

Improving the robustness of motion modelling and control for mobile robots in harsh conditions

Dominic Baril (111 103 819)
December 2023

Supervised by Prof. F. Pomerleau
and co-supervised by Prof. P. Giguère

1 Introduction

The field of mobile robotics has known significant advances in the last decade, leading to potentially disruptive innovations in automation for various industries. Autonomous systems are currently mature enough to be functional in controlled and structured operational environments, such as warehouses and urban areas under ideal weather. uncrewed ground vehicles (UGVs) are proving to be effective solutions to current society issues related to labor shortage, workplace security and operational efficiency. However, such issues are greater for industries industries such as agriculture, forestry, defense, mining and search and rescue, which require operation in outdoors, uncontrolled environments. In these cases, systems are subject to a higher spectrum of environmental hazards, such as harsh weather, traction variability and deployment in remote environments. However, as stated by **VanBrummelen2018**, challenges inherent to these conditions remain an open question.

This work aims to extend proficiency and robustness of autonomous navigation systems to off-road environments and harsh weather. Autonomous navigation can be split into three key components : path planning, path following and localization. This work mainly focuses on path following, with some contributions to localization. For path following, the key problems arising from navigating in such environments are the high variability of wheel-to-ground traction and complex vehicle dynamics. For localization, the key problems are related to navigating in Géolocalisation et Navigation par Système de Satellites (GNSS)-denied conditions, low geometrical constraints and dynamic environments. In all, the research question for this work can be stated as follows :

How to increase robustness of UGV path following and localization for off-road and winter conditions ?

A UGV motion model is a key component to compute optimal commands with respect to motion predictions and provide localization prior for localization systems. Thus, this research project is focused at minimizing motion prediction error for models, which is directly correlated with path following and localization errors. Current approaches for UGV modeling belong to two families : Model-based, divided between kinematic and dynamic models, and Learning-based, leveraging machine learning and driving data to predict motion. Both kinematic models and learning-based approaches share the advantage that they have a low expertise requirement for deployment and

require a training dataset to reduce prediction error, leading them being the most popular choice. To answer the aforementioned research question, three key issues were identified :

1. **How does UGV behavior differ between concrete and snow-covered terrain navigating. What kinematic model behaves best for both ?**
2. **How can we standardize training dataset gathering and improve vehicle slip learning ?**
3. **What are the impacts of the boreal forest environment and winter weather on lidar-based localization ?**

These key issues guide the scientific contributions that were made through this work. The remainder of this document describes the current scientific production done through this project and upcoming plan up to thesis submission. More specifically, [section 2](#) describes the currently submitted and published research work, summarizing contributions and lessons learned for each paper. Afterwards, [section 3](#) details the remaining research work [section 4](#) and provides a schedule leading to thesis submission. Lastly, [section 5](#) provides a brief conclusion.

2 Current scientific production

This section describes the current scientific done through this Ph.D. thesis work and collaborations done with other researchers. First, the three articles conducted directly for which I acted as first author. All of these scientific contributions are related to the subproblems states in [section 1](#). Then all of the worth in which I have participated as co-author is described briefly. Since mobile robotics is a field requiring various expertise and human resources to conduct field deployments, all scientific production presented includes multiple co-authors.

2.1 Articles published and submitted as first author

D. BARIL, V. GRONDIN, S.-P. DESCHENES, J. LACONTE, M. VAIDIS, V. KUBELKA, A. GALLANT, P. GIGUERE et F. POMERLEAU, “Evaluation of Skid-Steering Kinematic Models for Subarctic Environments”, in *2020 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2020, p. 198-205

The first article that I have published was submitted to the “Conference on Robot and Vision (CRV)”, in May 2020. This article aims to evaluate the performance of skid-steering mobile robots (SSMRs) kinematic motion models on dry concrete and snow-covered terrain. For this article In this article, we collected a total of 2km of human driving data to evaluate four kinematic models from the literature. We leverage lidar point cloud registration based on the iterative closest point (ICP) algorithm to generate ground truth localization. The resulting contributions are as follows :

1. validate their fitness for a heavier platform on a relatively uniform concrete terrain ;

2. evaluate their performance for snow-covered terrain using more than 2km of trajectories traveled ; and
3. highlight the impact of angular motion on the accuracy of SSMRs kinematic modeling.

