POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Outil web d'inventaire de stationnement hors rue

PAUL CHARBONNEAU
Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie civil

Décembre 2025

© Paul Charbonneau, 2025.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Outil web d'inventaire de stationnement hors rue

présenté par **Paul CHARBONNEAU**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Martin TRÉPANIER, président
Catherine MORENCY, membre et directrice de recherche
Lili CLAES, membre externe

DÉDICACE

« Une carte n'est pas le territoire »
Korzybski
« Mieux vaut une réponse approximative à la bonne question, qui est souvent vague, qu'une réponse exacte à la mauvaise question qui peut toujours être précise »
Tukey
« Si une zoologiste vous disait qu'elle étudiait l'association entre le panda et son habitat, mais n'étudiait pas l'habitat du panda, vous trouveriez ça étrange »
Manville

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma conjointe, Chloe Constans, qui m'a appuyé quand j'ai décidé de prendre une pause de ma vie professionnelle pour redevenir étudiant dans la trentaine. Sans son appui indéfectible et ses encouragements, vous ne liriez pas ces mots.

Merci à ma directrice de recherche Catherine Morency pour ses idées et suggestions au fil du projet, en espérant que ce projet fournira bien des idées pour de futurs étudiants.

Mes remerciements finaux vont à mes collègues du laboratoire qui ont probablement entendu plus qu'ils ne le voulaient sur le stationnement tout au long du projet. Alexandre Brunet, Alicia Brodeur, Amandine Goracy, Antoine Laporte, Bita Farokhian, Clémence de Rolland, Émilie Savard, Hamed Malekzadeh, Loïc Miara, Mathilde Zanolini, Mehdi Hamdaoui, Nicolas Charron, Simon Brassard, Suzanne Pirie et Yuxuan Wang ; vous avez rendu un local beige en un endroit bien drôle au fil de ces deux années !

RÉSUMÉ

Les automobiles passent 95% de leur temps dans un espace de stationnement et une littérature grandissante montre que la provision gratuite de cette infrastructure joue un rôle dans les choix de mobilité des citoyens. Les municipalités ont réagi aux enjeux de stationnement en requérant qu'un nombre minimal de places soient construites pour chaque nouvelle construction.

Ce mémoire propose un site web et une infrastructure informatique attenante pour stocker et diffuser différentes informations reliées au stationnement pour pallier la fragmentation et le manque d'exhaustivité entourant les données actuelles.

L'outil et la base de données sont divisés en quatre grandes parties. La première permet de stocker et visualiser des estimations du nombre de places pour un même lot. La deuxième modélise la variation des règlements minimums de stationnement en fonction du temps, de l'espace et de l'utilisation du sol et d'estimer la quantité de stationnements requis pour les entrées du rôle foncier. La troisième permet de sélectionner un échantillon aléatoire de lots sur le territoire d'étude pour évaluer la performance du modèle. La quatrième développe un outil d'agrégation, de visualisation et d'analyse des résultats de prédictions.

La ville de Québec est présentée comme étude de cas. L'historique des règlements de la ville est retracé jusqu'au milieu des années '90 et les règlements de cette période appliqués pour toutes les propriétés construites avant. La géopolitique est retracée jusqu'aux années '60.

L'évaluation du modèle est faite sur un échantillon aléatoire couvrant plusieurs utilisations du sol. Des analyses graphiques et de méthodes d'auto-amorçage permettent de calculer des intervalles d'erreur moyenne et d'erreur moyenne absolue pour le diagnostic. Elles révèlent un biais systématique dans le parc résidentiel unifamilial, et des erreurs importantes sur toutes les catégories, en partie expliquées par la procédure de conversion d'unités nécessaire pour certains règlements.

Finalement, les correctifs manuels apportés sont discutés avant de proposer différents indicateurs pour comprendre l'offre et la demande de stationnement.

À la vue des lacunes révélées, des méthodes de prédiction des données manquantes et des améliorations au modèle de règlements et aux conversions d'unités sont nécessaires pour utiliser le modèle dans un contexte de prise de décision. Les recherches futures devraient déployer des méthodes d'échantillonnage spatial pour avoir une contrefactuelle robuste aux méthodes communément utilisées dans la prédiction de l'offre de stationnement.

ABSTRACT

Cars spend 95% of their time in a parking space and a growing literature suggests that the free provision of parking plays a role in travel behaviour. Municipal governments have reacted to any issue surrounding parking by requiring that spaces be constructed with any new development through minimum parking regulations.

This thesis proposes a web site and attending infrastructure to store and disseminate information concerning parking to reduce the fragmentation and lack of coverage of data concerning parking supply.

The tool and database are divided into four key sections. The first section enables the storage and visualization of different estimates of the parking supply for any parcel on a territory. The second allows the storage and modelling of minimum parking requirements as a function of time, space and land use and to model the amount of parking required for every tax roll entry with valid data. The third creates a framework for selection of a random sample of parcels for quantitive assessment of the difference between built parking and the minimum requirements. The fourth is an aggregation, visualization and analysis tool of the prediction results.

Quebec City is presented as a case study. The regulations of the city are traced backed to the 1990s and the regulations of that period are applied to any property built before. The geopolitics of the city are modelled back to the 1960s.

The model predictions are assessed against a random sample of properties across multiple land uses. Graphical analysis and bootstrap methods are used to calculate error intervals on mean error and mean absolute error for diagnostics. They reveal systematic biases for single family residential properties and sizable errors for all categories, in part explained by the unit conversion process required to apply certain parking minimums.

Finally, the manual additions made to the parking supply estimates are discussed before proposing different indicators to assess parking supply and demand.

Given the errors shown in the assessment phase, methods for missing data prediction, improvements to unit conversions and the robustness of the regulation data model are suggested before using the model in a decision-making context. Future research should deploy survey based inference methods to build a robust counterfactual to deductive methods commonly used to assess parking supply.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT vii

LISTE DES TABLEAUX xii

LISTE DES FIGURES xv

LISTE DES EXTRAITS DE CODE xxiii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xxiv

LISTE DES ANNEXES xxviii

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
1.1 Éléments de la problématique 1
1.1.1 Fragmentation institutionnelle 1
1.1.2 Hétérogénéité des types de stationnements 2
1.1.3 Permanence de l'infrastructure 2
1.2 Objectifs de recherche 2
1.3 Plan du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 4
2.1 Synthèse 4
2.2 Définition et contexte légal du stationnement 13
2.2.1 Typologie de stationnement 13
2.2.2 Politiques gouvernant le stationnement hors rue 14
2.3 Pourquoi dénombrer le stationnement ? 16
2.3.1 Consommation théorique d'espace-temps de différents modes 16
2.3.2 Effet de l'offre de stationnement sur la mobilité 17
2.3.3 Choix de place, tarification et ratissage 25
2.3.4 Utilisation de la capacité existante, consommation d'espace 27

2.3.5 Effets environnementaux directs 29
2.3.6 Coûts du stationnement 33
2.4 Méthodes de dénombrement de stationnement 36
2.4.1 Quels sont les cadres théoriques de dénombrement de quantités d'objets ? 36
2.4.2 Méthodes d'estimation basées sur des données géoréférencées 43
2.4.3 Méthodes d'estimation basées sur l'imagerie aérienne et l'apprentissage machine 46
2.4.4 Méthodes d'estimation basées sur l'imagerie aérienne sans apprentissage machine 48
2.4.5 Méthode potentielle d'estimation : Modèles linéaires généraux 49
2.4.6 La méthode étalon pour le dénombrement : l'enquête 51
2.4.7 Modélisation, vérification et validation 53
2.4.8 Outils statistiques 55
2.5 Formats de données pour représenter des données de stationnement 59
2.5.1 CurbLR 59
2.5.2 CDS 60
2.5.3 OpenStreetMap 67
2.5.4 ISO5206-1 : Systèmes intelligents de transport - Stationnement - Partie 1 : Modèle de données de base 71
2.6 Lacunes de recherche et opportunités 76

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE 79
3.1 Portée du chapitre 79
3.2 Géopolitique de la ville de Québec 79
3.3 Politiques de stationnement de la ville de Québec 82
3.4 Données de départ 90
3.4.1 Données géographiques (SIG) 90
3.4.2 Enquête OD 92
3.4.3 Recensement 92
3.5 Prédiction de la capacité de stationnement à partir des règlements d'urbanisme 94
3.5.1 Choix d'une unité spatiale et d'une méthode d'estimation 94
3.5.2 Schéma relationnel de données 95
3.5.3 Structure des données représentant les secteurs d'analyse 97
3.5.4 Données cadastrales et de taxation foncière 100
3.5.5 Analyse descriptive des données foncières 101
3.5.6 Structure des données de dénombrement 117

3.5.7 Données de la géopolitique du territoire à l'étude 118
3.5.8 Données représentant les règlements 120
3.5.9 Ensemble des règlements et association à la géopolitique 132
3.5.10 Objets informatiques : Attributs, méthodes et utilitaires 140
3.5.11 Logigramme de la procédure d'estimation de la capacité 147
3.5.12 Procédure de sélection des données foncières 149
3.5.13 Procédure de sélection des territoires et règlements 149
3.5.14 Procédure d'affectation des données foncières aux RST 150
3.5.15 Conversions d'unités 153
3.5.16 Procédure de calcul des minimums 153
3.6 Évaluation quantitative du modèle de dénombrement 156
3.6.1 Sélection de lots pour l'évaluation 156
3.6.2 Méthode de quantification de l'erreur du modèle 157
3.6.3 Structure de données de l'échantillon d'évaluation des prédictions . . 158
3.7 Outil de gestion proposé 164
3.7.1 Requis 164
3.7.2 Architecture de l'outil proposé 165
3.8 Indicateurs utilisés pour l'analyse 171
3.8.1 Indicateurs issus des profils d'accumulation de véhicules 171
3.8.2 Indicateurs pour les lots 174
3.8.3 Indicateurs de secteurs municipaux 176
3.8.4 Analyse de variabilité 183
3.8.5 Structure de données pour l'analyse 185

CHAPITRE 4 RÉSULTATS 193
4.1 Outil développé 194
4.1.1 Procédure suggérée d'estimation de la capacité 194
4.1.2 Fonctions de l'API serveur 194
4.1.3 Pages de l'interface 203
4.2 Résultats du calcul automatique 235
4.3 Évaluation du modèle de prédiction 239
4.3.1 Résidentiel - logement unique 241
4.3.2 Résidentiel - 2 à 8 logements 251
4.3.3 Résidentiel - Grands immeubles résidentiels 261
4.3.4 Commercial 271
4.3.5 Services 282

4.3.6 Industriel 293
4.3.7 Assemblée et récréation 305
4.3.8 Usage mixte 315
4.4 Correctifs apportés à l'estimation réglementaire 326
4.5 Exemples d'analyse 327

CHAPITRE 5 CONCLUSION 341
5.1 Synthèse des travaux 341
5.2 Limitations de la solution proposée 342
5.2.1 Nature déductive et définitions ambiguës 342
5.2.2 Limitations de la méthodologie de prédiction 343
5.2.3 Limitations de la procédure d'évaluation 344
5.2.4 Limitations de l'analyse 345
5.2.5 Limitations de l'outil web développé 346
5.3 Améliorations futures 348
5.3.1 Développement d'une procédure inductive pour estimer la capacité . 348
5.3.2 Amélioration de la méthode de prédiction 348
5.3.3 Améliorations aux procédures d'évaluation 349
5.3.4 Améliorations à apporter à l'outil 351

RÉFÉRENCES 353

ANNEXES 381

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Sommaire des formats de données représentant le stationnement . . . 8
Tableau 2.2 Synthèse des méthodes d'estimation de la capacité de stationnement . 9
Tableau 2.3 Demande d'espace-temps par personne (en $m^2.h$) pour un déplacement de 5km (Reproduit de Marchand (1984)) 16
Tableau 2.4 Sommaire des études agrégées liant le stationnement à la mobilité . . 19
Tableau 2.5 Sommaire des études désagrégées liant le stationnement à la motorisation 20
Tableau 2.6 Sommaire des études désagrégées liant le stationnement résidentiel aux comportements 22
Tableau 2.7 Taux d'occupation - diverses études 28
Tableau 2.8 Synthèse des effets de l'urbanisation sur l'hydrologie (Reproduit de Shaikh et al. (2023)) 30
Tableau 2.9 Synthèse des polluants associés aux infrastructures de transport (adapté de Muller et al. (2020)) 30
Tableau 2.10 Sommaire des coûts de provision du stationnement dans les immeubles résidentiels 31
Tableau 2.11 Récapitulatif des cadres et cultures des différents modèles 39
Tableau 2.12 Jeux de données annotés de segmentation sémantique en milieu urbain 48
Tableau 2.13 Tableau résumé des fonctions pertinentes aux GLM 50
Tableau 2.14 Métriques d'erreurs pour les modèles déterministes 55
Tableau 3.1 Présence de réglementation de stationnement selon le code Code d'Utilisation du Bien Fond (CUBF) 83
Tableau 3.2 Récapitulatif des objets considérés pour fixer les capacités de stationnement 89
Tableau 3.3 Géobases pour le territoire de la ville de Québec 91
Tableau 3.4 Colonnes pour la table sec_analyse 97
Tableau 3.5 Acronymes affectés aux quartiers 97
Tableau 3.6 Colonnes pour la table role_foncier 101
Tableau 3.7 Colonnes pour la table association_cadastre_role 101
Tableau 3.8 Colonnes pour la table cadastre 101
Tableau 3.9 Récapitulatif de la médiane des valeurs au rôle en fonction de l'utilisation du sol et de la présence ou l'absence de données physiques requises 107
Tableau 3.10 Colonnes pour la table inventaire_stationnement 117

Tableau 3.11 Colonnes pour la table historique_geopol . . . 118
Tableau 3.12 Colonnes pour la table cartographie_secteurs . . . 118
Tableau 3.13 Valeurs dans l'historique géopolitique utilisé dans le cadre de ce mémoire 119
Tableau 3.14 Colonnes pour la table entete_reg_stationnement . . . 121
Tableau 3.15 Colonnes pour la table reg_stat_empile . . . 121
Tableau 3.16 Entrées dans la table liste_operations . . . 122
Tableau 3.17 Colonnes pour la table multiplicateur_facteur_colonne . . . 122
Tableau 3.18 Contenu type de la table multiplicateur_facteur_colonnes . . . 123
Tableau 3.19 Exemple règlements dans la table reg_stat_empile pour une clinique médicale . . . 129
Tableau 3.20 Exemple règlements dans la table reg_stat_empile pour le logement . 130
Tableau 3.21 Exemple règlements dans la table reg_stat_empile pour un lieu d'assemblée . . . 131
Tableau 3.22 Colonnes pour la table ensembles_reglement_stat . . . 132
Tableau 3.23 Colonnes pour la table cubf . . . 132
Tableau 3.24 Colonnes pour la table association_er_reg_stat . . . 133
Tableau 3.25 Colonnes pour la table association_er_territoire . . . 133
Tableau 3.26 Nombre de définitions par utilisation du sol . . . 135
Tableau 3.27 Attributs, méthodes et utilitaires de la classe **TaxDataset** . . . 141
Tableau 3.28 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingRegulation** . . 142
Tableau 3.29 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingRegulationSet** 143
Tableau 3.30 Structure et fonctions principales de l'objet **RegSetTerritory** (RST) 144
Tableau 3.31 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingCalculationInput** 145
Tableau 3.32 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingInventory** . . . 146
Tableau 3.33 Affectation des éléments du rôle à un Ensemble de Règlements Territoire 151
Tableau 3.34 Synthèse de sélection de lots de validation . . . 156
Tableau 3.35 Colonnes pour la table strates_echantillonnage . . . 159
Tableau 3.36 Colonnes pour la table inputs_validation . . . 161
Tableau 3.37 Colonnes pour la table resultats_validation . . . 162
Tableau 3.38 Colonnes pour la table conditions_strates_a_echant . . . 163
Tableau 3.39 Symboles utilisés dans la section . . . 171
Tableau 3.40 Champs de la table donnees_foncieres_agregees . . . 186
Tableau 3.41 Champs de la table population_par_quartier . . . 187
Tableau 3.42 Champs de la table census_population . . . 187
Tableau 3.43 Champs de la table census_population_2016 . . . 187
Tableau 3.44 Champs de la table od_data . . . 188

Tableau 3.45 Champs de la table motorisation_par_quartier 189
Tableau 3.46 Champs de la table profil_accumulation_vehicules 190
Tableau 3.47 Champs de la table donnees_foncieres_agregees 191
Tableau 4.1 Sigles de variables pour les requêtes de graphique 201
Tableau 4.2 Sommaire des métriques d'évaluation du modèle ($\alpha = 0.05$ pour les intervalles) 239
Tableau B.1 Réponse à l'appel « /api/cubf?niveau=1 » 394
Tableau B.2 Réponse à l'appel « /api/cubf?niveau=2&cubf=6 » 394
Tableau B.3 Réponse à l'appel « /api/cubf?niveau=3&cubf=65 » 395
Tableau B.4 Réponse de la méthode GET à l'adresse « /api/cubf/n_entrees » . . 395
Tableau C.1 Liste des ensembles de règlements créés 399

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Synthèses des interactions du stationnement avec l'environnement, l'économie et la mobilité 6
Figure 2.2 Typologies de stationnement (Morency et al., 2017) 13
Figure 2.3 Terrain vague avec des voitures stationnées à Québec 41
Figure 2.4 Polyfonctionnalité des quais de chargement 42
Figure 2.5 Ambiguïté de l'espace dédié au stationnement 43
Figure 2.6 Résultats de différentes méthodes de vision par ordinateur pour une même image 46
Figure 2.7 Format du modèle de données CurbLR 58
Figure 2.8 Survol des domaines de données de Curb Data Specification (CDS) . 60
Figure 2.9 Propriétés de l'objet statut dans l'Application Programming Interface ou Interface de Programmation Applicative (API) métriques de CDS 61
Figure 2.10 Modèles de données des bords de rue de CDS 63
Figure 2.11 Modèle de données pour les évènements de CDS 64
Figure 2.12 Modèle de données pour les sessions de l'API Métriques de CDS . . . 65
Figure 2.13 Modèle de données pour les statistiques issues de l'API Métriques de CDS 66
Figure 2.14 Modèle de données pour un « way » ayant la propriété « amenity=parking » (OSM Contributors, 2025b) 68
Figure 2.15 Modèle de données OpenStreetMap (OSM) pour le stationnement Bord De Rue (BDR) pour un élément « highway » (OSM Contributors, 2025d) 69
Figure 2.16 Domaines de données d'ISO 5206 (reproduit de Organisation internationale de normalisation (2023)) 70
Figure 2.17 Illustration de deux hiérarchies de lieux différentes selon ISO5206 . . 71
Figure 2.18 Représentation schématique du domaine de données des taux dans ISO5206 73
Figure 2.19 Schéma simplifié des données reliées au droit de stationnement (reproduit de (Organisation internationale de normalisation, 2023)) 75
Figure 3.1 Séparation géopolitique du territoire de l'actuelle Ville de Québec (Élections Québec, 2021) 80
Figure 3.2 Secteurs ayant des minimums de stationnement différents (Ville de Québec, 1995, 2024f, 2024g) 81
Figure 3.3 Utilisations du sol les plus récurrentes dans les règlements recensés . . 88

