الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
المدرسة العليا للإعلام الآلي 8 ماي 5491 - سيدي بلعباس
Higher School of Computer Science
8 Mai 1945 - Sidi Bel Abbes

Graduation Thesis

To obtain the diploma of **Engineering Degree**

Field of Study: **Computer Science**

Specialization: **Computer Systems Engineering**

Theme

Optimizing the Vehicle Routing Problem in an Uncertain Context Using Machine Learning

---

Presented by
Mohamed Khelifaoui

Defended on: **September,2025**
In front of the jury composed of

Ms. BEZZAOUCHA Fatima Souad	President of the Jury
Ms. TAOULI Amina	Thesis Supervisor
Mr. AZZA Mohamed	Co-Supervisor
Ms. ELHANNANI Souad	Examiner

Academic Year: 2024/2025

Abstract

The vehicle routing problem with time windows lies at the intersection of operational efficiency and service reliability. In practice, travel and service times—and sometimes demand—vary with context such as traffic, weather, and events, which makes deterministic plans fragile. This manuscript offers a coherent view of the problem under uncertainty by linking modeling, prediction, and decision-making. It consolidates the foundations of single- and multi-objective optimization, canonical formulations, and solution strategies needed to reason about trade-offs among cost, punctuality, and fleet utilization. It compares scenario-based stochastic programming, service-level models with probabilistic constraints, and robust and distributionally robust optimization, with particular attention to calibration and out-of-sample testing. It also shows how to incorporate context-aware information and uncertainty estimates into routing decisions while respecting temporal and spatial dependence, so that path variability and on-time performance are assessed realistically. These choices are situated within established benchmarks and the literature to clarify assumptions, evaluation practices, and the trade-offs among efficiency, service levels, and computational tractability.

Within this framework, the dissertation studies how to design routing plans that remain reliable as conditions change while keeping distance and fleet usage under control. A reproducible pipeline on the Solomon benchmark structures the study, with a deterministic baseline using OR-Tools, an uncertainty layer separating system-wide from local variation, and a shared-scenario evaluation protocol using common random numbers that reports on-time rates, tardiness, distance, number of vehicles, and runtime. Three complementary strategies are evaluated: quantile-based buffering, Sample Average Approximation to balance expected cost and delay, and Γ-budgeted robust protection that shields each route from a limited number of adverse segments. These approaches consistently improve median and tail punctuality with modest increases in distance. A service-level-oriented selection rule chooses, among plans that meet the punctuality target, the least-cost option and then the most frugal in fleet usage, while a lightweight machine-learning selector recommends a robust strategy based on instance features. Together, these elements make robust VRPTW a practical and auditable workflow and open paths to extensions on time-dependent networks, embedded probabilistic constraints, and validation on operational data.

Résumé

Le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps se situe à l'intersection de l'efficacité opérationnelle et de la fiabilité de service. En pratique les temps de trajet et de service ainsi que parfois la demande varient avec le contexte comme la circulation la météo et les événements ce qui fragilise les plans déterministes. Ce manuscrit propose une vision cohérente du problème sous incertitude en reliant modélisation prédiction et décision. Il consolide les fondations de l'optimisation à un objectif et à objectifs multiples les formulations canoniques et les stratégies de résolution nécessaires pour raisonner sur les compromis entre coût ponctualité et utilisation de flotte. Il compare la programmation stochastique fondée sur des scénarios les modèles de niveau de service à contraintes de probabilité et l'optimisation robuste et robuste distributionnelle avec une attention portée à l'étalonnage et aux tests hors échantillon. Il montre comment intégrer des informations tenant compte du contexte et des estimations d'incertitude dans les décisions de routage tout en respectant les dépendances temporelles et spatiales afin d'évaluer de façon réaliste la variabilité des trajets et la ponctualité. Ces choix sont replacés dans le cadre des jeux de référence et de la littérature pour clarifier les hypothèses les pratiques d'évaluation et les compromis entre efficacité niveaux de service et calculabilité.

