorded trajectories and statistics for 3 sampling flights at the Wind River Experimental Forest, Washington State.

A total of 12 trees were sampled with the DeLeaves tool at the Wind River Experimental Forest in Washington State. Three different species were collected: Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), western hemlock (*Tsuga heterophylla*), and silver fir (*Abies amabilis*). Figure 3.12 shows the

DeLeaves tool while collecting from a 40-meter-tall Douglas Fir. Sampling flights took an average of 7 min on trees as far as 130 m. Figure 3.13 shows the flight trajectories of 3 samplings flights as recorded by the on-board GPS. The recorded GPS coordinates of each tree obtained by the UAV will allow returning to the same trees in the next sampling campaign. Takeoff and landing were achieved from a small forest road with narrow canopy openings, too small to perform automatic takeoff. Furthermore, at ground level, the dense vegetation surrounding the road was obstructing the GPS signals. Automatic operation with the GPS could be resumed once the UAV cleared the canopy line. During this sampling campaign, one of NEON's UAV pilots was trained to use the DeLeaves. He was able, after less than half a day of training, to consecutively collect samples from 3 different Douglas fir trees. As the trees at Wind River are extremely tall, the DeLeaves yielded major improvements over traditional canopy sampling tools.

3.8 Conclusion and future work

Using UAVs to interact with the environment and collect samples is becoming possible with the latest technological advances. This paper explores the viability of tree sampling with UAVs, including the requirements of forestry applications. These requirements include the collection of appropriate samples for foliar analysis, the need to be effective on a large variety of species, the environmental factors and the need for beyond visual line-of-sight operations to be efficient over large areas. To analyze the viability of UAV sampling, traditional sampling techniques currently used in the industry were described. All of these techniques present an array of drawbacks ranging from dangerous to difficult to deploy, while also often being expensive, justifying the need for a UAV-based tree canopy sampling.

The recent developments in tree sampling UAVs were described with the information available on these systems. A custom design, the DeLeaves tool, combines the best practices found and was described in detail. This design uses a downward reaching tool suspended under a UAV to avoid added inertia or vibration modes that could perturb the flight controller. This has the added benefit of maintaining the centre of mass centred under the UAV even after collecting heavy samples, maximizing the flight time. A rotating saw is used to obtain a lightweight system that requires minimal cutting forces. Cameras are employed to guide the pilot toward the desired sample. The results of four sampling campaigns conducted in different environments are also presented.

Overall, the DeLeaves tool has sampled more than 20 species and has demonstrated that it can reliably collect sub-500 g samples located 100 + m away from the launch point in about 6 min from takeoff to landing.

To meet all the initial requirements, future work includes the integration of a video transmission system with a range of more than 300 m. Ongoing work also focuses on reducing the sampling time and improving the ease of use of such a system to increase its acceptance among forestry organizations and research groups. The DeLeaves tool is already being introduced in sampling protocols and it is expected that many other designs will also be explored successfully in the years to come.

3.9 Acknowledgements

This work has been made possible with the knowledge, the help and the contribution from many collaborators. Funding to support this work was provided from the UBC Botanical Garden through an anonymous gift to the Garden, as well as from NSERC and FRQNT through scholarships to G. Charron and H. La Vigne. Thanks to Nguyen Van Du from Vietnam Institute of Ecology and Biological Resources for inviting us in Vietnam in March 2018. The authors would also like to thank Simon Bilodeau Gauthier, Jolaine Arseneau and Florian Mezerette for their support during sampling of sugar maple stand in southern Quebec. Thanks to Domtar Forest Products for giving us access to their forest land for testing the DeLeaves tool. Thanks to the CABO team, especially Etienne Laliberté and Anna Schweiger, for conceiving the experiment that led to our sampling campaign. Special thanks to Jessica Zemaitis and David Durden at NEON for their constructive feedback during the sampling campaign at the Wind River Experimental Forest. The National Ecological Observatory Network is a program sponsored by the U.S. National Science Foundation and operated under cooperative agreement by Battelle Memorial Institute.

4. SYSTÈME DE STABILISATION

Afin de conserver la stabilité en vol du drone, il est indispensable d'attacher l'outil au drone à l'aide d'un joint universel. Cela permet au drone de conserver sa liberté mouvement en roulis et en tangage, mais de conserver un alignement en lacet avec l'outil. Le balancement de l'outil à la manière d'un pendule devient toutefois très irritant lors de la phase d'approche de la branche, qui est actuellement la plus longue de l'opération. En moyenne, 70% du temps d'échantillonnage est dédié à l'alignement de la branche dans l'outil d'échantillonnage. Du point de vue de l'opérateur, il est complexe d'estimer la position du drone en opérant seulement avec la prise de vue de la caméra qui est fixée sur la perche en mouvement. De plus, les expérimentations préliminaires ont aussi révélé que l'emplacement du point de pivot par rapport au centre de masse du drone affecte l'oscillation du système. Certains drones comme le DJI M210, illustré à la Figure 4.1, ont déjà des composants situés au centre de masse du drone (p.ex., des batteries, une caméra, etc.). Avec ce décalage, les mouvements du pendule sous le drone créent des forces sur le drone et le contrôleur du drone amplifie ces mouvements en essayant de minimiser les déplacements du drone. L'impact de la position du point de pivot sera donc aussi étudié.



Figure 4.1 : Le drone DJI M200

Afin de quantifier les performances voulues pour le système de stabilisation, des objectifs de contrôle ont été déterminés au préalable. Sans aucun système de stabilisation, le pendule situé au centre de masse du drone atténue son oscillation en environ 10 secondes actuellement grâce à l'amortissement de l'air et aux déplacements naturels du drone pour se stabiliser. L'objectif de contrôle sera donc de diminuer de moitié ce temps d'établissement, pour obtenir un temps 5 secondes suite d'un arrêt brusque après un déplacement à 2 m/s. Pour atteindre cet objectif, le concept choisi est de générer une force directement sur le pendule à l'aide d'un petit propulseur.

Cette solution a l'avantage de ne transmettre aucun couple déstabilisateur au drone contrairement à l'ajout d'amortissement dans le joint reliant l'outil au drone.

Le but de ce chapitre est d'explorer la viabilité de cette solution avec la démarche exploratoire suivante. Tout d'abord, il est nécessaire de valider la faisabilité de cette solution à l'aide d'une preuve de concept rapide présentée à la section 4.1. Ce système de propulseur sera contrôlé à l'aide d'une centrale inertielle située directement sur l'outil. Celle-ci permet de vérifier que la masse du système n'est pas trop élevée comparativement à celle de l'outil, que la bande passante des propulseurs est suffisante et que les vibrations de la perche n'interfèrent pas avec le contrôleur. Cette preuve de concept sera conçue et testée au sol et en vol à l'extérieur sur un drone Tarot 680 Pro. Par la suite, on pourra déterminer s'il est intéressant d'explorer diverses stratégies de contrôle avancées afin d'améliorer les performances du système. C'est pourquoi un modèle dynamique complet a été conçu à la section 4.2 suivie de l'implémentation d'un contrôleur linéaire-quadratique (LQR) sera implémenté à la section 4.3. Ce contrôleur se basera sur les états du pendule, mais aussi sur une estimation des états du drone. On pourra ainsi quantifier l'augmentation des performances du système et justifier ou non l'usage d'un système de contrôle plus complexe à la section 4.4. Une variation paramétrique de certains autres paramètres, comme la longueur du pendule ainsi que la masse de l'outil, permettra d'anticiper la performance du contrôleur advenant que des modifications soient apportées à l'outil DeLeaves. Enfin, cette simulation permettra aussi de quantifier l'impact du décalage du point de pivot.

4.1 Preuve de concept préliminaire

L'objectif de cette preuve de concept préliminaire est de valider que l'ajout de propulseurs sur l'outil DeLeaves est un concept viable. Celle-ci permettra de valider si nous pouvons atteindre les critères suivants :

- Les propulseurs requis pour générer la force de poussée nécessaire ont une masse représentant moins de 20% de la masse de l'outil actuel. À titre comparatif, la masse de l'outil DeLeaves actuel est de 1.1 kg et la charge utile maximale recommandée pour le DJI M200 est de 1.4 kg;

-
- L'inversion du sens de poussée des propulseurs muni d'un moteur BLDC avec ESC programmable est réactif pour cette application;
 - La tige de la perche étant flexible, les différents modes de flexion de celle-ci ne doivent pas interférer avec le contrôleur;
 - Les performances de stabilisation permettent de réduire d'au moins 50% le temps de stabilisation actuel de 10 secondes.

Le montage consistera à des propulseurs bidirectionnels avec des ESC programmables réversibles afin de produire une force de poussée dans les deux directions. La perche sur laquelle seront installés les propulseurs sera munie d'une masse qui reproduira les propriétés inertielles de l'outil DeLeaves. Le tout sera enfin installé à l'aide d'un joint universel sur la plateforme de vol Tarot 680 Pro pour les tests en vol à l'extérieur. Quatre scénarios seront testés, soit :

1. Vol stationnaire de 20 secondes
2. Arrêt à la suite d'un déplacement de 5 mètres à 0.5 m/s
3. Arrêt à la suite d'un déplacement de 5 mètres à 1 m/s
4. Arrêt à la suite d'un déplacement de 5 mètres à 2 m/s

Ces essais permettront de valider si la vitesse de déplacement a un impact sur les performances de stabilisation tout en validant l'objectif de performance initial pour un déplacement de 2 m/s.

4.1.1 Stratégie de contrôle

Afin de réduire les oscillations de la perche, on peut imaginer une solution qui réduit l'énergie du système. Pour se faire, on peut ajouter une force dissipative (F) à une certaine distance du point (C) de pivot pour créer un couple qui s'oppose au mouvement angulaire pour agir à titre d'amortissement, qui s'exprime en rotation comme ceci :

$$F \cdot C = -P \cdot \omega$$

La stratégie simple consiste donc à générer une force (F) qui est proportionnelle à l'inverse de la vitesse angulaire (ω) du pendule. Le coefficient d'amortissement sera ajusté par le gain

proportionnel (P). Celui-ci permettra d'augmenter la force dissipative tout en évitant d'avoir un système sur-amorti.

Afin de mesurer la vitesse angulaire du pendule, une centrale inertielle Adafruit BNO055 [54] a été intégrée au PCB du montage. Les gyroscopes permettent ainsi d'obtenir la vitesse angulaire à un taux de rafraîchissement de 100 Hz. La boucle de contrôle est implémentée dans le microcontrôleur atmega328p à une fréquence de 20 Hz et celui-ci envoie les commandes de servomoteur aux ESC des propulseurs. Afin de filtrer les vibrations induites par la flexibilité de la perche, le souffle des hélices et la vibration des moteurs, un filtre numérique passe-bas est ajouté sur les mesures de vitesse angulaire. Pour une poutre supportée aux deux extrémités, les calculs théoriques simples permettent d'estimer la fréquence du premier mode de flexion du tube de carbone à 30 Hz alors que la fréquence d'oscillation naturelle du pendule a été mesurée à 0.33 Hz. Ainsi, le modèle numérique inclut l'ajout d'un filtre passe-bas numérique de premier ordre avec la fréquence de coupure (ω_c) fixé à 1 Hz.