Figure 3.4 Diagramme entité-association de la partie de la base de données . . . 96
Figure 3.5 Secteurs utilisés pour l'analyse 99
Figure 3.6 Diagramme entité association pour le rôle foncier et le cadastre . . . 100
Figure 3.7 Proportion des lots et de la valeur foncière selon l'utilisation du sol pour la ville de Québec 102
Figure 3.8 Nombre de logements et de lots par compte de logement par lot et quartier 103
Figure 3.9 Pourcentage des lots avec des propriétés manquantes 104
Figure 3.10 Proportion de chaque utilisation du sol avec des données manquantes 105
Figure 3.11 Carte de chaleur de la proportion de lots et de valeur foncière avec une donnée essentielle manquante 106
Figure 3.12 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Usage résidentiel 108
Figure 3.13 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Usage industriel 109
Figure 3.14 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Infrastructures 110
Figure 3.15 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Commercial 111
Figure 3.16 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Services 112
Figure 3.17 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Récréation 113
Figure 3.18 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Ressources naturelles 114
Figure 3.19 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Inexploité 115
Figure 3.20 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Usage mixte 116
Figure 3.21 Diagramme entité association pour l'historique géopolitique 119
Figure 3.22 Diagramme entité association pour les règlements 124
Figure 3.23 Nombre de règlements par ville, texte de loi et date d'entrée en vigueur 125
Figure 3.24 Distribution du nombre de lignes pour définir les règlements recensés 126
Figure 3.25 Nombre de règlements par type d'opération 127
Figure 3.26 Nombre d'utilisation de différentes unités dans les règlements recensés 127
Figure 3.27 Nombre d'observation de seuil dans les règlements de logement 128
Figure 3.28 Règlements dupliqués pour faire prédictions avant recensement 128
Figure 3.29 Exemple de règlement de stationnement pour une clinique médicale . 129
Figure 3.30 Exemple de règle de stationnement pour logement 130
Figure 3.31 Exemple de règle de stationnement pour lieux d'assemblée 131
Figure 3.32 Diagramme entité association pour la définition d'ensembles de règlements et leur association au territoire 134
Figure 3.33 Compte d'ensembles de règlements par période géopolitique 139
Figure 3.34 Logigramme de calcul 148
Figure 3.35 Sélection des entrées du rôle pertinentes pour un territoire donné . . 149

Figure 3.36 Représentation schématique d'un TaxDataset ou ensemble de données foncières (TD) 149
Figure 3.37 Affectations de dates à l'exemple de données foncières 150
Figure 3.38 Exemple d'historique géopolitique 150
Figure 3.39 Représentation schématique de la validité des RegulationSetTerritory ou ensemble de règlements de territoire (RST) en fonction de la date et du territoire 151
Figure 3.40 Logigramme et exemple de conversion d'unités 152
Figure 3.41 Logigramme de calcul d'un règlement 154
Figure 3.42 Arbitrage entre deux estimations 155
Figure 3.43 Diagramme entité association pour l'évaluation de performance du modèle de prédiction 158
Figure 3.44 Architecture de l'outil développé dans le cadre du mémoire 166
Figure 3.45 Structure du dossier de programmation 168
Figure 3.46 Diagramme entité association des tables d'analyse et de validation . . 184
Figure 4.1 Procédure de génération de la prédiction de la capacité de stationnement 193
Figure 4.2 Représentation schématique de l'API pour les règlements 195
Figure 4.3 Représentation schématique de l'API pour l'inventaire et les ensembles de règlements 196
Figure 4.4 Représentation schématique de l'API pour les territoires et ensembles de règlements territoire 197
Figure 4.5 Représentation schématique de l'API pour les données cadastrales, les CUBF et l'analyse agrégée 198
Figure 4.6 Représentation schématique de l'API pour l'analyse de variabilité, les secteurs d'analyse et les profils d'accumulation véhicules 199
Figure 4.7 Représentation schématique de l'API pour l'évaluation des prédictions 200
Figure 4.8 Page d'historique 205
Figure 4.9 Recherche de règlements 206
Figure 4.10 Page de visualisation et d'édition de règlements 207
Figure 4.11 Création d'une association entre un CUBF et un règlement 208
Figure 4.12 Page de visualisation et d'édition des ensembles de règlements 209
Figure 4.13 Page de modification des ensembles de règlements territoire 211
Figure 4.14 Édition des paramètres d'un graphique 212
Figure 4.15 Page de graphiques de règlements 213
Figure 4.16 Processus pour un comptage manuel 215
Figure 4.18 Processus de prédiction automatique 215

Figure 4.17 Processus de calcul d'une estimation semi-automatique 216
Figure 4.19 Page de visualisation des prédictions 217
Figure 4.20 Panneau pour lancer les prédictions 218
Figure 4.21 Page d'approbation des prédictions pour un quartier 219
Figure 4.22 Page d'évaluation de prédictions automatique 221
Figure 4.23 Création des catégories d'évaluation 222
Figure 4.24 Sommaire d'évaluation de modèle 224
Figure 4.25 Page d'analyse de quartier 226
Figure 4.26 Analyse agrégée cartographique 227
Figure 4.27 Analyse agrégée par diagramme à barre 228
Figure 4.28 Analyse agrégée par diagramme XY 229
Figure 4.29 Profils d'accumulation Véhicules 230
Figure 4.30 Analyse de variabilité - Visualisation de l'inventaire prédit pour chaque ensemble de règlements choisi 232
Figure 4.31 Analyse de variabilité - distribution des prédictions d'inventaire . . . 233
Figure 4.32 Analyse de variabilité - diagramme à boite des prédictions d'inventaire 234
Figure 4.33 Distribution des places des stationnements par utilisation du sol . . . 235
Figure 4.34 Distribution des places de stationnement sur le territoire 236
Figure 4.35 Distribution de la densité de stationnement et de population sur le territoire 237
Figure 4.36 Distribution du nombre de places prédites par quartier et usage du sol 238
Figure 4.37 Distribution des prédictions pour le logement unifamilial 242
Figure 4.38 Erreur en fonction des prédictions pour le logement unifamilial 243
Figure 4.39 Distribution et normalité des erreurs pour le logement unifamilial . . 244
Figure 4.40 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour le logement unifamilial 245
Figure 4.41 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction du logement unifamilial 246
Figure 4.42 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour le logement unifamilial 247
Figure 4.43 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour le logement unifamilial 248
Figure 4.44 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour le logement unifamilial 249
Figure 4.45 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour le logement unifamilial 250

Figure 4.46 Distribution des prédictions pour les lots avec 2 à 8 logements 252
Figure 4.47 Erreur en fonction des prédictions pour les lots avec 2 à 8 logements . 253
Figure 4.48 Distribution et normalité des erreurs pour les lots avec 2 à 8 logements 254
Figure 4.49 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots avec 2 à 8 logements 255
Figure 4.50 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots avec 2 à 8 logements 256
Figure 4.51 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'année de construction pour les lots avec 2 à 8 logements 257
Figure 4.52 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots avec 2 à 8 logements 258
Figure 4.53 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots avec 2 à 8 logements 259
Figure 4.54 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots avec 2 à 8 logements 260
Figure 4.55 Distribution des prédictions pour les grands immeubles résidentiels . 262
Figure 4.56 Erreur en fonction des prédictions pour les grands immeubles résidentiels 263
Figure 4.57 Distribution et normalité des erreurs pour les grands immeubles résidentiels 264
Figure 4.58 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les grands immeubles résidentiels 265
Figure 4.59 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les grands immeubles résidentiels 266
Figure 4.60 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les grands immeubles résidentiels 267
Figure 4.61 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les grands immeubles résidentiels 268
Figure 4.62 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les grands immeubles résidentiels 269
Figure 4.63 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les grands immeubles résidentiels 270
Figure 4.64 Diagramme à boîte de l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement pour les propriétés commerciales 272
Figure 4.65 Distribution des prédictions pour les lots commerciaux 273
Figure 4.66 Erreur en fonction des prédictions pour les lots commerciaux 274
Figure 4.67 Distribution et normalité des erreurs pour les lots commerciaux . . . 275

Figure 4.68 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots commerciaux 276
Figure 4.69 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots commerciaux 277
Figure 4.70 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots commerciaux 278
Figure 4.71 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots commerciaux 279
Figure 4.72 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots commerciaux 280
Figure 4.73 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots commerciaux 281
Figure 4.74 Diagramme à boîte de l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement pour les services 283
Figure 4.75 Distribution des prédictions pour les lots de services 284
Figure 4.76 Erreur en fonction des prédictions pour les lots de services 285
Figure 4.77 Distribution et normalité des erreurs pour les lots de services 286
Figure 4.78 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots de services 287
Figure 4.79 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots de services 288
Figure 4.80 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots de services 289
Figure 4.81 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots de services 290
Figure 4.82 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots de services 291
Figure 4.83 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots de services 292
Figure 4.84 Diagramme à boîte de l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement pour l'industrie 294
Figure 4.85 Distribution des prédictions pour les lots industriels 295
Figure 4.86 Erreur en fonction des prédictions pour les lots industriels 296
Figure 4.87 Distribution et normalité des erreurs pour les lots industriels 297
Figure 4.88 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots industriels 298

Figure 4.89 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots industriels sans filtre 299
Figure 4.90 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots industriels 300
Figure 4.91 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots industriels 301
Figure 4.92 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots industriels 302
Figure 4.93 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots industriels 303
Figure 4.94 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots industriels 304
Figure 4.95 Erreur de la catégorie assemblée selon l'unité de formulation du règlement 305
Figure 4.96 Distribution des prédictions pour les lots d'assemblée 306
Figure 4.97 Erreur en fonction des prédictions pour les lots d'assemblée 307
Figure 4.98 Distribution et normalité des erreurs pour les lots d'assemblée 308
Figure 4.99 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots d'assemblée 309
Figure 4.100 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots d'assemblée 310
Figure 4.101 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots d'assemblée 311
Figure 4.102 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots d'assemblée 312
Figure 4.103 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots d'assemblée 313
Figure 4.104 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots d'assemblée 314
Figure 4.105 Erreur de la catégorie usage mixte selon l'unité de formulation du règlement 315
Figure 4.106 Distribution des prédictions pour les lots d'usage mixte 316
Figure 4.107 Erreur en fonction des prédictions pour les lots d'usage mixte 317
Figure 4.108 Distribution et normalité des erreurs pour les lots d'usage mixte . . . 318
Figure 4.109 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots d'usage mixte 319

Figure 4.110 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots d'usage mixte 320
Figure 4.111 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots d'usage mixte 321
Figure 4.112 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots d'usage mixte 322
Figure 4.113 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots d'usage mixte 323
Figure 4.114 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots d'usage mixte 324
Figure 4.115 Différence entre l'inventaire corrigé et l'inventaire automatique 326
Figure 4.116 Motorisation selon les quartiers 327
Figure 4.117 Nombre de places résidentielles par voiture des résidents 329
Figure 4.118 Stationnement résidentiel par logement 330
Figure 4.119 Profil d'accumulation de véhicules de la Cité-Universitaire 331
Figure 4.120 Profils d'accumulation de véhicules par clientèle 332
Figure 4.121 Profil d'accumulation d'Orsainville 333
Figure 4.122 Profils d'accumulation de personnes et permis pour la Cité-Universitaire334
Figure 4.123 Comparaison des règlements de stationnement en vigueur en 1997 pour le logement 335
Figure 4.124 Exemple d'analyse de variation utilisant tous les ensembles de règlements336
Figure 4.125 Pourcentage du territoire dédié au stationnement par quartier 337
Figure 4.126 Taux d'occupation total maximal prédit 338
Figure 4.127 Taux d'occupation public maximal prédit 339
Figure 4.128 Taux d'occupation résidentiel maximal prédit 340
Figure 5.1 Proposition alternative de diagramme entité association pour les règlements 350
Figure E.1 Découpage pour la période 1 439
Figure E.2 Découpage pour la période 3 440
Figure E.3 Découpage pour la période 4 440
Figure E.4 Découpage pour la période 5 441
Figure E.5 Découpage pour la période 6 441
Figure E.6 Découpage pour la période 7 442

LISTE DES EXTRAITS DE CODE

Extrait de code D.1 Requête 1 dans tax_database_for_analysis_territory . . . 402
Extrait de code D.2 Requête 2 dans tax_database_for_analysis_territory . . . 402
Extrait de code D.3 Requête 3 dans tax_database_for_analysis_territory . . . 403
Extrait de code D.4 Sélection des territoires touchant au rôle foncier 403
Extrait de code D.5 Ligne de code Python pour extraire les territoires pertinents 403
Extrait de code D.6 Sélection des associations d'ensembles de règlements aux territoires 404
Extrait de code D.7 Sélection des territoires pertinents 404
Extrait de code D.8 Sélection de l'historique géopolitique 404
Extrait de code D.9 Coeur de la boucle pour créer la liste de RST 405
Extrait de code D.10 Procédure d'assignation du rôle foncier aux RST 406
Extrait de code D.11 Fonction territory_filter 406
Extrait de code D.12 Méthode year_filter 407
Extrait de code D.13 Identification de lots problématiques 408
Extrait de code D.14 Calcul d'un sous-ensemble avec l'opérateur d'addition . . . 409
Extrait de code D.15 Calcul d'un sous-ensemble de type seuils 412
Extrait de code D.16 Fonction subset_operation 414
Extrait de code D.17 Compilation de l'inventaire par secteur 421
Extrait de code D.18 Compilation de la motorisation par quartier 426
Extrait de code D.19 Compilation de la population par quartier 427
Extrait de code D.20 Compilation des données foncières par quartier 428
Extrait de code D.21 Compilation des parts modales par quartier 430
Extrait de code D.22 Compilation des intrants de validation 433
Extrait de code D.23 Recherche d'inventaires selon l'unité de formulation 436
Extrait de code D.24 Recherche inventaire par intensité 438

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

5D	Design, Densité, Diversité, Distance au TC, Accessibilité aux destinations
a_l	Superficie d'un lot cadastral
a_{etage}	Aire d'étage d'une entrée du rôle foncier
$A(G)$	Aire de la géométrie G
$A_{I,q}$	Superficie de stationnement inutilisée du quartier q
APDS	Alliance for Parking Data Standards
API	Application Programming Interface ou interface de Programmation applicative
A_q	Superficie d'un quartier
ARTM	Autorité Régionale de Transport Métropolitain
$AS_{q,\%}$	Pourcentage de la superficie du quartier dédiée au stationnement
AS_q	Superficie des places de stationnement dans un quartier
BDR	Bord de Rue
C	Indice de la colonne à utiliser comme intrant de la conversion d'unités
$c_{conv,i}$	Constante d'une équation linéaire définissant la conversion d'unités
CDS	Curb Data Standard
CNN	Convolutional Neural Networks
$c_{s,max}$	Constante d'une équation linéaire définissant le maximum de stationnement
$c_{s,min}$	Constante d'une équation linéaire définissant le minimum de stationnement
CUBF	Code d'Utilisation des Biens-Fonds
d_f	Densité du foncier pour un lot
$D_{f,T,q}$	Densité du foncier total pour un quartier q
$D_{f,R,q}$	Densité du foncier résidentiel pour un quartier q
D_p	Densité de population pour un quartier
D_s	Densité de stationnement pour un quartier
d_s	Densité de stationnement pour un lot
$D_{s,cap}$	Nombre de places par résident du quartier
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.
F_{dep}	Facteur de pondération d'un déplacement dans l'enquête OD
f_l	Valeur foncière d'une entrée au rôle foncier

F_{men}	Facteur de pondération ménage dans l'enquête OD
F_{per}	Facteur de pondération d'une personne dans l'enquête OD
$F_{R,q}$	Valeur foncière résidentielle totale agrégée pour un quartier
$F_{T,q}$	Valeur foncière totale agrégée pour un quartier
G_{AD}	Géométrie d'une aire de diffusion
G_l	Géométrie d'un lot cadastral
GLM	Generalized Linear Model ou Modèle Linéaire Généralisé
GPS	Global Positioning System
G_q	Géométrie d'un quartier
H	Heure de départ d'un déplacement de l'enquête OD
HTTP	HyperText Transfer Protocol
i_l	Intensité de prédiction du stationnement pour un lot
I_q	Nombre de places de stationnement inutilisées du quartier q
ISO	Orgnanisation Internationale de Normalisation
ITE	Institute of Transportation Engineers
M_{dep}	Variable catégorielle pour le mode du déplacement 1 = Auto-Conducteur, 2 = Auto-Passager, 5 = Vélo, 6 = TC, 7=Bus scolaire, 13= À pied, 14= Traversier avec véhicule, 15 = Traversier sans véhicule
m_{dep}	Variable catégorielle pour le motif du déplacement 1=Travail au lieu habituel, 2=Travail lieu autre, 3=Sur la route pour le travail, 4=Études, 5=Magasinage, 6=Restaurant, 7=Loisirs, 8=Visite amis, 9=Santé, 10=Reconduire quelqu'un, 11=Aller chercher quelqu'un, 12=Retour au domicile, 13=Autre, 14=NSP
$M_{q,P}$	Nombre de voitures par permis en véhicules par milliers de permis
M_q	Taux de motorisation de la population en véhicules par milliers d'habitants
$N_{auto,sor,q,h}$	Nombre d'automobiles sortant du quartier q à l'heure h
$N_{auto,ent,q,h}$	Nombre d'automobiles entrant dans le quartier q à l'heure h
$N_{auto,q,h}$	Nombre d'automobiles à l'heure h dans le quartier q.
$n_{logements}$	Nombre de logements dans une entrée du rôle foncier
OBNL	Organisme à But Non Lucratif
O_{max}	Taux d'occupation des stationnements maximal
OQLF	Office Québécois de la Langue Française
O_{res}	Taux d'occupation de stationnement des résidents
OSM	OpenStreetMap

p_{AD}	Population d'une aire de diffusion
PAH	Acide aminohippurique
PAV	Profils d'Accumulation de Véhicules
PCI	ParkingCalculationInputs ou entrées d'inventaire de stationnement
$p_{conv,i}$	Pente d'une équation linéaire définissant la conversion d'unités
P_{des}	Position de la destination d'un déplacement dans l'enquête OD. Utilisé pour dénoter les intersections spatiales
PI	ParkingInventory ou inventaire de stationnement
P_{log}	Position du lieu de résidence dans l'enquête OD. Utilisé pour dénoter les intersections spatiales
PLUTO	Primary Land Use Tax Lot Output
PM_{mode}	Part modale du mode en indice. L'indice peut être AC (auto-conducteur), AP (auto-passager), TC (Transport en commun), MV (Marche Vélo) et BS (Bus scolaire) au fins de cette étude
P_{ori}	Position de l'origine d'un déplacement dans l'enquête OD. Utilisé pour dénoter les intersections spatiales
PP_{per}	Variable catégorielle dénotant la possession du permis de conduire : 1 = Oui, 2 = Non, 3= Refus/NSP, 4=Non applicable
P_q	Population du quartier q
PR	ParkingRegulation ou Règlement de Stationnement
P_{role}	Position (Point) d'une entrée du rôle foncier
PRS	ParkingRegulationSet ou Ensemble de Règlements de Stationnement
$p_{s,max}$	Pente d'une équation linéaire définissant le maximum de stationnement
$p_{s,min}$	Pente d'une équation linéaire définissant le minimum de stationnement
PT_q	Nombre de détenteurs de permis de conduire pour le quartier q
R	Ligne du rôle foncier
REST	REpresentational State Transfer
RST	RegulationSetTerritory ou Ensembles de Règlements de Territoire
SIG	Système d'Information Géographique
s_l	Nombre de places de stationnement d'un lot
S_q	Nombre de places de stationnement du quartier q
TC	Transport en Commun
TD	TaxDataset ou Ensemble de données foncières
T_{men}	Variable binaire qui indique la première entrée d'un ménage dans la table de déplacements de l'enquête OD

T_{per}	Variable binaire qui indique la première entrée d'une personne dans la table de déplacements de l'enquête OD
$t_{s,reg}$	Seuil de sélection de la définition d'un règlement
URL	Uniform Resource Locator
URI	Uniform Resource Identifier
UITP	Union Internationale des Transports Publics
v_{men}	Nombre de véhicules d'un ménage dans l'enquête OD
V_q	Nombre de véhicules pour le quartier q
VS_{res}	Nombre de voitures des résidents par place de stationnement dans un secteur. Inverse du taux d'occupation
VS_{max}	Nombre de voitures maximales par place de stationnement dans un secteur. Inverse du taux d'occupation
X_{des}	Longitude de la destination d'un déplacement dans l'enquête OD
X_{log}	Longitude du lieu de résidence dans l'enquête OD
X_{ori}	Longitude de l'origine d'un déplacement dans l'enquête OD
Y_{des}	Latitude de la destination d'un déplacement dans l'enquête OD
Y_{log}	Latitude du lieu de résidence dans l'enquête OD
Y_{ori}	Latitude de l'origine d'un déplacement dans l'enquête OD

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Méthodes statistiques recensées 381
A.1 Test d'équivalence 381
A.2 Valeurs p, réplication, tailles d'effets et la nouvelle statistique 382
A.3 Valeur d'intérêt 383
Annexe B Détails des différents domaines de données de l'API 384
B.1 API : routes d'appel 384
B.2 API : Inventaire 384
B.3 API : Règlements 386
B.4 API : Ensembles de règlements 389
B.5 API : Territoire 390
B.6 API : Ensembles de règlements territoire 391
B.7 API : Historique 392
B.8 API : Lots cadastraux et entrées du rôle foncier 392
B.9 API : Codes d'utilisation du Bien-Fonds 393
B.10 API : Secteurs d'analyse 394
B.11 API : Analyse agrégée 395
B.12 API : Profiles d'accumulation véhicule 396
B.13 API : Validation 397
Annexe C Détails des données de réglementaires 399
C.1 Ensembles de règlements créés 399
Annexe D Requêtes et morceaux de codes pertinents 402
D.1 Code : Sélection d'entrées du rôle foncier lors d'un calcul par quartier d'analyse 402
D.2 Code : Affectation des ensembles de règlements aux entrées du rôle à l'intérieur du quartier 403
D.3 Code : Affectation des données foncières aux RST 406
D.4 Identification lots problématiques 408
D.5 Code : calcul d'un sous-ensemble d'addition 409
D.6 Code : calcul d'un sous-ensemble de seuils 412
D.7 Code : Sélection entre deux sous-ensembles 414
D.8 Code : Inventaire compilé par quartier 421
D.9 Code : Nombre d'automobiles des résidents et nombre maximal et minimal d'automobiles par quartier 426
D.10 Code : Population issue du recensement 427

D.11 Code : Valeurs foncières agrégées 428
D.12 Code : Parts modales 430
D.13 Requête SQL : Intrants de validation 433
D.14 Requête SQL : lot où l'estimation de stationnement dépend du nombre de sièges 436
D.15 Requête SQL : recherche de lot selon l'intensité de prédiction de stationnement 438
Annexe E Découpage géopolitique utilisé 439

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les voitures passent 95% de leur temps stationnées (Morency et al., 2015), consommant d'importantes quantités d'espace et jouant un rôle important dans les choix de mobilités des personnes (Christiansen, Engebretsen et al., 2017) et affectant l'abordabilité du logement (Shah et al., 2024).

