

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Développement et évaluation d'une stratégie
d'atterrissage pour drones semi-autonomes
sur des lignes électriques dans diverses
conditions de vent

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Étienne Gendron

Sherbrooke (Québec) Canada

Juin 2023

MEMBRES DU JURY

Alexandre Girard

Directeur

David Rancourt

Codirecteur

Alexis Lussier-Desbiens

Évaluateur

Philippe Hamelin

Évaluateur

RÉSUMÉ

Au cours des dernières années, le recours aux drones pour l'inspection des lignes électriques à haute tension s'est répandu en raison de leur efficacité, de leur rentabilité et de leur capacité à atteindre des zones autrement inaccessibles. Cependant, faire atterrir en toute sécurité ces drones sur les lignes électriques, notamment dans des conditions venteuses, constitue un défi majeur. Cette recherche présente un modèle de contrôle semi-autonome pour permettre l'atterrissage sur une ligne électrique à l'aide de la plateforme NADILE (une plate-forme de développement pour l'atterrissage autonome) et évalue le fonctionnement dans différentes conditions de vent. L'analyse de la probabilité de réussite de l'atterrissage en fonction de l'état initial du drone a été effectuée à l'aide de la méthode de Monte Carlo. Les performances du système ont été évaluées pour deux stratégies d'atterrissage différentes (atterrissage direct et atterrissage avec alignement), divers paramètres de contrôle, et quatre niveaux de vent entre 5 km/h et 20 km/h. Les résultats ont montré qu'une stratégie d'atterrissage en deux étapes donne de meilleures chances de réussite de l'atterrissage et fournissent des indications précieuses sur les paramètres de contrôle optimaux et le niveau maximal de vent pour lequel le système est fiable. Une démonstration expérimentale de l'atterrissage autonome du système sur une ligne électrique a également été réalisée.

Mots-clés : Drones, Lignes électriques à haute tension, Atterrissage, semi-autonome, Contrôle

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
1.1	Mise en contexte et problématique	1
1.2	Définition et objectif du projet de recherche	2
1.3	Contributions originales	3
1.4	Plan du mémoire	3
2	Revue de littérature	5
2.1	Inspection de lignes électriques	5
2.2	L'inspection robotisée des lignes électriques	6
2.3	Interaction avec le câble à haute tension	7
2.4	Le LineDrone	8
2.5	Atterrissage sur conducteurs	9
2.6	Résumé de l'état de l'art	10
3	Article	13
3.1	Avant-propos	13
3.2	Article :	14
3.3	Introduction	14
3.4	States of the art	16
3.5	Methodology	18
3.5.1	Stochastic wind model	22
3.5.2	Dynamic	23
3.5.3	Landing envelope evaluation	27
3.6	Results	30
3.6.1	Gains evaluation results	30
3.6.2	Wind evaluation results	31
3.6.3	Strategies comparison	32
3.7	Field demonstration	34
3.7.1	Experimental setup	34
3.7.2	Experimental results	35
3.8	Conclusion	36
3.8.1	Acknowledgments	37
3.8.2	Competing interests statement	37
3.8.3	Data availability	37
3.8.4	Author contributions	37
3.8.5	Funding	38
3.8.6	Data availability statement	38
4	Conclusion	39

LISTE DES FIGURES

1.1	Prototype V1 de LineDrone [11]	2
2.1	Robots suspendus	6
2.2	Inspection des défauts d'isolateurs	7
2.3	Passage d'obstacle [22]	7
2.4	Drones Hybrides	8
2.5	LineDrone V1[21]	9
3.1	Drone NADILE in flight	16
3.2	NADILE during landing on un-energized power lines mockup, in a), b) and c) it's difficult to say if the drone is aligned with the electric cable. d) shows clearly the drone on cable.	17
3.3	Difficult operating areas such, a) shrubs below the lines[43], b) mountainous terrain [3] and c) power-lines river crossing [15].	18
3.4	Methodology overview	19
3.5	Landing zones around cable with both landing strategies (TSLs and DLS)	20
3.6	Landing flow chart from start position to land on cable	21
3.7	The custom HLPC takes position errors as input and provides velocity commands to the LLFC.	22
3.8	3.5 m/s wind samples generated by the Von Kármán wind generator	23
3.9	Model flow chart for dynamic simulations	24
3.10	Aerodynamic effects of airspeed on a multirotor drone propeller considering a fixed rpm. From left to right : the increase in thrust with changes in lateral airspeed, the increase in the pitching and rolling moments with changes in lateral airspeed and the change (positive or negative) of the thrust depending of the sign of the axial airspeed.	25
3.11	Total thrust (left) and total Z axis (shaft) torque vs motors' command generated by using the trained functions compared to the experimental data in wind tunnel. The graphs shown were obtained for a 0 m/s airspeed and 0° angle of attack.	26
3.12	Computer fluid analysis of the drone structure drag. On the left, is the simplified 3D model used for the analysis and on the right, is a section view with the wind speed contour around the drone for a 6 m/s wind.	27
3.13	Free body model of the drone and applied forces/torques for the rigid body dynamic.	28
3.14	Legs zone for cable validation	29
3.15	The success maps from the evaluation of controller gains are as follows : in a), low gains result in a very restricted success zone. In b), slightly increasing the PD gains to (0.5,0.1) slightly widens the success zone. In c), the success zone is considerably broad with PD gains of (1,0.5). However, in d), high PD gains of (5,3) reduce the chances of success.	31

3.16	Time response of the drone's lateral position relative to the cable for PD gains at 10 km/h, starting from -0.7 m laterally and at an altitude of 2 m.	32
3.17	Maps of success in lateral wind from a) 5km/h, b) 10km/h, c) 15km/h and d) 20km/h can be merged in e) and can define the "intermediate target position zone" for alignment before landing	33
3.18	Success maps of landing strategies at 10km/h of lateral wind speed a) Direct landing strategy and b) Two-stage landing strategy and states machine. . .	34
3.19	NADILE with a set of un-energized power lines mock-up.	35
3.20	Landing sequence on an un-energized power lines mockup	36
3.21	Experimental and simulation drone path comparison in y-z plane at 5km/h and 20km/h wind speed.	36

LISTE DES TABLEAUX

3.1 Tolerance table	29
-------------------------------	----

CHAPITRE 1

Introduction

1.1 Mise en contexte et problématique

Alors que le réseau de transport d'électricité continue à vieillir, Hydro-Québec se trouve dans la nécessité d'innover avec de nouvelles solutions robotisées pour accélérer et sécuriser les opérations d'inspection et de maintenance. Depuis 2010, l'essor des robots d'inspection pour les lignes électriques est en accélération. En effet, des robots suspendus comme le *LineRanger* [41] et le *LineScout*[39] développés par HQ sont désormais intégrés dans les opérations courantes. Récemment, l'utilisation de drones pour des inspections sans contact s'est popularisée, avec l'intégration de drones commerciaux équipés de capteurs infrarouges, photo, ou laser [14].

Pour répondre aux besoins d'inspections plus précises, les équipes de l'IREQ ont développé un drone hybride novateur, le LineDrone, capable d'atterrir sur des conducteurs sous haute tension pour réaliser des inspections en contact avec des outils tels que le *LineOhm*[28] et le *LineCore*[7].

Le pilotage du LineDrone est actuellement réalisé manuellement par un pilote expérimenté, assisté par un copilote qui suit les données de télémétrie du drone pour les communiquer au pilote. Pour une perception optimale de l'environnement, le pilote doit se trouver sous la ligne électrique pour exécuter correctement l'alignement et l'atterrissage, ce qui peut parfois s'avérer compliqué en raison de l'accessibilité limitée de ces zones. Par conséquent, l'automatisation de la phase d'atterrissage est un élément important pour faciliter l'adoption de cette technologie par un plus grand nombre de techniciens.

La méthode initialement testée par les chercheurs de l'IREQ impliquait l'utilisation d'une caméra monoculaire et d'un LIDAR 2D pour réaliser l'alignement et l'atterrissage. Bien qu'ayant montré des résultats encourageants, cette technique s'est révélée sensible à l'environnement. Dans le cadre du projet NADILE, l'utilisation d'un lidar 3D est envisagée pour détecter les conducteurs, permettant ainsi l'alignement et l'atterrissage du drone. Ce capteur, monté sur la cage du drone, permet de situer les câbles dans l'environnement du drone pour réaliser l'évitement d'obstacles, la navigation et l'atterrissage.



FIGURE 1.1 Prototype V1 de LineDrone [11]

Ce document présente donc les outils développés pour réaliser les phases d’alignement et d’atterrissage du LineDrone sur le conducteur en utilisant uniquement un capteur Lidar. Il expose l’architecture de contrôle en position, l’utilisation d’une machine à états combinée à différentes zones d’atterrissage et une méthode pour calculer les probabilités de succès d’atterrissage en fonction des conditions météorologiques.

1.2 Définition et objectif du projet de recherche

Question de recherche : Les algorithmes d’assistance à l’atterrissage peuvent-ils faciliter un atterrissage réussi d’un sur une ligne électrique dans des conditions de vent standard ?

Objectifs du projet de recherche :

Pour répondre à cette question, l’objectif suivant décomposé en sous-objectifs doit être atteint :

Développer des outils d’aide à l’atterrissage autonome regroupant les asservissements nécessaires à l’alignement du LineDrone avec le conducteur dans des conditions de vent normales (< 20 km/h).

Les sous-objectifs de recherche en découlant sont les suivants :

- 1 - Développer les algorithmes nécessaires pour l’alignement du drone avec le conducteur à l’aide d’un capteur LiDAR 3D,
- 2 - Développer les algorithmes nécessaires pour un atterrissage autonome,

- 3 - Réaliser une démonstration sur une maquette puis sur un conducteur taille réelle,
- 4 - Évaluer la robustesse dans des conditions de vent normales (< 20 km/h) et émettre des recommandations d'amélioration,
- 5 - Évaluer les probabilités de succès de l'atterrissage en fonction de conditions initiales.

1.3 Contributions originales

Au cours de la réalisation de cette maîtrise, une conception à échelle réduite du LineDrone a été réalisée, équipée des mêmes capteurs et ordinateur de bord. Ce prototype a permis de réaliser les premiers essais en intérieur et sur une maquette de conducteur à taille réduite. En parallèle, un travail significatif a été effectué sur le développement de l'architecture de contrôle de haut niveau, gérée par une machine à états et intégrant une interface utilisateur pour le pilote. L'analyse du comportement du drone au moment du contact avec le conducteur a été menée en utilisant les données de vol collectées à partir du LineDrone V1. Ces données ont été examinées pour déterminer la déviation du câble lorsque le drone atterrit. Cette analyse a permis de calculer les masses équivalentes du câble ainsi que son coefficient de raideur, ce qui a contribué à la compréhension du comportement du câble pendant la phase d'atterrissage. Une fois les tests sur le NADILE Jr. et le NADILE concluants, l'expertise acquise a été transférée sur le prototype académique du LineDrone pour réaliser les tests de machine à états et d'atterrissage sur la maquette. Par la suite, des essais ont été effectués et analysés avec le prototype dans les installations expérimentales de l'IREQ à Varennes. Les algorithmes d'alignement et d'atterrissage, testés en simulation et expérimentalement, ont permis d'effectuer les atterrissages de manière autonome en utilisant uniquement un Lidar comme capteur. Ces essais ont validé la méthodologie d'atterrissage et démontré la performance de l'approche aux partenaires du projet. Grâce à l'analyse des données de vol combinées à des simulations Monte Carlo, j'ai réussi à démontrer que l'approche d'atterrissage à deux étapes permet d'augmenter significativement les chances de réussite de l'atterrissage sur ligne électrique avec des vitesses de vent montant jusqu'à 20km/h.

1.4 Plan du mémoire

Ce travail de maîtrise est organisé en cinq chapitres distincts. Le premier chapitre sert à contextualiser le projet et introduire la problématique abordée tout au long de ce document. Le second chapitre propose une revue de l'état de l'art des technologies existantes, et positionne la technologie proposée dans ce contexte spécifique. Ensuite, le troisième chapitre présente l'article qui a été soumis au journal *Drone system and applications*. Le quatrième chapitre aborde le déploiement du drone ainsi que les essais réalisés. Enfin, le

document se conclut par une synthèse du projet, résumant les résultats obtenus et les performances des outils qui ont été développés.

CHAPITRE 2

Revue de littérature

Dans le contexte actuel, l'expansion rapide des réseaux de distribution d'électricité est stimulée par l'évolution technologique, l'urbanisation croissante et la hausse démographique. L'électricité, pierre angulaire du développement de nos sociétés modernes, requiert une surveillance constante et une maintenance efficace de son réseau de production et de distribution pour garantir sa disponibilité continue. Cet impératif pose des défis significatifs et génère une série de tâches complexes.