The four kinematic models evaluated are the extended differential-drive asymmetrical, the extended differential-drive symmetrical [2], the full linear [3] and radius of curvature (ROC)-based [4]. We also show that models with less parameters tend to perform better for angular prediction and models with more parameters perform better for translation prediction, due to their ability to predict non-zero lateral motion. However, once trained, the performance of all models is similar for both terrain types, suggesting that all kinematic models evaluated behave similarly. The largest prediction error occurs when the vehicle’s angular velocity is at its maximum, which leads to the highest amount of vehicle slip.

Additionally, training kinematic models with empirical driving data leads to significant prediction error reduction, for both concrete and snow-covered terrain. The relation between training window and prediction error is also studied in this work, clearly showing that models perform best when predicting for the same horizon for which they were trained. We show that for the same commanded angular velocity, angular velocity is higher on snow-covered terrain than concrete. This phenomenon is due to the high friction caused by the tire deformation occurring during skidding on concrete, compared to soft terrain deformation on snow-covered terrain.

The take home message for this published paper was that kinematic motion models are adequate for predicting SSMR motion, both on dry concrete and snow-covered terrain, however they require a training dataset dependent to vehicle and terrain properties. During the experimental work conducted for this paper, we imitated similar work by having a human operator to stimulate as many commands as possible, however this process lead to biased command stimulation and forward-only driving and proved to be time-consuming. Since deploying UGVs in off-road environments is a complex endeavor, reducing the time requiring to generate a motion model that is accurate enough for stable autonomous navigation is key.

D. BARIL, S.-P. DESCHÊNES, L. COUPAL, C. GOFFIN, J. LÉPINE, P. GIGUÈRE et F. POMERLEAU, “DRIVE: Data-driven Robot Input Vector Exploration”,

Le second article sur lequel j’ai travaillé a été soumis à la conférence appelée “International Conference on Robotics and Automation (ICRA)”, en septembre 2023. Cet article se concentre sur les différentes méthodes de calibration extrinsèque employées pour exprimer les données provenant de plusieurs stations totales robotiques dans un référentiel commun, et répond donc à la deuxième problématique de mes travaux de recherches. Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode dynamique qui se base sur les trois prismes suivis par nos trois stations totales robotiques. Une comparaison est effectuée entre toutes les méthodes étudiées : la nôtre augmente la précision de 25 % par rapport à la meilleure des méthodes utilisées dans l’état de l’art. Pour cet article, j’ai rédigé une bonne partie du texte, développé une partie du code pour le traitement des données, fait les expériences sur le terrain, et interprété les résultats obtenus. La citation complète de ma publication est la suivante :

L'article décrit dans un premier temps l'état de l'art à propos des différentes méthodes de calibration extrinsèque existantes en géomatique et arpentage. La première méthode est appelée calibration en deux-points. Elle a uniquement besoin de deux points statiques dont on connaît très précisément la position relative, au moins au millimètre près. Les positions sont mesurées par chacune des stations totales et la méthode nous donne les transformations rigides entre les référentiels respectifs. La seconde méthode, qui est la plus utilisée pour faire une calibration extrinsèque, est celle des points statiques de calibration. Cette méthode consiste à prendre les positions statiques de nombreux points de contrôles, à recalculer leurs positions, ce qui nous donne les transformations rigides entre les référentiels respectifs des stations totales. La troisième méthode est identique à celle précédemment citée, mais la position des points de contrôle est prise de manière dynamique avec un prisme en mouvement. Toutes ces méthodes, en plus de la nouvelle que nous proposons, sont décrites mathématiquement dans la section théorie du papier. L'état de l'art du papier donne également les principales sources de bruits à prendre en compte lors d'expérimentations avec plusieurs stations totales robotiques.

La nouvelle méthode de calibration extrinsèque que nous proposons se base sur les distances inter-prismes positionnées sur la plateforme robotique. Les distances pouvant être déterminées au millimètre près avec une station totale, nous pouvons minimiser la distance de ces distances inter-prismes avec une fonction de coût optimisée dans l'algèbre de Lie par une méthode des moindres carrés. Le résultat de cette minimisation nous donne directement les transformations rigides entre les référentiels des différentes stations totales robotiques. Pour pouvoir appliquer cette minimisation, nous pré-traitons les données brutes provenant des stations totales avec un pipeline dédié filtrant les données dans un premier temps. Puis, dans un deuxième temps, celles-ci sont interpolées permettant les mesures des stations totales à un même instant. Ceci n'est pas le cas habituellement puisque les données sont prises de manière asynchrone.