4.1.2 Montage expérimental et résultats

Le montage expérimental est présenté à la Figure 4.2. Celui-ci est composé d'un tube en fibre de carbone, du module électronique (PCB, batterie, récepteur), du module de propulsion et de la masse représentant l'outil d'échantillonnage DeLeaves. Un arduino MKR zero a été ajouté (absent sur la figure) pour enregistrer les données de l'IMU sur une carte micro SD. Le récepteur RC permet d'envoyer des commandes à l'aide d'une manette pour activer ou désactiver les propulseurs à distance ainsi que démarrer et arrêter l'enregistrement. À noter qu'il est important de vérifier l'alignement du PCB avec l'avant du montage et les propulseurs puisque la centrale inertielle est située sur le PCB. La masse totale ajoutée d'un tel système de stabilisation est de 128 g, soit 10.4 % de la masse totale de l'outil.

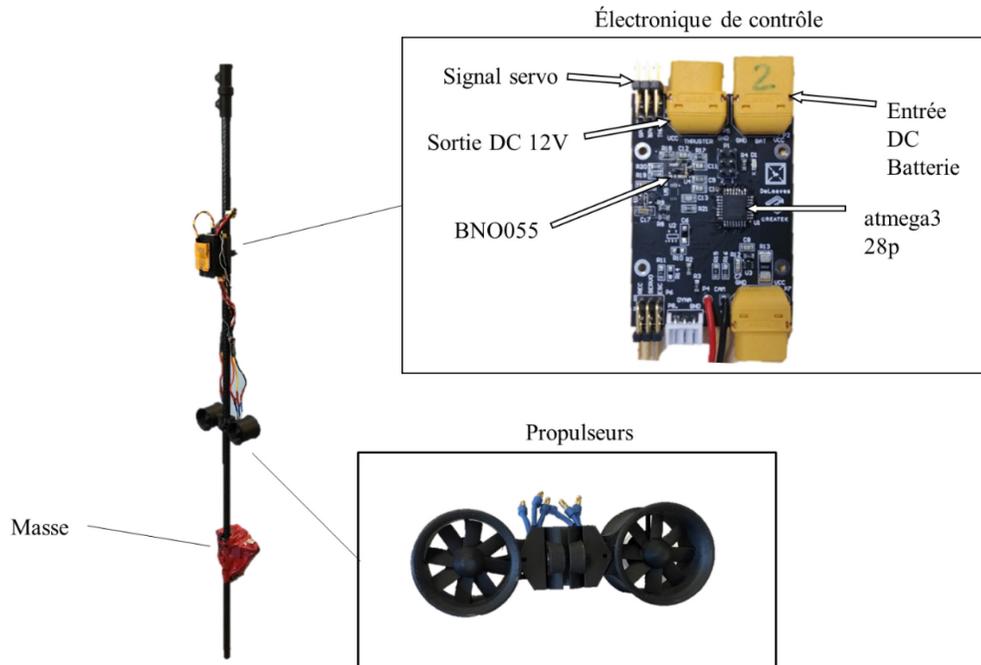


Figure 4.2 : Montage expérimental détaillé

Les essais en vol ont été configurés à l'aide du logiciel Qgroundcontrol, permettant de planifier une séquence de déplacements autonomes en réglant la vitesse de déplacement souhaitée. La Figure 4.3 illustre les essais qui ont été effectués.

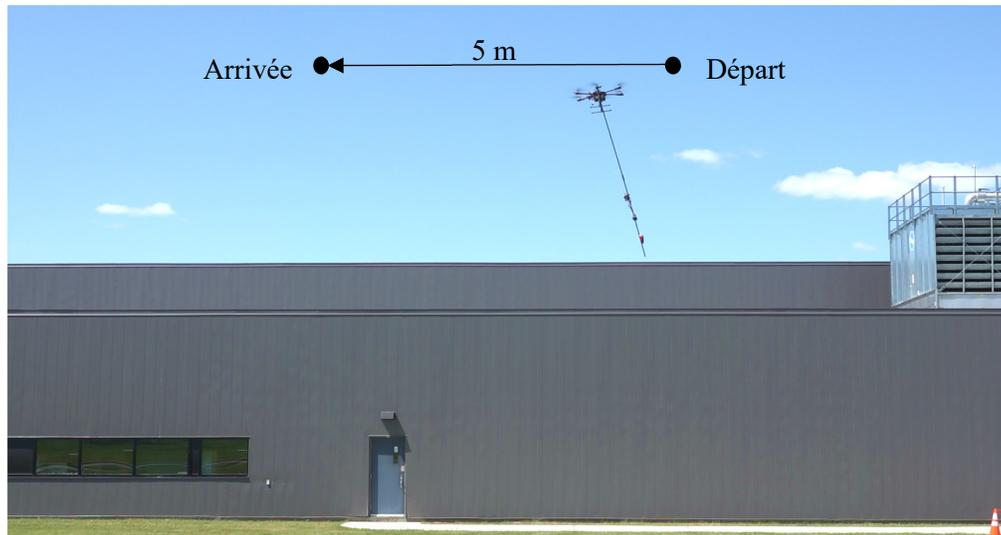


Figure 4.3 : Illustration des essais en vol à l'extérieur

Les quatre essais ont été effectués la même journée avec des conditions de vent comportant des rafales de 15 à 20 km/h. La Figure 4.4 montre qu'une oscillation de $\pm 2^\circ$ est présente lors d'un vol stationnaire. Cela correspond aux mouvements du drone causés par les corrections de position dues à l'incertitude des GPS ainsi que les perturbations de vent (lors du jour du test). En comparant les deux courbes dans le graphique, on se rend compte que l'activation des propulseurs a un impact minime.

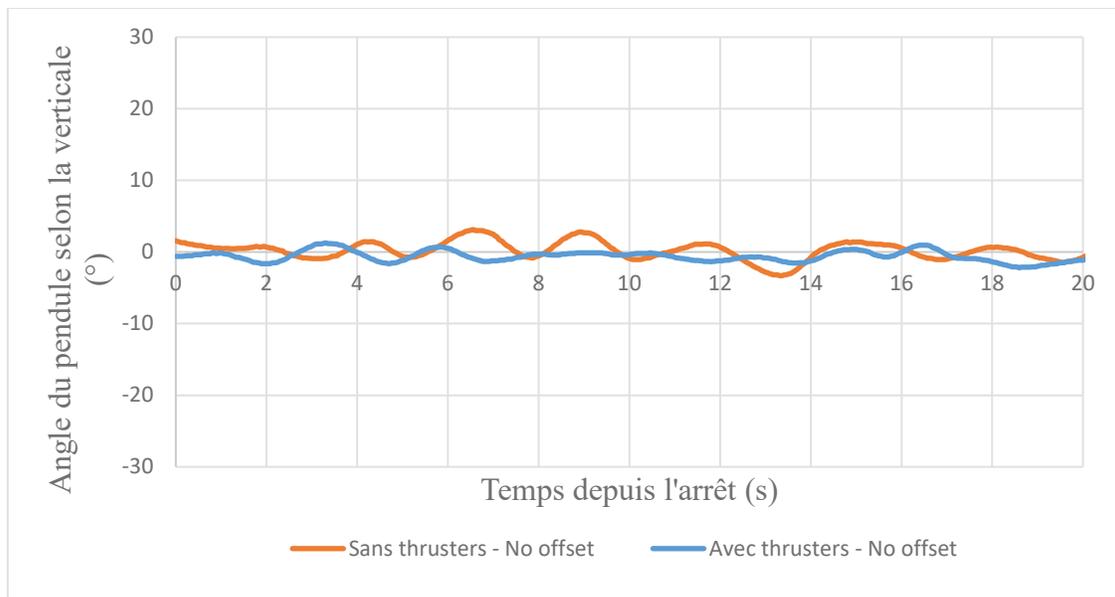


Figure 4.4 : Position angulaire de la perche par rapport à la verticale durant un vol stationnaire

Les 3 figures suivantes montrent les résultats obtenus lors d'arrêt suivant un déplacement à différentes vitesses. On remarque premièrement que le premier pic d'oscillation positif sans propulseur varie selon les essais (entre 10° et 20°). Cela est causé par le fait que le drone arrête sa course alors que le pendule a une vitesse angulaire différente. En effet, si la vitesse angulaire du pendule est initialement dans la même direction que la vitesse du drone, la quantité de mouvement « s'additionne ». Or, si la vitesse angulaire du pendule est initialement à l'opposée à la vitesse du drone, la quantité de mouvement s'annule partiellement, ce qui provoque une amplitude d'oscillation qui varie. Ainsi, la vitesse de déplacement n'est pas la cause principale de la variation de l'amplitude d'oscillation, comme on pensait précédemment. Dans tous les cas, on remarque que le système de stabilisation diminue significativement l'amplitude du premier pic positif d'oscillation ($\pm 8^\circ$ au maximum avec la stabilisation contrairement à $\pm 16^\circ$ sans stabilisation) et

permet de stabiliser le système en environ 5 secondes avec le même système de contrôle. De plus, les vibrations du système n'interfèrent pas du tout avec le contrôleur. Malgré la variabilité des essais à l'extérieur, ces résultats prometteurs permettent d'établir que le concept de propulseurs est viable pour stabiliser l'outil d'échantillonnage en vol. Les sections suivantes visent à développer un contrôleur pour obtenir une stabilisation plus rapide que 5 secondes.

Enfin, un autre avantage de ce système est aussi que les propulseurs peuvent servir à donner une poussée vers l'avant sur l'outil pour ainsi atteindre un échantillon sans faire avancer le drone. Cet ajout pourrait être intéressant pour accélérer la phase d'approche en ayant un moyen d'approcher l'outil autour de la branche sans déplacer le drone. Il s'agit donc d'un avantage comparativement aux autres techniques de stabilisation. Cette fonctionnalité a été testée avec le prototype et a permis d'avoir une portée d'environ 80 cm. Avec des propulseurs plus puissants et un outil plus long, on pourrait augmenter cette portée.