2.1 Inspection de lignes électriques

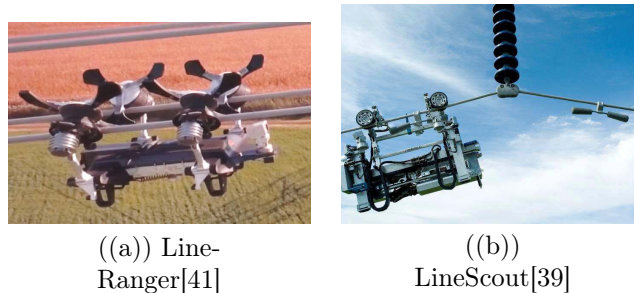
La méthode traditionnelle d'inspection des infrastructures électriques, qui repose sur l'intervention humaine pour examiner les vastes étendues du réseau, peine à répondre aux exigences croissantes de ce domaine. Par conséquent, l'émergence de nouvelles techniques d'inspection vise à soutenir, voire à remplacer, les équipes sur le terrain dans leurs activités quotidiennes. Qu'elles soient thermiques ou visuelles, ces inspections permettent de prévenir les défaillances dans les éléments critiques des installations, tels que les isolateurs, les pylônes et les conducteurs. Malgré les avancées récentes, une revue de l'état de l'art réalisée par Lei Yang en 2020 [46] indique qu'aucun système n'offre encore une inspection totalement autonome. Historiquement, l'inspection des lignes électriques s'effectuait manuellement, comme illustré à la figure ??, avec des techniciens qui montaient sur les infrastructures jusqu'aux conducteurs pour effectuer l'inspection et l'entretien nécessaire. Cette méthode nécessite souvent la fermeture d'importants tronçons de réseau électrique pour garantir la sécurité des techniciens, une coordination complexe qui peut entraîner des retards et des interruptions de service. Face à ces problèmes, ainsi qu'à une pénurie de main-d'œuvre et à des préoccupations croissantes en matière de sécurité, le coût de l'inspection augmente et sa sûreté diminue. Il devient alors impératif de développer des alternatives, comme les robots suspendus ou aériens, actuellement en cours de recherche dans divers laboratoires de robotique à travers le monde.

Un défi majeur de ces recherches est de déterminer la localisation précise du drone par rapport au conducteur, pour assurer la sécurité et l'intégrité des composants. L'une des premières tentatives de localisation d'un drone autour d'une ligne électrique a été menée par une équipe du MIT en 2009 [26], qui a utilisé le champ magnétique généré par le

conducteur pour déterminer la position du drone. Depuis lors, de nombreux progrès en robotique aérienne et suspendue ont exigé l'utilisation d'autres méthodes pour se localiser autour des conducteurs dans le but d'effectuer des inspections ou des réparations sur des lignes électriques dites "morte", c'est-à-dire sans champs électromagnétiques.

2.2 L'inspection robotisée des lignes électriques

Comme souligné précédemment, l'inspection des lignes à haute tension est de plus en plus effectuée avec des robots afin de maintenir les techniciens au sol en toute sécurité et d'éviter les coupures de courant sur les lignes [46]. Une gamme variée de robots est déployée pour accomplir ces tâches, incluant notamment les robots suspendus qui se déplacent en roulant sur les conducteurs. Cette méthode offre une autonomie énergétique considérable. Le LineScout [39] et le LineRanger [41] d'Hydro-Québec, illustrés à la figure 2.1, sont des exemples notables de cette technologie. Ils sont capables de mener des inspections visuelles, de marquage et d'identification, entre autres. Cependant, les robots suspendus présentent des défis considérables en matière d'installation sur les conducteurs en hauteur et doivent naviguer à travers de nombreux obstacles sur leur parcours, ce qui rend leur manoeuvre potentiellement complexe.



((a)) Line-
Ranger[41]

((b))
LineScout[39]

FIGURE 2.1 Robots suspendus

Pour l'inspection des éléments structuraux tels que les pylônes et les isolateurs, sans oublier les centres de distribution et les sites de construction, l'usage de véhicules aériens sans pilote (UAV), comme les drones quadricoptères, est désormais courant. Cette technologie connaît une expansion rapide à l'échelle mondiale, avec une utilisation étendue incluant l'inspection visuelle de composants en hauteur. Un drone d'inspection, équipé de caméras optiques et thermiques, permet de réaliser des missions d'inspection de lignes électriques à un coût moindre et sans interruption de l'alimentation électrique. Les drones sont capables de capturer des images détaillées des installations et, avec l'aide de lidars embarqués, de réaliser des modèles 3D de terrains. Les images capturées peuvent être analysées en post-traitement ou en temps réel grâce à l'intelligence artificielle, capable d'identifier des défauts ou des anomalies, comme illustré à la figure 2.2. Cependant, bien que les avantages

possible de réaliser une inspection rapprochée à l'aide d'outils développés en interne par Hydro-Québec, tels que le *LineOhm*[28] ou le *LineCore*[7], qui permettent de mesurer la résistance électrique aux manchons ainsi que la corrosion du conducteur.

De plus, le franchissement d'obstacles tels que des pylônes, des isolateurs ou des amortisseurs de vibrations peut être facilement effectué par un décollage vertical suivi d'un atterrissage un peu plus loin sur la ligne. Ceci est démontré à la figure 2.3, tirée de recherches sur les drones hybrides [10].

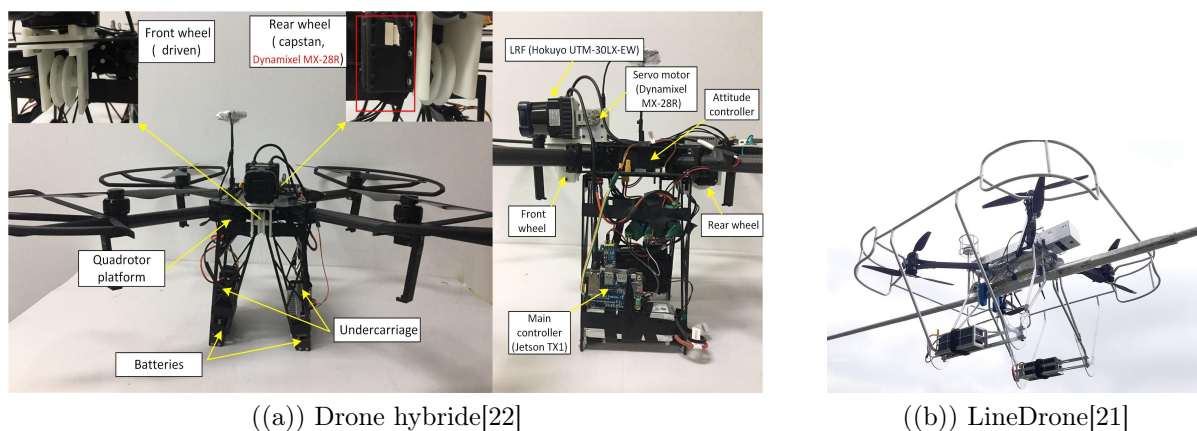


FIGURE 2.4 Drones Hybrides

2.4 Le LineDrone

Le LineDrone V1, illustré à la Figure 2.5, développé par l'équipe d'Hydro-Québec, est un exemple prééminent de drone hybride. Ce drone aéroporté, capable de se poser sur un conducteur pour rouler dessus avec ses moteurs éteints, incarne une avancée remarquable dans le domaine des inspections de lignes électriques [34]. Il est doté de fonctionnalités robustes, comme la capacité à effectuer une inspection rapprochée en roulant sur les lignes de transmission, tout en ayant la possibilité de décoller pour franchir les obstacles rencontrés sur les lignes [34]. Cela ouvre la voie à des inspections détaillées de haute précision tout en permettant une grande autonomie énergétique en mode roulage.

Cependant, malgré ces avantages significatifs, le LineDrone présente également des inconvénients. Un défi majeur est l'atterrissage du drone sur la ligne, qui nécessite une grande précision et une bonne stabilité, surtout dans des conditions de vent défavorables [18]. Par ailleurs, il a été noté que le drone peut être affecté par des conditions environnementales difficiles, comme des vents forts ou des températures extrêmes, qui peuvent altérer sa performance et sa fiabilité [18]. Il est donc essentiel de continuer à améliorer et à optimiser le

LineDrone pour surmonter ces défis et maximiser son potentiel dans l'inspection des lignes électriques.



FIGURE 2.5 LineDrone V1[21]

Afin de réaliser le développement d'algorithmes autonome, une version prototype nommée NADILE (Navigation autonome des drones et interventions sur les lignes électriques) a été conçue et fabriquée dans le cadre du projet. Le NADILE introduit plusieurs avancées significatives qui augmentent ses capacités opérationnelles.

Tout d'abord, l'intégration d'un capteur LiDAR 3D sur le NADILE a permis de renforcer la précision et l'efficacité des tâches autonomes. Le capteur LiDAR est utilisé pour obtenir un nuage de points détaillées de l'environnement, améliorant ainsi la capacité du drone à identifier et à naviguer autour des obstacles. Le NADILE est équipé également d'une combinaison d'ordinateurs de bord et d'auto-pilotes qui offre des possibilités accrues d'autonomie. Ce système permet au drone de réaliser des tâches de navigation et d'atterrissage de manière semi-autonome pour le moment, ce qui réduit la dépendance envers l'opérateur et augmente l'efficacité globale des opérations. Grâce à ces innovations, le NADILE représente une étape importante vers l'automatisation complète des inspections de lignes électriques. Cependant, il convient de noter que des essais sur le terrain et une optimisation supplémentaire seront nécessaires pour confirmer la performance du NADILE dans diverses conditions environnementales et opérationnelles.

2.5 Atterrissage sur conducteurs

L'atterrissage de drones, particulièrement dans des environnements exigeants et non standard, représente une tâche complexe qui a suscité de nombreuses études. Atterrir sur des surfaces stables, comme les toits, nécessite une stratégie d'atterrissage sécuritaire, fiable et précise qui tient compte des variables environnementales imprévues, telles que les perturbations du vent, ainsi que des paramètres d'opération, y compris la vitesse d'impact

verticale et le positionnement précis [6]. Ce domaine a été approfondi par des recherches intensives qui ont permis de développer des algorithmes sophistiqués et des technologies innovantes pour optimiser l'atterrissage des drones sur ces surfaces. Dans un contexte plus dynamique, l'atterrissage sur des objets en mouvement, comme des véhicules ou des navires, intensifie la complexité du défi. Ce scénario nécessite une localisation relative précise et des stratégies de contrôle adaptatives pour gérer l'instabilité inhérente de la plateforme d'atterrissage [27]. Les algorithmes de contrôle de drones doivent donc être capables de s'adapter en temps réel aux variations de vitesse et d'orientation de la plateforme d'atterrissage. Plus spécifiquement, l'atterrissage sur des lignes électriques s'avère être une tâche particulièrement exigeante. La finesse des lignes électriques, leur hauteur et le fait qu'elles soient énergisées à haute tension posent des contraintes uniques, incluant la nécessité d'éviter des dommages à la fois au drone et à la ligne. Les recherches actuelles dans ce domaine se concentrent sur l'amélioration des algorithmes de contrôle autonome pour permettre des atterrissages plus sûrs et plus précis sur les lignes électriques. Ces travaux montrent l'importance cruciale de développer des stratégies d'atterrissage adaptées à divers contextes. Chaque avancée dans ce domaine a un impact significatif sur l'efficacité et la sécurité des opérations de drones, particulièrement dans des applications cruciales comme l'inspection des lignes électriques. Ces recherches ouvrent la voie vers une plus grande autonomie des drones, permettant leur utilisation dans un éventail toujours croissant d'applications.

2.6 Résumé de l'état de l'art

La revue de l'état de l'art a démontré l'évolution de l'inspection robotique et l'état actuel de la technologie d'inspection par drone. Historiquement, l'inspection et la maintenance de ces infrastructures étaient effectuées manuellement, engendrant souvent des interruptions coûteuses. L'émergence de techniques d'inspection robotisées a toutefois commencé à transformer ce paysage [39][41].

Les drones, notamment, ont permis de réaliser des inspections à moindre coût et sans interruption de service. Grâce à leur capacité à voler près des lignes électriques et à l'équipement embarqué comme les caméras visibles et thermiques, ils ont pu fournir des informations précises sur l'état global des infrastructures, mais pas de la corrosion, comme peut faire des sondes en contact. Néanmoins, des limites ont été observées, notamment en termes d'autonomie de vol, de capacité de charge utile, et de leur performance dans des conditions météorologiques défavorables.

Pour surmonter ces limitations, des "drones hybrides" ont été conçus, capables de se poser sur les conducteurs et de rouler dessus, combinant ainsi l'avantage de l'autonomie de

vol avec la possibilité d'inspections de proximité. Le LineDrone, développé par Hydro-Québec, illustre bien ce concept [34][18]. Cependant, l'atterrissage sur une ligne électrique suspendue s'avère un défi majeur, nécessitant une grande précision et dextérité de la part du pilote, en particulier dans des conditions de vent défavorables.

En réponse à ces défis, le NADILE a été développé, intégrant un capteur LiDAR 3D et un système embarqué avancé pour améliorer la précision et l'autonomie des tâches. Cependant, l'atterrissage autonome sur une ligne conductrice suspendue reste un défi à surmonter, particulièrement en raison de la petite taille de la cible, des variations de la hauteur de la ligne causées par le vent et autres conditions environnementales.

Bien que d'importants progrès aient été réalisés dans le domaine de l'atterrissage des drones sur les lignes électriques, il est évident que la précision et la stabilité sont soumises à des défis lors d'interventions par temps venteux. Par conséquent, il est impératif de poursuivre la recherche afin de mettre au point des méthodes d'atterrissage plus solides et fiables, tout en évaluant leurs performances, notamment dans des conditions venteuses.