Afin de comparer les différentes méthodes, un jeu de données totalisant plus de 30 km de trajectoire de la plateforme robotique a pu être enregistré lors de 40 expériences différentes : elles ont été réalisées entre fin février 2022 et septembre 2022 lors de 15 déploiements. Ces déploiements se déroulèrent dans deux types d'environnement : à l'extérieur, tout d'abord sur le campus de l'Université Laval où se situent des bases de calibrations statiques permettant de réaliser la calibration en deux-points, puis dans les tunnels de l'Université Laval, longs et droits sur plusieurs centaines de mètres à certains endroits. Le choix s'est porté sur ces lieux du fait de leurs différentes configurations spatiales et des expériences de cartographie 3D avec lidars qu'y mène le Norlab. Comme suite à chaque déploiement, une station totale a mesuré la position des prismes et de certains capteurs avec précision afin que notre nouvelle méthode de calibration extrinsèque puisse être appliquée.

Grâce à ce jeu de données, des tests de sensibilités et d'ablations ont pu être effectués sur les différents paramètres et modules du pipeline de pré-traitement. Il a été démontré que le pipeline augmente la précision des résultats de 18 % grâce au filtrage des données erronées. De plus, une simple interpolation linéaire des données est suffisante en comparaison d'une utilisation de "Gaussian Process" pour laquelle une meilleure précision était attendue. La comparaison entre les différentes

méthodes de calibration extrinsèque nous démontre que la nôtre est la plus précise. Son exactitude est cependant plus faible de quelques millimètres en comparaison de la méthode des points de contrôles statiques. Globalement, toutes les méthodes sont plus précises que l'utilisation de GNSS.

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle méthode de calibration extrinsèque qui ne se base pas sur la mesure de points statiques, ce qui permet d'augmenter le temps consacré aux expériences lors de déploiements. Cette nouvelle méthode s'accompagne d'un pipeline de pré-traitement des données venant des stations totales robotiques. L'utilisation du pipeline augmente de 18 % la précision des résultats, et ceux-ci sont plus précis de 25 % car combinés à notre nouvelle méthode de calibration extrinsèque. Notre nouvelle méthode de calibration est limitée dans certains types d'environnements comme les tunnels, où les trajectoires sont longues et droites, ce qui empêche notre minimisation de converger vers le résultat attendu. Des simulations plus poussées seront effectuées afin de mieux caractériser ces limites d'utilisation. La position des prismes sur la plateforme robotique a également un effet sur le résultat, qui doit être davantage quantifié avec précision. Cet article met à notre disposition tous les moyens de recueillir des données précises permettant de reconstruire les vérités terrains précises qui seront utiles pour l'évaluation des algorithmes de cartographie 3D. Le code ainsi que le jeu de données utilisés sont disponibles en ligne¹.

2.2 Articles published and submitted as co-author

Vlad2022 : Ce papier présente un moyen d'améliorer la précision de la localisation par lidar grâce à la prise en compte du vecteur de gravité donné par une centrale inertielle. Pour ce papier, j'ai effectué les comparaisons de trajectoire entre celles données par notre algorithme de cartographie amélioré et celles des vérités terrains prises par des GNSS. J'ai également apporté mon aide à la prise de jeux de données sur le terrain et à la rédaction.

Baril2022 : Cet article de journal présente un pipeline de "teach-and-repeat" qui a été testé en forêt Montmorency. Avec ce pipeline, la plateforme robotique a pu effectuer près de 20 km de trajectoire en toute autonomie, dans des conditions boréales. Pour ce faire, j'ai enregistré sur le terrain des données de vérités terrains à l'aide de mon système de stations totales et de GNSS, puis j'ai traité les données recueillies. J'ai également participé à la rédaction de l'article.

Roucek2021 : En février 2020, j'ai participé à la compétition du DARPA ("Defense Advanced Research Projects Agency") Urban Challenge. Ce papier présente le système utilisé lors de la compétition, ainsi que les résultats obtenus. J'ai participé à la compétition, traité les données en lien avec la cartographie 3D et effectué l'évaluation de la précision de notre algorithme pour la localisation des plateformes utilisées.