Dans la plupart des municipalités, le stationnement est donc géré par des restrictions réglementaires et tarifaires sur rue et au travers de normes d'urbanisme régissant la quantité de stationnements à fournir hors rue(Shoup, 2005). Malheureusement, ces politiques visant à garantir l'accès à un stationnement gratuit ont pour l'essentiel garanti que l'automobile était le mode le plus compétitif sur la plupart des trajets (Shoup, 2005 ; Weinberger et al., 2009). Cet accès est dispendieux pour les individus et les collectivités et l'affectation actuelle par les règlements plutôt que les prix constituent une subvention importante à l'automobile (Inci, 2015 ; Litman, 2023a ; Shoup, 2005). En plus des coûts économiques, le stationnement génère des externalités environnementales et de santé publique qui ne sont pas internalisées.(Buyantuyev & Wu, 2010 ; Yuan et al., 2024)

Malgré ces enjeux, les dénombrements des places de stationnement (Morency et al., 2017 ; Shoup, 2005) ne sont que rarement entrepris ou mis à jour. Les autorités municipales commencent à mettre en place des méthodes pour le stationnement sur rue, (Eros et al., 2025 ; Open Mobility Foundation, 2024c) mais le stationnement hors rue reste largement méconnu.

1.1 Éléments de la problématique

Plusieurs éléments contribuent à rendre un dénombrement du stationnement hors rue difficile.

1.1.1 Fragmentation institutionnelle

Le stationnement et les codes d'urbanisme sont gérés par les municipalités qui ont chacune leur réglementation spécifique avec des formulations et quantités différentes (S. Goodman, 2015). Aucune autorité provinciale ou nationale n'encadre la formulation et la compilation de données à quelques exceptions près (Bronin et al., 2023 ; Department for Transport, 2025). Malgré un certain mimétisme entre les municipalités (Shoup, 2005) et la dépendance d'acteurs du milieu sur un cadre normatif (ITE, 2023), la réglementation du stationnement hors rue demeure complexe.

Une fois les règlements en place, le stationnement implique beaucoup de parties prenantes.

Des commerçants perçoivent souvent le stationnement comme clé au succès de leurs entreprises, les citoyens sont en même temps détenteurs de stationnement et le perçoivent comme un droit acquis dans la sphère publique et sont généralement opposés à des solutions de tarification qui mèneraient à une allocation plus efficace de l'espace dédié au stationnement (De Borger & Russo, 2017 ; Rye et al., 2008). Contrairement à d'autres infrastructures comme les routes ou les chemins de fer, aucune organisation n'a été mise en place pour gérer le stationnement (Cohon et al., 1996, p. 65). Deux possibilités existent pour l'estimer : retracer les décisions qui ont mené à l'état actuel ou trouver une méthode à coût raisonnable pour dresser l'état des lieux et le maintenir.

1.1.2 Hétérogénéité des types de stationnements

Les contraintes économiques et réglementaires mènent à une variabilité importante dans l'aménagement physique du stationnement. L'implémentation varie entre un champ vide avec des cordes installées pour guider les visiteurs à des structures multiétagées en surface ou souterraines. D'autre part, en plus des places requises par les codes d'urbanisme, des opérateurs de stationnements privés et publics œuvrent dans le milieu. Même dans des espaces aménagés pour le stationnement, l'organisation spatiale n'est pas nécessairement immédiatement visible et se fait parfois de manière informelle, menant à des difficultés pour estimer une capacité fixe.

1.1.3 Permanence de l'infrastructure

Une fois un état des lieux dressé, il demeure que l'infrastructure est difficile à réallouer et les conséquences de l'aménagement urbain sur les choix de déplacements demeurent modestes (Manville, 2017 ; Stevens, 2017). Il n'en demeure pas moins qu'aucune évaluation ne peut être faite sans état des lieux.

1.2 Objectifs de recherche

Ce mémoire cherche à développer un système d'information capable de générer, stocker, valider et disséminer aux parties prenantes des estimations sur le nombre, la localisation et la réglementation entourant les places de stationnement hors rue d'un territoire. Les sous-objectifs suivants sont poursuivis :

1. Développer une structure de données qui permet de représenter les règlements de zonage portant sur la quantité de stationnements à fournir

2. Développer un modèle d'estimation de la capacité de stationnement hors rue basée sur la réglementation du point 1 et les données de rôle foncier.
3. Définir une structure de base de données qui permet d'entreposer et de comparer différentes estimations de la capacité pour une même unité géographique
4. Développer une méthode et un outil d'évaluation de la précision du modèle d'estimation de la capacité
5. Développer une interface facile d'utilisation qui permet à un praticien d'estimer la capacité et de corriger les estimés au besoin
6. Développer la structure d'une interface de programmation d'application pour que d'autres logiciels puissent valoriser la donnée dans les études de la mobilité.

1.3 Plan du mémoire

Le mémoire se divisera en 4 chapitres. Le chapitre 2 est une revue de littérature sur les impacts du stationnement sur la mobilité, les finances et l'environnement, ainsi que les méthodes utilisées pour en estimer la capacité. Le chapitre 3 portera sur les données disponibles, les méthodologies et les modèles utilisés pour calculer, entreposer et mettre à disposition des praticiens des informations sur le stationnement. Le chapitre 4 présentera l'outil développé et les résultats du modèle d'estimation pour le territoire de la ville de Québec. La conclusion présentera une synthèse des travaux, les limitations de la méthode utilisée et de potentielles améliorations futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre dresse l'état des connaissances sur le stationnement et est divisé en six grandes parties. La première fait une synthèse de l'ensemble du chapitre (sec. 2.1).

La deuxième relate les typologies de stationnement et fait un survol rapide du contexte légal du stationnement au Québec (sec. 2.2).

La troisième partie (sec. 2.3) explore en profondeur des raisons d'estimer la taille du parc de stationnement. La section explore le cadre théorique entourant la consommation d'espace-temps en transport, l'effet du stationnement sur les comportements de mobilité, les modèles économiques explorant les comportements de recherche de stationnement, l'utilisation de la capacité existante, et finalement les effets environnementaux et les coûts de construction.

La quatrième partie 2.4 discute des méthodes utilisées pour estimer la capacité de stationnement dans la littérature scientifique. La différence entre approches inductives et déductives pour l'estimation de variables est d'abord discutée avant d'exposer trois types de méthodes déductives : les méthodes utilisant des données géoréférencées vectorielles, les méthodes de segmentation de l'imagerie aérienne par apprentissage profond et les méthodes combinant des dénombrements manuels à des méthodes de régression. Finalement, cette partie discute des processus d'évaluation de modèles, des méthodes de sondage qui ont été appliquées à d'autres problématiques de dénombrement. La partie se termine en discutant des méthodes statistiques qui peuvent être déployées pour quantifier les erreurs.

La cinquième partie (sec. 2.5) discute de quatre formats de données recensés pour représenter le stationnement et ses propriétés : CurbLR , Curb Data Standard , OpenStreetMap et la norme ISO5206-1.

Le chapitre se termine en identifiant les lacunes de recherche dans la section 2.6

2.1 Synthèse

Le stationnement constitue une partie essentielle du système de transport et est particulièrement critique pour les automobiles qui passent 95% du temps arrêté (Morency et al., 2015). Ce requis d'entreposage consomme d'importantes quantités d'espace en milieu urbain (Chester et al., 2022 ; Héran & Ravalet, 2008) et reçoit relativement peu d'attention (Inci, 2015 ; Shoup, 2005) à part pour en décrier la rareté ou le prix (De Borger & Russo, 2017). Pourtant un corpus scientifique lie le stationnement à une possession et une utilisation accrue de l'automobile (Christiansen, Engebretsen et al., 2017 ; Currans et al., 2023).

Outre les effets sur la mobilité, le stationnement contribue aux effets d'îlots de chaleur (Hoehne et al., 2022 ; Isola et al., 2024) et à l'imperméabilisation des sols (Arnold Jr. & Gibbons, 1996) avec d'importants effets sur la morphologie des bassins versants (Shaikh et al., 2023) et des impacts sur la qualité de l'eau (Muller et al., 2020).

D'autre part, la provision de ces infrastructures est mandatée par la plupart des gouvernements municipaux sans requis de tarification menant les acteurs économiques à transmettre ces coûts aux consommateurs (Shoup, 2005). Ce mandat coûte cher et est socialisé au moyen des taxes municipales et le prix des biens et services (Shoup, 2005). Ceci se reflète par une augmentation des coûts (Gabbe & Pierce, 2017) et une réduction du stock de logements (Anderson & de Palma, 2004 ; Lehe, 2018 ; Shah et al., 2024) et contraint le développement commercial favorisant une relocalisation à la périphérie (Cutter & Franco, 2012). De plus, en réduisant la densité de construction (Shoup, 2005 ; Smith et al., 1964), les requis de stationnement participent à détériorer la santé financière des municipalités en augmentant leurs coûts (Hortas-Rico & Solé-Ollé, 2010 ; Metro Vancouver Regional Planning, 2023) tout en réduisant leurs revenus (Blanc et al., 2014).

À l'exception de certains cas particuliers, la mise en place de tarification incite les gens à utiliser les modes durables ou actifs pour se déplacer (plutôt qu'en automobile solo) et augmente ainsi le bien-être économique (Khordagui, 2019 ; Olus Inan et al., 2019). Des modèles économiques théoriques (Arnott, 2006 ; Arnott & Rowse, 2009) ont trouvé que le prix des stationnements est trop bas et crée des externalités de congestion, qui peuvent être réduites en ancrant le prix sur rue aux prix des garages hors rue avoisinants. Ce constat théorique se matérialise empiriquement dans des juridictions où le stationnement sur rue est tarifé de cette manière (J. N. van Ommeren et al., 2012). Les coûts de la congestion créés par le ratissage peuvent être inférés à l'aide de données de tarification et d'occupation (Inci et al., 2017 ; J. van Ommeren et al., 2021). La figure 2.1 schématise les relations entre les différents impacts et leur relation.

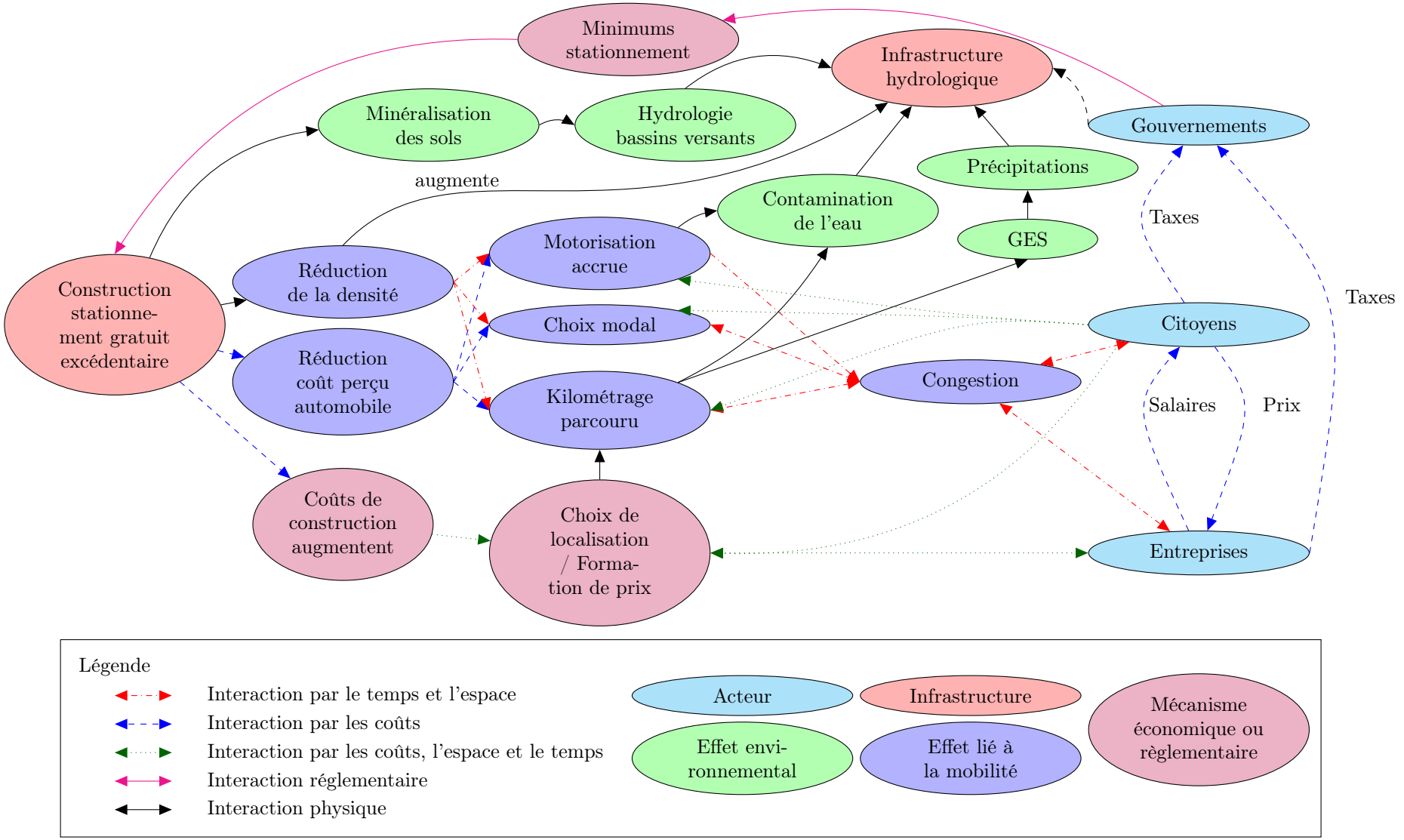


FIGURE 2.1 Synthèses des interactions du stationnement avec l'environnement, l'économie et la mobilité

Concernant les méthodes de dénombrement sur rue, la plupart des méthodes se fient à un identifiant de rue et une coordonnée linéaire de début et de fin de zone ainsi que des conventions sur un ensemble de champs qui définissent les dates, heures et types de véhicules affectés par les restrictions des panneaux (Bourdeau, 2014 ; Eros et al., 2025 ; Open Mobility Foundation, 2024c). Certaines méthodes utilisent simplement une estimation de la longueur moyenne des places de stationnement et des retraits pour les bornes-fontaines et les arrêts de bus par exemple(Chester et al., 2015, 2022 ; Hoehne et al., 2019). Plus récemment, Hellekes et al. (2023) a proposé une méthode basée sur une fusion de résultats de segmentation d'image par Apprentissage Profond (AP) et d'inférence bayésienne. En prenant de multiples images différentes, la méthodologie prédit si une partie de bord de rue est un stationnement ou une voie de circulation. Le modèle est aidé en utilisant un masque issu d'OSM pour ajouter de l'information à l'entrée du modèle.

Trois grandes familles de méthodes ont émergé pour estimer les places de stationnement hors rue. La première a émergé avec l'amélioration des méthodes d'AP. Ces articles discutent des manières d'identifier les places de stationnement hors rue sans discuter de la manière de compiler des estimations à des échelles métropolitaines (Azimi et al., 2019 ; Hellekes et al., 2023 ; Hurst-Tarrab et al., 2020 ; Lichtblau & Oswald, 2019 ; Qiam et al., 2025 ; Seo et al., 2009). L'utilisation de l'AP pour détecter les aires de stationnement s'inscrit dans une tendance plus large de prédiction de l'utilisation du sol à partir des ces méthodes qui ont vu d'importantes améliorations dans leurs prédictions dans la dernière décennie (Lv et al., 2023 ; Ronneberger et al., 2015 ; Vaswani et al., 2017). La deuxième catégorie utilise des relevés manuels sur un sous-ensemble du territoire et une régression subséquente pour estimer la quantité de stationnements sur un territoire. Deux exemples principaux de ces méthodes sont Akbari et al. (2003) et Davis, Pijanowski, Robinson et Kidwell (2010). La troisième méthode utilise une combinaison des requis de stationnement issus des codes d'urbanisme simplifiés et une base de données foncières pour estimer le nombre de places requises à la construction (Chester et al., 2015, 2022 ; Hoehne et al., 2019).

Quatre formats de données utilisés pour la représentation cartographique du stationnement ont été recensés. Les deux premiers sont plus focalisés sur le stationnement sur rue(Eros et al., 2025 ; Open Mobility Foundation, 2024c) tandis que les deux derniers peuvent représenter le stationnement sur rue et hors rue (Organisation internationale de normalisation, 2023 ; OSM Contributors, 2025b, 2025e). Le tableau 2.1 donne un aperçu des caractéristiques des différents formats de données sur 5 dimensions : la représentation de la capacité de stationnement, la capacité de représenter des places individuelles, la représentation des restrictions, la représentation de la tarification et la capacité de récolter des données sur l'utilisation.

TABLEAU 2.1 Sommaire des formats de données représentant le stationnement

Format \ Dimension	Sur rue					Hors rue				
	Capacité	Place indiv.	Restriction	Tarification	Utilisation	Capacité	Place indiv.	Restriction	Tarification	Utilisation
CurbLR	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Curb Data Standard	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
OpenStreetMap	/	/	✓	/	✗	✓	✓	/	/	✗
ISO 5206	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ = Pleinement supporté, ✗ = Non supporté, / = Représentation partielle

D'un point de vue méthodologique, les méthodes d'estimations proviennent toutes de traditions scientifiques différentes , avec des méthodes de quantification de l'erreur qui ne sont pas toutes compatibles (Breiman, 2001 ; Ziman, 1984). Aucune étude comparative des méthodes d'estimation n'existe, contrairement à d'autres disciplines (Rhodes et al., 2015). Pour le cas de l'estimation utilisant les règlements de stationnement, les articles utilisant cette méthode présentent un cadre limité pour d'évaluation de la précision du modèle. À cette complexité s'ajoute le fait que les méthodes ne mesurent pas toutes la même chose. Les méthodes de segmentation représentent la taille, les méthodes par les minimums donnent des places. Les méthodes de régression changent selon la formulation. Bref, il n'y a pas de cadre clair sur l'objet d'inventaire ou la base de comparaison des méthodes.