CHAPITRE 3

Article

3.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation

- Étienne Gendron : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.
- Marc-Antoine Leclerc : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.
- Samuel Hovington : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique.
- Étienne Perron : professionnel de recherche, Université de Sherbrooke.
- David Rancourt : professeur agrégé , Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique et robotique.
- Philippe Hamelin : Chercheur en robotique, Hydro-Québec.
- Alexandre Girard : professeur agrégé , Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique et robotique.
- Alexis Lussier-Desbiens : professeur agrégé , Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique et robotique.

Date de soumission : 12 juin 2023

État de l'acceptation : Soumis

Revue : Drone Systems and applications

Titre Français : Évaluation de l'impact du vent sur les atterrissages de drones semi-autonomes pour l'inspection en contact des lignes électriques à haute tension.

Contribution au document : Cet article apporte une contribution significative à la thèse en détaillant les objectifs secondaires. Il décrit les exigences du projet, la conception d'une stratégie de contrôle pour l'atterrissage d'un drone sur lignes électriques, ainsi que l'évaluation de l'enveloppe d'atterrissage. De plus, il confirme la validité de ces éléments par des simulations et des tests en conditions réelles.

Résumé français : Ces dernières années, l'utilisation de drones d'inspection est devenue de plus en plus populaire pour les inspections de câbles électriques à haute tension

en raison de leur efficacité, de leur rentabilité et de leur capacité à accéder à des zones difficiles d'accès. Toutefois, l'atterrissage en toute sécurité des drones sur les lignes électriques, en particulier dans des conditions venteuses, reste un défi de taille. Cette étude présente un schéma de contrôle semi-autonome pour l'atterrissage sur une ligne électrique avec la plateforme Nadile (un drone d'inspection pour les lignes électriques) et évalue l'enveloppe opérationnelle dans différentes conditions de vent. Une méthode de Monte Carlo est employée pour analyser la probabilité de réussite de l'atterrissage en fonction de l'état initial du drone. Les performances du système sont évaluées pour deux stratégies d'atterrissage, différents paramètres de contrôle et quatre niveaux d'intensité du vent. Les résultats montrent qu'une stratégie d'atterrissage en deux étapes offre de meilleures probabilités de réussite de l'atterrissage et donnent un aperçu des meilleurs paramètres du contrôleur et du niveau de vent maximum pour lequel le système est robuste. Enfin, une démonstration expérimentale de l'atterrissage autonome du système sur une ligne électrique est présentée.

3.2 Article :

Les sections suivantes proviennent de l'article soumis dans le journal *Drone system and application*.

3.3 Introduction

The use of inspection drones has gained popularity in recent years due to their efficiency, cost-effectiveness, and ability to access hard-to-reach areas. Drone inspection technologies have revolutionized power line inspections by enhancing efficiency, safety, and accuracy while reducing costs. Drones equipped with advanced sensors and imaging systems remotely monitor power lines, capturing detailed visuals and detecting issues such as wear, corrosion, or damage. Light Detection and Ranging (LiDAR) sensors provide accurate 3D representations [29], enabling the detection of small-scale deformations and precise measurements. Additional technologies, like magnetoresistive sensors [45] and hyperspectral imaging [40], help identify hidden defects. A recent development involves using drones to deploy contact probes on energized power lines. The LineOhm [28] measures sleeve resistance, and the LineCore [7] measures conductor corrosion, serving as two successful examples of contact probes deployed by drones. Deploying contact probes on power lines using drones presents multiple challenges. These include ensuring accurate navigation and landing in varying wind conditions, managing interference from power line electromagnetic fields, maintaining safety from high voltage electricity, and operating the drones manually. This last point is difficult to achieve at all times because of the height of the power lines, the terrain and the parallax effect of the cables. Also for this moment the pilot's

input is crucial for ensuring the safety of the operation. Therefore, this study presents a semi-autonomous control scheme for landing a drone on electrical lines and evaluates the operating envelope under different wind conditions for a power line-adapted drone, maintaining the pilot's involvement in the process.

In an attempt to address these challenges, a drone prototype, named LineDrone, has been developed specifically for high voltage power line applications. The drone is designed to land and deploy contact probes directly onto the power lines. This innovative solution, developed by Hydro-Québec's robotics teams, facilitates efficient inspection of energized power lines while reducing accident risk and minimizing potential infrastructure damage. The drone prototype, designed for Autonomous Navigation of Drones and Interventions on Power Lines (acronym in French - NADILE), as shown in Figure 3.1, serves as the primary test-bed and evaluation model for this study.

Manual drone operation for this application poses challenges in maintaining clear line of sight for accurate positioning during landing, due to parallax effects and altitude as show in Figure 3.2. The current need to operate the drone from directly beneath the power line complicates its use in hard-to-reach areas, as illustrated in Figure 3.3. This enabled the Monte Carlo model to account for the inherent variability and turbulence encountered by the NADILE during the landing process.

This paper presents a semi-autonomous control scheme for landing a drone on an electrical line and evaluates its landing envelope. A methodology, employing a statistical Monte Carlo algorithm, has been devised to create a map that takes into account the drone's present state and prevailing wind conditions. This map facilitates the computation of landing envelopes, defined as regions of states where the likelihood of a successful landing initiation is high. These calculations are instrumental in evaluating two distinct landing strategies across diverse wind conditions, shedding light on the drone's capacity to execute successful landings. Additionally, the same calculations help establish transition rules for the autonomous landing state-machine, determining when to initiate or withhold the next landing phase. By simulating a range of wind conditions, the study aimed to provide a comprehensive analysis of the landing envelope and identify strategies for safe and reliable landings on high-voltage electric cables. Lastly, the semi-autonomous control scheme is experimentally tested using the NADILE, showcasing secure semi-autonomous landings.

Section 3.4 explores existing landing strategies and analysis methods like Monte Carlo simulations that have inspired this study. Section 3.5 details the methodology adopted for the landing strategies, control models, state-machines, and the drone model used in the



FIGURE 3.1 Drone NADILE in flight

simulations. Section 3.6 presents the evaluation results of the NADILE's landing envelope, comparing different landing strategies under wind conditions and assessing various alignment controller gains. Section 3.7 concentrates on field tests of the semi-autonomous approach.

3.4 States of the art

Landing drones on cables for inspection has garnered significant attention in recent years. Miralles and al. [34] introduced a multicopter drone developed by the Hydro-Quebec (HQ) robotics team for landing on power lines and conducting inspections. The drone employs a two-level control architecture to achieve lateral alignment and yaw control above the conductor, with the conductor's position determined through image analysis, although it's important to note that the algorithm's performance relies on sufficient lighting conditions. Building on this work, the paper [18] introduced a discrete-time controller featuring a cascaded P/PI lateral controller and a P *Yaw* controller. Simulations and practical outdoor experiments showcased outstanding alignment performance. Nevertheless, the perception system continued to encounter constraints stemming from the camera's field of view and reliance on natural daylight. Several other researches have been done concerning the landing of a drone on a power line using various methods, including top and bottom grasping perching [38] [24] [33]. This method of bottom perching works well to ensure the stability

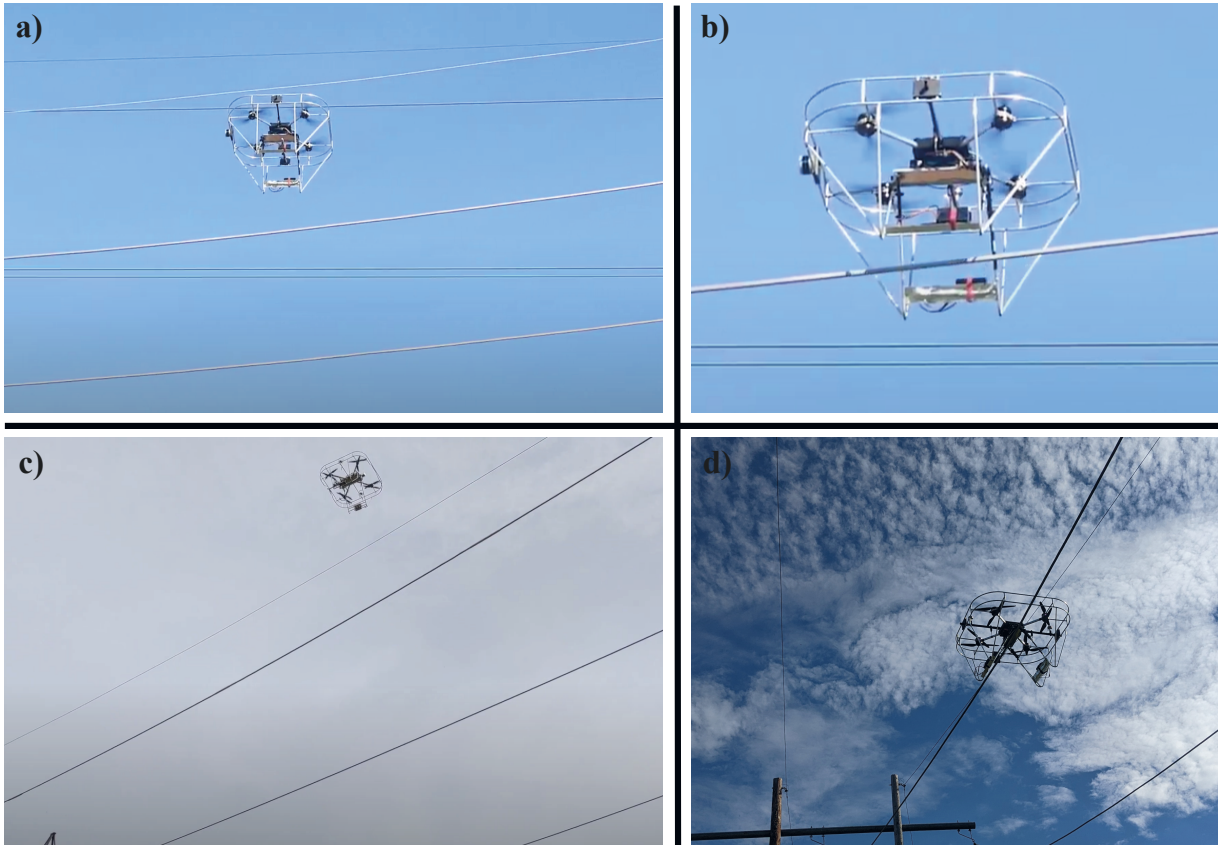


FIGURE 3.2 NADILE during landing on un-energized power lines mockup, in a), b) and c) it's difficult to say if the drone is aligned with the electric cable. d) shows clearly the drone on cable.

of a small drone on a cable with grippers and can perform drone self-recharging [23], but is limited because it does not allow movement on the power line.

To assess the performance of landing algorithms, it's crucial to define the operational conditions for the drone, including landing conditions. Landing envelopes have been thoroughly examined and employed in various scenarios beyond power line inspections, including rooftop landings, wall landings, landings on moving objects, and even in aerospace applications like helicopter landings or spacecraft touchdowns. In the case of rooftop landings [6] and wall landing [32], strategies have been devised for safe and reliable landings on flat and inclined surfaces, considering factors like wind disturbances, vertical impact velocity, and accurate localization. In the case of moving objects like vehicles, ships, or even rocket landings on a drone ship as discussed in Blackmore (2016) [8], the challenge becomes more pronounced. This is due to the requirement for precise relative localization and the implementation of adaptive control strategies capable of adapting to the dynamic nature of the landing platform, as highlighted by Keipour (2021)[27]. Even in the context



FIGURE 3.3 Difficult operating areas such, a) shrubs below the lines[43], b) mountainous terrain [3] and c) power-lines river crossing [15].

of landing sequences on Mars, as described in Holzmann (2013)[19], the process is intricate and demands meticulous calculation and execution of a landing envelope. These diverse landing scenarios underscore the broad applicability of landing envelope concepts and the significance of developing context-specific landing strategies.

In the field of robotics and aerospace, the Monte Carlo method is a powerful computational technique used for probabilistic reasoning, estimation, and decision-making. This approach involves simulating numerous scenarios by randomly sampling possible outcomes, allowing robots to better understand and predict their environment online or offline. Monte Carlo algorithms, such as particle filters [17] and Monte Carlo Localization (MCL) [12] [2], are widely applied in robotics for tasks like localization [35], mapping [16], and motion planning [20]. By incorporating uncertainty and considering a range of potential outcomes, the Monte Carlo method enables robots to make more informed decisions and adapt to complex, real-world situations with greater reliability and accuracy.

In summary, this state-of-the-art section has provided an overview of drone landing for power line inspection, discussing drones, sensors, landing research, landing envelopes, and the application of Monte Carlo methods in robotics. This review lays the groundwork for the development of an improved landing strategy, incorporating the latest advancements in drone technology, sensor systems, and computational methods.

3.5 Methodology

To determine the landing envelope of the NADILE under various wind conditions, we utilize a tailored approach. This approach involves employing a simulation model of the drone and conducting a series of direct landings to accurately calculate the landing envelope. Figure 3.4 demonstrates the approach employed to establish the landing envelope under windy conditions. A Monte Carlo method was developed to analyze the probability of successful landing based on initial drone states, offering valuable insights for refining

the landing strategy. We perform simulations for each initial state vector x_0 , encompassing the drone's position, orientation, and velocity at $t = 0$. For each x_0 , ten trials are conducted, each with a randomly generated wind speed profile centered around 5, 10, 15, and 20 km/h in the most unfavorable lateral conditions. Subsequently, a direct landing of the drone is simulated and evaluated using a gain function.