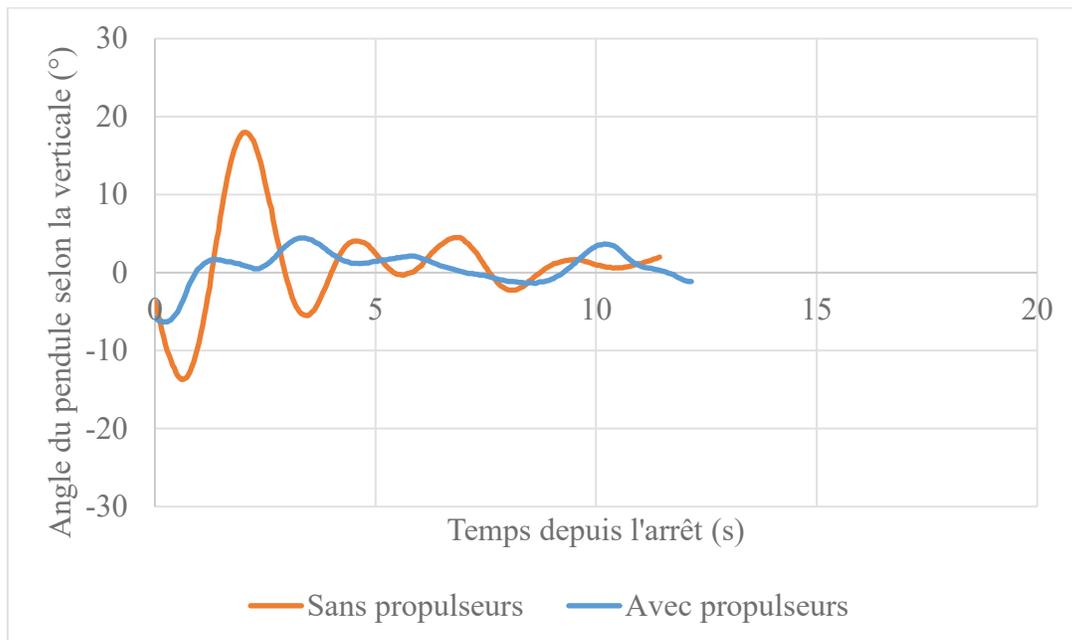


Figure 4.5 : Position angulaire de la perche lors d'un arrêt suivant un déplacement à 0.5 m/s

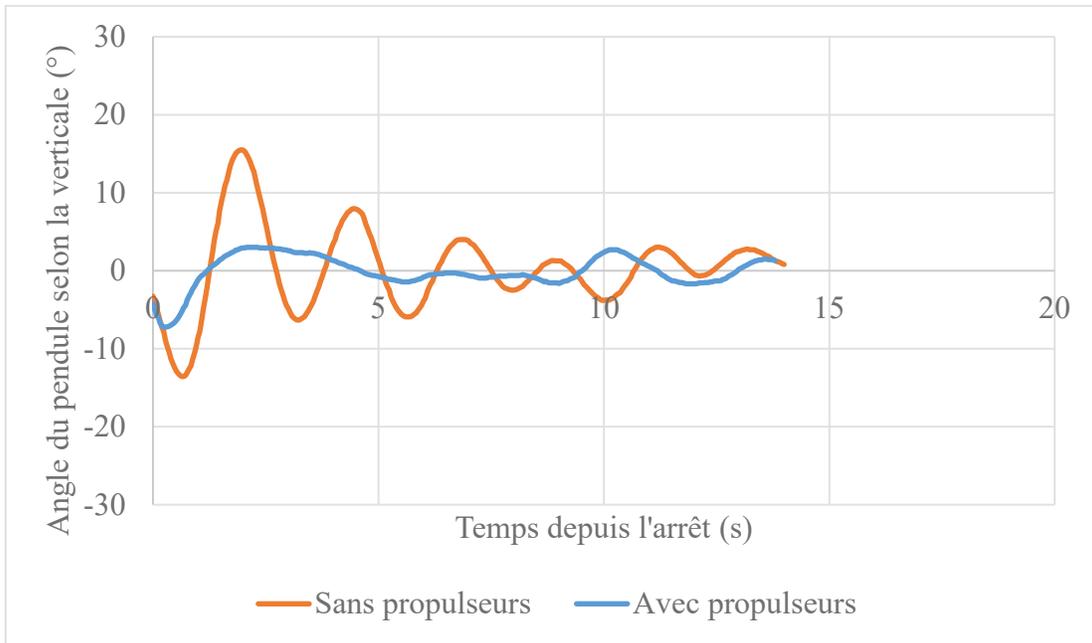


Figure 4.6 : Position angulaire de la perche lors d'un arrêt suivant un déplacement à 1 m/s

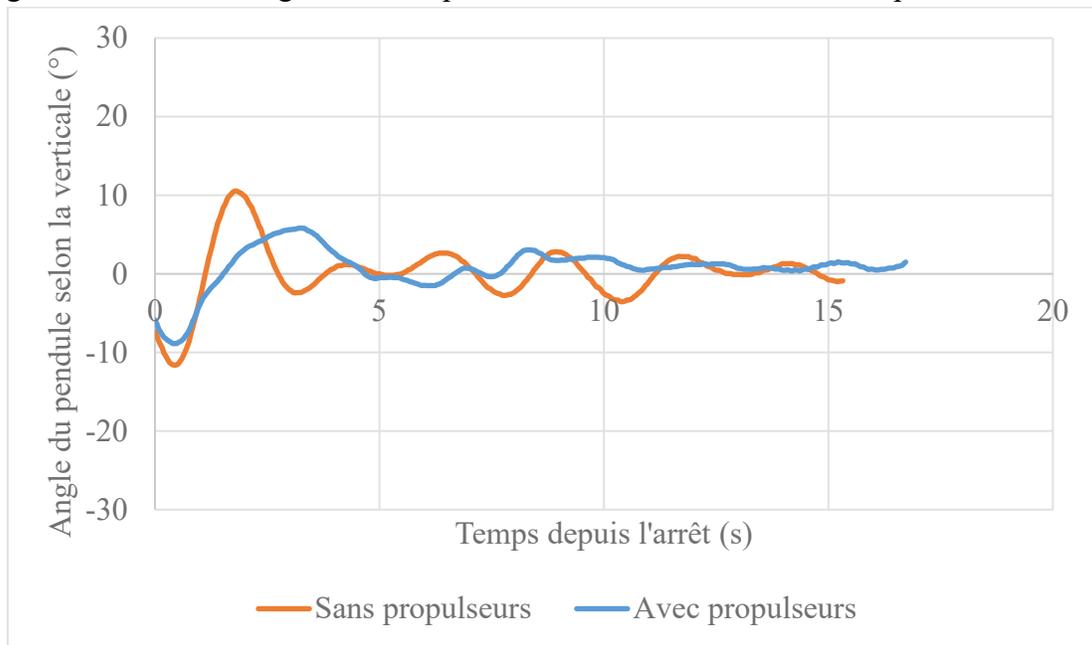


Figure 4.7 : Position angulaire de la perche lors d'un arrêt suivant un déplacement à 2 m/s

4.2 Modélisation du système

La preuve de concept a permis de valider que l'ajout de propulseurs avec un contrôleur basé sur l'ajout d'une force dissipative permet de stabiliser le système en 5 secondes. Ce contrôleur se fie

seulement sur les mesures de la centrale inertielle située sur l'outil. Il est intéressant de voir s'il est possible d'améliorer ces performances en conservant le même matériel, mais en utilisant un contrôleur avancé du type linéaire quadratique (LQR) qui utilise aussi les états du drone. Pour ce faire, la première étape consiste à bâtir un modèle représentatif du système réel en simulation. Ce modèle sera basé sur les propriétés physiques de l'outil DeLeaves actuel ainsi que sur la plateforme de drone DJI M200. Par la suite, ce modèle sera linéarisé afin de pouvoir concevoir le contrôleur LQR. La section 4.3 portera ensuite sur la conception du contrôleur puis la performance du système sera analysée à la section 4.4. Certains résultats des sections 4.2 à 4.4 portent sur mes propres travaux effectués lors du cours GMC733 *Commande avancée en mécanique*. [53]

Tout d'abord, la plateforme DJI M210 a été choisie, car l'outil DeLeaves est destiné à être utilisé avec ce drone, mais aussi parce qu'elle présente une particularité qui pose un défi supplémentaire. En effet, certains drones comme le M200 ont déjà des dispositifs (batteries, caméras...) installés à l'endroit où le pivot du pendule doit être positionné, soit le plus près possible du centre de masse du drone. Des essais préliminaires ont permis de constater que la position du point de pivot du pendule est importante. En effet, en descendant la position du pivot par rapport au centre de masse du drone, on peut rendre instable la dynamique de contrôle interne au drone. Comme il n'est pas possible de modifier la structure du contrôleur de la plupart des drones commerciaux, nous souhaitons donc aussi déterminer précisément comment la longueur de ce décalage affecte l'amortissement de l'oscillation (présenté à la section 4.4)

Le schéma présenté à la Figure 4.8 montre le système complet avec les différents paramètres. On y voit aussi les forces créées par les actuateurs, soit les quatre hélices du drone et le propulseur sur l'outil. Dû au fait que les mouvements sont souvent contrôlés séquentiellement dans chaque plan et par des soucis de simplicité, le système est modélisé seulement en 2D.

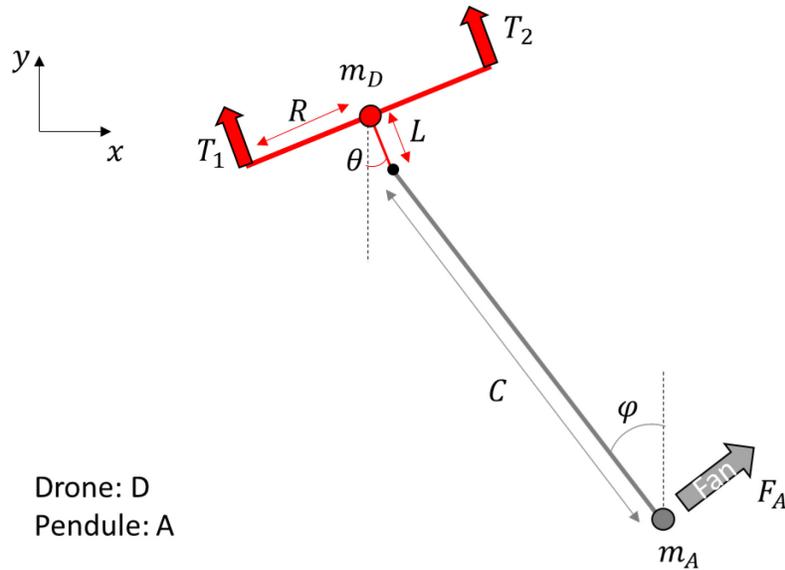


Figure 4.8 : Schématisation du système

Le Tableau 4.1 présente la valeur des paramètres du système. Ces paramètres sont utilisés pour générer le modèle initial.

Tableau 4.1 : Paramètres du système modélisé

Paramètre	Valeur
Décalage du point de pivot (L)	0.2 m
Rayon des membrures du drone (R)	0.345 m
Masse du drone (M_D)	3 kg
Masse du pendule (M_A)	1.15 kg
Inertie en rotation du drone (I_D)	0.025 kg m ²
Inertie en rotation du pendule (I_A)	0.09 kg m ²
Longueur du pendule (C)	2.6 m

L'inertie en rotation du pendule et du drone ont été validées expérimentalement. En suspendant l'outil et le drone à la manière d'un pendule bifilaire, il a été possible de mesurer la fréquence d'oscillation de ces systèmes et d'approximer par calcul la valeur de l'inertie selon cet axe.