TABLEAU 2.2 Synthèse des méthodes d'estimation de la capacité de stationnement

Méth.	Type	Description	Hypothèses	Avantages	Inconvénients	Quantif. erreur
Imagerie aérienne + régression	Hors Rue	Comptage sur un sous-ensemble du territoire puis prédiction sur le reste	• Sélection donnée pour formulation • Régularité statistique du territoire	• Simple à implémenter	• Résultat agrégé • Aucune visibilité sur le stationnement souterrain	Statistique prédictive : Erreur moyenne absolue, erreur quadratique
Règlements + données foncières	Hors Rue	Représentation des règlements et application à une base de données foncière	Quantité réglementaire construite	• Inventaire désagrégé • Couverture stationnement souterrain • Structure les hypothèses de la littérature	• Besoin en données • Complexité de l'historique • Hypothèse que le min est la valeur construite	Statistique prédictive : erreur moyenne, erreur min et max sur échantillon
Panneaux	Sur Rue	Découpage des bords de rue en utilisant des informations géospatiales	Longueur de place et précision des données géospatiales	• Variabilité temporelle • Limite d'accès	• Données • Sensible à l'hypothèse de longueur de places	Aucun cadre

TABLEAU 2.2 Synthèse des méthodes d'estimation de la capacité de stationnement(suite)

Méth.	Type	Description	Hypothèses	Avantages	Inconvénients	Quantif. erreur
Segmentation imagerie aérienne	Principalement hors rue une étude sur rue	Entraînement d'un modèle d'apprentissage profond sur de l'imagerie aérienne annotée. Méthode classifie chaque pixel sur une image	Structure visuelle du stationnement universelle	• Accès aux données • Désagrégé	• Aucune visibilité sur le stationnement souterrain • Ressources informatiques • Prédiction conditionnelle aux données • Doit convertir la superficie en capacité	Statistique prédictive : métriques de chevauchement entre l'annotation humaine et la prédiction du modèle
Détection imagerie aérienne	Stationnement intérieur Aucune étude à grande échelle	Entraînement d'un modèle d'apprentissage profond sur de l'imagerie aérienne annotée. Méthode crée une boite englobante pour chaque objet detecté	Structure visuelle universelle du stationnement	• Accès aux données • Complètement désagrégé	• Aucune visibilité sur le stationnement souterrain • Ressources informatiques • Prédiction sujette aux données d'entraînement	Statistique prédictive : métriques de chevauchement entre l'annotation humaine et la prédiction du modèle

TABLEAU 2.2 Synthèse des méthodes d'estimation de la capacité de stationnement(suite)

Méth.	Type	Description	Hypothèses	Avantages	Inconvénients	Quantif. erreur
Régression données foncières	Prospectif Aucune étude recensée	Recensement manuel sur un ensemble de lots/rues d'entraînements puis prédiction sur l'ensemble du territoire à l'aide d'un modèle de régression	Constance de la relation entre les covariants	• Désagrégé • Relativement simple	• Requiert des modèles de régression spécifiques pour les entiers positifs et variables catégorielles • Prédiction conditionnelle aux données • Récolte de données	Statistique prédictive ou inférentielle selon l'application
Recensement manuel	Hors rue sur rue	Recensement manuel de l'ensemble des places	Dénombrement fixe possible	• Exhaustivité • Désagrégé • Capacité de statuer sur la valeur réelle	• Coût • Entraînement des sondeurs	Statistique descriptive : Intervalles de confiance

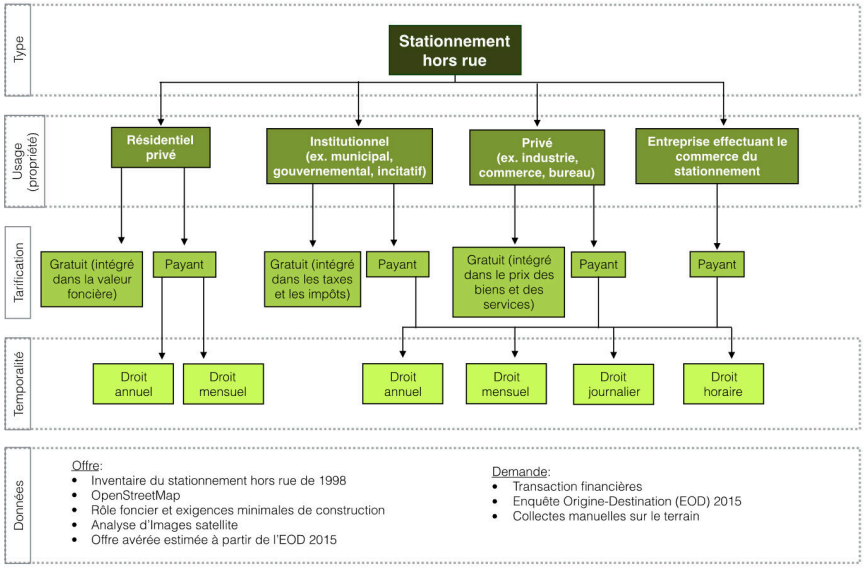
TABLEAU 2.2 Synthèse des méthodes d'estimation de la capacité de stationnement(suite)

Méth.	Type	Description	Hypothèses	Avantages	Inconvénients	Quantif. erreur
Échantillonnage	Hors rue et sur rue	Comptage manuel sur échantillon aléatoire ou systématique - Inférence statistique sur le territoire	• Base de sondage • Échantillon (méthodes design) • Modèle statistique (méthodes modèles)	• Robustesse statistique : demeure d'étalon dans beaucoup de disciplines (démographie, biologie, etc.) • Coût par rapport au recensement complet • Capacité de statue sur la valeur réelle	• Approche agrégée • Entraînement des sondeurs • Coût par rapport aux méthodes prédictives ou d'AP	Statistique inférentielle : Intervalles de confiance, variance

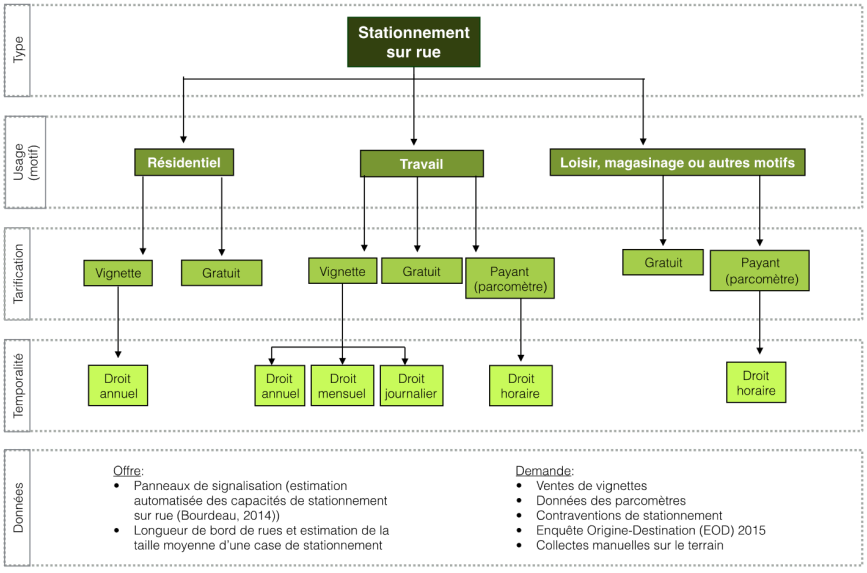
2.2 Définition et contexte légal du stationnement

2.2.1 Typologie de stationnement

Morency et al. (2017) détaillent des typologies de stationnement hors rue et sur rue. Elles sont montrées aux figures 2.2a et 2.2b. La typologie distingue un type (hors rue/sur rue), un usage et une propriété, la tarification et les droits d'accès.



(a) Hors rue



(b) Sur rue

FIGURE 2.2 Typologies de stationnement (Morency et al., 2017)

2.2.2 Politiques gouvernant le stationnement hors rue

Les minimums de stationnement ont vu le jour dans les années '30 en réponse à la croissance du parc automobile et pour assurer que les commerçants et citoyens internalisaient les coûts associés à l'automobile(Shoup, 2005). Ces règlements exigent qu'une quantité minimum de stationnements soient construits avec toute nouvelle construction ou réaffectation d'usage. Au Québec, la « loi sur l'urbanisme et l'aménagement » permet aux villes d'utiliser ce type de règlement si elles le veulent (Éditeur officiel du Québec, 1979). Ce mécanisme réglementaire est encore omniprésent au Québec à quelques exceptions près (Aignel et al., 2015 ; Arrondissement Côte-des-Neiges, Ville de Montréal, 2020 ; Arrondissement Plateau Mont-Royal, Ville de Montréal, 2015 ; Arrondissement Sud-Ouest, Ville de Montréal, 2020 ; Arrondissement Ville-Marie, Ville de Montréal, 2018). La ville de Québec a enlevé les requis minimums pour les logements dans certaines zones denses (Ville de Québec, 2024e).

Il est important de noter qu'il n'existe, à la connaissance de l'auteur, qu'un seul dénombrement tel que celui complété pour le ministère des Transports pour la ville de Montréal (Consortium CIMA+ - Daniel Arbour et associés, 1998). Aucune autre ville québécoise n'a entrepris d'inventaire exhaustif et même celui cité ci-haut ne capturait pas les stationnements résidentiels. D'autre part, ce dénombrement n'est ni mis à jour ni en accès libre. La section suivante donnera un aperçu des coûts directs associés au stationnement. Bien que les articles proviennent de l'international, la similarité des mécanismes réglementaires et la logique économique influençant le comportement des parties prenantes sont transposables au Québec.

Bien qu'il existe d'importantes preuves que ces requis sont contraignants (Cutter IV & DeWoody, 2010 ; Willson, 1995), F. Li et Guo (2014) constate une réduction de 49% du nombre de places de stationnement construites après l'abrogation des règlements. Ils trouvent par ailleurs que l'abrogation des minimums a eu plus d'effet que l'imposition de maximums. Ces constats sont différenciés par typologie de quartier puisque l'abrogation de minimums a plus d'effet dans les quartiers centraux alors que les maximums affectent les développements périurbains. L'abrogation ou la réduction des minimums de stationnement ne garantit pas que les promoteurs immobiliers décideront de minimiser les coûts à tout prix. Stangl (2019) donne une base quantitative à ce phénomène en recensant le stationnement construit et en le comparant aux réductions des minimums que les promoteurs ont obtenus. Ainsi, lorsque les minimums sont abrogés, la réduction médiane de stationnement construit est de 24 à 66% selon le cas. L'auteur constate que les promoteurs immobiliers veulent minimiser leurs risques d'invendus. Dans les quartiers avec un tissu urbain dense et de fortes contraintes de stationnement, où la valeur perçue du stationnement est plus élevée, les promoteurs réduisent

moins le stationnement pour maximiser leurs profits. Gabbe et al. (2020) montre comment l'abrogation des minimums de stationnement à Seattle a réduit la construction de stationnement de 18000 places à un coût de 30000$ chaque. Il cite que les requis des banques sont un facteur supplémentaire dans la décision de promoteurs à construire plus que le minimum.

2.3 Pourquoi dénombrer le stationnement ?

2.3.1 Consommation théorique d'espace-temps de différents modes

Plusieurs études ont contribué à définir le concept de la demande d'espace-temps de différents modes. Selon cette dimension, les modes collectifs ou actifs tendent à être beaucoup plus économes en infrastructures que l'automobile. Selon Vuchic et Bruun (1995), le concept a été introduit dans les années 50 par l'Union Internationale des Transport Publics (UITP) (Union Internationale des Transports Publics, 1959) puis développé au fil des années (Leibbrand, 1970 ; Marchand, 1984 ; Pushkarev & Zupan, 1975 ; Schmider, 1977). Trois composantes contribuent à l'empreinte spatio-temporelle de différents modes. L'espace directement pris lors des déplacements, l'« ombre » requise pour assurer les distances de freinage et l'espace requis pour l'entreposage du véhicule lorsqu'il n'est pas utilisé (Vuchic & Bruun, 1995). Le tableau 2.3 montre que le stationnement consomme entre 0.66 et 4 fois la quantité d'espace-temps consommée en déplacement. Selon le motif et le mode, l'automobile consomme 3 à 90 fois plus d'espace-temps que les alternatives.

Tableau 2.3 Demande d'espace-temps par personne (en $m^2.h$) pour un déplacement de 5km (Reproduit de Marchand (1984))

Mode	Motif	Stationnement $[m^2.h]$	Circulation $[m^2.h]$	Total $[m^2.h]$
Piéton		0	2.0	2.0
2 roues	Travail 9h	13.5	7.5	21
	Loisirs 3h	4.5	7.5	12
	Achats 1.5h	2.5	7.5	10
Automobile 1.25 pers./véh.	Travail 9h	72	18	90
	Loisirs 3h	24	18	42
	Achats 1.5h	12	18	30
Autobus 50 pers./véh.	Voie Banale	0	3	3
	Voie Réservée (60 pass/dir/h)	0	6	6
	Voie Réservée (30 pass/dir/h)	0	12	12
Métro	(30000 pers/dir./h)	0	1	1

Shin et al. (2009) formule un modèle de ville monocentrique radiale pour modéliser comment

les villes peuvent réagir aux pressions pour assurer la mobilité dans une région métropolitaine. Les auteurs décrivent plusieurs solutions au problème de croissance de métropoles incluant l'intensification de l'utilisation du sol, l'étalement urbain ou la mise en place de transports avec une empreinte spatiale plus faible. Ils trouvent que des politiques visant à accommoder l'auto déplacent d'autres activités plus productives.

Dans le contexte québécois, diverses études ont approché des éléments de l'offre d'espace dédié à chaque mode sur la voie publique (Bourdeau, 2014 ; Lefebvre-Ropars, 2021), mais des méthodologies de dénombrement de la consommation d'espace hors rue demeurent relativement peu nombreuses et difficiles à compiler (Morency et al., 2017).Héran et Ravalet (2008) explique que seules les grandes régions métropolitaines avec de fortes pressions sur l'espace ont les moyens de complètement documenter l'espace dédié au stationnement.

Cette section a introduit une comparaison théorique de la consommation d'espace en fonction du mode utilisé pour un déplacement, illustrant l'impact du stationnement sur ce bilan. La section suivante montrera comment l'espace dédié au stationnement influence les habitudes de déplacement.

2.3.2 Effet de l'offre de stationnement sur la mobilité

Cette section discutera des effets de l'offre de stationnement sur la mobilité des personnes. Beaucoup des études citent explicitement la nécessité de réduire le kilométrage parcouru en automobile du fait de l'impact élevé qu'a ce mode sur la santé publique, les finances publiques et des ménages et l'environnement (Miner et al., 2024). Ces coûts publics sont contrebalancés par la perception d'une meilleure qualité de vie (Mouratidis, 2025) et des meilleures perspectives d'emploi en l'absence de bon service de Transport Collectif (TC) (Smart & Klein, 2020). Ces avantages devraient cependant être remis dans le contexte d'un ensemble de subventions et de représentations sociales qui mettent en place un avantage structurel pour l'automobile (Mattioli et al., 2020 ; Olson et al., 2019 ; Seiler, 2008).

L'aménagement urbain, incluant la provision de stationnements, joue un rôle dans ces choix. Deux méta-analyses ont trouvé des liens modestes entre l'aménagement du territoire et les comportements de mobilité (R. Ewing & Cervero, 2010 ; Stevens, 2017). Cet aménagement du territoire est souvent quantifié à l'aide des 5D :Densité, Diversité, Design, Accessibilité aux destinations et Distance au TC. Manville (2017) suggère que ces effets sont modestes du fait de l'observation de la mauvaise variable. En effet, en évacuant le prix des routes et du stationnement des études, les études attribuant les comportements à l'aménagement ne mesurent qu'un proxy pour les objets pertinents. Pour reprendre l'expression de Manville, « si un zoologiste vous disait qu'il étudiait l'association entre les pandas et leur habitat, mais

n'étudiait pas l'habitat des pandas, vous trouveriez cela étrange.[...]Nous nous focalisons sur les lieux où les personnes habitent et travaillent, et non sur ceux où les véhicules bougent ou reposent ». Plusieurs études lient directement l'offre et le coût de stationnement au niveau agrégé et désagrégé.

La première catégorie d'études comparant les effets du stationnement sur la mobilité des personnes est constituée d'études agrégées à l'échelle métropolitaine. Le tableau 2.4 donne un sommaire des études recensées qui trouvent toutes un lien entre la quantité agrégée de stationnements et les habitudes de déplacement des citoyens. Les études agrégées ont cependant des risques d'erreur écologique et la variance des comportements est invisibilisée (R. Ewing & Cervero, 2010). Ceci a amené à plusieurs recherches sur l'effet du prix et de la quantité de stationnements sur les habitudes, commençant par l'offre résidentielle.

L'offre de stationnement résidentiel affecte en premier lieu la possession automobile. Les études sont souvent basées sur des méthodes de régression logistique et sont synthétisées au tableau 2.5. Le stationnement résidentiel peut aussi être associé avec les comportements de mobilité au-delà de la possession automobile. Quelques études sont synthétisées au tableau 2.6 et trouvent souvent un lien avec les comportements comme le choix modal ou le nombre de kilomètres parcourus en véhicule personnel. Le lien avec les comportements de mobilité est souvent modulé par la possession automobile (Chatman, 2013 ; Currans et al., 2023). Les lecteurs peuvent se référer à Currans et al. (2021) pour une feuille de route conceptuelle sur les liens entre le stationnement résidentiel et les habitudes de mobilité des résidents.