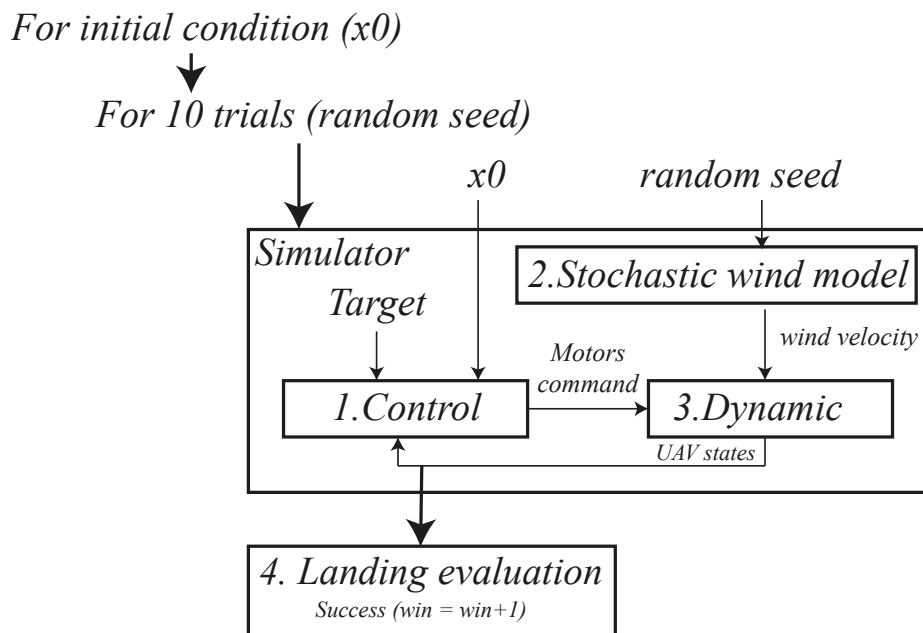


FIGURE 3.4 Methodology overview

The next sections describe the components of the control strategies in subsection 3.5, the stochastic wind model in subsection 3.5.1, the simulation model in subsection 3.5.2 and the methodology for landing evaluation in subsection 3.5.3.

Landing strategies

Two landing strategies has been evaluated and implemented in this study, the direct landing and the two-stage landing. They are illustrated in Figure 3.5.

In the direct landing strategy (DLS), the drone aims to land directly on the cable, targeting the cable itself. While this method might be quicker, ensuring a safe landing could be more difficult, as the drone might not have sufficient time to adjust its position, orientation, and speed before making contact with the cable. Moreover, the drone's structure, depicted in Figure 3.1, consists of a substantial aluminum enclosure standing at a height of 1 meter. This particular design characteristic presents a potential obstacle when aiming to establish a secure and reliable approach from various starting positions.

The two-stage landing strategy (TSLS) is a safer approach that consists of two distinct phases : alignment and landing. In the alignment phase, the drone first maneuvers itself to an intermediate target position above the cable, ensuring that its position, orientation, and speed are within acceptable bounds. As will be discussed later, the alignment phase significantly broadens the region where the pilot can commence the landing phase (including areas ready for line-up and safe landing zones), in comparison to the Direct Landing Strategy (DLS), which might traverse undesirable zones (e.g., abort zone). Landing zones illustrated in Figure 3.5 are regions that have been qualitatively defined through experience and practical knowledge, providing a suitable area for drone to land safely during their operations. The results of this study aim to confirm and refine the geometry of these landing zones, providing a more systematic and data-driven approach to identifying optimal landing areas. As illustrated in Figure 3.6, once the drone is properly aligned, it proceeds to the landing phase, where it descends and makes contact with the cable. This strategy provides more opportunities for error correction and adjustments during the alignment phase, resulting in a safer and more controlled landing.

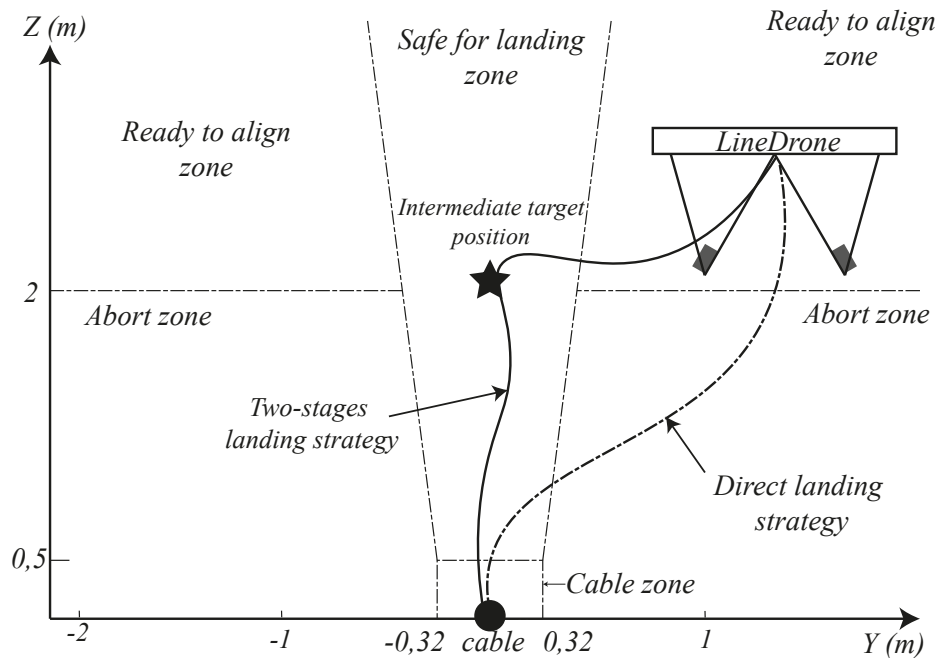


FIGURE 3.5 Landing zones around cable with both landing strategies (TSLS and DLS)

The TSLS is governed by a landing state machine, which continually tracks the drone's states during the landing process. This state machine is tasked with ensuring the drone stays within acceptable boundaries regarding position, orientation, and velocity as it moves

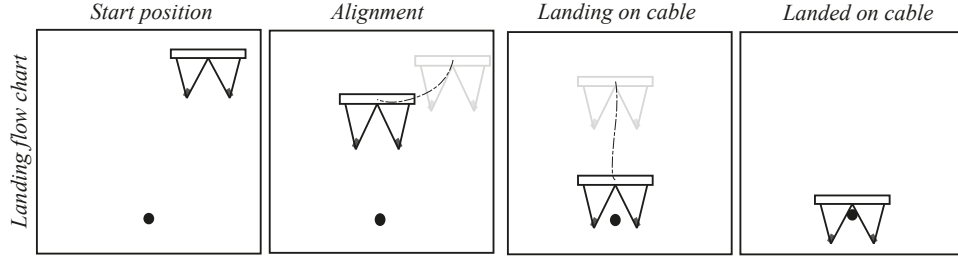


FIGURE 3.6 Landing flow chart from start position to land on cable

between the alignment and landing phases. As the drone progresses through the landing sequence, the state machine confirms that all required conditions are fulfilled before permitting the drone to proceed to the next state.

Alignment and landing controllers

In the custom configuration of the NADILE, the drone's position relative to the cable during landing sequence is managed by a high-level position controller (HLPC), while the drone's stability is maintained by the low-level flight controller (LLFC) using the autopilot internal control loops. The HLPC comprises three decoupled position controllers (y , z , and yaw), each responsible for moving the drone toward the target position along their respective axes. The pilot and the LLFC handle the x -axis which is parallel to the conductor. Lateral (y) and yaw errors are managed by two proportional-derivative (PD) controllers, while a proportional (P) controller handles altitude control (z). From the HLPC perspective, the system being controlled is at least a type 1 system, i.e. it has at least one pole at the origin in the continuous-time domain. Hence, the steady-state error will naturally tend toward zero even if the HLPC has no integrator. The HLPC configuration is illustrated in Figure 3.7. In this configuration, K_{p_y} , K_{p_ψ} and K_{p_z} are proportional gains that multiply the errors between the target and actual drone's pose, while K_{d_y} and K_{d_ψ} are the derivative gains that multiply the time derivatives of the errors. The output command is a velocity vector that is converted by the LLFC into lateral displacement through motor speed adjustments. The target is obtained using a LiDAR-based perception system described in [37], which is out of the scope of this paper. The landing phase also employs the same HLPC to ensure proper drone alignment. The HLPC generates velocity commands that are sent to the LLFC in ArduPilot [5] via Mavlink protocol [31].

In summary, the alignment and landing controllers, landing strategies, and landing state machine are presented, and their performance will be evaluated for multiple control gains and wind speed. These various mechanisms were incorporated into simulations to assess landing envelopes under a multitude of parameters. This understanding will facilitate the

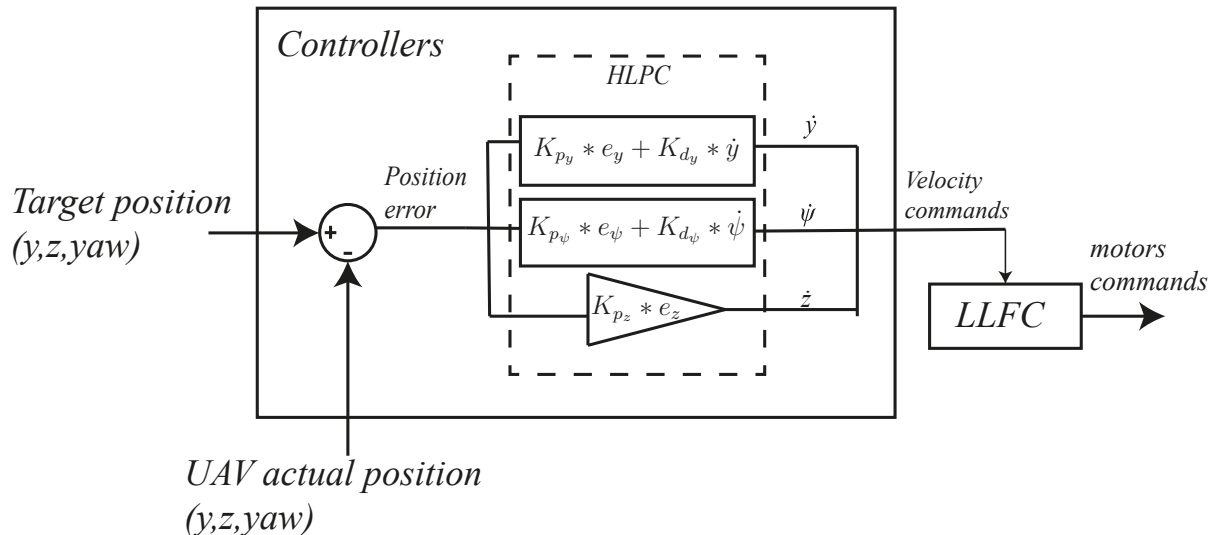


FIGURE 3.7 The custom HLPC takes position errors as input and provides velocity commands to the LLFC.

development of more efficient, safer, and more reliable landing procedures for a variety of inspection, maintenance, and other applications.

3.5.1 Stochastic wind model

A vital element of the Monte Carlo model is accurately representing wind variability during the landing process. To simulate appropriate wind profiles, the Von Kármán wind spectrum [1] was used for each simulation trial. This Von Kármán wind spectrum describes the wind speed at a specific location and time using the following general equation :

$$V(f) = V_0 * f^{\left(\frac{-5}{3}\right)} \quad (3.1)$$

In this equation, $V(f)$ represents the wind speed for a given frequency f , V_0 is a scaling factor denoting the average wind speed at the given location, and the exponent $-5/3$ is known as the von Kármán exponent. This exponent describes the relationship between the frequency of the wind fluctuations and their intensity, with higher frequencies corresponding to smaller-scale turbulence. This spectrum offers a mathematical framework for generating the distribution of wind velocities. The random seed of the Monte Carlo method is a random wind profile defined by this wind generator. The average wind speeds are fixed, but the random profile allows for the evaluation of landings under varying wind speeds over time as illustrated in Figure 3.8. This enabled the Monte Carlo model to account for the inherent variability and turbulence encountered by the NADILE during the landing process. By simulating a range of wind conditions, the study aimed to provide a

comprehensive analysis of the landing envelope and identify strategies for safe and reliable landings on high-voltage electric cables.

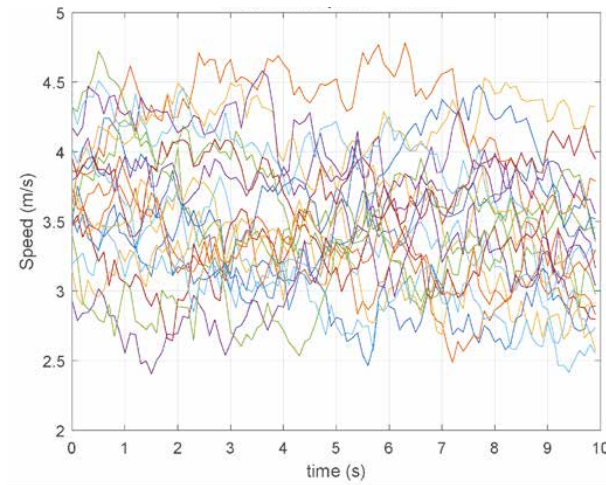


FIGURE 3.8 3.5 m/s wind samples generated by the Von Kármán wind generator

3.5.2 Dynamic

To accurately evaluate the NADILE's landing envelope in various wind conditions, a realistic drone dynamic was necessary. Indeed, the wind generate additional aerodynamics forces on the drone fuselage, but mainly from the interactions between the wind and propellers. If these additional forces are ignored, it can lead to an overestimation of the drone's landing envelope in high wind. Thus, in addition to the usual motors' command, the drone model developed takes as input the wind velocity to compute the additional aerodynamics forces to calculate the main states of the drone (i.e., 6-DOF position and velocity). The links between the main processes of the drone's dynamic model are presented in Figure 3.9.