Dans ce cadre la thèse étudie la conception de plans de tournée qui restent fiables lorsque les conditions varient tout en maîtrisant la distance et l'usage de la flotte. Un pipeline reproductible sur le jeu de référence de Solomon structure l'étude avec une base déterministe via OR Tools une couche d'incertitude qui sépare variations globales et locales et un protocole d'évaluation à scénarios partagés utilisant des nombres aléatoires communs qui rapporte taux de ponctualité retard distance nombre de véhicules et temps de calcul. Trois stratégies complémentaires sont évaluées un gonflement fondé sur les quantiles une approximation par moyenne d'échantillon SAA pour arbitrer entre coût et retard espéré et une protection robuste à budget Γ qui préserve chaque tournée contre un nombre limité de segments défavorables. Ces approches améliorent régulièrement la ponctualité médiane et en queue avec des hausses modestes de distance. Une règle de sélection orientée vers les SLA choisit parmi les plans qui atteignent la cible de ponctualité le moins coûteux puis le plus économe en flotte et un sélecteur léger d'apprentissage automatique recommande la stratégie robuste à partir des caractéristiques des instances. L'ensemble fait du VRPTW robuste un flux de travail pratique et traçable et ouvre vers des extensions sur réseaux dépendants du temps l'intégration directe de contraintes de probabilité et une validation sur données opérationnelles.

الملخص

توجد مسألة توجيه المركبات مع نوافذ زمنية عند تقاطع الكفاءة التشغيلية وموثوقية الخدمة. في الواقع العملي تتغير أزمنة السفر والخدمة وأحياناً الطلب تبعاً للسياق مثل الازدحام والطقس والفعاليات مما يجعل الخطط الحتمية هشة. يقدّم هذا العمل منظوراً متماسكاً لمسألة التوجيه تحت عدم اليقين يربط بين النمذجة والتنبؤ واتخاذ القرار. فهو يرسخ أسس التحسين من منظور هدف واحد ومنظور متعدد الأهداف ويعرض الصيغ القياسية وأساليب الحل اللازمة لفهم المفاضلات بين الكلفة والانضباط الزمني واستخدام الأسطول. كما يقارن بين البرمجة العشوائية القائمة على السيناريوهات ونماذج مستوى الخدمة ذات القيود الاحتمالية والتحسين القوي والتحسين القوي توزيعياً مع اهتمام خاص بالمعايرة والتقييم خارج العينة. ويتناول دمج معلومات مدركة للسياق وتقديرات عدم اليقين في قرارات التوجيه مع احترام الاعتمادين الزمني والمكاني حتى لا تُبالغ تقديرات تباين المسارات وموثوقية الوصول في الوقت المناسب. وتوضع هذه الخيارات ضمن المعايير المرجعية والأدبيات لتوضيح الافتراضات وممارسات التقييم والمفاضلات بين الكفاءة ومستويات الخدمة وقابلية الحل.

انطلاقاً من هذه الخلفية تسأل الأطروحة كيف نصمم خطط توجيه تبقى موثوقة مع تغيّر الظروف مع إبقاء المسافة واستخدام الأسطول تحت السيطرة. يثبت البحث خط أنابيب قابلًا لإعادة الإنتاج على مرجع سليمان يتضمن خط أساس حتمي باستخدام Tools OR وطبقة لعدم اليقين تفصل بين التغيّر على مستوى النظام والتغيّر المحلي وبروتوكول تقييم بسيناريوهات مشتركة باستخدام أرقام عشوائية مشتركة يبلّغ عن معدلات الالتزام بالمواعيد والتأخر والمسافة وعدد المركبات وزمن التنفيذ. تختبر الدراسة ثلاث استراتيجيات متكاملة هي تضخيم قائم على القيم المئينية وتقريب المتوسط العيني SAA لتحقيق توازن بين الكلفة والتأخر المتوقع وحماية قوية بميزانية لكل مسار ضد عدد محدود من المقاطع غير المواتية. ترفع هذه الأساليب أداء الالتزام في الوسيط والذيل بزيادات طفيفة في المسافة. وتُعرّف قاعدة اختيار موجهة نحو اتفاقيات مستوى الخدمة تختار بين الخطط التي تحقق مستوى الالتزام المطلوب الأقل كلفة ثم الأقل استخداماً للأسطول مع مُنتقٍ خفيف بالتعلم الآلي يوصي بالاستراتيجية المناسبة انطلاقاً من خصائص المثيل. بذلك يتحول التوجيه القوي إلى سير عمل عملي قابل للتدقيق ويمهد الطريق لتوسعات نحو شبكات تعتمد على الزمن وفرض قيود احتمالية داخل المحلّل والتحقق على بيانات تشغيلية.