4.2.1 Système non linéaire

Ce système planaire possède 4 degrés de liberté, soit la position en X et en Y du drone, l'angle du drone θ et l'angle du pendule φ . Ces quatre degrés de liberté et leur dérivé représentent les états du système, soit $x, \dot{x}, y, \dot{y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}$. Quant aux entrées du système, il s'agit des forces générées

par les actuateurs, soit T_1 , T_2 et F_A . Voici la démarche mathématique pour obtenir un système de 4 équations 4 inconnues avec ce système.

Tout d'abord, en appliquant les équations du mouvement linéaire/angularaire sur le drone, on obtient 3 équations avec 5 inconnus, soit \ddot{Y}_D , \ddot{X}_D , $\ddot{\theta}$ et F_1, F_2 (les forces de contact au pivot):

$$m_D \ddot{Y}_D = -F_2 + T_1 \cos \theta + T_2 \cos \theta - m_D g \quad (4.1)$$

$$m_D \ddot{X}_D = F_1 - T_1 \sin \theta - T_2 \sin \theta \quad (4.2)$$

$$I_D \ddot{\theta} = -T_1 R + T_2 R + F_1 L \cos \theta - F_2 L \sin \theta \quad (4.3)$$

En appliquant les équations du mouvement linéaire/angularaire sur le pendule autour de son centre de masse, on obtient 3 équations et on introduit 3 inconnus, soit \ddot{Y}_A , \ddot{X}_A et $\ddot{\varphi}$.

$$I_A \ddot{\varphi} = -F_2 C \sin \varphi + F_1 C \cos \varphi \quad (4.4)$$

$$m_A \ddot{Y}_A = F_2 + F_A \sin \varphi - m_A g \quad (4.5)$$

$$m_A \ddot{X}_A = -F_1 + F_A \cos \varphi \quad (4.6)$$

Nous avons maintenant 6 équations et 8 inconnus. Afin de résoudre ce système d'équations, on introduit les 2 équations suivantes issues des contraintes géométriques du pivot:

$$\ddot{X}_A = \ddot{X}_D + L \ddot{\theta} \cos \theta - L \dot{\theta}^2 \sin \theta + C \ddot{\varphi} \cos \varphi - C \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \quad (4.7)$$

$$\ddot{Y}_A = \ddot{Y}_D + L \ddot{\theta} \sin \theta + L \dot{\theta}^2 \cos \theta + C \ddot{\varphi} \sin \varphi + C \dot{\varphi}^2 \cos \varphi \quad (4.8)$$

Avec 8 équations et 8 inconnus, il est maintenant possible de remplacer les équations (4.7) et (4.8) dans (4.5) et (4.6) pour obtenir les deux équations suivantes :

$$F_1 = -m_A (\ddot{X}_D + L \ddot{\theta} \cos \theta - L \dot{\theta}^2 \sin \theta + C \ddot{\varphi} \cos \varphi - C \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) + F_A \cos \varphi \quad (4.9)$$

$$F_2 = m_A(\ddot{Y}_D + L\ddot{\theta} \sin \theta + L\dot{\theta}^2 \cos \theta + C\ddot{\varphi} \sin \varphi + C\dot{\varphi}^2 \cos \varphi) - F_A \sin \varphi + m_A g \quad (4.10)$$

On remplace ensuite les équations (4.9) et (4.10) dans les équations (4.1), (4.2), (4.3) et (4.4) pour avoir un système de 4 équations et 4 inconnues :

$$m_D \ddot{X}_D = -m_A(\ddot{X}_D + L\ddot{\theta} \cos \theta - L\dot{\theta}^2 \sin \theta + C\ddot{\varphi} \cos \varphi - C\dot{\varphi}^2 \sin \varphi) + F_A \cos \varphi - T_1 \theta - T_2 \theta \quad (4.11)$$

$$m_D \ddot{Y}_D = -(m_A(\ddot{Y}_D + L\ddot{\theta} \sin \theta + L\dot{\theta}^2 \cos \theta + C\ddot{\varphi} \sin \varphi + C\dot{\varphi}^2 \cos \varphi) - F_A \sin \varphi + m_A g) + T_1 + T_2 - m_D g \quad (4.12)$$

$$I_D \ddot{\theta} = -T_1 R + T_2 R - L \cos \theta (-m_A(\ddot{X}_D + L\ddot{\theta} \cos \theta - L\dot{\theta}^2 \sin \theta + C\ddot{\varphi} \cos \varphi - C\dot{\varphi}^2 \sin \varphi) + F_A \cos \varphi) - \sin \theta (m_A(\ddot{Y}_D + L\ddot{\theta} \sin \theta + L\dot{\theta}^2 \cos \theta + C\ddot{\varphi} \sin \varphi + C\dot{\varphi}^2 \cos \varphi) - F_A \sin \varphi + m_A g) \quad (4.13)$$

$$I_A \ddot{\varphi} = -C \sin \varphi (m_A(\ddot{Y}_D + L\ddot{\theta} \sin \theta + L\dot{\theta}^2 \cos \theta + C\ddot{\varphi} \sin \varphi + C\dot{\varphi}^2 \cos \varphi)) + C \cos \varphi (-m_A(\ddot{X}_D + L\ddot{\theta} \cos \theta - L\dot{\theta}^2 \sin \theta + C\ddot{\varphi} \cos \varphi - C\dot{\varphi}^2 \sin \varphi) + F_A \cos \varphi) \quad (4.14)$$

À l'aide de Matlab, il a été possible de résoudre ce système de 4 équations 4 inconnues pour obtenir les équations de \ddot{X}_D , \ddot{Y}_D , $\ddot{\varphi}$ et $\ddot{\theta}$ en utilisant une inversion symbolique de la matrice des coefficients des accélérations pour obtenir la matrice de coefficient des forces.

4.2.2 Linéarisation du système

Les stratégies de contrôle avancées de type LQR nécessitent d'abord de linéariser le système non-linéaire que nous avons obtenu. La linéarisation s'effectue autour du point d'équilibre de fonctionnement du système, soit un vol stationnaire. Voici donc la valeur des variables d'état à l'équilibre (X_e) ainsi que les entrées à l'équilibre (U_e):

$$x_e = x_{commandé}, \dot{x}_e = 0, y_e = y_{commandé}, \dot{y}_e = 0, \theta_e = 0, \dot{\theta}_e = 0, \varphi = 0, \dot{\varphi}_e = 0$$

Pour les entrées du système, les valeurs à l'équilibre compensent la gravité, soit :

$$T_{1e} = \frac{(m_D+m_A)g}{2}, T_{2e} = \frac{(m_D+m_A)g}{2}, F_{Ae} = 0$$

Ainsi, nous pouvons obtenir un modèle « State-Space » avec les matrices A, B, C suivantes où

$Z = X - X_e$ et $V = U - U_e$. La notation Z est utilisée pour différencier le système linéaire et le système non-linéaire (X):

$$\frac{dZ}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -13.28 & 0 & 3.47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -83.35 & 0 & 83.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16.68 & 0 & -16.68 & 0 & 0 \end{bmatrix} [Z] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.025 & -0.025 & 0.0079 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2410 & 0.2410 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -13.2005 & -13.2005 & 0.1889 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1.4571 & -1.4571 & 0.4591 \end{bmatrix} [v]$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [Z]$$

Avec le modèle dynamique linéarisé, il est maintenant possible d'appliquer la stratégie de contrôle LQR.

4.3 Contrôleur linéaire quadratique (LQR)

Afin de simplifier la conception du contrôleur LQR, la section suivante se fait en deux temps. Tout d'abord, on conçoit le régulateur qui commande les entrées du système avec un retour sur les états du système. Ensuite, on conçoit un observateur linéaire quadratique (LQE) qui estime les états du

système avec les « vraies » sorties des capteurs, en incluant le bruit et les perturbations externes de vent.

4.3.1 Contrôleur LQR par retour d'état

La structure du contrôleur est celle d'un « feedback », avec une consigne sur les états qu'on souhaite contrôler. Celle-ci est présentée à la Figure 4.9. Le système complet sur Simulink est présenté à l'Annexe A pour avoir une vue d'ensemble de la structure finale.

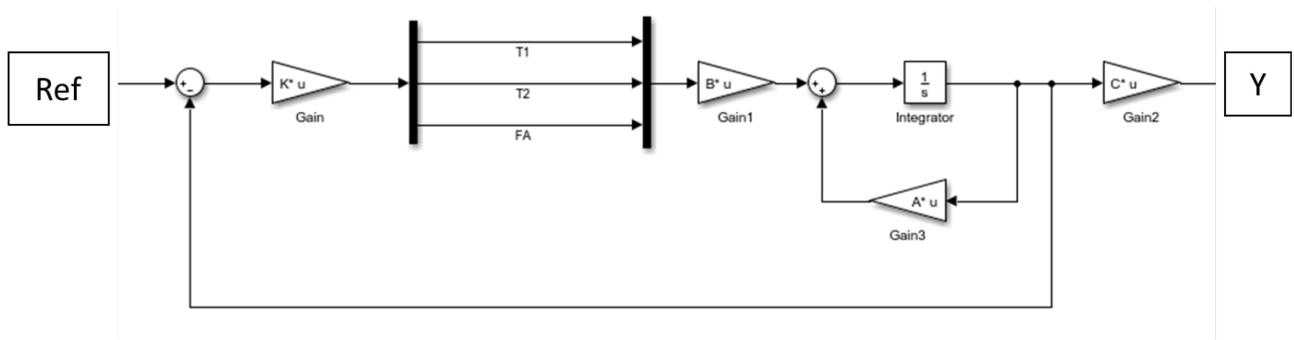


Figure 4.9 : Structure du contrôleur par retour d'état

Puisque le drone possède un contrôleur indépendant du contrôleur du pendule, on configure un premier régulateur qui affecte seulement les forces de poussée des hélices du drone (T1 et T2) pour simuler le contrôleur du drone. Ce premier régulateur K_d n'affecte donc pas le propulseur du pendule. Il a été déterminé avec les matrices Q_d et R_d suivantes.

$$Q_d = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_d = \rho \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\rho = 0.01$$

Dans la matrice Q_d , on impose un coût plus grand aux erreurs sur X (1,1) et Y (3,3) puisque ce sont ces états qu'on souhaite que le drone corrige. La position angulaire θ (5,5) ainsi que la vitesse

angulaire $\dot{\theta}$ (6,6) du drone ont un coût moindre puisque le drone doit effectuer des rotations dans le but de conserver sa position X et Y. Dans R_d , le coût de chaque hélice est égal. Le coefficient ρ a été ajusté pour diminuer le coût des actionneurs comparativement au coût de l'erreur. Avec la procédure LQR standard, on obtient la matrice K_d , avec des coefficients nuls dans les commandes envoyées au propulseur (3^e rangée) et sur les états du pendule (7^e et 8^e colonne).