This section presents a realistic propulsion model that could take into account the coaxial propellers interaction and the airspeed effects using wind tunnel tests to create an empirical propulsion model. Using the airspeed (wind speed minus the drone's ground speed) and the commands from the flight controller, the propulsion model output the total forces and moments generated by the propellers. For the aerodynamics forces generated by the fuselage, due its geometric complexity, CFD analysis were done to obtain the the drone's drag forces function of the airspeed. The calculated forces and moments are then use in a 3D rigid body model to calculate the drone's dynamic and to obtain the states that will be used by the flight controller.

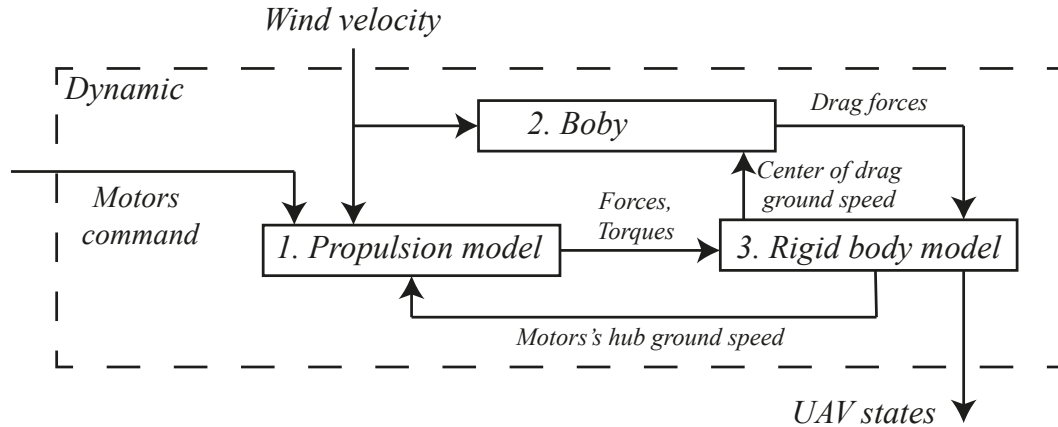


FIGURE 3.9 Model flow chart for dynamic simulations

Propulsion model

Propulsion forces/torques are often modelled as simple function of the motors' rotation speed [4]. However, to capture the effect of the wind on the NADILE, more advanced models that consider the effects of airspeed are required. Lateral and axial wind affect the propeller's forces in three main ways [30], as presented in Figure 3.10.

There many effect caused by lateral and axial airspeed on the propellers. The first effect is the increase in the thrust caused by the increase of the lateral airspeed. This cause a reduction of the induced flow in the rotor resulting in a higher angle of attack for the same rotational speed. The second effect caused by lateral airspeed is the creation of rolling and pitching moments on the rotor hub due to the asymmetric lift distribution on the rotor. For example, take the rotor illustrated in Figure 3.10. The rotor hub airspeed is in the positive X axis direction, and the propeller rotates counterclockwise. The advancing blade experiences a higher airspeed than the retreating one, creating a positive pitching moment (Y axis) and negative rolling moment (X axis) about the propeller's hub. Since the propellers are rigid for a multirotor drone (no hinges), the rolling and pitching moments of each rotor are transmitted to the drone's body [30]. The third effect is the increase or decrease of thrust due to a change in the axial airspeed, which happens during climb and descent, but also during rolling and pitching maneuvers. They effectively act as a dampener where a positive vertical speed reduces the thrust and a negative speed increases the thrust for the same rotational speed.

The drone uses four pairs of coaxial propellers, which considerably increase the complexity of the aerodynamics effects between the upper and lower propellers [44]. To create a high-fidelity model while avoiding CFD calculations [13], the drone's coaxial propulsion was

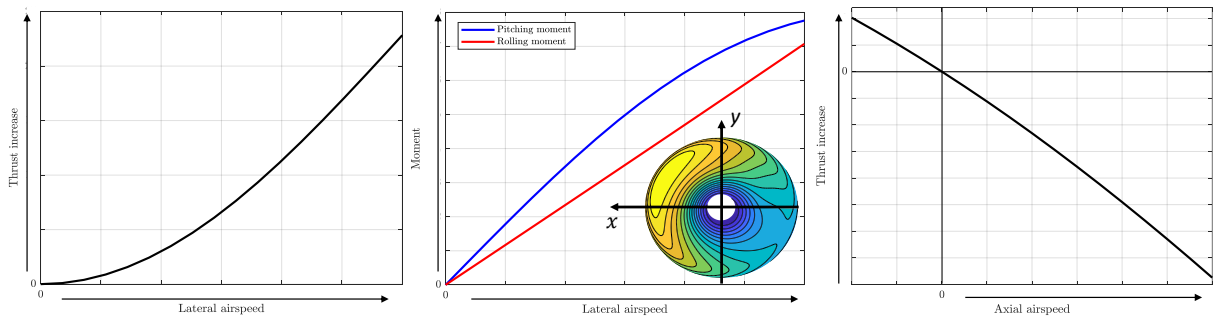


FIGURE 3.10 Aerodynamic effects of airspeed on a multirotor drone propeller considering a fixed rpm. From left to right : the increase in thrust with changes in lateral airspeed, the increase in the pitching and rolling moments with changes in lateral airspeed and the change (positive or negative) of the thrust depending of the sign of the axial airspeed.

tested on two *Tyto Robotics* Series 1780 Thrust Stand [42] in a coaxial configuration. The setup was placed in a wind tunnel where multiple runs were done while changing one of the four main parameters (upper motor RPM, lower motor RPM, wind speed, and pitching angle) one at a time. The motor's command range tested was from 1200 RPM to 1700 RPM for both motors, 0 m/s to 10 m/s for the wind speed and -10° to 10° for the angle of attack. Using the experimental data, an empirical propulsion model was created that takes as input the upper and lower motor RPM and the relative airspeed magnitude and direction to calculate the resulting forces and torques of each coaxial pair. The model was constructed using the MATLAB Neural Network Training function, employing Bayesian Regularization training on the initial two-thirds of the dataset. Subsequently, model validation was conducted using the remaining one-third of experimental data, which had not been utilized in the training phase. The model exhibits minimal error, enabling the generation of functions for calculating the forces and torques along the principal axes that will be employed in the dynamic model. An example of the force/torques obtain using the trained function is presented in Figure 3.11 for for a 0 m/s airspeed and 0° angle of attack. We can observe the experimental data superposed correctly over the trained model (surface) and allows extrapolation the experimental data to cover to entire motors' range.

Airframe Drag

The design constraints of the NADILE's mission resulted in a unique structure with a large aluminum cage to protect delicate components against electrical discharges and physical contact. Also, the need to be passively stable when landing on the power lines required the center of mass to be low, which was achieved by placing the batteries at the base of the legs. The large cage and batteries at the bottom are an important source of drag, and

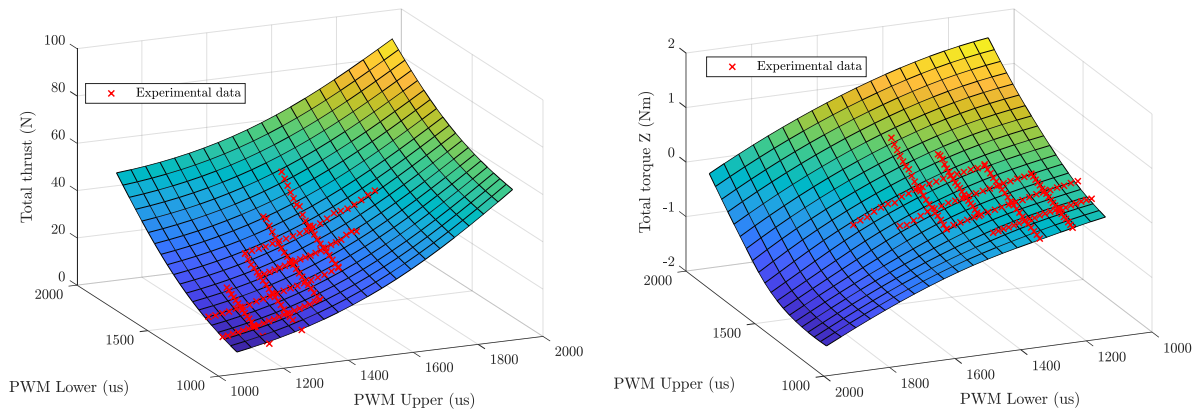


FIGURE 3.11 Total thrust (left) and total Z axis (shaft) torque vs motors' command generated by using the trained functions compared to the experimental data in wind tunnel. The graphs shown were obtained for a 0 m/s airspeed and 0° angle of attack.

CFD analysis was performed to obtain an estimate of the NADILE's complex structure drag, as presented in Figure 3.12. We can observe that the batteries at the base of the cage and the central structure cause significant disturbances in the airflow, resulting in a high drag force.

Different drone inclinations at various airspeeds were tested to determine the *Equivalent Flat Plate* area, which will be used to calculate the drag at different airspeed in the three primary directions. The analysis yielded an equivalent flat plate area of 0.512 m^2 . Another important outcome of the simplify CFD analysis is the position of the center of drag (CD). The Center of Drag (CD), where all aerodynamic forces on the drone's frame converge, determines the stability of the drone under high airspeed [9]. In our case, due to the unique configuration, the CD is above the Center of Mass (as seen in Figure 3.12 right), making lateral airspeed destabilizing for the drone.

Rigid body model

The forces and torques defined in the previous sections are used to calculate the drone's dynamics. The drone's structure is approximated as a single rigid body. The free diagram model used to define the dynamics is presented in Figure 3.13.

The model uses the two standard frames generally used to model a drone's dynamic; the inertial frame N is fixed on the ground, and the body frame B is attached to the drone. These frames use the conventional north-east-down (NED) for the main directions. The mass and inertia of the rigid body were measured experimentally with the NADILE

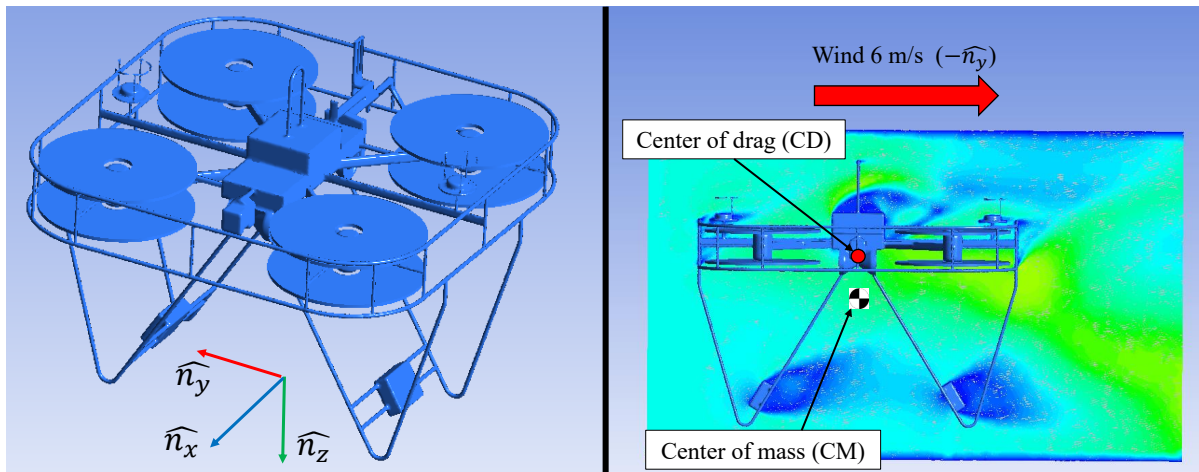


FIGURE 3.12 Computer fluid analysis of the drone structure drag. On the left, is the simplified 3D model used for the analysis and on the right, is a section view with the wind speed contour around the drone for a 6 m/s wind.

prototype. The drone's mass is 20 kg with X,Y and Z axis inertia in the body frame being respectively 3.52, 3.31 and 3.84 kg.m². For the applied forces and moments, each coaxial pair is considered as one entity, as defined in Section 3.5.2, and applies a force in the body frame negative Z-axis with torques in the body X-Y-Z axes. The body drag forces presented in Section 3.5.2 are applied at the center of drag (CD). The drone's physical properties and the forces/moments are then used to solve the differential equation of motion in translation and rotation for the 3 main axis. The solved equations are then used at each time step of the simulation to update the new states bases on the previous ones and the forces/moments applied.