1. https://github.com/norlab-ulaval/RTS_Extrinsic_Calibration

Chahine2021 : Ce papier présente un algorithme de cartographie 3D se basant sur différents capteurs visant ainsi à améliorer la précision du résultat (lidar, caméra et GNSS ensemble).

C'est dans ce papier que j'ai présenté pour la première fois le début de mes recherches avec mon système de stations totales. Mais seule une station totale a pu alors être utilisée du fait du manque d'espace pour les cibles sur le sac à dos avec les capteurs. J'ai aidé à la prise de données sur le terrain, ainsi qu'à leur traitement pour l'obtention de la vérité terrain, et j'ai également participé à la rédaction de l'article.

D. BARIL, V. GRONDIN, S.-P. DESCHENES, J. LACONTE, M. VAIDIS, V. KUBELKA, A. GALLANT, P. GIGUERE et F. POMERLEAU, "Evaluation of Skid-Steering Kinematic Models for Subarctic Environments", in *2020 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2020, p. 198-205 : Cet article présente l'évaluation de modèle cinématique sur différents types de terrains : asphalte ou neige. Le but de l'article est de présenter les résultats des différents modèles et de discuter de leur efficacité. Pour cet article, j'ai pris des données sur le terrain et j'ai traité celles provenant de notre algorithme de cartographie. J'ai également aidé à la rédaction.

Laconte2021 : Ce papier présente l'état de l'art pour les différentes méthodes de localisation de véhicules sur des autoroutes, principalement par la détection des lignes via des systèmes de caméras et de lidars. J'ai aidé à la rédaction de l'article. Aucune donnée n'a été prise sur le terrain.

Vaidis2020 : Cet article est un article de "workshop" pour la conférence ICRA 2021, en ce sens non pertinent pour ma thèse. Il aborde l'amélioration de notre algorithme de cartographie avec des contraintes de rotation fixées dans l'algèbre de Lie via des données issues d'une centrale inertielle. Pour ce papier, j'ai effectué les expériences, traité les données et rédigé la grande partie de l'article.

3 Recherches futures

Dans les ?? ont été présentés le travail réalisé pour mettre au point le système de stations totales robotiques, ainsi que la collecte de données dans différents types d'environnement avec une précision sub-centimétrique. Les deux premières problématiques de mon doctorat concernant la mise au point de ce système de collecte de données ainsi que l'obtention d'une calibration extrinsèque de précision ont été détaillées et résolues. La présente section détaille les travaux de recherches que je planifie afin de répondre à ma dernière problématique de recherche, à savoir comment utiliser les données récoltées pour générer des vérités terrains précises dans l'ordre du millimètre, et effectuer des comparaisons de trajectoires avec ces vérités terrains. Le calendrier détaillé de mes recherches restantes est présenté dans la [section 4](#).

3.1 Génération de vérités terrains

La dernière partie de mon doctorat se concentrera donc sur la génération des vérités terrains, ce qui est la suite logique de mes travaux de recherches, ainsi que le but ultime de mon système de stations totales robotiques. Cette dernière problématique se décompose en trois sous-parties :

1. La génération des vérités terrains,
2. La gestion de l'incertitude,
3. L'évaluation de trajectoires avec ces vérités terrains.

La génération de vérités terrains, à savoir la pose de la plateforme robotique en six degrés de liberté, a déjà été succinctement évoquée dans le papier CRV 2021 : sa faisabilité a été démontrée. Celle-ci a été effectuée après l'interpolation des trajectoires de prismes par une minimisation point-à-point entre les positions théoriques des prismes les uns par rapport aux autres, et leurs positions mesurées sur le terrain. Dans le papier d'ICRA 2023, nous avons relaté que l'utilisation de modules de filtrage permettait d'augmenter la précision de 18 % des résultats finaux. Nous souhaitons appliquer le même principe à la génération des vérités terrains pour en augmenter la précision, et utiliser d'autres méthodes d'interpolation ou d'optimisation de trajectoires pour générer ces vérités terrains et évaluer quelles en sont les meilleures, notamment pour quantifier l'incertitude.

L'incertitude est rarement quantifiée lors de la génération de vérités terrains. Elle l'est encore moins pour l'évaluation de trajectoires par rapport à celles-ci. Avec notre système de trois stations totales et des trois prismes, nous avons la possibilité de pouvoir estimer l'incertitude grâce à la métrique de la distance inter-prisme. C'est pourquoi l'objectif de mes prochaines recherches portera sur la manière de quantifier cette incertitude à l'aide des expériences effectuées. Mon souhait est également d'exploiter cette incertitude pour ce qui concerne la comparaison de trajectoires.