$$K_d = \begin{bmatrix} -0.957 & -0.1994 & 110.284 & 33.623 & -7.583 & -1.600 & 0 & 0 \\ -1.790 & -1.557 & 110.454 & 33.645 & -5.685 & -0.205 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Par la suite, on conçoit le régulateur qui va affecter la commande du propulseur en se basant sur les états du drone et du pendule.

$$Q_p = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_p = \rho \begin{bmatrix} 1/40 & 0 & 0 \\ 0 & 1/40 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\rho = 0.01$$

Dans la matrice R_p , on ajuste le coût lié au propulseur par rapport aux hélices du drone en sachant que les propulseurs ont environ 1/40^e de la puissance de chaque hélice. La matrice K_p est ainsi générée et on s'intéresse seulement à la partie liée à l'actionnement du propulseur (3^e rangée).

$$K_p = \begin{bmatrix} -0.957 & -0.1994 & 110.284 & 33.623 & -7.583 & -1.600 & -37.355 & -3.904 \\ -1.790 & -1.557 & 110.454 & 33.645 & -5.685 & -0.205 & -33.308 & -4.383 \\ 4.4128 & 6.496 & -35.199 & -4.159 & -12.959 & 0.313 & 28.323 & 25.122 \end{bmatrix}$$

Enfin, on combine K_d et K_p pour bâtir la matrice K de gains du régulateur LQR. Avec la matrice K obtenue, le contrôleur LQR ne « voit » pas la perche pour contrôleur du drone et le contrôleur de perche voit tous les états du drone.

$$K = \begin{bmatrix} -0.957 & -0.1994 & 110.284 & 33.623 & -7.583 & -1.600 & 0 & 0 \\ -1.790 & -1.557 & 110.454 & 33.645 & -5.685 & -0.205 & 0 & 0 \\ 4.4128 & 6.496 & -35.199 & -4.159 & -12.959 & 0.313 & 28.323 & 25.122 \end{bmatrix}$$

Il est maintenant intéressant de regarder les performances obtenues lorsqu'on soumet le système au scénario de test, soit un déplacement horizontal du drone à 2 m/s. En premier lieu, la Figure 4.10 montre le comportement lorsqu'on désactive les commandes au propulseur pour voir comment se comporte le système sans stabilisation par propulseur. La valeur du décalage de la position du pivot (L) a été mise à 0 afin de comparer avec les performances du système actuel installé sous le Tarot 680 Pro. À noter qu'il s'agit d'un contrôleur optimal à retour d'état, donc l'incertitude des GPS sur la position en X n'est pas encore prise en compte.

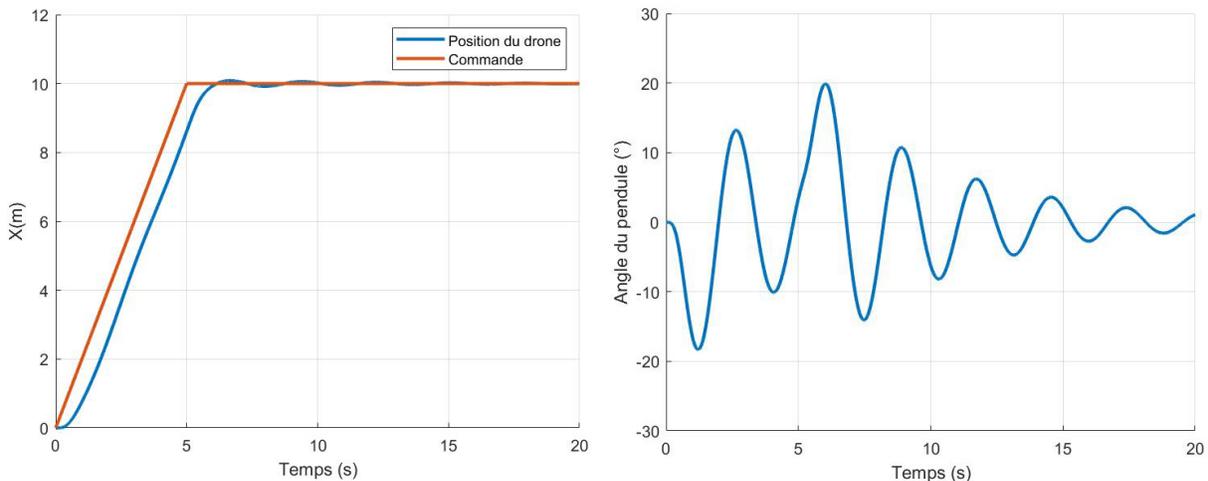


Figure 4.10 : Performance du retour d'état LQR sans stabilisation par propulseur. La position du drone en X (gauche) et l'angle du pendule (droite).

On obtient une bonne réponse du drone sur la position en X, mais on remarque une oscillation liée à l'oscillation du pendule qui n'est pas stabilisé rapidement. Maintenant, lorsqu'on active la stabilisation avec les propulseurs (dont la force de poussée a été modélisée selon les propulseurs utilisés dans la preuve de concept, avec une saturation à 2 N) on obtient la réponse montrée à la Figure 4.11.

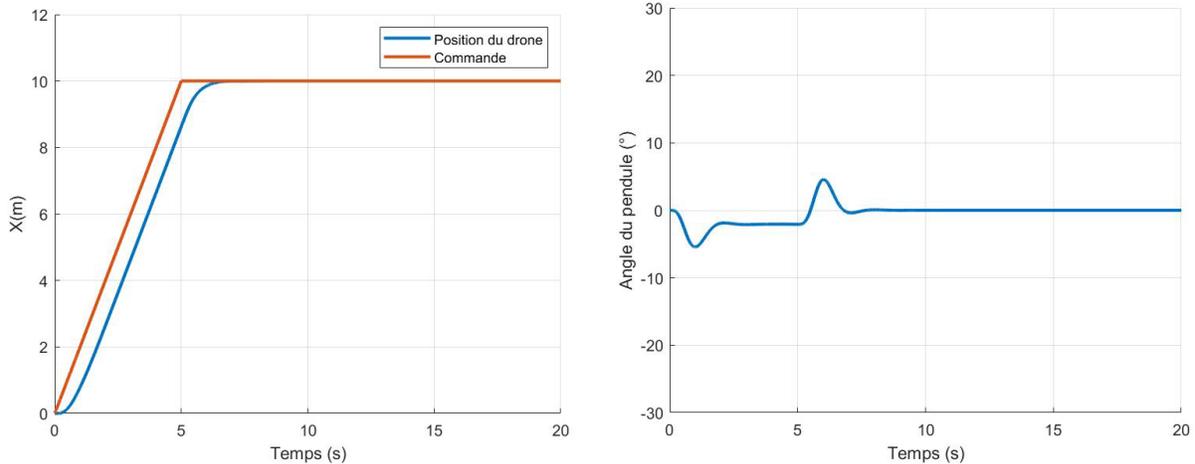


Figure 4.11: Performance du retour d'état LQR avec stabilisation par propulseur. La position du drone en X (gauche) et l'angle du pendule (droite).

On remarque que l'oscillation en régime permanent est éliminée et que le drone conserve ses performances. Le pendule atteint un angle maximal de 5° . Il s'agit de très bonnes performances, ce qui est attendu puisqu'il s'agit d'un modèle de retour d'état. En pratique, les états du drone seront extrapolés des capteurs qui sont plus ou moins bruités. C'est pourquoi il est nécessaire de concevoir un observateur et d'intégrer le bruit et l'incertitude des capteurs.

4.3.2 Ajout d'un observateur LQE

Pour le contrôle du système, nous allons nous fier à 4 capteurs présents soit sur le drone ou sur le pendule. Tout d'abord, nous avons les données de positionnement en X du drone via le GPS, l'altitude Y du drone avec le baromètre, la vitesse angulaire du drone à l'aide d'un gyroscope et la vitesse angulaire du pendule à l'aide d'un gyroscope sur le pendule. Bien sûr, cela demanderait d'envoyer les états du drone dans le contrôleur du pendule, ce qui est complexe en soit, mais faisable. Cela justifie la matrice C du système montré précédemment. C'est à ce moment qu'on introduit le bruit des capteurs et la perturbation du vent :

Bruits de mesure:

GPS X: ± 0.05 m, fréq. acquisition = 20 Hz

Baromètre Y: ± 0.05 m, fréq. acquisition = 100 Hz

Gyroscope θ : ± 0.005 rad/s, fréq. acquisition = 100 Hz

Gyroscope φ : ± 0.005 rad/s, fréq. acquisition = 100 Hz

Perturbations:

Vent latéral, accélérations ± 0.1 m/s², fréq. 1 Hz

L'implémentation d'un observateur LQE est maintenant nécessaire pour estimer tous les états du système selon les données obtenues des capteurs. Ayant une bonne connaissance de notre système, nous sommes en mesure de régler les matrices Q_e et R_e pour avoir la meilleure performance possible.

$$Q_e = \rho \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_e = \begin{bmatrix} 0.05^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.005^2 \end{bmatrix}$$

$$\rho = 10^{-8}$$

Le coefficient ρ est ajusté pour donner plus de poids au modèle dynamique puisque le bruit des capteurs fait en sorte qu'on ne peut pas trop se fier sur ceux-ci. De plus, les coefficients la matrice R_e ont un sens physique puisqu'ils représentent la covariance du bruit des capteurs. Nous obtenons ainsi la matrice de gain K_e transposée suivante :

$$K_e' = \begin{bmatrix} -0.4852 & -0.6323 & 0 & 0 & 0.0398 & -0.1817 & 0.0391 & 0.0598 \\ -0.4827 & -0.5300 & 0 & 0 & 0.0398 & 0.08737 & 0.0423 & -0.1817 \\ 0 & 0 & -0.1126 & 0.0063 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.2354 & 0.7654 & 0 & 0 & -0.0281 & -0.0048 & -0.0281 & -0.0048 \end{bmatrix}$$

Les performances obtenues sont présentées à la Figure 4.12. On obtient un bon filtrage du bruit et la position en X du drone est stable. On peut observer l'effet du vent sur le système, notamment

l'angle du pendule, qui oscille de $\pm 2^\circ$ au repos. La structure de l'observateur est présente dans le Simulink complet du système à l'annexe A. Une analyse plus détaillée des performances obtenues suit dans la prochaine section.