3.5.3 Landing envelope evaluation

In this section, a statistical probability approach based on the Monte Carlo algorithm is used to determine the landing envelope of the NADILE. The Monte Carlo simulation method, as shown in Figure 3.4, is a statistical technique that involves generating numerous random samples (also known as "trials") of a system and using them to approximate the probability of specific outcomes. The simulation used the MATLAB and Simulink implementation of the drone simulation model based on Section 3.5.2. Moreover, to simulate realistic wind conditions, a wind generator utilizing the Von Karman algorithm was employed. This method, as detailed in Section 3.5.1, generated wind samples with varying average wind speeds within the manual operational range (ranging from 0 km/h to 20 km/h). The wind samples, illustrated in Figure 3.8, were generated with a standard deviation of 3.6 km/h to accurately simulate wind speed fluctuations.

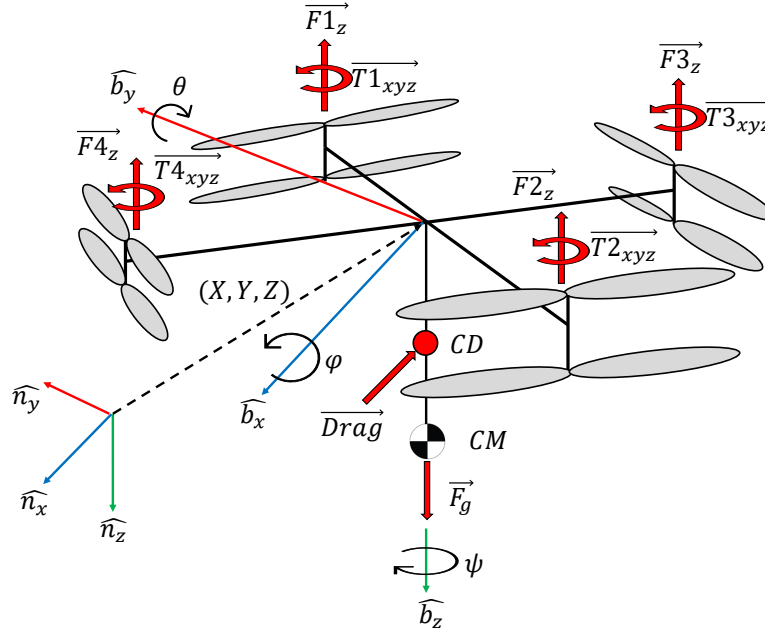


FIGURE 3.13 Free body model of the drone and applied forces/torques for the rigid body dynamic.

Ensuring the safety and reliability of the drone during its high-voltage cable landing operations heavily relies on meeting specific landing conditions. Successful landing is determined by the success function, which validates compliance with the following defined conditions, with the tolerances indicated in the table 3.1.

1. The cable is located in the drone's legs zone as Figure 3.14
2. The absolute roll angle of the drone $|\phi|$ is below $|\phi_{tol}|$.
3. The absolute roll velocity $|\dot{\phi}|$ is below $\dot{\phi}_{tol}$.
4. The velocity vector norm $|\vec{v}|$ is below $|\vec{v}|_{tol}$.
5. The direction of the velocity vector \vec{v} is directed toward the cable within some tolerance \vec{v}_{tol}
6. The absolute yaw angle between the drone and cable $|\Delta\psi|$ is below $|\Delta\psi|_{tol}$
7. The absolute yaw velocity $|\dot{\psi}|$ is below $|\dot{\psi}|_{tol}$.

Variable	Maximum	Unit
$ \phi _{tol}$	0.08	rad
$ \dot{\phi} _{tol}$	0.08	rad/s
$ \vec{v} _{tol}$	0.2	m/s
\vec{v}_{tol}	$[\pm 0.5, -0.2]$	m
$ \Delta\psi _{tol}$	0.1	rad
$ \dot{\psi} _{tol}$	0.1	rad/s

TABLEAU 3.1 Tolerance table

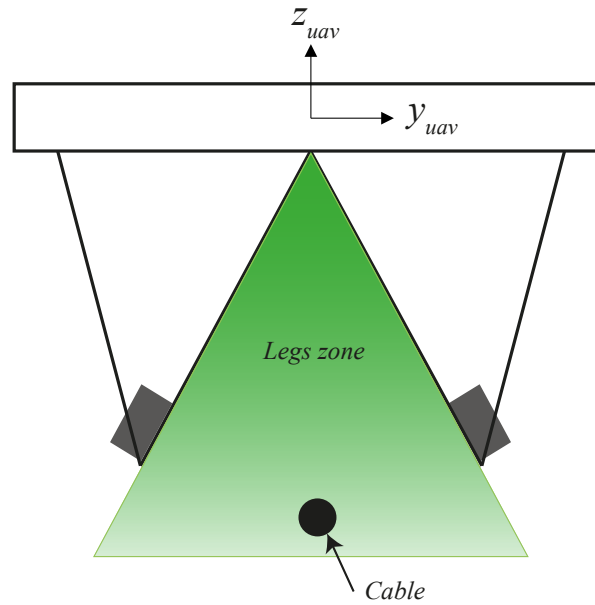


FIGURE 3.14 Legs zone for cable validation

To consider a landing successful, the drone's states must meet specific criteria when entering the cable zone. These criteria are derived from the need to control safe landing conditions. It is necessary to control the speed and direction of the drone towards the cable prior to contact. The maximum allowable speed is determined by the theoretical descent speed command of 0.2 m/s. It is also important to verify the tilt angle within the range of (± 5) and the angular velocity within $(0.5/s)$ to ensure pitch stability during landing. Finally, it is crucial to ensure that the cable is between the drone's legs to guarantee a successful landing. If the win function is asserted, i.e. all conditions above are satisfied, a successful landing can be attributed to the initial position x_0 . The Monte Carlo evaluation was conducted using starting points within a lateral range of $(-1.5, 1.5\text{m})$ and an altitude range of $(1.5 \text{ to } 2.5\text{m})$.

3.6 Results

In this section, we present the results of our study, which are organized into three main areas : gain evaluation, landing envelope evaluation, and landing strategies comparison. First, we discuss the gain evaluation process, which determines the optimal control gains for the high-level position controller (HLPC) during the alignment phase. Next, we assess the landing envelope for the NADILE under various wind conditions, providing insights into the drone's performance and limitations during the landing process. Finally, we compare the direct landing strategy (DLS) and the two-stage landing strategy (TSLs) to highlight the advantages and drawbacks of each approach in terms of success rate and overall safety.

3.6.1 Gains evaluation results

In this section, we undertake an appraisal of the PD gains for the high-level position controller. We tested the K_p and K_d gains of the alignment PD controller within the ranges of $[0.1 : 0.5 : 5]$ and $[0.01 : 0.1 : 3]$ respectively, aiming to identify the optimal PD gains for the alignment controller. Securing gains that deliver the largest possible success zone while maintaining an alignment time under 5 seconds assures a successful landing. The altitude and yaw controller gains were established empirically through simulations and confirmed through experimental trials, since the drone's geometry permits a larger margin of error in altitude and yaw. The gain evaluation maps for a 10 km/h wind speed are shown in Figure 3.15. The figure 3.16 depicts the temporal responses of different PD gains under a wind speed of 10km/h. The PD gain pair (0.5,0.1) demonstrates a smooth and consistent alignment with stabilization achieved in under 5 seconds. Maintaining a low K_p value minimizes the drone's rapid accelerations during maneuvers, ensuring that the drone maintains its stability and does not increase wind resistance during alignment. This, in turn, improves the chances of a successful landing.

As shown in Figure 3.15, low controller gains *a*) led to a landing envelope confined to the area directly above the cable because these low gains do not enable the drone to land properly in these winds unless it is already aligned. On the other hand, high controller gains *d*) result in non-uniform landing zones, primarily due to the significant alignment accelerations caused by the high gains. To maximize landing success, $K_p = 0.5$ and $K_d = 0.1$ in *b*) proves to be the most suitable choice in this case, providing a good trade-off between the size of the landing success envelope and its uniformity.

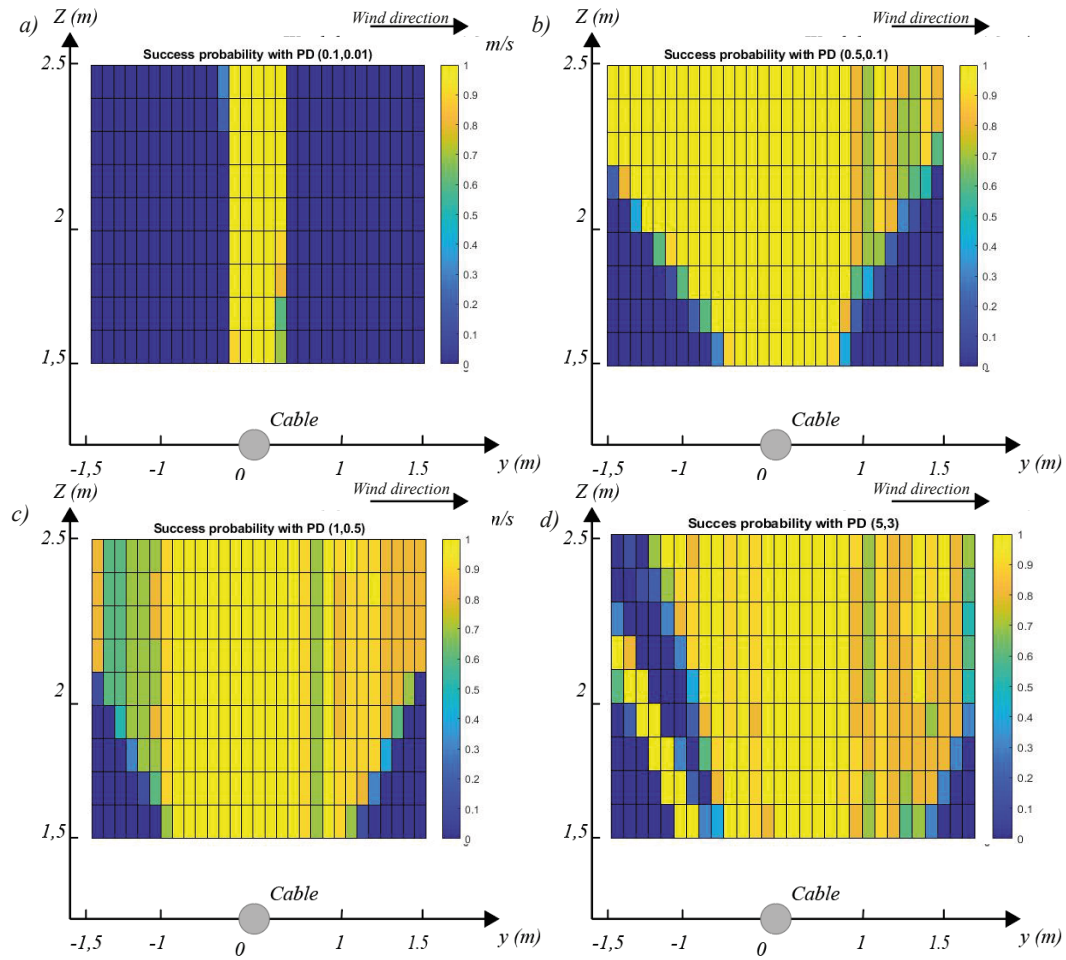


FIGURE 3.15 The success maps from the evaluation of controller gains are as follows : in a), low gains result in a very restricted success zone. In b), slightly increasing the PD gains to (0.5,0.1) slightly widens the success zone. In c), the success zone is considerably broad with PD gains of (1,0.5). However, in d), high PD gains of (5,3) reduce the chances of success.

3.6.2 Wind evaluation results

The Monte Carlo simulations provide a detailed perspective on the landing envelope for the direct landing strategy (DLS) under different wind speeds, highlighting the initial position zones with the highest rates of successful landing initiation. Figure 3.17 shows the map of landing success rates as a function of crosswind speed. The aim of this simulated study is to identify the worst landing scenarios in crosswinds and assess the likelihood of landing success. It's important to note that the study assesses the wind from left to right, and the results are symmetrical when the wind direction is reversed. The 100% success rate area decreases with increasing wind speed. This area is primarily located above the power line and remains so up to wind speeds of at least 20 km/h. The zones with a 100% success rate, considering the two worst wind directions together, are illustrated in Figure 3.17. The

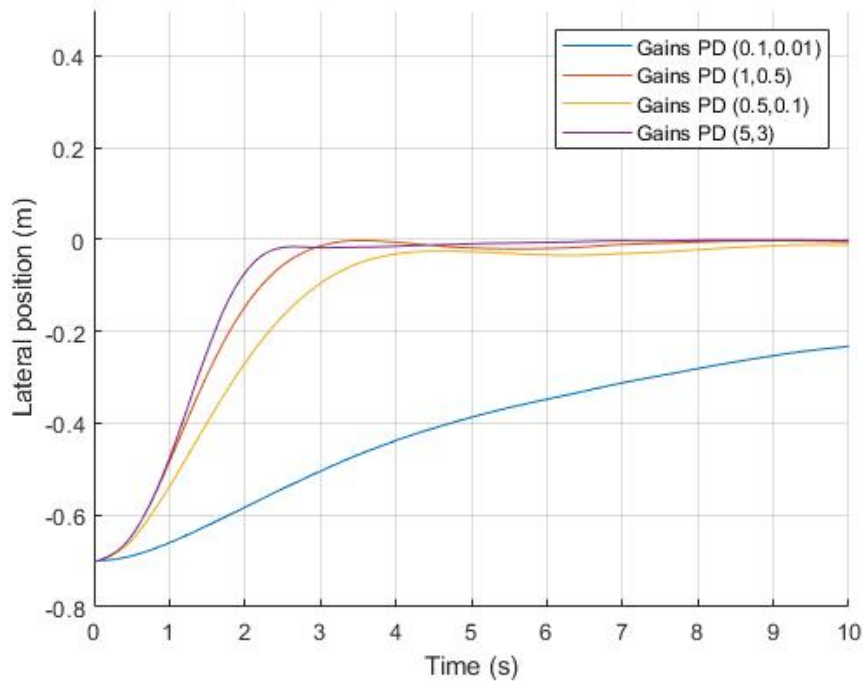


FIGURE 3.16 Time response of the drone’s lateral position relative to the cable for PD gains at 10 km/h, starting from -0.7 m laterally and at an altitude of 2 m.

green area depicted in e) measuring 0.2m in width and 0.4m in height, represents the area with the highest landing success rate, and thus is the most preferable location to set the intermediate landing point. This area is defined based on the success rate and constraints associated with an overlapped cable environment under the worst-case scenario.