L'évaluation de trajectoires avec des vérités terrains se fait depuis de nombreuses années. La très grande majorité des évaluations utilise la norme euclidienne pour établir les comparaisons. Cette norme est facile à mettre en application, mais elle ne prend pas en compte l'incertitude, ce qui peut fausser le résultat et donc rendre inutilisable la vérité terrain. Ces situations peuvent se produire lorsqu'un GNSS est utilisé pour générer une vérité terrain, alors que son signal n'est pas bon. Une incertitude de plusieurs mètres peut alors apparaître comme ce fut le cas pour le jeu de données du Kitty Dataset², lequel compare des trajectoires données par des algorithmes de cartographie à sa vérité terrain issue d'un GNSS. En dessous de 100 m d'évaluation par une métrique d'erreur de pose relative, les résultats peuvent être biaisés. Les auteurs du jeu de données ont donc mis la distance d'évaluation pour une métrique d'erreur de pose relative à 100 m au minimum pour éviter ces cas. Dans mes recherches, je souhaite améliorer la prise en compte de l'incertitude concernant l'évaluation de trajectoires. Cela permettra un résultat plus représentatif pour effectuer des comparaisons d'algorithmes entre eux.

2. https://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_odometry.php

Ces trois sous-parties de ma problématique finale seront développées dans un article de journal que je soumettrai fin mars 2023. Le journal visé sera celui de “Field Robotics”³. Cet article de journal se concentrera sur la manière dont on générera les vérités terrains avec notre système de stations totales robotiques. Il sera une suite logique des deux premiers articles, et présentera des jeux de données provenant de déploiements effectués durant une année entière (février 2022 à décembre 2022) afin de pouvoir montrer la plus-value de notre système dans différents types d’environnements et dans différentes conditions météorologiques. Le détail des expériences à faire est présenté dans la prochaine sous-section.

3.2 Expériences prévues

Afin de préparer mes recherches futures, plus d’une dizaine de déploiements sont prévus en ces mois de novembre et décembre 2022. Je collecterai les données manquantes à la présentation de mon travail dans l’article de journal. Ces déploiements sont répartis en plusieurs étapes correspondant à différentes parties de ma recherche, à savoir l’évaluation de la précision du système de stations totales robotiques dans différentes conditions, la comparaison de celle-ci avec les GNSS sur un plus grand nombre de données, et la récolte de plus de données en forêt de Montmorency.

Quelques évaluations ont déjà été réalisées et répertoriées dans l’article de CRV 2021 sur notre système afin de caractériser la précision de ce dernier. Cependant, le jeu de données alors utilisé comprenait moins de 500 m de trajectoires de la plateforme robotique et la méthode de calibration extrinsèque utilisée n’était pas aussi précise que celle développée dans l’article d’ICRA 2023. Quelques expériences pour mieux comprendre notre système font défaut au jeu de données utilisé dans l’article d’ICRA 2023 : à savoir la distance limite de la prise de données due à la distance maximale permise par les stations totales ainsi que la distance maximale des modules LoRa de communication. Des expériences seront donc menées afin de quantifier ces limites, mais également afin de quantifier la précision en fonction de la distance de la prise de mesure. De plus, dans les articles de CRV 2021 et d’ICRA 2023 a été soulevée la question de l’influence de la position des prismes sur la plateforme robotique. Des simulations et des expériences seront menées afin de pouvoir répondre à cette question.

Dans l’article de CRV 2021, a été effectuée une comparaison avec des données GNSS en milieux ouverts ainsi qu’en forêt. Pour faire suite aux récentes améliorations apportées à notre système, une collecte de données plus conséquente sera réalisée dans le but d’augmenter le nombre de données exploitables en plus de celles utilisées pour le papier d’ICRA 2023. Les données GNSS ont pour le moment uniquement servi à comparer la précision du système par rapport à la métrique de la distance inter-prisme ou inter-GNSS. Les données que nous récolterons prochainement serviront cette fois à faire des comparaisons de trajectoires avec les vérités terrains. De plus, les trajets effectués prendront en compte différents types de scénarios, tels que l’alternance de milieux ouverts ou couverts, afin de mettre en évidence les problèmes des GNSS comparés à notre système de stations totales.