Tableau 2.4 Sommaire des études agrégées liant le stationnement à la mobilité

Étude	Contexte	Type	Constat
Manville et Shoup (2005)	27 Villes américaines	Corrélation / Argumentaire	Association entre stationnement, densité, kilomètres parcourus et congestion
C. McCahill et Garrick (2012)	12 villes américaines	Régression	Augmentation de 10% de la part modale automobile par $2500m^2$ de stationnement
C. T. McCahill et Garrick (2010)	2 villes américaines	Description	Trajectoire divergente de deux villes du fait de politiques de stationnement différentes
C. T. McCahill et al. (2016)	9 villes américaines	Régressions et critère de Bradford-Hill	Inférence de la direction de causalité entre le stationnement et l'augmentation des kilomètres parcourus
McAslan et Sprei (2023)	56 municipalités suédoises	Régressions sur la possession automobile	Chaque réduction de 1 place par $1000m^2$ des minimums de stationnement réduit le taux de possession automobile de 9.4 véhicules par 1000 habitants
Weinberger (2012)	New York	Modèle linéaire général (GLM) sur la possession automobile et part modale avec logit pour fonction lien et distribution binomiale	Association significative entre le stationnement automobile à domicile, la possession automobile et la part modale automobile

Tableau 2.5 Sommaire des études désagrégées liant le stationnement à la motorisation

Étude	Contexte	Type	Constat
Guo (2013b)	Étude de cas à New York	Inventaire manuel de stationnement et modèles logistiques imbriqués pour 770 ménages choisis au hasard dans une enquête de transport	Disponibilité du stationnement explique plus de variation que d'autres variables traditionnelles après contrôle de l'endogénéité
Guo (2013a)	Étude de cas à New York	Même échantillon que (Guo, 2013b). Modèle logistique imbriqué examinant l'effet de la compétition pour le stationnement sur rue sur la motorisation	1 voiture sur 11 des ménages enquêtés pourrait être expliquée par la présence de stationnement sur rue
Narayanan et al. (2024)	Madrid(Espagne)	Modèles logistiques multinomiaux estimant la probabilité d'avoir une ou plusieurs voitures	Présence d'un stationnement public hors rue à proximité augmente la probabilité d'avoir une voiture, mais pas plusieurs
Celik et al. (2023)	3 villes turques : Ankara, Erzurum et Bayburt	Modèles PPO, OLOGIT, GOLOGIT, HOLOGIT	La probabilité d'avoir une voiture augmente indépendamment de l'offre de stationnement, mais les chances de posséder plus qu'une voiture sont réduites si l'offre est restreinte

Tableau 2.5 Sommaire des études désagrégées liant le stationnement à la motorisation (suite)

Étude	Contexte	Type	Constat
De Gruyter et al. (2025)	Sydney Perth et Melbourne	Modèle logistique multinomial	Effet variable, mais réduction des chances d'avoir une voiture si des contraintes de stationnement existent, après contrôle pour les attitudes des répondants
C. Yin et al. (2018)	Changchun (Chine)	2 modèles logistiques binaires pour la motorisation : possession automobile et intentions d'achat	Le stationnement résidentiel et à l'employeur ont un effet statistiquement significatif sur la possession automobile et seul le stationnement résidentiel a de l'influence sur l'intention d'achat
Chatman (2013)	À proximité de stations de modes lourds au New Jersey	Régression moindres carrés sur le taux de motorisation des répondants d'une enquête dédiée	Rareté de stationnement et service de bus plus influents que la proximité aux modes lourds sur la motorisation
Christiansen, Fearnley et al. (2017)	Norvège	Modèle logistique	L'accès à un stationnement privé ou réservé triple la probabilité d'avoir une voiture
Stiebe et al. (2025)	Complexes résidentiels en suisse	Foret aléatoire, régression de Lasso et moindres carrés	Disponibilité du stationnement est la variable la plus importante du modèle de forêt aléatoire et du modèle de Lasso pour prédire le taux de possession automobile et la part modale

Tableau 2.6 Sommaire des études désagrégées liant le stationnement résidentiel aux comportements

Étude	Contexte	Type	Constat
Currans et al. (2023)	Los Angeles	Modèle binomial pour la possession et modèle tobit pour les kilomètres parcourus liés par une approche de médiation	Pour un développement hypothétique de 100 ménages, la restriction du stationnement à moins d'une place par logement réduirait les kilomètres parcourus par 10 à 23%
Christiansen, Fearnley et al. (2017)	Norvège	Régression logistique	Chaque place additionnelle augmente les chances d'utilisation de 13% et l'augmentation de la distance de marche au stationnement réduit les chances. Aucune indication de réduction du taux de mobilité avec des restrictions de stationnement
Chatman (2013)	New Jersey	Régression logistique	Les effets du stationnement résidentiel sont principalement sentis par la relation à la motorisation accrue
Khordagui (2019)	Los Angeles	Régression logistique binaire et multinomiale	Augmentation de 1% de l'offre de stationnement sur rue à domicile augmente les chances de conduire de 0.12% et le même pourcentage du stationnement hors rue augmente les chances de 0.06%

Tableau 2.6 Sommaire des études désagrégées liant le stationnement résidentiel aux comportements (suite)

Étude	Contexte	Type	Constat
den Braver et al. (2022)	Toronto	Ratio de risque avec un indice de « conduisabilité » basé sur l'aire de stationnement OSM par aire de diffusion, combiné à d'autres facteurs par analyse de composantes principales	1.8 fois plus de chances de conduire pour le 5^{e} d'indice de « conduisabilité » que pour le premier

La disponibilité et les dispositions d'accès du stationnement à l'emploi influencent aussi les comportements de mobilité en combinaison avec la disponibilité résidentielle. (den Braver et al., 2022), Khordagui (2019), Christiansen, Engebretsen et al. (2017), Wilson (1992) et Hess (2001) trouvent tous une association entre la disponibilité du stationnement au lieu de travail (et son prix) et la propension à conduire en utilisant des régressions logistiques. Ils suggèrent que la mise en place de mesures incitatives, de tarification (préférablement horaire plutôt que mensuelle) et la limitation de la capacité sont des outils potentiels pour encourager l'utilisation du TC ou de modes actifs. D'autre part, Hamre et Buehler (2014) trouve que l'efficacité de mesures incitatives pour les modes durables est limitée lorsque le stationnement est gratuit au travail. Parmar et al. (2023) crée un modèle de choix plus complexe qui inclut des variables attitudinales et trouve une association positive entre le stationnement fourni par l'employeur et l'utilisation de la voiture. Cependant, les employeurs ne sont pas incités à mettre en place la tarification et plusieurs conditions doivent être en place pour que ces mesures se concrétisent (Rye & Ison, 2005).

L'imposition de frais de stationnement pour le motif « magasinage » affecte aussi le choix modal de personnes vers des modes plus durables, mais peut réduire le chiffre d'affaires des centres commerciaux affectés (Au & Young, 2016 ; Lin et al., 2014 ; Newmark & Shiftan, 2007 ; Van Der Waerden et al., 2009). La propension à payer varie en fonction de données socio-économiques, mais aussi en fonction du type de « magasinage » (épicerie, linge, etc.). Cette propension à payer demeure même dans des contextes périurbains (Newmark & Shiftan, 2007 ; Olus Inan et al., 2019). Cela étant dit, les minimums de stationnements peuvent être une politique efficace pour maximiser le bien-être (au sens économique du terme) si le centre commercial a un important pouvoir de marché et a peu de compétition pour le bien qu'il vend (Olus Inan et al., 2019).

Des études de cas existent aussi dans le cas de travaux sur la gestion de la demande en transport sur les campus universitaires (Melia & Clark, 2018 ; Senft, 2005 ; Sweet & Ferguson, 2019 ; Yan et al., 2019). Ces études de cas constatent que la restriction ou la tarification du stationnement a un impact parfois plus important sur les parts modales que des mesures incitatives (subventions pour le TC, remises en argent), mais peuvent être difficiles à implémenter dans des contextes peu denses où la congestion n'est pas une assez grande contrainte(Sweet & Ferguson, 2019). D'autre part, si la tarification ne s'applique que sur le territoire de l'université, l'augmentation des frais de stationnement change le lieu de stationnement plutôt que le mode emprunté (Yan et al., 2019).

Plusieurs municipalités implémentent des taxes sur les stationnements (Dale et al., 2017, 2019 ; Hamer et al., 2009 ; Richardson & Merz, 2010) ou implémentent de la tarification pour

les places sur rue (Hensher & King, 2001 ; Wei et al., 2008). Selon les contextes, le transfert modal vers des modes plus durables peut être obtenu, mais aura potentiellement des effets modestes s'ils sont politiquement acceptables (Bianco et al., 1998 ; Hensher & King, 2001). Ils donneront potentiellement lieu à de potentiels déplacements d'impacts si les utilisateurs se stationnent en dehors du cordon (Wei et al., 2008). Dale et al. (2019) constatent un report modal vers des modes plus durables pour les trajets au travail, mais ils remarquent aussi sur la présence d'une forte demande latente pour le transport automobile qui limite les effets sur la congestion. Hensher et King (2001) suggère par ailleurs que l'imposition de prix est plus déterminante que la limitation de la capacité par des limites horaires pour moduler la demande.

Les derniers paragraphes illustrent comment le prix et la quantité de stationnements à différentes destinations affectent le comportement. Les constats sur la tarification font partie d'un corpus scientifique plus large de l'économie du stationnement. Cette discipline construit des modèles économiques et analyse des données de stationnement pour comprendre les interactions des acteurs et fournit un cadre théorique pour expliquer certains phénomènes à l'arrivée à destination, notamment comment s'effectue le choix de place, l'effet de la tarification et les externalités liées à la recherche que l'on nomme ratissage. Ce corpus sera discuté à la section suivante.

2.3.3 Choix de place, tarification et ratissage

Les pays anglo-saxons ont largement adopté des mécanismes de marché pour allouer les biens et services. Les réseaux routiers et le stationnement sont un secteur où ces mécanismes ne sont pas appliqués, malgré des résultats pratiques et théoriques suggérant qu'il y ait d'importants bénéfices (Button, 2006 ; Donald Shoup, 2016 ; Inci, 2015 ; Shoup, 2005 ; Vickrey, 1994 ; Walters, 1961).

Plusieurs modèles théoriques simplifiés ont été créés pour étudier la question du stationnement et comprendre les différents moyens de mieux allouer les places sur rue en l'absence de compétition hors rue (Anderson & de Palma, 2004 ; Arnott & Inci, 2006, 2010) ou lorsque des alternatives hors rue existent (Arnott, 2006 ; Arnott & Rowse, 2009 ; Calthrop & Proost, 2006). Inci (2015) synthétise ces articles en statuant qu'il y aura du ratissage tant qu'il y a un écart entre le prix sur rue et le prix des garages hors rue. D'autre part, les stationnements hors rue agissent comme des monopoles locaux (puisqu'il y a un coût spatial à aller au prochain garage) et que les usagers ne veulent pas marcher trop longtemps jusqu'à leur destination. Cependant, ces modèles économiques posent l'hypothèse d'un centre-ville spatialement homogène et négligent ainsi les temps de marches (Martens et al., 2010). L'utilisation

de modèles à base d'agents (Benenson et al., 2008 ; Martens et al., 2010) permet de mieux discriminer cette structure spatiale, montrant que certaines rues se rempliront progressivement tandis que d'autres gardent des places libres. Ils illustrent les dilemmes présents pour les décideurs : s'ils fixent des prix assez hauts, ils peuvent assurer des places libres en tout temps, mais feront face à de l'opposition politique, et sont souvent incités à accepter un certain niveau de congestion.

Plusieurs études présentent un complément empirique à la théorie énoncée plus haut. Dans le contexte néerlandais, une étude montre que même lorsque les prix sur rue sont proches de ceux des garages, il demeure du ratissage, mais que ce dernier pourrait être minimisé par une tarification dynamique et une meilleure information sur la disponibilité des places de stationnement (J. N. van Ommeren et al., 2012). Des projets pilotes de tarification dynamique ont été mis en place à San Francisco et Seattle. Les études portant sur ces deux pilotes ont trouvé que la demande est initialement inélastique, mais que le maintien de la politique amène des améliorations sur la disponibilité à long terme. Chatman et Manville (2014) constatent que l'implémentation de SFPark, le programme de tarification variable de San Francisco, a eu des résultats mitigés. Bien que le taux d'occupation moyen, qui était l'indicateur utilisé pour faire varier la tarification, ait été réduit à environ 80%, le taux de disponibilité (le pourcentage de temps où au moins une place est disponible sur un tronçon) n'était pas sensible au prix avec les modalités politiques en place. Ainsi, l'imposition de prix plafond, la lenteur de l'adaptation du prix et le choix d'indicateur pour la tarification sont déterminants pour réduire les externalités liées à la recherche de stationnement. Cela amène un questionnement plus large sur la viabilité politique d'un système de tarification. D'autre part, d'importants problèmes d'information sont présents dans le marché du stationnement comme l'illustre Albalate et Gragera (2018).

Les méthodes économiques peuvent aussi isoler ce que différents acteurs sont prêts à payer pour différents biens. J. van Ommeren et al. (2011) infèrent la propension à payer pour un stationnement des résidents d'Amsterdam en utilisant les préférences révélées par le choix d'achat de résidence. En utilisant des données de ventes de résidences et en capitalisant la différence de prix sur le temps d'attente pour un permis de stationnement résident, les auteurs estiment une propension à payer de 10€ par jour, bien au-dessus du prix réel de 0.40€ et bien en dessous des recettes possibles pour les places tarifées aux visiteurs qui paient 2.3€ par heure.

Lorsqu'un bien est offert gratuitement, la théorie économique stipule aussi que l'affectation de places se fait par d'autres moyens (attente, épuisement des stocks, triage selon certaines règles, etc.). Dans le cas du stationnement, l'affectation se fait par le temps d'attente. Du

fait de la nature spatiale de ce dernier, l'attente se fait en mouvement et se mélange au reste de la circulation automobile, saturant potentiellement le réseau routier. Shoup (2018, p. 262) compile des statistiques montrant que dans certains cas, 8 à 70% des automobiles en circulation sont à la recherche de stationnement, avec des temps d'attente moyens variant entre 3 et 4 minutes. Deux études utilisent des méthodes économétriques pour estimer les externalités reliées à ce ratissage en utilisant des données d'horodateurs (Inci et al., 2017 ; J. van Ommeren et al., 2021).

Inci (2015) mentionne les éléments suivants comme manquants à la recherche : l'effet de la prévention de la fraude, l'économie politique du stationnement, les interactions entre véhicules stationnés et en mouvement et l'établissement de l'élasticité de la demande dans plusieurs contextes spatio-temporels. Il est intéressant de noter qu'il y a peu de mentions de l'interaction du stationnement avec d'autres utilisations du sol ou des modes autres que l'automobile dans la plupart des études trouvées dans la littérature plus basée sur les modèles économiques. Ces modèles discutent peu de l'utilisation du parc total de places de stationnements, en partie du fait de l'absence de données. Quelques études dans la littérature scientifique et la littérature grise ont été recensées et sont discutées à la prochaine section.

2.3.4 Utilisation de la capacité existante, consommation d'espace

Les sections précédentes ont révélé que les places de stationnement affectent le comportement de mobilité, et que l'absence de tarification implique fort probablement une allocation peu efficace des places de stationnement. Il est donc intéressant de se questionner sur le taux d'utilisation de l'infrastructure. Translink et Metro Vancouver Regional Planning (2019) a sondé les taux d'occupation des immeubles d'habitation et du stationnement sur rue dans la grande région de Vancouver. Pour l'échantillon donné, entre 30 et 40% de la capacité de stationnement n'était pas utilisée. L'étude constate aussi que la demande de stationnement est plus faible chez les locataires que chez les propriétaires. Cela étant dit, l'étude ne spécifie pas le plan d'échantillonnage, limitant la portée des constats. La conception de l'étude n'a pas permis de quantifier les interactions entre le stationnement hors rue et sur rue pour les immeubles d'habitation, mais indique qu'anecdotiquement, les praticiens ont constaté que les résidents utilisaient le stationnement sur rue plutôt qu'en sous-sol lorsqu'il n'y avait pas de restriction sur le stationnement sur rue. Héran et Ravalet (2008) estime un taux d'occupation pour le centre et les couronnes de la région parisienne avec des valeurs variant entre 70% pour le centre et 50% pour les couronnes plus éloignées.

Chester et al. (2015) trouvent que 16% de la région est utilisée pour le stationnement, plus que l'ensemble du réseau routier. D'autre part, le centre-ville a vu une forte croissance de

Tableau 2.7 Taux d'occupation - diverses études

Ville	Type de milieu	Taux d'occupation	Source
Vancouver	Appartement - Centre et banlieue	60-75 %	(Translink & Metro Vancouver Regional Planning, 2019)
Paris - Centre	Échelle municipale	70%	(Héran & Ravalet, 2008)
Paris - Couronne	Échelle métropolitaine	50%	(Héran & Ravalet, 2008)
Phoenix	Échelle métropolitaine	23%	(Hoehne et al., 2019)
Los Angeles	Échelle métropolitaine	30%	(Chester et al., 2015 ; Hoehne et al., 2019)
San Francisco	Échelle métropolitaine	40%	(Chester et al., 2022)
Montréal	Artères commerçantes tarifées	31-76%	(Aignel et al., 2015, p. 116)
Montréal	Stationnement sur rue zones d'étude (jour)	51-84%	(Aignel et al., 2015, p. 127)
Montréal	Stationnement sur rue zones d'étude (soir)	38-94%	(Aignel et al., 2015, p. 127)
Edimburgh	Hors rue centre ville	40-90%	(Rye et al., 2008)

stationnements en structure et souterrains où les valeurs de terrains sont hautes. Les auteurs concluent qu'il y a 3.3 places de stationnement par véhicule et que la majorité de la croissance du parc de stationnement a eu lieu entre 1950 et 1980.Davis, Pijanowski, Robinson et Kidwell (2010) estiment que 4.97% de l'espace urbain est utilisé par le stationnement hors rue commerciale (sans compter les stationnements sur rue ou résidentiels). Ils estiment environ 1.8 place par voiture, 5.3 places par ménage et 1.7 place par adulte. L'indicateur ne mesure pas la même chose que Chester et al. (2015) puisque ce dernier inclut les stationnements sur rue et résidentiel. Dans le cadre de l'établissement de la politique de stationnement de la ville de Montréal, Aignel et al. ont trouvé que les taux d'occupation ne sont élevés que sur quelques tronçons. Le tableau 2.7 synthétise le taux d'occupation constaté dans les différentes études.

L'espace important que prend le stationnement soulève plusieurs défis environnementaux puisque l'on bétonne d'importantes quantités d'espace.

2.3.5 Effets environnementaux directs

En plus des considérations spatiales, les stationnements créent de larges zones imperméables et absorbent la radiation solaire. Il en résulte deux conséquences principales : l'amplification des phénomènes d'îlot de chaleur et la pollution due au ruissellement des eaux.

Les îlots de chaleur urbains furent initialement constatés au XIX^{e} siècle à Londres (Hidalgo et al., 2008 ; Howard, 1833). Ils sont attribuables à 4 grandes causes : la rareté de la végétation et l'utilisation de matériaux de construction imperméables pour les bâtiments et les chaussées, la capacité des bâtiments à stocker et libérer de la chaleur, la géométrie tridimensionnelle de la surface urbaine « canyon urbain » et les sources anthropiques de chaleur (confort thermique, industries, transports). Les stationnements contribuent par la création de surfaces imperméables qui sont d'importants contributeurs à l'effet (Dudorova & Belan, 2022). Des analyses statistiques trouvent une relation significative entre le pourcentage de surface imperméable et la température au sol (Buyantuyev & Wu, 2010 ; Zhou et al., 2011) qui est fortement corrélé avec la température de l'air au sol la nuit (Marzban et al., 2018 ; Sheng et al., 2015). Ces îlots de chaleur ont des effets sur la santé humaine, avec un effet plus prononcé dans les pays fortement industrialisés avec de plus hauts niveaux d'inégalité, et affectent plus fortement les populations vulnérables (Yuan et al., 2024). Le Québec n'est pas exempt de ce constat puisque l'effet d'îlot de chaleur urbain a intensifié la canicule de 2018 à Montréal et dans les régions environnantes de 6 à 12 °C et est plus intense pendant les périodes chaudes de la journée (Shu et al., 2023). Les changements climatiques combinés au vieillissement de la population risquent d'augmenter la mortalité due aux vagues de chaleur (Cote et al., 2024 ; Hebbern et al., 2023). Des modifications aux revêtements peuvent réduire la contribution de ces derniers aux îlots de chaleur(Shamsaei et al., 2022), et des aménagements végétaux peuvent réduire leurs impacts (Bouzouidja et al., 2021 ; Chun & Guldmann, 2018 ; Parison et al., 2023).

Le deuxième impact environnemental des stationnements est le ruissellement de l'eau. Les stationnements constituent une part importante des surfaces imperméables dans les zones urbaines (Chester et al., 2022 ; Davis, Pijanowski, Robinson & Engel, 2010 ; Hoehne et al., 2019) et contribuent ainsi aux impacts sur les bassins versants (Shaikh et al., 2023). Le tableau 2.8 donne une synthèse des effets hydrologiques ; En plus des effets hydrologiques, les voitures, le bitume et les autres constructions émettent des contaminants qui sont relâchés dans l'environnement ou doivent être gérés par les gouvernements municipaux. Le tableau synthétise les effets trouvés dans la revue de Muller et al. (2020) Il faut cependant noter que diverses solutions techniques sont en développement pour minimiser les effets sur l'hydrologie incluant des bassins de rétention ou des revêtements plus perméables (Biswal et al., 2022 ;

Tableau 2.8 Synthèse des effets de l'urbanisation sur l'hydrologie (Reproduit de Shaikh et al. (2023))

Paramètre hydrologique	Effet
Volume de ruissellement	Augmentation
Débit de pointe	Augmentation
Infiltration	Réduction
Évotranspiration	Réduction
Recharge des nappes phréatiques	Réduction
Débit de base	Variable
Précipitation	Augmentation
Connectivité hydrologique	Variable

Tableau 2.9 Synthèse des polluants associés aux infrastructures de transport (adapté de Muller et al. (2020))

Contaminants constatés	Sources
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)	Lessivage du bitume, usure de la route, émissions pots d'échappement, freins
Métaux lourds	Pots catalytiques, peinture, plaquages , béton, masses d'équilibrage, freins, pneus
Chlorure	sel de déglaçage
Microplastiques	pneu, usure de la route

J. Wang et al., 2022).

Malgré les potentielles solutions techniques, la littérature est sans équivoque sur le fait que l'automobile requiert des taux d'occupation faibles dans les stationnements pour être fonctionnelle (Davis, Pijanowski, Robinson & Kidwell, 2010 ; Héran & Ravalet, 2008 ; Hoehne et al., 2019). Il y a donc le potentiel de faire du déport modal ou simplement réduire la capacité excédentaire pour réduire les dommages environnementaux. Ce constat a l'avantage de potentiellement mener à d'importantes réductions de coûts pour les ménages, les entreprises et les collectivités. La section suivante discutera des coûts de construction.