The results of these Monte Carlo simulations lay the groundwork for further refinement of the landing strategy, taking into account real-world variables such as environmental fluctuations, the geometry of the power lines, and drone performance. The implementation of this semi-autonomous landing strategy with a target before landing is projected to greatly improve the success rate and safety of drone operations during power line inspections.

3.6.3 Strategies comparison

In this subsection, we provide a comparative analysis of two distinct landing strategies : the Direct Landing Strategy (DLS) and the Two-Stage Landing Strategy (TSL). These strategies differ in terms of their approach to aligning and landing the drone on high-voltage cables.

As a reminder, the DLS is a single-phase approach that directly descends the drone onto the cable, offering simplicity and time-efficiency but posing higher risks in terms of landing

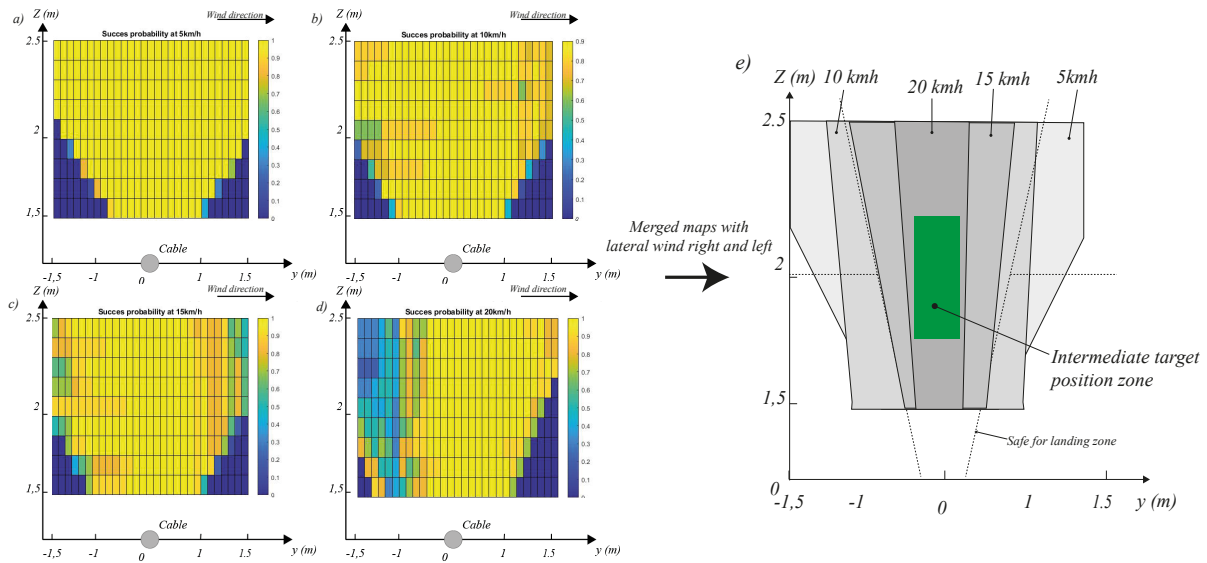


FIGURE 3.17 Maps of success in lateral wind from a) 5km/h, b) 10km/h, c) 15km/h and d) 20km/h can be merged in e) and can define the "intermediate target position zone" for alignment before landing

success and safety. On the other hand, the Two-Stage Landing Strategy (TSLs) employs a two-phase approach, consisting of an alignment phase and a landing phase. This enforces a specific approach trajectory, which in turn increases the confidence level of a successful landing.

The comparison maps illustrated in Figure 3.18 reveal a significant difference between the landing success rates of the two strategies. The TSLs map showcases a 100% landing success rate for all initial positions above the cable with a 2m alignment target above the cable, emphasizing its effectiveness across various starting situations, more specifically in lower area where DLS have a zero success rate. Conversely, the DLS map indicates a lower success rate, stemming from its direct approach, which can result in potential risks and diminished accuracy.

In conclusion, the TSLs provides a considerably greater degree of landing success and safety compared to the DLS. By implementing the automatic TSLs with an alignment target position set at 2 meters above the cable (to avoid the intermediate point being too high due to potential overhead cables), operators can achieve more reliable and secure landings in practical applications. This ultimately contributes to increased efficiency and safety in high-voltage cable inspections.

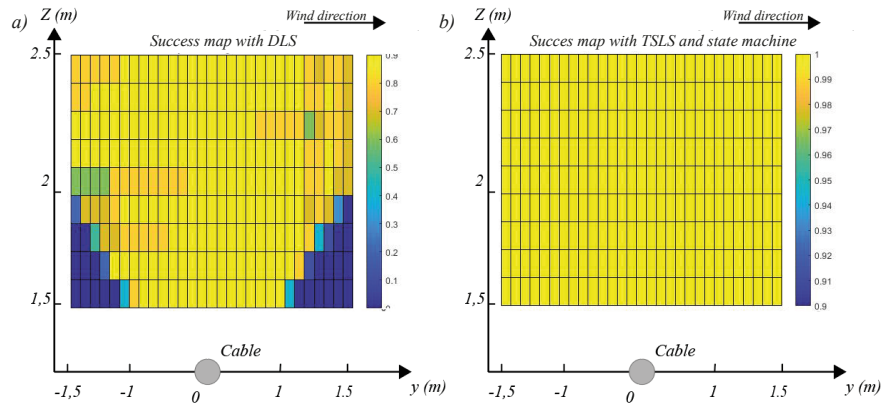


FIGURE 3.18 Success maps of landing strategies at 10km/h of lateral wind speed a) Direct landing strategy and b) Two-stage landing strategy and states machine.

3.7 Field demonstration

In this section, we present the results of the experimental testing of the landing algorithm on a set of real size un-energized power lines mock-up.

3.7.1 Experimental setup

The field tests were conducted on a set of un-energized power lines mock-up that replicate the conditions of actual high-voltage electrical cables, as show in Figure 3.19. The drone was equipped with onboard sensors to record its states (position, orientation, velocity, etc.) during the landing attempts. Wind speed and direction were logged manually in a journal.

The NADILE was manually navigated to the "ready to align" zone above the target cable. Once in position, the landing procedure was initiated, and the drone's states were logged throughout the process. The landing approach was tested in various wind conditions, ranging from light winds (3-5 km/h) to more challenging windy conditions (20km/h with 25-30km/h wind gusts).



FIGURE 3.19 NADILE with a set of un-energized power lines mock-up.

3.7.2 Experimental results

NADILE drone effectively aligning itself and landing securely on the un-energized power lines mock-up at 100% in 50 attempts. The performance of the controllers was consistent across various wind conditions, showcasing the robustness of the landing algorithm. The drone maintained stable flight during the alignment phase and demonstrated precise control over its position and orientation.

The Two-Stage Landing Strategy (TSLS) behaves as anticipated in simulations, with a maximum error of 0.08 m even in crosswind conditions of up to 20 km/h. This demonstrates the effectiveness of the algorithm in real-world scenarios. Figure 3.21 illustrates both experimental and simulation landing trajectories from the 'ready to align' zone to the power line, in the presence of 5km/h and 20km/h lateral winds.

The Fig. 3.20 shows the landing sequence tested in simulation and outdoors on an experimental line under different wind conditions at four moments during the landing phase :

1. Initial positioning of the drone on the side of the cable ;
 2. Vertical alignment of the drone with the cable ;
 3. Automated descent to the cable ;
 4. Actual landing of the drone on the cable
-

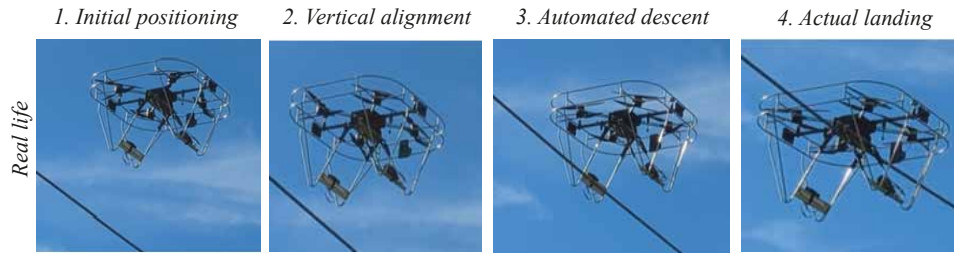


FIGURE 3.20 Landing sequence on an un-energized power lines mockup

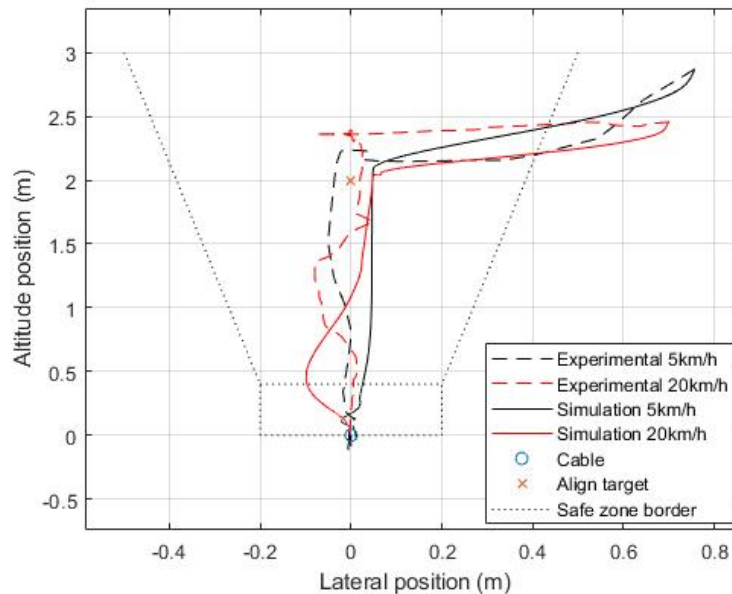


FIGURE 3.21 Experimental and simulation drone path comparison in y-z plane at 5km/h and 20km/h wind speed.

Field tests carried out on mock-ups of un-energized power lines offered insights into the NADILE's performance, including its wind resistance and cable alignment capabilities. These successful outcomes confirmed the potential of utilizing the drone for semi-autonomous landing on high-voltage cables in actual operational conditions. Future development and tests will persist in fine-tuning the algorithm and enhancing the drone's functionalities, with the goal of producing an increasingly proficient and dependable instrument for power line inspection and upkeep.

3.8 Conclusion

In conclusion, this paper has addressed the challenges of manually landing a drone on power lines and introduced an experimental drone based on original LineDrone key features named NADILE. We have described two semi-autonomous landing strategies designed to

facilitate the process of landing the drone on a power line, as well as the associated control schemes. Through the implementation of a dynamic drone simulation model resembling the actual NADILE and a Monte Carlo-based evaluation method, we were able to assess the success rates of initiating landing from different positions above the cable.

The results of these evaluations, including a comparison between the two landing strategies, have been presented, followed by a discussion on the outcomes. Real-world demonstrations of the concept were also shown to validate the findings. As demonstrated in this study, semi-autonomous landing in windy conditions provides good results up to a wind speed of 20 km/h. Implementing the Two-Step Landing System (TSLs) on a drone allows the drone pilot to perform safe landings on power cables without the need to position the drone directly underneath the power lines. Therefore, the development of this semi-autonomous tool is essential for the successful deployment of the technology and to ensure the safety of pilots during inspections.

Looking ahead, further development of this system would ideally focus on creating a system that can withstand stronger winds while maintaining good control response. Additionally, it would be beneficial to develop a fully autonomous landing strategy, integrated with an autonomous navigation system, to further simplify the task of high-voltage power line inspection. This would potentially open the door to broader adoption and more effective use of drones in this critical application area.

3.8.1 Acknowledgments

We extend our sincere appreciation to the engineers and project managers at Hydro-Quebec and DroneVolt for their invaluable guidance and insights. Lastly, special recognition is due to our fellow students for their meaningful contributions that greatly enriched the development of this project.

3.8.2 Competing interests statement

The authors declare there are no competing interests.

3.8.3 Data availability

The authors state that there is no raw data available due to data confidentiality.