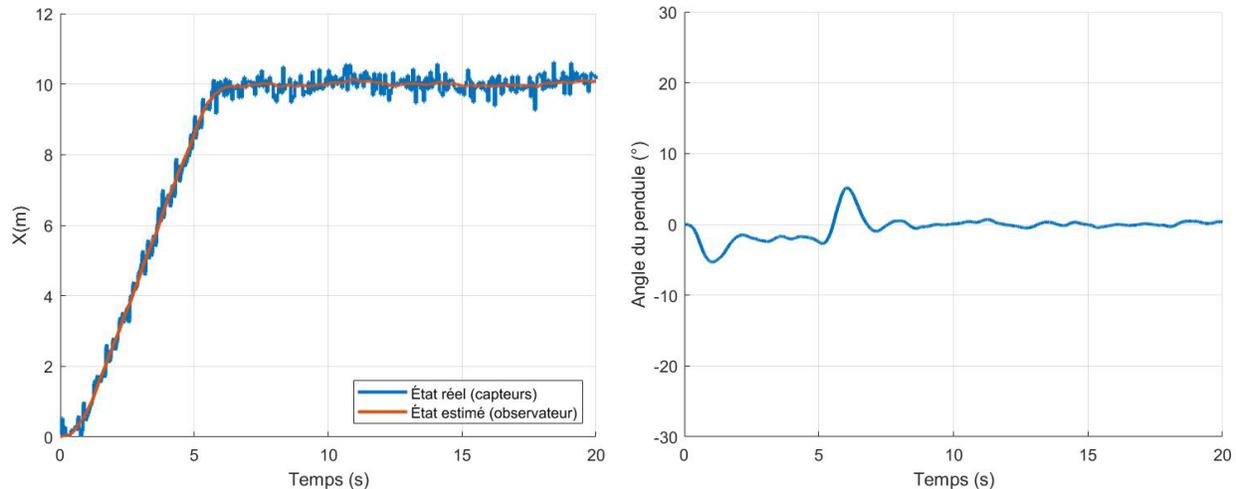


Figure 4.12 : Système en retour de sortie avec l'observateur LQE avec la stabilisation La position du drone en X (gauche) et l'angle du pendule (droite).

4.4 Évaluation de la performance du contrôleur LQR

Maintenant que le modèle est complet et que le contrôleur LQR a été conçu, il est intéressant d'utiliser cet outil de simulation à son plein potentiel. Tout d'abord, une analyse des performances en faisant varier plusieurs paramètres du système sera effectuée pour quantifier la robustesse du contrôleur. De plus, il sera possible de quantifier l'impact de la variation du décalage du point de pivot sur un système qui n'est pas muni de propulseurs pour la stabilisation. Enfin, il sera discuté du potentiel d'application de ce contrôleur sur l'outil DeLeaves.

4.4.1 Analyse de robustesse

Afin de quantifier la robustesse du système, une étude de l'influence des variations paramétriques du système a été faite. Comme tout système mécanique, celui-ci est voué à évoluer au fil du temps. Par exemple, il serait possible par exemple qu'une plus longue perche soit utilisée pour atteindre des branches situées plus bas dans un arbre. Il est donc important de caractériser l'impact de différents paramètres. Ces paramètres ciblés sont la masse du pendule, la longueur de celui-ci et la position du point de pivot. Le Tableau 4.2 montre les paramètres affectés et leur plage d'incertitude.

Tableau 4.2 : Incertitude sur des paramètres du système

Paramètre	Variation
Décalage du point de pivot (L)	0.0 m à 0.4 m
Masse du pendule (M_A)	1.0 kg à 1.5 kg
Longueur du pendule (C)	1.5 m à 3 m

Une première analyse a donc été faite sur un échantillon de 50 cas avec une variation aléatoire des paramètres parmi leur plage d'incertitude. Les deux scénarios, avec la stabilisation par propulseur et sans celle-ci, ont été simulés et compilés. La Figure 4.13 montre ces résultats.

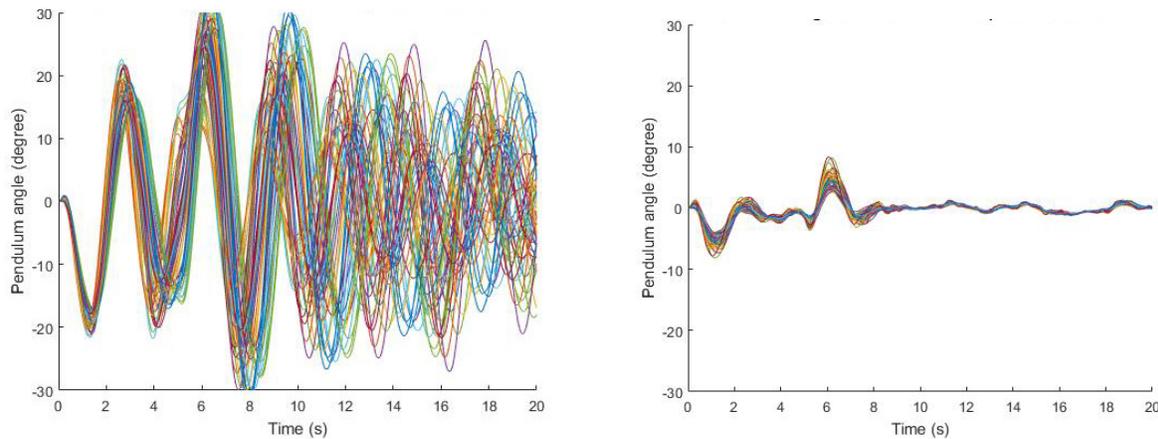


Figure 4.13 : Angle du pendule avec une variation paramétrique sans stabilisation (gauche) et avec stabilisation (droite) pour un déplacement de 10 m à 2 m/s

La Figure 4.14 le montre les performances obtenues. On constate que le système conserve son niveau de performance malgré l'incertitude paramétrique. L'amplitude du premier pic positif d'oscillation augmente légèrement pour atteindre 8° dans le pire cas, ce qui est équivalent aux résultats obtenus dans la preuve de concept. Le système se stabilise maintenant en 3 secondes.

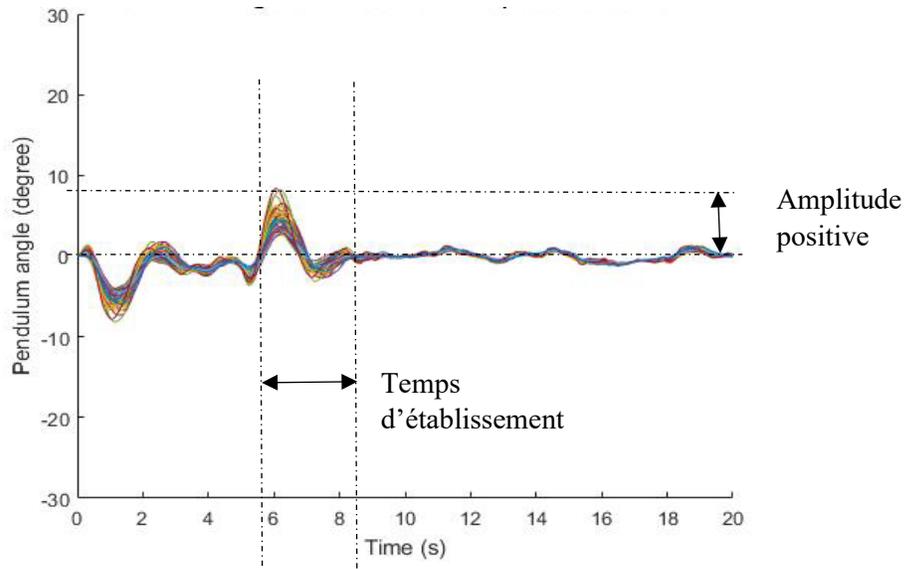


Figure 4.14 Analyse des objectifs initiaux sur le contrôleur LQR

4.4.2 Analyse du positionnement du point de pivot

Une deuxième analyse a été faite spécifiquement pour quantifier l'impact de la position du point de pivot dans le cas où il n'y a pas de système de stabilisation. Les résultats montrent que l'oscillation s'atténue moins rapidement lorsque la position du pivot est éloignée du centre de masse du drone. La Figure 4.15 suivante montre les simulations faites sur un pivot situé au centre de masse, puis décalé par incréments de 0.1 m jusqu'à 0.5 m. On voit que ce paramètre est bel et bien important pour la stabilisation passive de l'oscillation de l'outil en vol. Malheureusement, on obtient une singularité dans les équations lorsqu'on impose une valeur négative de décalage ce qui empêche d'analyser le comportement dans ce cas. Il serait possible d'estimer qu'un petit décalage négatif aiderait la stabilité du système. Toutefois, la force de gravité du pendule exercerait maintenant un couple dans le même sens que la rotation du drone. Si on augmente trop le bras de levier de ce couple, il pourrait y avoir des conséquences sur la dynamique de rotation du drone. Plus d'expérimentations permettraient de quantifier cet effet.

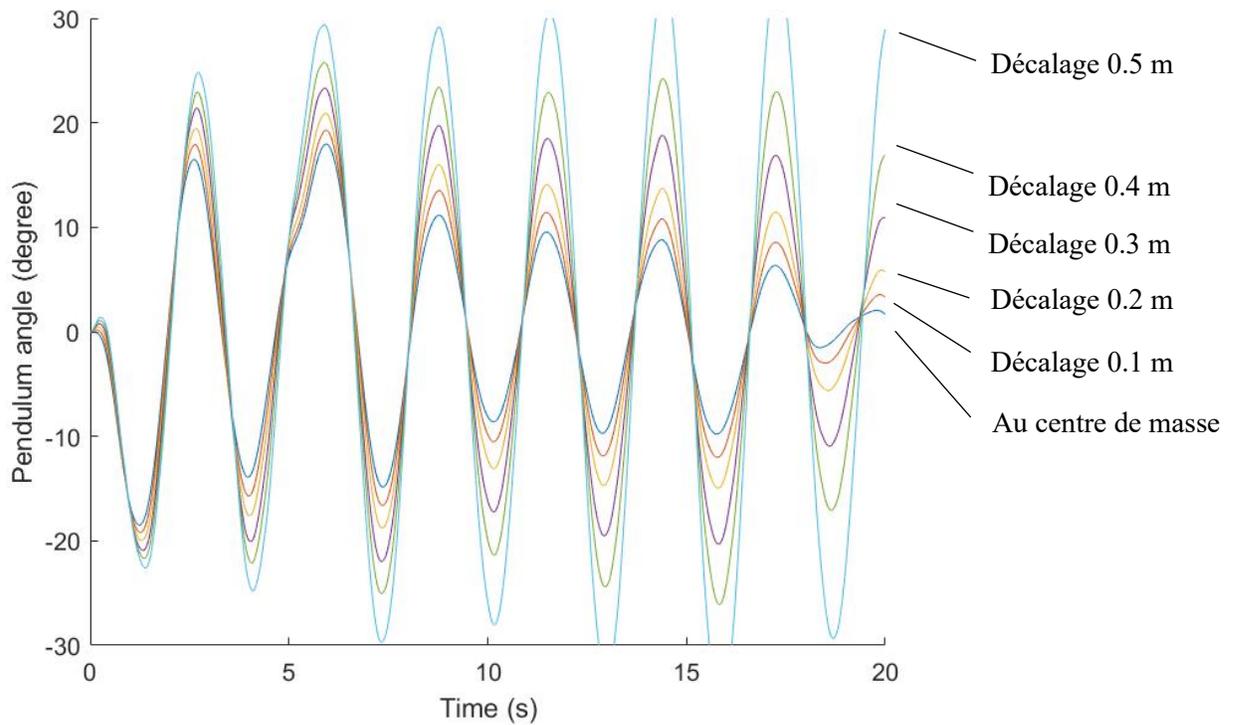


Figure 4.15 : Angle du pendule avec une variation du décalage du point de pivot sans stabilisation pour un déplacement de 10 m à 2 m/s

Afin de remédier à la problématique du point de pivot décalé vers le bas, un adaptateur a spécifiquement été conçu pour attacher l’outil sous un M200 en conservant l’axe du pivot au centre de masse du drone. Cet adaptateur est montré à la Figure 4.16 suivante.