Tableau 2.10 Sommaire des coûts de provision du stationnement dans les immeubles résidentiels

Étude	Date	Où	Constat sur	Méthode	Effet constaté
Jia et Wachs	1999	San Francisco	Logement unifamilial	Modèle hédonique	Augmentation du prix de 11.8% pour les domiciles avec stationnement
			Copropriétés	Modèle hédonique	Augmentation du prix de 13% pour les domiciles avec stationnement
			Capacité population	Modèle hédonique	Augmentation de 20% du nombre de ménages qualifiant pour une hypothèque
Gabbe et Pierce	2017	États-Unis	Locataires sans auto	Modèle hédonique	613 $ par année ou 13% du loyer Perte sèche de 440 M$
			Marché locatif	Modèle hédonique	1700$ par année ou 17% du prix
Shah et al.	2024	Canada	Coûts de construction par logement	Modèle de coûts de construction	Réduction de 40% des minimums baisse les coûts de construction de base de 9%
			Entretien	Revue de littérature	575$ de frais annuels d'entretien pour un garage souterrain
			Achat de copropriété	Modèle hédonique	5 à 7 % du prix d'achat
			Coûts de construction de stationnement en surface	Estimations de l'industrie	5 à 27$ du pied carré
			Coûts de construction de stationnement étagé	Estimations de l'industrie	75 à 160$ par pied carré
			Coûts de construction de stationnement souterrain	Estimations de l'industrie	115 à 265$ par pied carré

Tableau 2.10 Sommaire des coûts de provision du stationnement dans les immeubles résidentiels (suite)

Étude	Date	Où	Constat sur	Méthode	Effet constaté
Andersson et al.	2016	Suède	Parc de logement	Modèle théorique calibré sur données marché	Minimums augmentent les coûts de 10% menant à une réduction du parc de logements de 1.4%
			Prix du logement	Modèle théorique calibré sur données marché	Minimums augmentent les coûts de 10% menant à une augmentation du prix du logement de 2.4%
Cudney	2017	États Unis	Coût médian de construction stationnement étagé	Enquête industrie	19700$ par place
			Coût médian par pied carré stationnement étagé	Enquête industrie	59.06$ par pied carré

2.3.6 Coûts du stationnement

Coûts de construction

La provision de stationnements génère des coûts pour une variété de parties prenantes : les individus paient indirectement pour le stationnement par les prix de différents biens et service, les collectivités locales doivent gérer les impacts du stationnement sur leurs infrastructures et le stationnement crée aussi des externalités (Shoup, 2005). Cette section visera à identifier quels sont les coûts associés et qui les porte. La première catégorie de coûts est liée au logement. Le tableau 2.10 synthétise les coûts de construction liés au stationnement et leurs impacts sur les dépenses des ménages en logement.

Ces coûts ne sont pas limités au développement immobilier résidentiel puisque des dynamiques similaires s'appliquent pour des développements immobiliers commerciaux. Franco et al. (2020) trouve que les requis de stationnement imposent un coût d'environ 44$ par pied carré de bureau construit alors que les coûts de construction totaux sont de l'ordre de 150$ le pied carré. Dans une étude de cas, Willson (1995) trouve dans une étude de cas que la réduction des minimums de stationnement de 35% augmente la valeur du projet de 30% ou garde le projet viable avec une augmentation de la valeur du terrain de 50%. Cutter et Franco (2012) utilisent une base de données des ventes d'immobilier commercial pour estimer si la valeur marginale de revente d'une place additionnelle recouvre les coûts de construction et constatent que ce n'est pas le cas pour la vaste majorité des propriétés. Ils trouvent que le ratio de places requises à places construites est de 0.97 indiquant que les promoteurs construisent légèrement moins de places que la valeur requise. Ils estiment que les minimums de stationnement sont une contrainte pour 80% des propriétés industrielles et 99% des propriétés en commerce de détail. Toutes propriétés confondues, les coûts de construction du stationnement excèdent la valeur à la revente de 20$ par pied carré.

Certains chercheurs ont développé des modèles économiques pour expliquer la manière dont les requis influencent les coûts de construction (Andersson et al., 2016 ; Lehe, 2018). Ces coûts peuvent être reportés sur la mobilité sous la forme d'une subvention à l'automobile par kilomètre parcouru. C'est ce que fait Litman lorsqu'il estime que le stationnement gratuit constitue une subvention d'environ 0.2$ par kilomètre ou 3.5$ par trajet. Au-delà des coûts directs mentionnés dans cette section, le stationnement consomme une forte quantité d'espace et impose des coûts liés à la provision d'infrastructure.

Coûts indirects du stationnement liés à la réduction de la densité

R. H. Ewing (2008) identifie plusieurs causes pour l'étalement urbain constaté dans plusieurs pays développés. D'une part, l'augmentation des revenus des ménages, l'augmentation des vitesses de transport (particulièrement automobiles) ainsi que diverses politiques publiques favorables à l'étalement urbain généralement. À cela s'ajoutent des imperfections de marché, des dynamiques spéculatives sur les marchés fonciers, des incitatifs fractionnés entre les promoteurs immobiliers et la population(Blais, 2024). Diverses subventions directes et indirectes au système de transport automobile par la construction d'infrastructures, les aides aux équipementiers et la socialisation des externalités, entre autres liées à la mortalité(Mattioli et al., 2020 ; Miner et al., 2024).

Un autre impact est lié aux coûts que les municipalités supportent pour fournir des services aux citoyens. Trois types d'études étudient ces impacts :

— des études d'ingénierie qui essaient d'inférer des coûts à partir d'unités de base (mètre d'égout et de routes, services publics par habitant) pour des archétypes de quartiers.
— des études de croissance alternative qui regardent différents scénarios de croissance à l'échelle métropolitaine pour examiner les effets potentiels de scénarios sur les coûts de service.
— des analyses de régression qui prennent des données agrégées par municipalité et tirent des conclusions sur le coût relatif de différentes municipalités en essayant de prendre en compte des facteurs comme le niveau de service ou des différences sociodémographiques ou climatiques.

Les études d'ingénierie ne sont pas novatrices puisque les premières ont émergé dans les années 1930 (The City Planning Board et al., 1934) avec une première revue systématique en 1961 (Mace, 1961) qui concluait déjà que les niveaux de service et de taxation étaient différentiés et constataient que beaucoup des études faites à cette date étaient motivées a priori, menant à des conclusions dramatiques (et prédéterminées). L'étude la plus citée (et potentiellement controversée) demeure « The costs of sprawl » (Real Estate Research Corporation, 1974a, 1974b) qui fut la première à essayer de systématiquement comptabiliser les coûts de différents types d'aménagement du territoire et des densités afférentes en utilisant une approche par archétypes. Cette étude montre des économies de 10 à 15% pour les coûts en capitaux publics en augmentant la densité du développement de 20%. Elle fut cependant critiquée pour certaines erreurs méthodologiques, car tout n'était pas tenu égal par ailleurs (Windsor, 1979), mais la critique trouvait quand même que les milieux plus denses réduisaient les coûts en capitaux publics de l'ordre de 9%. La commission de planification de Vancouver a trouvé que les coûts de services pour un appartement étaient 6 fois moindres par personne que

ceux de résidence unifamiliale, mais indique que les coûts de développement immobiliers sont plus hauts menant les ménages à s'installer hors du centre-ville (Metro Vancouver Regional Planning, 2023). D'autres études se sont focalisées sur les revenus totaux des municipalités et ont constaté que le stationnement avait un coût d'opportunité par rapport à des usages alternatifs variant entre -600 et 11000 $ par acre (Blanc et al., 2014).

Les études de croissance alternative, quant à elle, suivent un processus similaire à l'étude d'ingénierie, mais à l'échelle métropolitaine. La plus communément discutée dans le contexte canadien provient de Halifax (Stantec Consulting Ltd, 2013). Cette étude comptabilise les coûts en infrastructure routière, les réseaux publics (eaux usées) et privés (électricité et gaz) ainsi que les services comme les pompiers, policiers, écoles et bibliothèques, ainsi que les gains de temps de transport. Les économies entre les scénarios pour Halifax revenaient à des économies de 3 à 10% sur 10 ans entre le scénario de continuation et des scénarios où le développement était focalisé au centre-ville en incluant les gains de temps,

Plusieurs études économétriques tendent maintenant à supporter l'hypothèse que l'intensité de l'aménagement du territoire permet de réduire les coûts publics par personne, (Hortas-Rico & Solé-Ollé, 2010 ; Raghav et al., 2019) mais certains constatent un effet inverse à de très hautes densités du fait des demandes importantes sur l'infrastructure (Garrido-Jimenez et al., 2018 ; C. B. Goodman, 2019 ; Ladd, 1992). Certaines études ne montrent cependant pas d'associations entre la provision de services et l'intensité de l'utilisation du sol. (Holcombe & Williams, 2008)

Pour conclure, les minimums de stationnement sont un des mécanismes contribuant à la réduction des densités de constructions(Smith et al., 1964). Cette pratique augmente les coûts de construction pour les résidents, les utilisateurs ainsi que les municipalités qui doivent fournir des services publics à ces terrains, dont les revenus fonciers, sont faibles par rapport aux usages alternatifs qu'on pourrait en faire si les règlements d'urbanisme ne l'empêchaient pas.

Cette section conclut la discussion sur les impacts du stationnement. La section suivante examinera les méthodes de mesure ou d'estimation de capacité recensée pour les différents types de stationnements.

2.4 Méthodes de dénombrement de stationnement

La section précédente a démontré la pertinence d'en connaître plus sur le parc de stationnement. Cette section discutera des différentes méthodes utilisées pour émettre des prédictions ou des mesures sur une variable d'intérêt, les quantités que fournissent chacune des méthodes et leur pertinence dans le cadre du stationnement. Les difficultés entourant une énumération précise de l'entreposage de véhicules sont aussi discutées. Les méthodes utilisant des données géoréférencées pour prédire une capacité de stationnement théorique sont tout d'abord présentées. Par la suite, les méthodes de vision machine par apprentissage profond sont discutées et contrastées avec les méthodes d'énumération utilisant l'imagerie aérienne et la régression. Finalement, des méthodes prospectives, qui ont été appliquées à d'autres problèmes, sont discutées : l'utilisation d'un modèle de régression adapté à la nature des données et les méthodes d'enquêtes qui ont été utilisées dans d'autres branches de la science (biologie, démographie). Deux sections supplémentaires ferment le chapitre. La première discute de la littérature sur les processus d'évaluation des modèles et des enjeux entourant ce processus. La deuxième n'est que tangentiellement reliée au dénombrement. En évaluant les possibilités pour l'évaluation, différents outils statistiques ont été explorés et sont discutés.

2.4.1 Quels sont les cadres théoriques de dénombrement de quantités d'objets ?

L'un des défis du mémoire a été de déterminer une méthode pour évaluer la performance des prédictions. Or, différentes traditions scientifiques approchent l'évaluation de leurs prédictions et la génération de connaissances de manières différentes. Le dénombrement de places de stationnement semble assez banal. Il cache pourtant des différences importantes dans les cultures scientifiques qui ont généré les différentes méthodes et leur approche à la quantification d'erreur. Cette section va donc rendre explicites deux concepts. Le premier entoure la différence entre le cadre déductif et le cadre inductif. La deuxième discute des deux cultures de la statistique : la statistique inférentielle et la statistique algorithmique (science de la donnée). Finalement, la difficulté d'affecter une quantité précise de stationnements dans certains contextes précis sera aussi discutée.

Inductif et déductif

Le processus scientifique fonctionne par un processus de formulation d'hypothèses suivi d'expériences pour tenter de falsifier les hypothèses. Ce domaine est vaste ; le lecteur peut se référer à Thompson (2012) ou Ziman (1984) pour le contexte d'histoire des sciences. Deux cadres de création de connaissances sont présents et en tension : le cadre déductif et le cadre

inductif. Dans le cadre déductif, des hypothèses sont formulées et leurs conséquences mathématiques servent de base à la formulation de prédictions. Ces estimations peuvent ensuite être confrontées à la réalité du terrain afin d'évaluer l'incertitude du modèle par rapport aux observations. Des facteurs de correction peuvent être introduits à partir de données empiriques pour affiner le modèle. Dans ce mode de pensée, la réalité du processus a une structure connue, et les incertitudes proviennent principalement des limites de la modélisation elle-même.

À l'opposé, le cadre inductif repose sur l'observation du monde : il s'agit d'utiliser des méthodes mathématiques pour généraliser des régularités empiriques, souvent en cherchant à falsifier le paradigme en place. Une théorie scientifique n'est donc jamais confirmée, mais plutôt considérée comme la proposition la plus probable, ou simplement adaptée au problème à résoudre. Ce processus est fortement dépendant des méthodes de statistique inférentielle. Contrairement au mode déductif, l'incertitude provient de la qualité de la méthode d'échantillonnage et de la variabilité du processus.

Ces deux cadres ne sont pas hermétiques : ils utilisent parfois des méthodes mathématiques qui se situent à l'interface. Les méthodes de régression peuvent être utilisées dans un processus inductif pour inférer une relation à partir des données et estimer des paramètres utilisés dans les modèles, qui eux ont une structure déductive. Pour prendre un exemple simple, les modèles de résistance des matériaux utilisent des méthodes inductives pour estimer les propriétés d'un matériel. Celles-ci sont utilisées dans des modèles déductifs (la loi de Hooke) pour prédire la capacité d'une structure. Les tests d'hypothèses servent à déterminer si une prédiction déductive se matérialise.

Statistique descriptive, inférentielle et de prédiction

La deuxième distinction est entre la modélisation statistique de données et la modélisation statistique algorithmique (Breiman, 2001). Les deux cultures partagent des objectifs communs : l'extraction d'information et la prédiction.

La première culture part d'hypothèses sur la structure des données (par exemple : normalité des résidus, variance constante) et de preuves mathématiques pour assurer qu'ils puissent statuer sur la population dont provient un échantillon s'il a les propriétés énoncées. L'évaluation du modèle se fait sur la base de métriques d'ajustement du modèle et l'examen des résidus. Cette approche a le mérite d'être transparente et de permettre de bien expliquer les relations.

La deuxième culture quant à elle tend à être plus pragmatique, l'évaluation du modèle se fait sur la base de sa capacité à émettre de bonnes prédictions. Ici, on tend à diviser l'échantillon

en deux parties choisies par tirage aléatoire. La première sert à trouver une formulation mathématique qui permet de capturer la régularité statistique des données. La deuxième partie de l'échantillon est utilisée pour assurer que le modèle est capable de prédire sur des données qui ne sont pas utilisées dans la formulation du modèle et servent à vérifier la capacité du modèle à généraliser. Cette approche permet d'utiliser des modèles plus complexes, mais tend à être plus difficile d'interprétation.

Les deux cultures utilisent des métriques différentes pour décrire l'erreur : les métriques de statistique algorithmique sont souvent seulement sur l'erreur de la prédiction du modèle et pas nécessairement sur chaque paramètre à l'intérieur. D'autre part, la statistique algorithmique tend à se focaliser sur les données disponibles, alors que les plans d'échantillonnage dans la statistique inférentielle sont spécifiquement conçus pour aborder une population d'intérêt. Encore une fois, les mêmes outils peuvent être utilisés dans ces deux cadres : une régression linéaire peut être assez utilisée pour inférer la relation entre deux paramètres et utiliser des méthodes de validation croisée pour assurer que la formulation mathématique est assez robuste. Finalement, ces deux cultures tendent à ne pas statuer sur le même objet. La statistique inférentielle met en place les outils pour pouvoir inférer sur une population complète. Dans le cas de la statistique algorithmique, le modèle est conditionnel aux données ; on se fie alors à l'analyste pour assurer que l'ensemble de données est représentatif du problème à l'étude, mais le degré de généralisation n'est pas garanti.

Tableau 2.11 Récapitulatif des cadres et cultures des différents modèles

Méthode	Mode de pensée	Culture statistique	Sources d'erreur	Quantification	Statue sur
Comptage manuel	Inductif	Inférentielle	Entraînement, cohérence des recenseurs, base de recensement bien définie, définition claire et précise d'une place de stationnement	Statistique descriptive	La quantité réelle de stationnements
Échantillonnage	Inductif	Inférentielle	Entraînement sondeurs, plan d'échantillonnage, non-réponse , base de sondage bien définie	Statistique inférentielle : intervalles de confiance	La quantité réelle de stationnements
Apprentissage profond	Inductive	Prédiction	Annotation précise, capacité du modèle à distinguer les objets, représentativité des données pour l'application, occlusion (arbres, souterrain)	Échantillon croisé et métrique de chevauchement des annotations avec les prédictions	La quantité observable et détectable d'espace dédié au stationnement conditionnel à l'échantillon d'apprentissage
Géoréférencées sur rue	Déductive	Prédiction	Exhaustivité des données : règlements, rues longueur de véhicules	Aucune constatée	La quantité conditionnelle au respect des hypothèses

Tableau 2.11 Récapitulatif des cadres et cultures des différents modèles (suite)

Méthode	Mode de pensée	Culture statistique	Sources d'erreur	Quantification	Statue sur
Géoréférencées hors rue	Déductive	Prédiction	Formulation des règlements, données foncières, cas où les règlements ne sont pas économiquement contraignants	Échantillon de validation : Résultats en pourcentage d'erreur	La valeur qui devrait être construite, conditionnelle aux données foncières et aux hypothèses
Imagerie aerienne et régression	Inductive	Prédiction	Constance de la relation des covariants, hypothèse de définition du stationnement	Échantillon de validation ou convergence méthode de Monte-Carlo	Superficie dédiée au stationnement ou nombre de places conditionnel à l'échantillon et aux données utilisées pour régresser au territoire complet

Quel est le rapport avec le stationnement ?

Le tableau 2.11 résume où les différentes méthodes se situent sur les différentes dimensions discutées dans la section. Il est possible de constater que les méthodes qui sont élaborées au sein de ce chapitre ne statuent pas toutes sur la même quantité rendant la comparaison difficile. Aux cadres méthodologiques différents s'ajoute un enjeu de sémantique sur la nature d'une place de stationnement. Si la figure 2.2 définit une nomenclature, elle ne fournit pas nécessairement un diagnostic sur ce qui devrait être comptabilisé (ou non) comme une place qui a un effet sur la mobilité des personnes (ou d'autres sujets d'intérêt). La section suivante abordera ce sujet.

Enjeux sémantiques : qu'est-ce qu'une place de stationnement ?

La littérature discute du stationnement sans donner une définition précise de ce qu'est une unité de stationnement. Cette section vise à montrer en quoi cette définition est plus problématique qu'on ne le penserait. Certains lieux peuvent être polyfonctionnels et ne permettent pas facilement d'émettre un constat sur une capacité de stationnement. Quatre exemples seront donnés : les terrains vagues, deux lieux à vocation industrielle et les garages.