3.8.4 Author contributions

Étienne Gendron was primarily responsible for the conceptualization, software and hardware development, validation, and original draft preparation. Marc-Antoine Leclerc contributed to the writing, review and editing, as well as developing the drone model and implementing the simulation for formal analysis. Samuel Hovington played a key role in

software development and field testing, while also reviewing and editing the manuscript. Étienne Perron carried out formal analysis and investigation of the drone model, with David Rancourt providing necessary resources for the drone model study. Philippe Hamelin participated in the conceptualization, resource provision, manuscript review and editing, as well as project supervision. Alexis Lussier Desbiens, alongside Alexandre Girard, took charge of project conceptualization, methodology definition, and supervision, with Alexis further overseeing project administration and funding acquisition.

3.8.5 Funding

This research was funded by CRIAQ and Alliance grant number 2601-2600-703 between University of Sherbrooke, Hydro-Québec, DroneVolt and CRIAQ.

3.8.6 Data availability statement

Due to the commercial nature of this project and the associated proprietary restrictions, the raw data supporting the conclusions of this article will not be made available publicly. However, the authors confirm that the presented information and results are reproducible within the given constraints of the commercial agreement. Any inquiries regarding further specifics of the data and methodology should be directed towards the corresponding author, who will strive to address these to the best extent possible without violating any confidentiality agreements.

CHAPITRE 4

Conclusion

En conclusion, cette recherche a joué un rôle crucial dans le développement et l'évaluation de différentes tactiques d'atterrissage pour les drones conçus spécifiquement pour l'inspection des lignes électriques à haute tension. Grâce aux simulations de Monte Carlo, une enveloppe d'atterrissage a été définie pour la Stratégie d'Atterrissage Directe (DLS) et la Stratégie d'Atterrissage en Deux Étapes (TSLs) sous différentes conditions de vent. Il est démontré que la TSLs offre une sécurité et un taux de réussite d'atterrissage nettement supérieurs à ceux de la DLS, en particulier dans des conditions venteuses.

La combinaison de la méthode de contrôle semi-autonome avec l'approche TSLs a le potentiel d'améliorer significativement l'efficacité et la sûreté des inspections des lignes à haute tension. Ces progrès technologiques contribuent non seulement à une réduction des coûts mais aussi à une intégration plus fluide du LineDrone au sein des équipes de maintenance des lignes électriques à haute tension.

Les recherches présentées dans ce mémoire ouvrent la porte à de nouvelles investigations et à une amélioration continue des technologies des drones utilisés pour l'inspection des lignes électriques. Il serait enrichissant d'explorer d'autres méthodes de contrôle et d'optimisation pour améliorer davantage la performance de l'atterrissage. En outre, l'examen de l'impact de divers facteurs environnementaux sur la stabilité et la sécurité des drones serait également une perspective intéressante pour des recherches futures.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Ahmed ABROUS, René WAMKEUE et El Madjid BERKOUK. « Modeling and simulation of a wind model using a spectral representation method ». In : *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. 2015, p. 1-6. DOI : 10.1109/IRSEC.2015.7455141.
- [2] Naoki AKAI. « Reliable Monte Carlo localization for mobile robots ». In : *Journal of Field Robotics* (2022). DOI : 10.1002/rob.22149.
- [3] Rhett ALLAIN. « Let's Do the Shocking Physics of Why Power Lines Sag ». In : *Wired* (). Section : tags. ISSN : 1059-1028. URL : <https://www.wired.com/2017/04/lets-physics-power-lines-sag/> (visité le 30/04/2023).
- [4] Rooh AMIN, Li AIJUN et Shahab BAND. « A Review of Quadrotor UAV : Control Methodologies and Performance Evaluation ». In : *International Journal of Automation and Control* 10 (déc. 2015). DOI : 10.1504/IJAAC.2016.076453.
- [5] *ArdupilotCopter*. URL : <https://ardupilot.org/copter/index.html#>.
- [6] John BASS, Isaac TUNNEY et Alexis Lussier DESBIENS. « Adaptative Friction Shock Absorbers and Reverse Thrust for Fast Multirotor Landing on Inclined Surfaces ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* (2022). DOI : 10.1109/lra.2022.3176102.
- [7] J. BELLEMARE et al. « Reporting on the Last 6 years of Field Inspections Using LineCore for the Non- Destructive Evaluation of Overhead Conductors ». In : *null* (2021). DOI : null.
- [8] Lars BLACKMORE. « Autonomous precision landing of space rockets ». In : *Frontiers of Engineering : Reports on Leading-Edge Engineering from the 2016 Symposium*. T. 46. The Bridge Washington, DC. 2016, p. 15-20.
- [9] Pierre-Jean BRISTEAU et al. « The role of propeller aerodynamics in the model of a quadrotor UAV ». In : *2009 European Control Conference (ECC)*. 2009, p. 683-688. DOI : 10.23919/ECC.2009.7074482.
- [10] Wenkai CHANG et al. « Development of a power line inspection robot with hybrid operation modes ». In : *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2017, September 24, 2017 - September 28, 2017*. T. 2017-September. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vancouver, BC, Canada : Institute of Electrical et Electronics Engineers Inc., 2017, p. 973-978. DOI : 10.1109/IROS.2017.8202263.

-
- [11] Marc-Antoine CÔTÉ. *Une technologie de haute voltige développée par hydro-Québec*. 2020. URL : https://www.portailconstructo.com/pratiques_innovations/cavabienaller_technologie_haute_voltige_developpee_par_hydro_quebec.
- [12] Frank DELLAERT et al. « Monte Carlo localization for mobile robots ». In : *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)* (1999). DOI : 10.1109/robot.1999.772544.
- [13] Jinghui DENG et al. « Aerodynamic characteristics of rigid coaxial rotor by wind tunnel test and numerical calculation ». In : *Chinese Journal of Aeronautics* 32 (mars 2019). DOI : 10.1016/j.cja.2018.12.026.
- [14] DJI DJI. *M200 series : A new tool for power-line inspections*. Fév. 2020. URL : <https://enterprise.dji.com/news/detail/m200-power-line-inspection-tool>.
- [15] *Experts Confirm Dominion's Transmission Line in Historic James River Not Necessary*. National Parks Conservation Association. URL : <https://www.npca.org/articles/2549-experts-confirm-dominion-s-transmission-line-in-historic-james-river-not> (visité le 30/04/2023).
- [16] Alberto GARCIA et al. « Portable Multi-Hypothesis Monte Carlo Localization for Mobile Robots ». In : *ArXiv* (2022). DOI : 10.48550/arxiv.2209.07586.
- [17] Neil GORDON et al. « Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation ». In : *null* (1993). DOI : 10.1049/ip-f-2.1993.0015.
- [18] Philippe HAMELIN et al. « Discrete-time control of LineDrone : An assisted tracking and landing UAV for live power line inspection and maintenance ». In : *International Conference on Unmanned Aircraft Systems* (2019). DOI : 10.1109/icuas.2019.8798137.
- [19] Gerard J. HOLZMANN. « Landing a Spacecraft on Mars ». In : *IEEE Software* 30.2 (2013), p. 83-86. DOI : 10.1109/MS.2013.32.
- [20] Zheng HU et al. « Monte Carlo WLS Fuser for Nonlinear/Non-Gaussian State Estimation ». In : *International Conference on Control, Automation and Information Sciences* (2021). DOI : 10.1109/iccais52680.2021.9624493.
- [21] HYDRO-QUEBEC. *Transmission Solutions : UAV*. Accessed 2023. URL : <http://www.hydroquebec.com/robotics/transmission-solutions-uav.html>.
- [22] Nicolai IVERSEN, Oscar Bowen SCHOFIELD et Emad EBEID. « LOCATOR - Lightweight and Low-Cost Autonomous Drone System for Overhead Cable Detection and Soft Grasping ». In : *2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. ISSN : 2475-8426. Nov. 2020, p. 205-212. DOI : 10.1109/SSRR50563.2020.9292591.
-

- [23] Nicolai IVERSEN et al. « Design, Integration and Implementation of an Intelligent and Self-recharging Drone System for Autonomous Power line Inspection ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2021).
- [24] Nicolai IVERSEN et al. « LOCATOR - Lightweight and Low-Cost Autonomous Drone System for Overhead Cable Detection and Soft Grasping ». In : *IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics* (2020). DOI : 10.1109/ssrr50563.2020.9292591.
- [25] Nicolai IVERSEN et al. « Pneumatic-Mechanical Systems in UAVs : Autonomous Power Line Sensor Unit Deployment ». In : (2021). MAG ID : 3135811073.
- [26] JOSEPH L. MOORE et Joseph MOORE. « Powerline perching with a fixed-wing UAV ». In : (avr. 2009). MAG ID : 2022400583. DOI : 10.2514/6.2009-1959.
- [27] Azarakhsh KEIPOUR et al. « Visual Servoing Approach to Autonomous UAV Landing on a Moving Vehicle ». In : *Italian National Conference on Sensors* (2021). DOI : 10.3390/s22176549.
- [28] Samuel LAVOIE et Ghislain LAMBERT. « Resistance-measuring device and method ». Brev. amér. 11092632B2. Hydro QUEBEC. 17 août 2021. URL : <https://patents.google.com/patent/US11092632B2/en> (visité le 30/04/2023).
- [29] Keun Wang LEE, Joon Kyu PARK et Joon Kyu PARK. « Comparison of UAV Image and UAV LiDAR for Construction of 3D Geospatial Information ». In : *Sensors and Materials* (2019). DOI : 10.18494/sam.2019.2466.
- [30] J.Gordon LEISHMAN. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. English. 2nd Revised edition. Cambridge, United Kingdom : CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, déc. 2016. ISBN : 978-1-107-01335-3.
- [31] *Mavlink*. URL : <https://mavlink.io/en/>.
- [32] Dino MEHANOVIC et al. « Autonomous Thrust-Assisted Perching of a Fixed-Wing UAV on Vertical Surfaces ». In : *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Sous la dir. de Michael MANGAN et al. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 302-314. ISBN : 978-3-319-63537-8.
- [33] Jiawei MENG et al. « On Aerial Robots with Grasping and Perching Capabilities : A Comprehensive Review ». In : *Frontiers in Robotics and AI* (2022). DOI : 10.3389/frobt.2021.739173.
- [34] Francois MIRALLES et al. « LineDrone Technology : Landing an Unmanned Aerial Vehicle on a Power Line ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2018). DOI : 10.1109/icra.2018.8461250.
-

-
- [35] Michael MONTEMERLO, William WHITTAKER et Sebastian THRUN. « Fastslam : a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem with unknown data association ». In : *AAAI/IAAI* (2003). DOI : 10.5555/777092.777184.
- [36] Van Nhan NGUYEN et al. « Automatic autonomous vision-based power line inspection : A review of current status and the potential role of deep learning ». In : *International Journal of Electrical Power Energy Systems* (2018). DOI : 10.1016/j.ijepes.2017.12.016.
- [37] Bastien PÉRIARD. *Développement d'un algorithme de détection de câbles électriques et de localisation pour drone d'inspection de lignes électriques haute tension*. Jan. 2022. URL : <http://hdl.handle.net/11143/20130>.
- [38] Katie M. POPEK et al. « Autonomous Grasping Robotic Aerial System for Perching (AGRASP) ». In : *IEEE/RJS International Conference on Intelligent RObots and Systems* (2018). DOI : 10.1109/iro.2018.8593669.
- [39] Nicolas POULIOT, Pierre-Luc RICHARD et Serge MONTAMBAULT. « LineScout Technology Opens the Way to Robotic Inspection and Maintenance of High-Voltage Power Lines ». In : 2.1 (mars 2015). MAG ID : 2022427525, p. 1-11. DOI : 10.1109/jpets.2015.2395388.
- [40] Xue QINGSHENG et al. « Compact, UAV-mounted hyperspectral imaging system with automatic geometric distortion rectification ». In : *Optics Express* (2021). DOI : 10.1364/oe.412853.
- [41] P.-L. RICHARD et al. « LineRanger : Analysis and Field Testing of an Innovative Robot for Efficient Assessment of Bundled High-Voltage Powerlines ». In : (mai 2019). MAG ID : 2967573320, p. 9130-9136. DOI : 10.1109/icra.2019.8794397.
- [42] Tyto ROBOTICS. *Series 1780 Thrust Stand*. 2023. URL : <https://www.tytorobotics.com/pages/series-1780>.
- [43] Luther TURMELLE. *Report : Customers' inability to pay energy bills could force some utilities to delay projects*. New Haven Register. Section : Business. 26 nov. 2022. URL : <https://www.nhregister.com/business/article/Late-payments-could-hurt-utilities-cash-flow-17606816.php> (visité le 30/04/2023).
- [44] Bo WANG et al. « Geometry Design of Coaxial Rigid Rotor in High-Speed Forward Flight ». In : *International Journal of Aerospace Engineering* 2020 (déc. 2020), p. 1-18. DOI : 10.1155/2020/6650375.
- [45] Yang WU et al. « Overhead Transmission Line Parameter Reconstruction for UAV Inspection Based on Tunneling Magnetoresistive Sensors and Inverse Models ». In : *IEEE Transactions on Power Delivery* 34.3 (2019), p. 819-827. DOI : 10.1109/TPWRD.2019.2891119.
-

-
- [46] Lei YANG et al. « A Review on State-of-the-Art Power Line Inspection Techniques ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 69.12 (déc. 2020). Conference Name : IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, p. 9350-9365. ISSN : 1557-9662. DOI : 10.1109/TIM.2020.3031194.
-