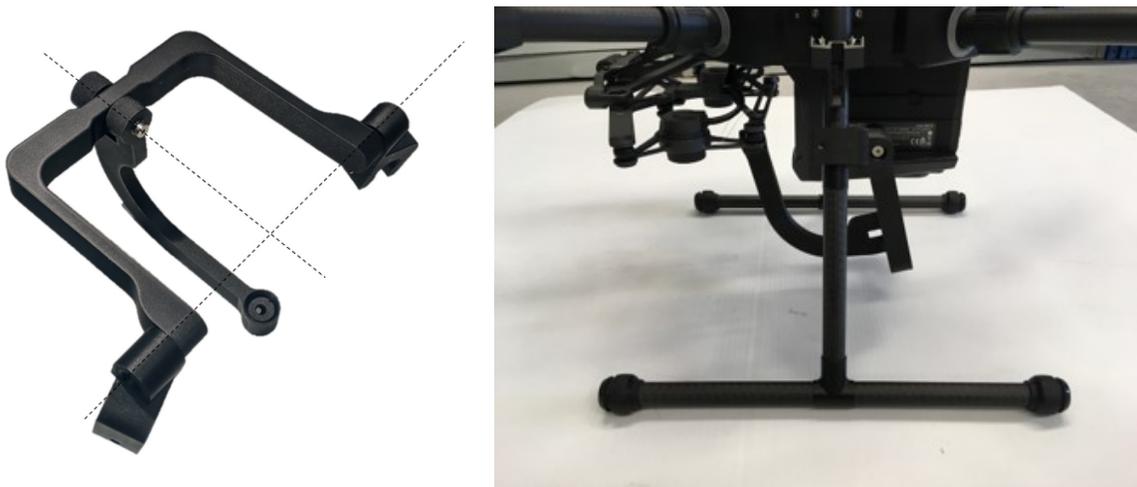


Figure 4.16 : Adaptateur pour l’installation de l’outil DeLeaves sur le DJI M200

4.4.3 Interprétation des résultats

En somme, le système présente une bonne robustesse malgré les perturbations, les bruits de mesure et l'incertitude paramétrique. Il est possible de quantifier les performances du contrôleur développé comparativement à celles obtenues dans la preuve de concept initiale. Le temps d'établissement est passé de 5 secondes à 3 secondes. De plus, l'amplitude d'angle maximale atteinte est de 5° , comparativement à 8° obtenu lors des essais expérimentaux. Si on regarde notre objectif initial de stabiliser l'outil en moins de 5 secondes, celui-ci est atteint par la preuve de concept et est dépassé par le contrôleur LQR qui stabilise l'outil en 3 secondes.

Il est à se questionner si l'amélioration du temps d'établissement à 3 secondes et une diminution de 5° d'amplitude sont valables compte tenu de la complexité supplémentaire qu'apporte le contrôleur optimisé. En effet, ce contrôleur nécessite d'avoir accès aux données GPS du drone et à sa vitesse angulaire pour estimer l'état du système en entier ce qui risque d'être complexe à implémenter sur l'outil. Toutefois, ces performances ont été montrées théoriquement et pourront peut-être servir dans une application future nécessitant une stabilisation optimale. De plus, la compréhension de l'effet du décalage du point de pivot a permis de développer un adaptateur passif pour réduire cet impact sur le drone DJI M200. De futurs travaux portent sur l'implémentation de ce contrôleur sur l'outil DeLeaves et son utilisation en contexte réel d'échantillonnage pour atteindre des plantes sur les falaises.

5. CONCLUSION

Au terme du projet de maîtrise, des avancées majeures ont été effectuées pour concevoir l'outil DeLeaves et faire en sorte que celui-ci soit utilisé dans plusieurs environnements différents. Le système DeLeaves a permis d'effectuer l'échantillonnage d'arbre de manière efficace en récoltant des branches situées dans la canopée des forêts (c.-à-d., < 25 mm de diamètre, < 500 g, toutes orientations). Quatre différentes campagnes d'échantillonnages utilisant l'outil DeLeaves dans des contextes d'échantillonnages réels ont été présentées. Jusqu'à présent, l'outil DeLeaves a récolté plus de 250 échantillons sur plus de 20 espèces d'arbres différentes en un temps moyen de 6 minutes. Ces résultats démontrent clairement le potentiel de l'échantillonnage d'arbre à l'aide de UAV pour permettre et faciliter considérablement des applications clés en foresterie, en botanique et en écologie.

Les multiples démonstrations et vidéos accumulées lors des différentes campagnes d'échantillonnage répondent donc à la question de recherche initiale: est-il possible de concevoir un drone échantillonneur pouvant récolter des branches à la cime de diverses espèces d'arbres de manière rapide et répétitive?

L'expérience acquise à opérer le système a permis de conclure que le mouvement d'oscillation engendré par la suspension de l'outil sous le drone complexifie grandement l'opération. De ce fait, l'annulation du mouvement de pendule rendra le pilotage du drone et l'approche de la branche plus faciles. Une preuve de concept préliminaire a démontré qu'un système de stabilisation par propulseurs d'une masse de 128 g permet de stabiliser l'outil en moins de 5 s à la suite d'un arrêt de déplacement du drone. Les amplitudes d'oscillation maximales sont aussi réduites de 16° à 8°. En utilisant des stratégies de contrôle avancées, il serait théoriquement possible de stabiliser le système en moins de 3 s et de réduire les amplitudes maximales d'oscillation à 5°. Il s'agit de performances au-delà des objectifs initiaux, mais il est toutefois permis de se questionner si les gains en performance justifient l'ajout de complexité pour des applications réelles.

Le modèle développé a également permis de démontrer que la position du point de pivot par rapport au centre de masse du drone influence la stabilisation de l'oscillation, jusqu'au point de rendre le système complètement instable. Une stratégie de stabilisation passive a ainsi été développée en

utilisant un adaptateur qui pivote autour du centre de masse du drone sans interférer avec les batteries du M210.

Enfin, l'utilisation de propulseurs sur la perche a permis de découvrir l'avantage de propulser l'outil vers l'avant pour faciliter la capture de la branche. Le montage expérimental a permis de démontrer une portée d'environ 80 cm grâce à cette fonctionnalité. Les travaux futurs prévoient l'implémentation de ce contrôleur sur un système DeLeaves et son essai en contexte réel d'échantillonnage.

6. LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] J. Berni JA, Zarco-Tejada P, Suárez L, Fereres E. Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. vol. 47. 2009. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>.
- [2] Nyberg B. Drone Technology Leads to Plant Discoveries at Limahuli Garden & Preserve | National Tropical Botanical Garden 2018. <https://ntbg.org/news/rare-plant-discoveries> (accessed March 22, 2019).
- [3] Anderson K, Gaston KJ. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2013;11:138–46. <https://doi.org/10.1890/120150>.
- [4] Portlock FT. A field guide to collecting cones of British Columbia conifers. Victoria, B.C.: Canadian Forest Service; 1996.
- [5] Quirós G. Giant Sequoias Struggle with Drought. *QUEST* 2015. <https://ww2.kqed.org/quest/2015/11/17/giant-sequoias-struggle-with-drought/> (accessed January 17, 2020).
- [6] KAKOBA Canopy Crane | Papua New Guinea n.d. <http://baloun.entu.cas.cz/png/crane/> (accessed January 17, 2020).
- [7] Hall. Francis Hallé et le Radeau des Cimes. *Reforest Action* 2017. <https://www.reforestaction.com/blog/francis-halle-et-le-radeau-des-cimes> (accessed January 17, 2020).
- [8] Coyle DR, Coleman MD. Forest production responses to irrigation and fertilization are not explained by shifts in allocation. *Forest Ecology and Management* 2005;208:137–52. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.11.022>.
- [9] Grattapaglia D, Resende MDV. Genomic selection in forest tree breeding. *Tree Genetics & Genomes* 2011;7:241–55. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0328-4>.
- [10] Schlanger Z. The botanists' last stand: The daring work of saving the last samples of dying species. *Quartz* n.d. <https://qz.com/1007400/the-botanists-last-stand-the-daring-work-of-saving-the-last-samples-of-dying-species/> (accessed March 22, 2019).
- [11] Ore J-P, Elbaum S, Burgin A, Detweiler C. Autonomous aerial water sampling. *Journal of Field Robotics* 2015;32:1095–1113.
- [12] Pirotta V, Smith A, Ostrowski M, Russell D, Jonsen ID, Grech A, et al. An Economical Custom-Built Drone for Assessing Whale Health. *Front Mar Sci* 2017;4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00425>.
- [13] Rossi M, Brunelli D, Adami A, Lorenzelli L, Menna F, Remondino F. Gas-drone: Portable gas sensing system on UAVs for gas leakage localization. *SENSORS, 2014 IEEE, IEEE; 2014*, p. 1431–1434.
- [14] Hyneman J. Jamie Hyneman's "Arborist" Quadcopter Test. *Tested* 2015. <https://www.tested.com/art/makers/518883-jamie-hynemans-arborist-quadcopter-test/> (accessed January 17, 2020).
- [15] Colin C. How Mythbuster Jamie Hyneman Hacked a Drone to Trim His Trees. *Popular Mechanics* 2017. <https://www.popularmechanics.com/flight/drones/a26102/jamie-hyneman-drone-plants/> (accessed January 17, 2020).
- [16] Sampler Drones for Forestry Reseach. UC Berkeley Forest Pathology and Mycology Lab 2015. <https://nature.berkeley.edu/garbelottowp/?p=1801> (accessed January 17, 2020).