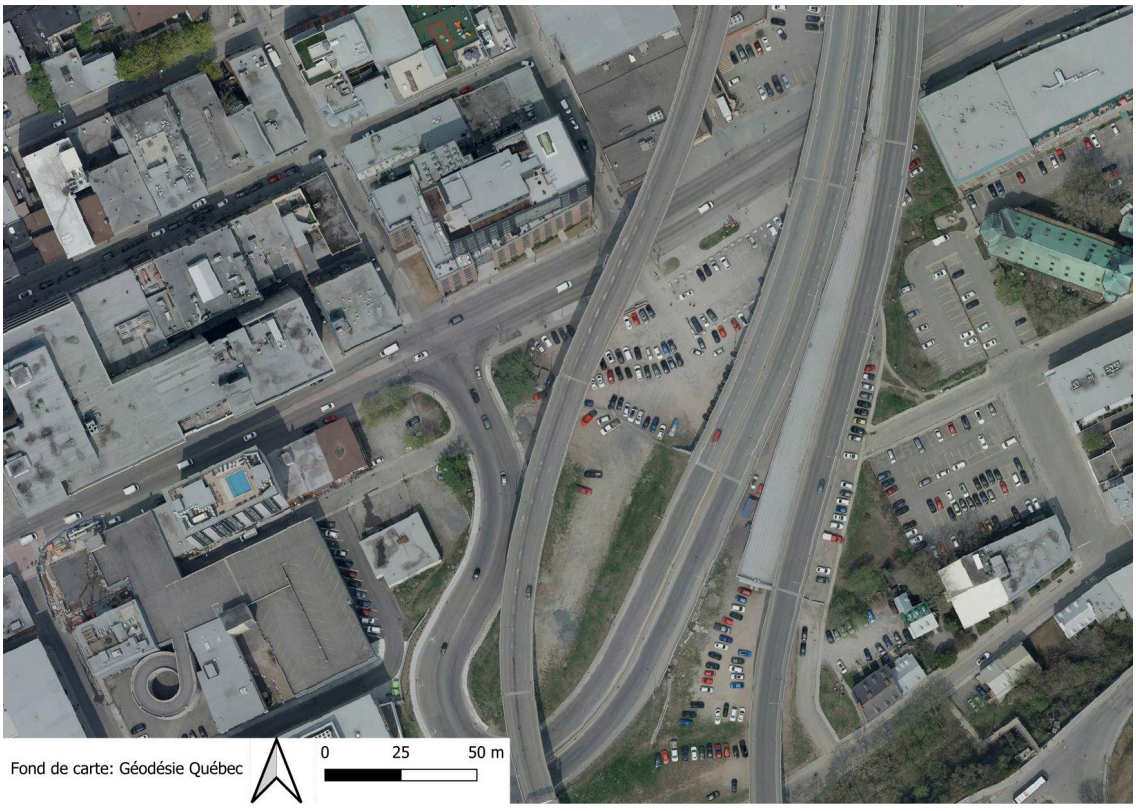


FIGURE 2.3 Terrain vague avec des voitures stationnées à Québec

Le premier exemple est un terrain vague sous l'autoroute Dufferin-Montmorency au centre-ville de Québec à la figure 2.3. Le terrain est clairement utilisé pour le stationnement. Dans un cadre d'estimation basée sur les règlements, cette capacité de stationnement n'existe pas, la réglementation ne requiert pas de places de stationnement. Dans un comptage manuel, comment affecterait-on une capacité précise à ce lieu, et en analyse d'imagerie, quelle superficie considérerait-on comme affectée au stationnement. OSM montre un stationnement à ce lieu, mais la structure organisationnelle n'est pas précisée, il y a donc un flou sémantique qui rend la détermination d'une quantité d'intérêt difficile.

Les deux prochains exemples proviennent de propriétés industrielles, une à Markham en Ontario et une à Napierville au Québec. La figure 2.4 montre la propriété à Markham. Les murs en dent de scie à l'arrière de la propriété sont tous des quais de chargements pour les camions. Cependant, on constate que des voitures sont stationnées devant les quais, car les places délimitées sont remplies. Quelle capacité de stationnement affecterait-on à ce lot ?

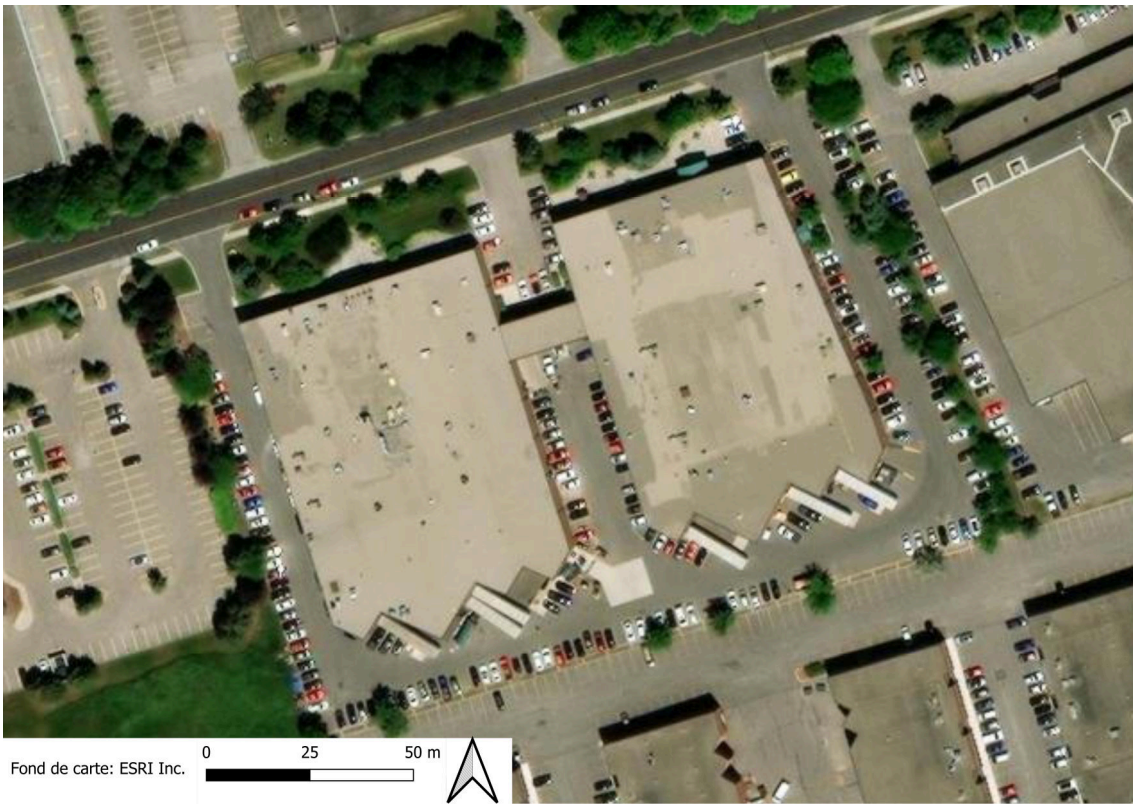


FIGURE 2.4 Polyfonctionnalité des quais de chargement

Le troisième exemple est une propriété industrielle à Napierville montrée sur la figure 2.5 (toit blanc au centre de la figure). La ville requiert une place par $75m^2$ pour les activités de fabrication et le rôle foncier révèle une superficie d'étages de $542m^2$, menant à un minimum

de 8 places requises. Dans un contexte de segmentation d'image, où devrait-on délimiter le stationnement ? Et si on devait aller compter un nombre de places, quel serait le chiffre exact affecté ? La littérature est relativement silencieuse sur la manière de prendre cette décision.



FIGURE 2.5 Ambiguïté de l'espace dédié au stationnement

L'enjeu est aussi présent dans des lieux pourtant dédiés à l'entreposage de voitures : les garages ont techniquement chacun une place de stationnement, mais ces espaces peuvent être utilisés pour l'entreposage. Si c'est le cas, la place devrait-elle être comptée ? Ces enjeux sont rendus explicites pour contextualiser les méthodes discutées dans le reste de la section et pour évaluer leurs forces et leurs faiblesses.

2.4.2 Méthodes d'estimation basées sur des données géoréférencées

La revue de littérature a révélé plusieurs méthodologies d'estimation de l'offre de stationnement hors rue et sur rue à l'aide de données vectorielles géoréférencées. Les méthodes sont différentes selon le contexte hors rue ou sur rue.

Sur rue

Bourdeau (2014) détaille une méthode d'inventaire de places de stationnement sur rue basée sur l'utilisation des données de bords de réseau routier, des panneaux de stationnement et de localisation des entrées charretières pour déterminer le nombre de places de stationnement sur rue. Des approches ignorant les entrées charretières ont aussi été mises en place pour Montréal et Québec (Fabrique des Mobilités, 2022b) en utilisant le standard de données CurbLR (Eros et al., 2025).

Cette approche permet de mieux identifier les limites réglementaires et temporelles que les approches utilisées par Chester et al. (2022) et Scharnhorst (2018). En effet, ces dernières n'enlèvent de la capacité que sur une base de moyennes pour les intersections et arrêts de bus sans prendre en compte la géométrie locale ou des contraintes qui ne peuvent être adéquatement capturées par OSM. Dans les 2 cas ci-haut, l'inventaire sur rue est fait avec des largeurs d'intersection moyennes, avec des retraits pour les entrées et la réglementation utilisant des heuristiques plutôt que les restrictions réglementaires.

Un projet allemand financé par leur ministère de la Recherche (Open Knowledge Foundation Deutschland, 2025) a été lancé pour évaluer le potentiel d'estimer la capacité de stationnement à partir de données OSM. Cette étude utilise des tampons autour de certains types d'objets (arrêts de bus, pistes cyclables, bornes-fontaines, entrées de bâtiment) qu'ils soustraient de la longueur de rue. Les auteurs comparent leurs résultats à des comptages manuels avec une erreur de +2.8% sur le nombre de places sur l'échantillon complet (avec des erreurs variant de -50% et +19% selon le segment de rue) (Seidel, 2021a). Plusieurs outils ont été développés pour faire le traitement des données OSM en combinaison avec des données de recensement et d'immatriculation pour faire des estimations d'utilisation de la capacité et de la consommation d'espace (Jordans et al., 2025 ; Seidel, 2021a, 2021b). Cependant, cette approche requiert que les informations de stationnement soient codifiées manuellement dans OSM et incluent le stationnement hors rue.

Une autre méthode spécifique a été recensée pour les stationnements hors rue qui évite de devoir manuellement codifier chaque stationnement et sera discutée à la section suivante.

Hors Rue

Chester et al. (2015) utilisent des données basées sur le rôle foncier, un modèle de croissance de la construction et des données de recensement croisées avec les minimums de stationnement issus des codes d'urbanisme pour déduire la capacité de stationnement de la région de Los Angeles depuis les années '50. Les auteurs indiquent qu'ils estiment que les minimums mis

en place sont probablement le nombre de places construites du fait de la valeur marginale basse de la place de stationnement par rapport à la construction de bâtiments. Chester et al. estime la capacité de stationnement en utilisant une méthode similaire basée sur les codes d'urbanisme et les données foncières pour la région de San Francisco (Chester et al., 2022) et Phoenix (Hoehne et al., 2019). Hoehne et al. (2019) élabore sur son processus de validation : 585 lots sont examinés manuellement avec des erreurs (prédits/observées) variant de +110% à -73%, l'erreur pour tous les lots recensés est de 6.2% plus de places prédites que comptées. L'erreur médiane était de 1.1% plus de stationnements prédits que comptés.

La récolte de données de minimums de stationnement est cependant manuelle et certains chercheurs en politiques de logements ont essayé de récolter de telles données de manière systématique, menant à des tentatives de collecte automatique.

Outils de collecte automatique de données de zonage

La mobilité n'est pas la seule sphère de la société affectée par les règlements d'urbanisme. Ces derniers contribuent à la formation des prix pour le foncier, notamment le prix des logements (Kok et al., 2014 ; L. Glaeser et al., 2005). Cela a mené les chercheurs dans ce domaine à développer deux méthodes pour récolter de l'information sur les règlements.

Des enquêtes peuvent être menées auprès des urbanistes pour comprendre les dispositions réglementaires (Gyourko et al., 2008 ; Pendall et al., 2018) ou les textes de loi peuvent être recensés pour créer des ensembles de données représentant le degré de restriction des règlements de zonage (Bronin et al., 2023 ; Dain, 2005 ; Xu et al., 2023). La deuxième méthode tend à être favorisée dans la littérature récente du fait des biais de réponse constatés dans les enquêtes (Lewis & Marantz, 2019).

Cependant, le processus de collecte de données est très laborieux et a mené certains chercheurs à essayer d'utiliser des méthodes d'AP pour faciliter la récolte. Ainsi, Axelrod et al. (2023) trouvent qu'une « approche mêlant la revue manuelle aux outils informatiques pourrait réduire l'effort requis pour collecter et numériser les règlements d'urbanismes [...]. Cependant, [leur] étude révèle aussi les limites de l'automatisation pour capturer les diverses formes d'expression au sein des structures juridiques du zonage ». Dans leur méthodologie, les auteurs ont utilisé des données d'un atlas créé manuellement (Bronin et al., 2023) comme données d'entraînement pour prédire les catégories de zones (résidentiel, usage mixte ou non résidentiel) et obtiennent de meilleurs résultats que des approches utilisant seulement des règles. Cependant, le document ne dit pas si des valeurs numériques pourraient être extraites. En conclusion, bien que les méthodes d'AP semblent prometteuses pour faciliter ce type de tâches, il semble nécessaire de créer des structures de données manuellement pour

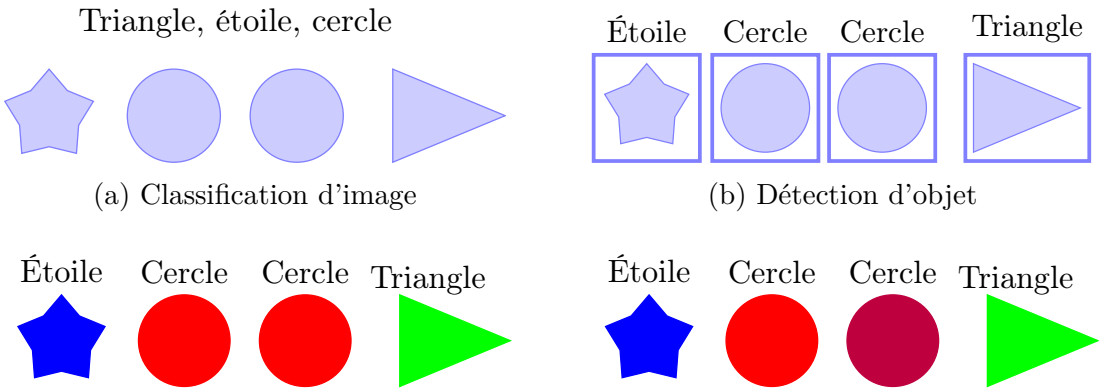
servir de données d'entraînement.

Les avancées récentes en AP ont mené certains chercheurs à développer des méthodes de segmentation d'images spécifiquement pour extraire les aires de stationnement.

2.4.3 Méthodes d'estimation basées sur l'imagerie aérienne et l'apprentissage machine

Méthodes

L'augmentation de la capacité de calcul numérique et la démocratisation des méthodes d'apprentissage machine ont mené plusieurs auteurs à développer des méthodes spécifiques au stationnement. Ces méthodes se fient à des réseaux de neurones pour capturer la régularité statistique des images. Les tâches de vision machine se répartissent dans quatre grandes catégories : la classification, la détection, la segmentation sémantique et la segmentation d'instance (Wallach, 2024). La figure 2.6 représente schématiquement ces tâches.



(a) Classification d'image

(b) Détection d'objet

(c) Segmentation sémantique

(d) Segmentation d'instance

FIGURE 2.6 Résultats de différentes méthodes de vision par ordinateur pour une même image

Les méthodes de segmentation sémantique (Hellekes et al., 2023 ; Qiam et al., 2025) et de détection d'objet(Amato et al., 2017 ; de Almeida et al., 2015) sont les plus communément constatées dans la littérature sur le stationnement. La segmentation sémantique est la plus utilisée pour des inventaires à des échelles métropolitaines tandis que la détection est plus utilisée pour identifier des places occupées ou libres dans des stationnements. Une topologie de réseau adaptée à la tâche est d'abord choisie, ensuite une fonction de perte à minimiser pour l'entraînement est spécifiée ainsi que des hyper paramètres définissant la configuration

de l'algorithme d'optimisation des paramètres. Dans le cas de la segmentation sémantique, les images sont annotées en spécifiant l'appartenance de chaque pixel à une classe. Les images sont séparées en un ensemble d'entraînement et un ensemble de validation. L'ensemble de validation est un échantillon croisé pour éviter le surapprentissage où le modèle représente bien les données, mais dénature la tendance centrale(Geman et al., 1992 ; Wallach, 2024). Le modèle est le plus souvent évalué en utilisant une métrique décrivant le degré de chevauchement de l'annotation avec la prédiction du modèle.

Deux grandes vagues d'innovation ont amélioré la performance des modèles de vision par ordinateurs : les réseaux de convolution (Lecun & Bengio, 1995 ; Ronneberger et al., 2015) et les transformateurs et mécanismes d'attention (Lv et al., 2023). Ces derniers sont les modèles les plus avancés et permettent d'inclure le contexte complet de l'image alors que les méthodes de convolution fonctionnent en passant l'ensemble des pixels par un même noyau de convolution pour extraire des caractéristiques. Le sujet est vaste et de nombreux ouvrages de référence sont disponibles si le lecteur veut approfondir,(Goodfellow et al., 2016 ; Wallach, 2024) mais le contexte fourni ci-dessus devrait permettre de comprendre le reste de la section. Pour une discussion spécifique à la segmentation d'image pour les scènes urbaines, le lecteur peut se référer à Lv et al. (2023) ;

Quelques articles ont été recensés pour prédire la présence de stationnement. Hurst-Tarrab et al. (2020) utilise un ensemble de données pour prédire le stationnement. La métrique Intersection over Union (IoU) dénotant le chevauchement des deux images atteint 80% pour cette étude en utilisant seulement de l'imagerie et l'annotation. Deux études ont utilisé des données OSM pour enrichir l'image et fournir un masque supplémentaire pour réduire les chances que les voies de circulation ne se voient pas affectées à la classe de stationnement (Hellekes et al., 2023 ; Y. Yin et al., 2022). Dans les études mentionnées, le contexte OSM est ajouté directement à l'entrée du réseau de convolution. Qiam et al. (2025) prennent une approche légèrement différente pour valoriser les données OSM pour améliorer les prédictions. Dans leur cas, ils retirent des pixels aux prédictions de stationnement après l'entraînement du réseau de neurones. Qiam et al. (2025) inclut aussi de l'imagerie infrarouge comme couche supplémentaire aux images colorées. Ces deux modifications améliorent la métrique IoU de 2.5% et la meilleure spécification de modèle atteint une valeur de 84.6% pour cette métrique. Toutes ces méthodes requièrent des jeux de données annotés pour la prédiction. La section suivante donnera de l'information sur les jeux de données recensés. Cette liste n'est pas exhaustive, mais montre la difficulté d'établir un comparatif standard même entre des études avec une conception similaire.

Jeux de données disponibles à l'entraînement pour le stationnement

Deux enjeux sont critiques au succès d'un projet d'apprentissage machine. La présence d'un modèle adapté à la tâche en cours et la présence d'un jeu de données annoté qui peut être utilisé pour ajuster les poids initiaux du modèle. Le tableau suivant résume les jeux de données actuellement disponibles pour la segmentation sémantique du stationnement en milieu urbain :

Tableau 2.12 Jeux de données annotés de segmentation sémantique en milieu urbain

Nom	Origine	$N_{classes}$	N_{images}	Classes pertinentes	Point de vue
CNRParkEXT	Amato et al., 2017	2	144 000	Places occupées, places libres	Caméra de surveillance
PKLot	de Almeida et al., 2015	2	12146	Places occupées, places libres	Caméra de surveillance
APKLot	Hurst-Tarrab et al., 2020	1	500	Grappes	Imagerie satellite
Skyscapes	Azimi et al., 2019	31	16	Aires pavées, aires non-pavées	Orthophotos
Grab-PkLot	Y. Yin et al., 2022	1	1344	Aires de stationnement	Orthophotos
Parkseg	Qiam et al., 2025	1	12617	Aires de stationnement	Imagerie satellite

L'imagerie aérienne a aussi été utilisée avant la démocratisation de ces méthodes en utilisant des comptages manuels et des régressions au niveau d'un territoire

2.4.4 Méthodes d'estimation basées sur l'imagerie aérienne sans apprentissage machine

Akbari et al. (2003) utilisent des orthophotos en couleur avec une résolution de 0.3m pour identifier le pourcentage d'utilisation des sols de différentes surfaces (bâtiments, verdure, stationnements, etc.). Une approche de Monte-Carlo est utilisée où un sous-ensemble de pixels se voit assigner une utilisation des sols manuellement pour chaque sous-ensemble de photos

basé principalement sur la couleur du pixel. Le nombre de pixels manuellement identifiés est validé contre la convergence du pourcentage d'utilisation des sols jusqu'à un seuil de 1%. Akbari et al. ne font pas de distinction entre la voirie et le stationnement sur rue. Les taux de couverture sont extrapolés sur l'ensemble de la municipalité à l'aide de données géospatiales d'utilisation du sol.