3. https://www.journalfieldrobotics.org/Field_Robotics/Home.html

Enfin, il est prévu de faire des déploiements en forêt de Montmorency dans le but de recueillir des données avec météo variable : par temps de brouillard et de chutes de neige afin de quantifier la précision de notre système pendant ces épisodes climatiques. De ce fait, au moins deux déploiements sont prévus à un mois d'écart : le premier au début du mois de novembre 2022 (sans neige), puis le second au début du mois de décembre (avec neige). Les deux plateformes robotiques seront utilisées afin de maximiser la prise de données durant ces déploiements. Ces expériences visant à comparer les jeux de données seront cependant toujours réalisées au même endroit, quelle que soit la météo.

Il est à noter que pour chacun des déploiements effectués, les données provenant de capteurs lidars seront également récoltées afin de pouvoir comparer la trajectoire donnée par notre algorithme de cartographie 3D à celle issue de notre système de stations totales robotiques ou de GNSS. Ainsi, grâce à chaque expérience menée, nous pourrions étudier un résultat spécifique et le présenter dans l'article de journal. Le jeu de données de l'article d'ICRA 2023 sera également exploité pour certains résultats et certaines comparaisons, comme cela avait été prévu initialement. Au total, nous souhaitons avoir plus de 50 km de trajectoires de plateforme robotiques afin d'éliminer certaines valeurs aberrantes lors de la génération des résultats, et pouvoir ainsi accéder à un jeu de données complet prenant en compte différents types d'événements. Cela nous est nécessaire si nous souhaitons trouver les limites de notre système, comme ce fut le cas par exemple dans l'article d'ICRA 2023.

4 Calendrier des recherches futures

Le calendrier détaillé de la planification des objectifs pour la rédaction du prochain article de journal est située dans la [section 6](#) en annexe. Ce calendrier s'étend de novembre 2022 à mars 2023. Les différentes étapes de mes recherches y sont présentées : expériences à faire sur le terrain, génération des vérités terrains, prise en compte de l'incertitude pour ces générations, évaluation de trajectoires, et enfin rédaction de l'article de journal.

Mon article de journal rédigé, je me concentrerai sur la rédaction de ma thèse. La [figure 1](#) montre le calendrier de la planification des objectifs pour le dépôt final de la thèse. Je souhaite réaliser une thèse par articles. Elle en comportera trois que j'ai publiés ou soumis : CRV 2021, ICRA 2023 et Field Robotics 2023. S'il est accepté, l'article d'ICRA 2023 sera présenté à la conférence à la fin du mois de mai 2023. Pour ce qui est de l'article du journal Field Robotics, il sera probablement publié d'ici un an ou deux, soit en 2024 ou 2025, après les différentes rondes de révisions.

Je prévois deux mois de rédaction de thèse juste après la soumission de mon article de journal, soit en avril et mai 2023. Je ferai mon dépôt initial au mois de mai 2023. Après une période de 6 à 8 semaines, je pourrai effectuer ma défense durant le mois de juillet 2023. Si ma thèse est acceptée, il m'appartiendra de faire les corrections données par mon comité pour un dépôt final escompté au mois d'août 2023.