-
- [17] Bailey W, Bryce M, James F, Davitt M, Colin A. Sampler Drone | Engineering Capstone | College of Engineering | UC Santa Barbara n.d. <https://capstone.engineering.ucsb.edu/projects/dantonio-and-oono-labs-sampler-drone> (accessed January 17, 2020).
- [18] Finžgar D, Bajc M, Brezovar J, Kladnik A, Capuder R, Kraigher H. Development of a patented unmanned aerial vehicle based system for tree canopy sampling. *Folia Biologica et Geologica* 2016;57:35–9. <https://doi.org/10.3986/fbg0009>.
- [19] Bajc M. Remotely controlled apparatus for taking samples in treetops. DE102016110821A1, 2017.
- [20] Käslin F, Baur T, Meier P, Koller P, Buchmann N, D’Odorico P, et al. Novel Twig Sampling Method by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Frontiers in Forests and Global Change* 2018;1:2. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00002>.
- [21] Watkins TC, Sinacori JB, Kesler DF. Stabilization of Externally Slung Helicopter Loads. NORTHROP CORP HAWTHORNE CA ELECTRONICS DIV; 1974.
- [22] Palunko I, Cruz P, Fierro R. Agile Load Transportation : Safe and Efficient Load Manipulation with Aerial Robots. *IEEE Robotics Automation Magazine* 2012;19:69–79. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2205617>.
- [23] Faust A, Palunko I, Cruz P, Fierro R, Tapia L. Learning swing-free trajectories for UAVs with a suspended load. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, p. 4902–9. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631277>.
- [24] Sreenath K, Lee T, Kumar V. Geometric control and differential flatness of a quadrotor UAV with a cable-suspended load. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2013, p. 2269–74. <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760219>.
- [25] Sreenath K, Michael N, Kumar V. Trajectory generation and control of a quadrotor with a cable-suspended load - A differentially-flat hybrid system. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, p. 4888–95. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631275>.
- [26] the LSS – Vita Inclinata Technologies n.d. <https://vitatech.co/lss-2/> (accessed April 9, 2019).
- [27] Buchmueller D, III LLL, Jr JE, Koller SE, Riehl EA, Walker TB. Stabilized airborne drop delivery. US9688404B1, 2017.
- [28] Wing MG, Burnett J, Sessions J, Brungardt J, Cordell V, Dobler D, et al. Eyes in the Sky: Remote Sensing Technology Development Using Small Unmanned Aircraft Systems. *J For* 2013;111:341–7. <https://doi.org/10.5849/jof.12-117>.
- [29] Tang L, Shao G. Drone remote sensing for forestry research and practices. *J For Res* 2015;26:791–7. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>.
- [30] Paneque-Galvez J, McCall MK, Napoletano BM, Wich S. Small drones for community-based forest monitoring: an assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests* 2014;5:1481–507. <https://doi.org/10.3390/f5061481>.
- [31] Getzin S, Wiegand K, Schöning I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution* 2012;3:397–404. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00158.x>.
- [32] Getzin S, Nuske R, Wiegand K. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to Quantify Spatial Gap Patterns in Forests. *Remote Sensing* 2014;6:6988–7004. <https://doi.org/10.3390/rs6086988>.
- [33] Dunford R, Michel K, Gagnage M, Piégay H, Trémelo M-L. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing* 2009;30:4915–35. <https://doi.org/10.1080/01431160903023025>.

-
- [34] Sharma RC, Kajiwara K, Honda Y. Estimation of forest canopy structural parameters using kernel-driven bi-directional reflectance model based multi-angular vegetation indices 2013.
- [35] Gini R, Passoni D, Pinto L, Sona G. Use of Unmanned Aerial Systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing* 2014;47:251–69. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20144716>.
- [36] Stanton B, Eaton J, Johnson J, Rice D, Schuette B, Moser B. Hybrid Poplar in the Pacific Northwest: The Effects of Market-Driven Management. *J For* 2002;100:28–33. <https://doi.org/10.1093/jof/100.4.28>.
- [37] Christersson L. Biomass production of intensively grown poplars in the southernmost part of Sweden: Observations of characters, traits and growth potential. *Biomass and Bioenergy* 2006;30:497–508. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.10.003>.
- [38] González-García S, Moreira MT, Dias AC, Mola-Yudego B. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: environmental and energy profiles. *Journal of Cleaner Production* 2014;66:188–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.067>.
- [39] Weetman GF, Wells CG. Plant analyses as an aid in fertilizing forests. *Plant Analyses as an Aid in Fertilizing Forests* 1990.
- [40] Clevers JGPW, Kooistra L, Schaepman ME. Estimating canopy water content using hyperspectral remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2010;12:119–25. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.01.007>.
- [41] Inoue Y, Guérif M, Frederic B, Skidmore A, Gitelson A, Schlerf M, et al. Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: A comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation. *Plant, Cell & Environment* 2016;39. <https://doi.org/10.1111/pce.12815>.
- [42] Schweiger AK, Lussier Desbiens A, Charron G, La Vigne H, Laliberté É. Uas-based foliar sampling reveals spectral and functional differences within tree crowns. *Canadian Journal of Forest Research* 2020.
- [43] Clevers JGPW, Kooistra L. Using Hyperspectral Remote Sensing Data for Retrieving Canopy Chlorophyll and Nitrogen Content. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2012;5:574–83. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2011.2176468>.
- [44] Sammons L. Going Out on a Limb with a New Canopy Sampling Method | NSF NEON | Open Data to Understand our Ecosystems 2019. <https://www.neonscience.org/observatory/observatory-blog/going-out-limb-new-canopy-sampling-method> (accessed January 17, 2020).
- [45] Justice D. Exploring the Rooftop of Vietnam | UBC Botanical Garden 2017. <https://botanicalgarden.ubc.ca/exploring-the-rooftop-of-vietnam/> (accessed January 17, 2020).
- [46] Justice D. Trekking in the Mountains of Northern Vietnam | UBC Botanical Garden 2018. <https://botanicalgarden.ubc.ca/trekking-in-the-mountains-of-northern-vietnam/> (accessed January 17, 2020).
- [47] Jackman W. Reconnaissance Biogeochemical Survey using Spruce-Tops in the West Road (Blackwater) River Area, Fraser Plateau, British Columbia GBCR 2016-05. *Geoscience* 2016. <http://www.geosciencebc.com/reports/gbcr-2016-05/> (accessed January 17, 2020).
- [48] Stork NE. Australian tropical forest canopy crane: New tools for new frontiers. *Austral Ecology* 2007;32:4–9. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01740.x>.
- [49] Basset Y, Kitching R, Miller S, Novotny V. *Arthropods of Tropical Forests: Spatio-Temporal Dynamics and Resource Use in the Canopy*. Cambridge University Press; 2003.

-
- [50]The Tru-Shot Line Throw Line Launcher || WesSpur n.d. <http://www.wesspur.com/items/thr301.html> (accessed January 24, 2020).
- [51]Weintraub S, Hinckley E. TOS PROTOCOL AND PROCEDURE: CANOPY FOLIAGE SAMPLING rev F 2019:102.
- [52]Asner G, Martin R. Spectranomics: Emerging science and conservation opportunities at the interface of biodiversity and remote sensing. *Global Ecology and Conservation* 2016;8:212–9. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.09.010>.
- [53]Charron G. Contrôle d'un pendule avec point de pivot décalé sous un drone. Université de Sherbrooke 2019.
- [54]Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor. Adafruit Learning System n.d. <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/overview> (accessed January 21, 2020).

Annexe A – Modèle Simulink du système

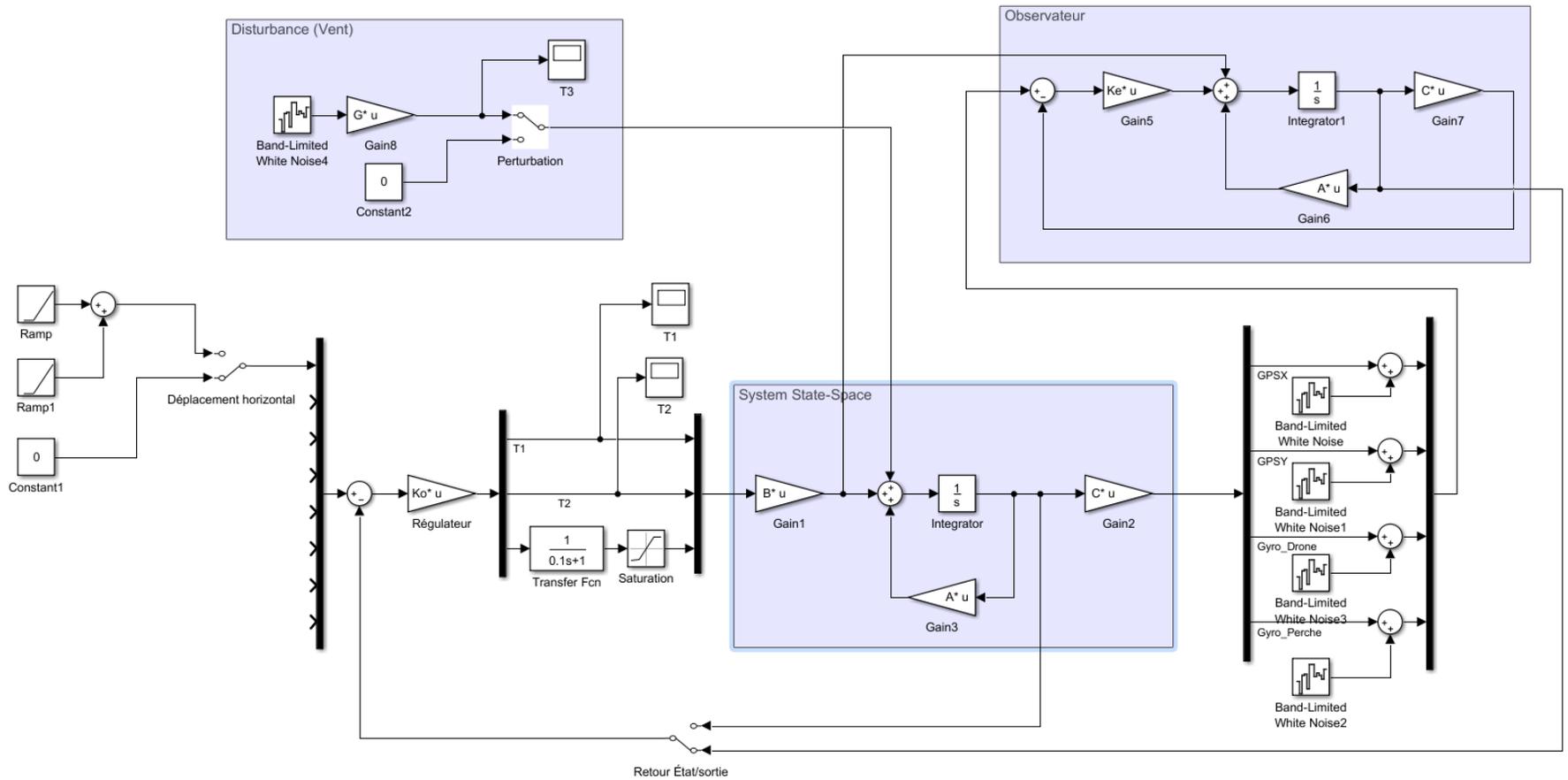


Figure A.0.1 : Modèle Simulink du système