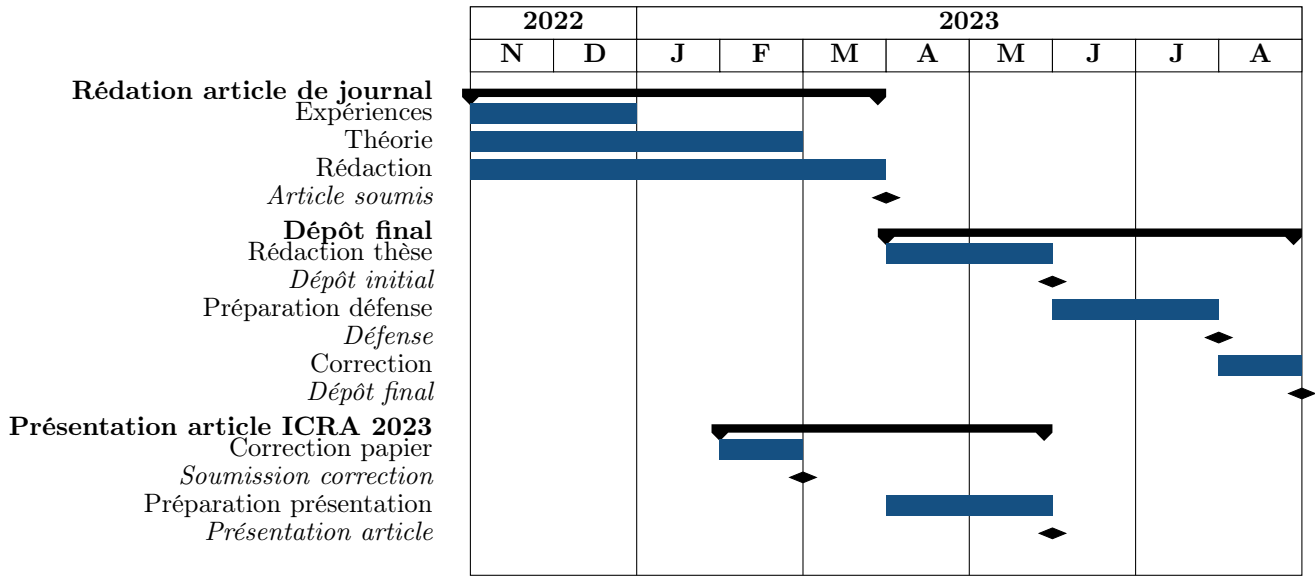


FIGURE 1 – Diagramme de Gantt contenant les objectifs devant être accompli d’ici au dépôt final de la thèse.

5 Conclusion

À travers cette proposition de thèse, un récapitulatif de mes contributions vis-à-vis de ma problématique de recherche a été présenté, et la planification de la fin de mon doctorat a été détaillée. J’ai démontré que j’avais suffisamment avancé dans mes recherches et que je serai sur le point d’effectuer mon dépôt initial d’ici à quelques mois. La problématique de ma recherche porte sur la génération précise de trajectoires de références pour les véhicules en mouvement ainsi que de leur évaluation. Deux sous-parties de ma problématique de recherche ont déjà été abordés et résolus à travers la publication de deux articles de conférence, dont un soumis en septembre dernier. Dans un premier temps, un système basé sur trois stations totales robotiques a été créé et testé sur le terrain dans le but de pouvoir générer des vérités terrains ayant une précision sub-centimétrique. Par la suite, une amélioration de la calibration extrinsèque entre les différents référentiels de ces stations totales robotiques a été proposée et validée sur un jeu de données de plus de 30 km de trajectoires de plateformes robotiques. Mes travaux actuels portent sur la publication d’un dernier article de journal qui finalisera mes recherches. Cet article abordera la problématique de l’évaluation des trajectoires de références accompagnée de celles générées par des algorithmes de cartographie 3D. Il abordera également la gestion de l’incertitude dans ces évaluations et mentionnera l’impact de cette incertitude sur les résultats.

Le calendrier des étapes restantes a été détaillé dans la [section 4](#). La rédaction de mon article de journal aura lieu du mois de novembre 2022 au mois de mars 2023. Ensuite sera effectuée la rédaction de ma thèse. Je prévois une rédaction de thèse par articles comme cités dans ce document, à savoir l’article de CRV 2021, l’article de ICRA 2023 et l’article de journal Field Robotics 2023 que je

rédigerais. Le dépôt initial de ma thèse aura lieu au mois de mai 2023 et ma défense devrait se tenir durant le mois de juillet 2023. Je prévois ainsi de terminer mon dépôt final durant le mois d'août 2023 après avoir effectué les corrections demandées suite à ma défense.

Références

- [1] D. BARIL, V. GRONDIN, S.-P. DESCHENES et al., “Evaluation of Skid-Steering Kinematic Models for Subarctic Environments”, in *2020 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2020, p. 198-205.
- [2] A. MANDOW, J. L. MARTINEZ, J. MORALES, J. L. BLANCO, A. GARCIA-CEREZO et J. GONZALEZ, “Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots”, in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007, p. 1222-1227.
- [3] G. ANOUSAKI et K. KYRIAKOPOULOS, “A dead-reckoning scheme for skid-steered vehicles in outdoor environments”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, IEEE, 2004, 580-585 Vol.1.
- [4] T. WANG, Y. WU, J. LIANG, C. HAN, J. CHEN et Q. ZHAO, “Analysis and Experimental Kinematics of a Skid-Steering Wheeled Robot Based on a Laser Scanner Sensor”, *Sensors*, t. 15, n° 5, p. 9681-9702, 2015.
- [5] D. BARIL, S.-P. DESCHÊNES, L. COUPAL et al., “DRIVE: Data-driven Robot Input Vector Exploration”,

6 Annexe

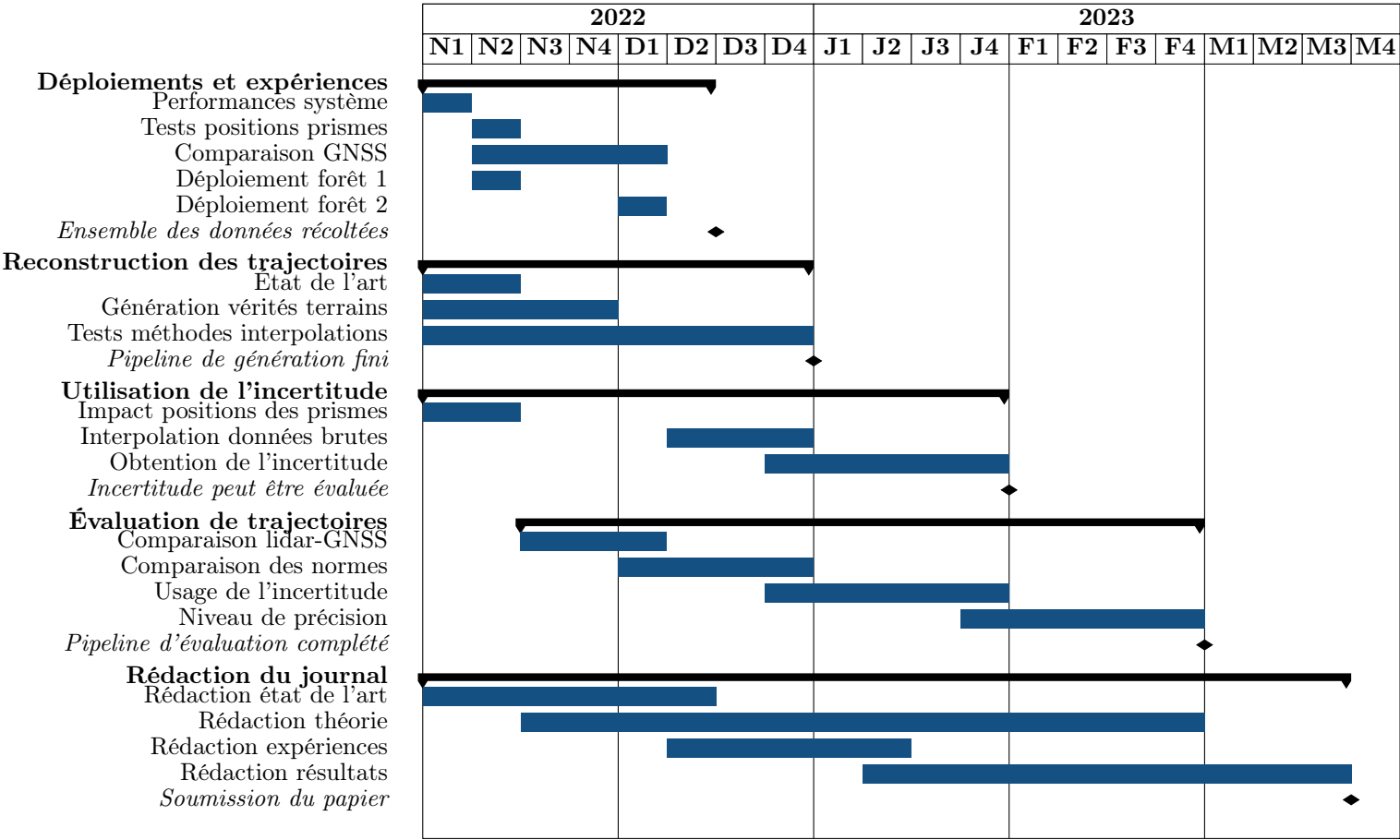


FIGURE 2 – Diagramme de Gantt contenant les objectifs de recherche devant être accomplis d’ici au dépôt initial de la thèse pour la soumission de l’article de journal.