Davis, Pijanowski, Robinson et Kidwell (2010) recensent le stationnement manuellement dans un sous-ensemble de codes postaux de la région des Grands Lacs. Une régression basée sur une codification d'« urbanité » des codes postaux issue du recensement est ensuite utilisée pour inférer l'offre de stationnement hors rue non résidentielle sur un territoire s'étendant sur 4 états dans le Midwest des États-Unis. La méthode est validée sur un sous-ensemble de données qui n'est pas utilisé pour la régression et les auteurs constatent une erreur de 5% entre la valeur inférée par régression et la valeur mesurée manuellement pour le sous-ensemble de contrôle. Comme l'étude précédente, cette étude n'inclut que le stationnement hors rue.

Ces deux études supposent une homogénéité de la répartition du stationnement sur le territoire et leurs constats sont conditionnels à l'échantillon choisi pour la formulation de la régression et l'évaluation sur l'échantillon retenu pour la généralité du modèle.

2.4.5 Méthode potentielle d'estimation : Modèles linéaires généraux

Une avenue potentielle serait d'utiliser un échantillon de données pour régresser le nombre de places en fonction de données foncières. Le stationnement étant un compte (nombre entier positif) sur une aire limitée, les méthodes de régression linéaire des moindres carrés sont cependant mal adaptées. L'utilisation d'un Modèle Linéaire Généralisé ou Generalized Linear Model (GLM) (Cameron & Trivedi, 1998 ; Nelder & Wedderburn, 1972) permet de modéliser explicitement la relation entre la variable dépendante et les variables indépendantes comme le fait une régression linéaire typique, mais permet de définir une distribution des erreurs adéquate aux données, d'ajouter une fonction lien pour conditionner les données et de gérer l'hétéroscédasticité. Ces modèles sont constitués de trois grands morceaux : un prédicteur linéaire, une fonction lien et une distribution de probabilité sous-jacente. Le prédicteur linéaire et la fonction de lien déterminent la composante déterministe de la modélisation tandis que la distribution de probabilités tente de refléter la composante aléatoire du phénomène. De manière plus formelle, Le prédicteur linéaire est donné par :

$$\eta = \mathbf{X}\beta \tag{2.1}$$

où $\mathbf{X}$ est un vecteur de variables explicatives, β est l'ensemble de coefficients estimés pour maximiser la vraisemblance du modèle et η est l'entrée de la fonction de lien. La fonction de lien relie le prédicteur linéaire à la moyenne de la distribution choisie. Le lien logarithmique est souvent choisi pour assurer la positivité de la moyenne et réduit la variance pour les données de comptage.

$$\mu = g^{-1}(\eta) \tag{2.2}$$

La distribution de probabilité qui doit provenir de la famille exponentielle est donnée par :

$$f_{EDM}(y|\theta_i, \phi) = e^{\frac{y\theta - b(\theta)}{a(\phi)} + c(y,\phi)} \tag{2.3}$$

La fonction $b(\theta)$ est telle que :

$$E[y] = \mu = b'(\theta) \tag{2.4}$$

où $b'(\theta) = \partial b(\theta)/\partial\theta$. La fonction $a(\phi)$ contrôle la dispersion telle que :

$$Var[y] = a(\phi)b''(\theta) \tag{2.5}$$

où $b''(\theta) = \partial^2 b(\theta)/\partial^2\theta$. Typiquement, $a(\phi)$ est égal à ϕ. Les GLM sont déjà implémentés dans la librairie « statsmodels » (Perktold et al., 2024). Le tableau suivant résume les implémentations pertinentes aux données de compte et pour le cas spécifique de la régression linéaire à titre comparatif :

Tableau 2.13 Tableau résumé des fonctions pertinentes aux GLM

Cas	Distribution	b	$b'(\theta) = \mu$	$b''(\theta)$	ϕ	Lien typique
Compte	Poisson (μ)	e^θ	e^θ	e^θ	1	$\mu = e^\eta$
	Binomiale négative (μ,α)	$-\frac{1}{\alpha}\ln(1-\alpha e^\theta)$	$\frac{e^\theta}{1-\alpha e^\theta}$	$\mu(1+\alpha\mu)$	1	$\mu = e^\eta$
Réels	Gaussienne (μ,σ^2)	$1/2\theta^2$	θ	1	σ^2	$\mu = \eta$

Le choix entre la distribution de Poisson ou la distribution binomiale négatives tient alors à la dispersion des données. Le facteur α est un facteur de dispersion de variance permettant de gérer l'hétéroscédasticité et peut être estimé à partir des résidus d'un modèle de Poisson. Dans son implémentation avec une gaussienne et une fonction lien linéaire, la régression devient simplement une régression des moindres carrés. La section suivante discutera de certaines méthodes mathématiques qui pourraient être pertinentes à l'évaluation d'un modèle.

2.4.6 La méthode étalon pour le dénombrement : l'enquête

Les méthodes d'inférence statistique et d'enquête sont la méthode de référence pour les cas de dénombrement ou de récolte de données, que ce soit dans un contexte humain (Ardilly, 2006 ; Tillé, 2019) ou pour dénombrer des espèces animales (Rhodes et al., 2015) et en sylviculture (Méthot et al., 2014). Ces derniers utilisent les données, des outils mathématiques et les lois de probabilité pour inférer des quantités - ou leur adéquation avec une valeur posée - pour des populations à partir d'un échantillon. Ainsi, les sondages tirent leur validité du plan d'échantillonnage par rapport à la base de la population. Ces méthodes ont été développées au XIX^{e} siècle comme méthode alternative au dénombrement manuel complet (Ardilly, 2006). Ces méthodes pourraient potentiellement être appliquées pour induire des capacités de stationnement totales ou à un niveau d'agrégation plus bas avec des méthodes plus poussées (Ghosh & Rao, 1994).

Méthodes d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage représentatif le plus simple serait un échantillonnage aléatoire simple (Tillé, 2019). Ce dernier utilise une sélection aléatoire d'une population. Ce type de sondage ou de tirage a l'avantage de ne requérir aucune information auxiliaire avant le sondage. La méthode de tirage est simple, mais comporte des limites lorsque les individus constituant la population sont très différents (ou que la discipline scientifique s'attende à ce qu'ils soient différents). Il peut être avantageux de modifier l'échantillonnage pour tirer des individus de groupes plus homogènes.

Un échantillonnage stratifié améliore cette situation en apportant de l'information connue a priori pour constituer des groupes (Cochran, 1963 ; Gumuchian & Marois, 2000 ; Tillé, 2019). Il est important de noter que l'échantillonnage stratifié comporte aussi des désavantages, il peut être plus complexe à implémenter et est sujet au jugement de l'analyste pour assurer que les strates sont adéquates. Il est aussi important de noter que l'évaluation de quantités avec une dimension spatiale apporte des complications additionnelles (J.-F. Wang et al., 2012). En effet, dans la plupart des cas, les variables sont corrélées spatialement entre elles : l'échantillonnage de deux propriétés limitrophes dans le stationnement risque de mener à des valeurs très semblables de stationnement qu'en prenant deux propriétés. En conséquence, les plans d'échantillonnage spatial systématique tendent à être plus efficaces que ne le sont des plans aléatoires dans ces contextes (Perret et al., 2022).

Des plans d'échantillonnage non probabilistes peuvent être utilisés dans certains cas en utilisant des modèles statistiques, mais sont au-delà de la portée de ce mémoire (Brus, 2023).

Estimation de paramètres

À partir des données récoltées à l'échantillonnage, on peut induire la valeur probable d'une quantité d'intérêt et l'incertitude qui l'entoure du fait de l'échantillonnage et du processus sous-jacent. Cette section donnera un exemple très simple à titre démonstratif.

Plusieurs ouvrages de référence donnent les méthodes pour déterminer des totaux ou des moyennes et les intervalles de confiance les entourant (Ardilly, 2006 ; Hines et al., 2005 ; Tillé, 2019). Dans le cas d'un tirage aléatoire simple, l'estimateur sans biais du total

$$\hat{T} = \sum_{j=i}^{n} \frac{y_i}{\pi_i} \tag{2.6}$$

où $\hat{T}$ est le nombre de stationnements total, y_i est la valeur mesurée de la variable d'intérêt à l'échantillon i, π_i la probabilité d'inclusion égale à n/N où n est la taille de l'échantillon et N est la taille de la population. L'estimateur par lot quant à lui est donné par

$$\hat{\bar{Y}} = \sum_{j=i}^{n} \frac{y_i}{n} = \bar{y} \tag{2.7}$$

où $\bar{y}$ est la moyenne de l'échantillon. La variance de l'échantillon s^2 (Ardilly, 2006) est donnée par :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \tag{2.8}$$

L'estimateur sans biais de la variance sur la moyenne et le total sont donnés pour un échantillonnage sans remise aux équations :

$$Var(\bar{y}) = FPC \times \frac{s^2}{n} \tag{2.9}$$

$$Var(\hat{T}) = N^2 \times FPC \times \frac{s^2}{n} \tag{2.10}$$

Le facteur de correction de population finie $FPC = \left(1 - \frac{n}{N}\right)$ sert à indiquer que la variance est réduite à mesure qu'une partie de plus en plus grande de la population est sondée. Dans les cas où les populations sont grandes par rapport à l'échantillon ($n \ll N$), $\left(1 - \frac{n}{N}\right)$ tend vers 1. Sous l'hypothèse de normalité, l'intervalle de confiance est donné par

$$\bar{T}_{\text{inf}} = \hat{T} - t_{n-1,1-\alpha/2}\sqrt{Var(\hat{T})} \tag{2.11}$$

$$\bar{T}_{\text{sup}} = \hat{T} + t_{n-1,1-\alpha/2}\sqrt{Var(\hat{T})} \tag{2.12}$$

où $t_{n-1,1-\alpha/2}$ est la valeur de la statistique t de Student pour un niveau de confiance de $(1-\alpha)$, typiquement $\alpha = 0{,}05$.

L'approche donnée plus haut dépend sur plusieurs hypothèses incluant l'homoscédasticité (variance constante) et la normalité approximative de la distribution de l'estimateur du total ou de la moyenne. Si ces hypothèses ne sont pas remplies, des méthodes non paramétriques peuvent être utilisées au besoin pour pallier ces difficultés (voir section 2.4.8). Avant d'aborder ces sujets, la littérature sur l'évaluation de la performance de modèles est discutée dans la prochaine section pour contextualiser les discussions des sections précédentes sur les méthodes d'estimation.

2.4.7 Modélisation, vérification et validation

La vérification et la validation sont les noms formels pour le processus d'évaluation des modèles en science. Cette section commencera par la définition de ce processus puis discutera des enjeux.

Vérification

La définition de la vérification selon National Research Council (2012) est donnée ci-dessous.

Définition 1. *La vérification est le processus pour déterminer si l'implémentation d'un modèle représente la description conceptuelle et les spécifications du concepteur.*

Typiquement, la vérification serait assurée à l'aide de tests unitaires sur les différentes fonctions pour assurer que le code fonctionne comme prévu. La vérification vise donc à assurer la cohérence interne du modèle. Dans le cadre de ce mémoire, la vérification a été faite de manière ad hoc. Les lecteurs peuvent se référer aux ouvrages de référence pertinents pour des cadres méthodologiques complets (Sale, 2014 ; Saleh, 2013).

Validation

La définition de la validation selon National Research Council (2012) est donnée ci-dessous.

Définition 2. *La validation est le processus de détermination de la fidélité du modèle au monde réel de la perspective des usagers du modèle.*

Ce processus vise donc à assurer la concordance du modèle avec le monde réel dans un régime et des hypothèses données qui peuvent (ou non) s'appliquer à des contextes plus généraux.

Le processus de validation s'appuie sur une série d'expériences ou d'observations à différents niveaux hiérarchiques dans la simulation, idéalement au niveau le plus fondamental possible pour déterminer la précision du modèle au niveau systémique. Un processus de calibration des variables intermédiaires inconnues (en utilisant la littérature ou des résultats expérimentaux dédiés) peut être utilisé pour caler une partie du modèle.

Le processus de validation peut être compromis par l'inexactitude des mesures physiques utilisées pour comparer le modèle à la réalité, compliquant la tâche.

Pourquoi avoir un processus d'évaluation ?

Le formalisme du processus est mis en place pour que les praticiens et les décideurs aient confiance dans la capacité de modèles à suffisamment bien représenter les potentiels scénarios qu'ils envisagent (National Research Council, 2008, 2012 ; Transportation Research Board & National Cooperative Highway Research Program, 2012).

La validation est-elle garante de prédictions fiables ?

Malgré ce formalisme, beaucoup de modèles ne peuvent pas être empiriquement validés du fait de la disponibilité des données au lieu, à l'échelle ou au temps voulu. Par ailleurs, Oreskes (1998) indique que les termes de vérification et validation devraient être recadrés comme des processus d'évaluation du contexte et du degré d'utilité d'un modèle. Le mot « validation » implique un manque de failles au modèle lorsqu'il est utilisé dans le langage usuel.

Oreskes (1998) illustre cette idée avec l'exemple de modèles de pollution créés dans un contexte réglementaire : bien que les modèles aient été validés sur un ensemble de centrales, ils se sont révélés incapables de prédire les émissions d'autres centrales, menant à des litiges et l'absence de sanctions financières pour certaines des centrales en excès des normes environnementales.

Avec ces limitations importantes en tête, la section suivante illustrera les méthodes typiquement utilisées pour quantifier le degré de fidélité d'un modèle.

Métriques d'évaluation

Dans le domaine de la prédiction, les modèles sont souvent évalués contre un ensemble de données considéré comme représentatif du phénomène d'intérêt. Comme mentionné plus haut, la disponibilité des données peut évidemment limiter l'étendue de cette évaluation. Les prédictions du modèle peuvent alors être comparées à la réalité terrain d'un ensemble de données.

Les métriques suivantes sont souvent utilisées pour la validation de modèles en science des données (Agard, 2024).

Tableau 2.14 Métriques d'erreurs pour les modèles déterministes

Description	Acronyme	Formule
Erreur moyenne	ME	$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_{pred,i} - y_{obs,i})$
Erreur moyenne quadratique	MSE	$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_{pred,i} - y_{obs,i})^2$
Racine de l'erreur quadratique moyenne	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_{pred,i} - y_{obs,i})^2}$
Erreur moyenne absolue	MAE	$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert y_{pred,i} - y_{obs,i}\rvert$
Erreur moyenne absolue en pourcentage	MAPE	$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\lvert y_{pred,i} - y_{obs,i}\rvert}{y_{obs,i}}$

Toutes ces métriques présentent le problème de ne pas discerner entre des biais systématiques et la variabilité probabiliste qui n'est pas représentée dans le modèle déterministe. Des approches différentes ont été constatées dans le cas du stationnement puisque Hoehne et al. (2022) cite des pourcentages d'erreurs sans nécessairement spécifier l'effet que pourrait avoir les erreurs constatées en pourcentage sur l'échantillon complet ou fournir une analyse de la source des erreurs. Cette approche présente le risque d'avoir d'énormes variations de pourcentage pour des petites prédictions et des enjeux, si aucune place n'est observée.

Des processus de modélisation des résidus ou l'intégration de composantes probabilistes dans des modèles déterministes sont relativement communs (Ting et al., 2023 ; Verma, 2025 ; Wong & Wong, 2016). Ils peuvent être utilisés pour informer sur les sources d'erreur ou redresser les résultats à des valeurs vraisemblables, mais dénaturent le processus, réduisant le pouvoir explicatif du modèle s'il n'y a pas un mécanisme causal clair pour expliquer le redressement.

2.4.8 Outils statistiques

La section précédente a discuté du cadre théorique de l'évaluation du modèle. Cette section discutera de méthodes statistiques qui peuvent être utilisées en complément pour mieux représenter les incertitudes de mesures ou les erreurs inhérentes aux méthodes d'estimation. La statistique est le plus souvent nécessaire dans un cadre inductif, mais ces méthodes peuvent aussi être utilisées pour propager l'incertitude ou donner un meilleur portrait des réponses possibles dans un contexte déductif.

Méthodes d'autoamorçage

Les sections précédentes ont discuté des modèles de données qui sont utilisés pour pouvoir inférer sur les propriétés d'une population à partir d'un échantillon. Les données ne se conforment pas nécessairement à ces hypothèses. Les méthodes d'autoamorçage (aussi appelées méthodes de Cyrano ou de « bootstrap » en anglais) furent donc conçues à la fin des années '70 (Efron, 1979 ; Miller, 1974). Ce sont des méthodes non paramétriques pour trouver les paramètres de distribution tels des intervalles de confiance quand la distribution de la variable d'intérêt se conforme mal aux distributions théoriques (normale, gamma, poisson). Ces méthodes consistent à faire un tirage aléatoire avec remise au sein d'un échantillon (ou d'un modèle constitué à partir d'un échantillon) existant pour générer une distribution synthétique. Le nombre de tirages est spécifié par l'analyste. Plus le nombre de tirages est grand, plus on approche de la valeur asymptotique du paramètre à estimer pour un coût informatique plus élevé, sous certaines conditions.

Trois grandes sous-familles de méthodes d'autoamorçage ont émergé (Davison & Hinkley, 1999) : non paramétriques, paramétriques et semi-paramétriques. Dans tous les cas, la méthode est initiée avec un échantillon observé :

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\} \tag{2.13}$$

Les échantillons sont indépendants les uns des autres et appartiennent à une distribution inconnue F :

$$x_i \overset{\text{ind}}{\sim} F, \quad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{2.14}$$

Une statistique d'intérêt est alors calculée :

$$\hat{\theta} = t(\mathbf{x}) \tag{2.15}$$

Les modèles non paramétriques fonctionnent typiquement en tirant B fois l'échantillon fourni avec remplacement pour obtenir un échantillon synthétique $\mathbf{x}^*$ tel que :

$$\mathbf{x}_b^* = \{x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*\} \quad b = 1, 2, \ldots, B \tag{2.16}$$

La statistique d'intérêt est recalculée à chaque itération :

$$\hat{\theta}_b^* = t(\mathbf{x}_b^*) \tag{2.17}$$

La distribution de la métrique d'intérêt est ainsi induite pour la variable θ à partir des

estimations de tirages successifs $\hat{\theta}_b^*$. Dans son implémentation la plus simple, les centiles pertinents sont extraits pour cette distribution. Ainsi, si un niveau de confiance $\alpha = 0.05$ est recherché, les $2.5^{\text{ième}}$ et $97.5^{\text{ième}}$ centiles de la distribution du paramètre recalculé sont utilisés pour l'intervalle de confiance. Cette méthode peut cependant donner lieu à des biais lorsque la distribution des données est asymétrique ou lorsque la fonction n'est pas lisse. La présence de données manquantes, des données aberrantes et des échantillons non indépendants sont cités comme des cas où l'autoamorçage ne fonctionnera pas(Davison & Hinkley, 1999). Des variantes des méthodes sont apparues pour corriger certains défauts des méthodes d'autoamorçage : les méthodes de correction de biais et d'accélération (BC_a) et les méthodes « bootstrap-t » qui normalisent toutes deux la distribution d'échantillons pour obtenir de meilleures estimations (DiCiccio & Efron, 1996).

Les méthodes paramétriques prennent en hypothèses que la forme de la fonction prend une valeur connue (normale, Poisson, binomiale négative, etc.). Les paramètres de la distribution sont induits à partir de l'échantillon. Un nouvel échantillon est créé à partir de la distribution ainsi définie B fois pour inférer les erreurs d'échantillonnage. Cette procédure est cependant sensible à la bonne spécification du modèle de la distribution des données.

Les modèles semi-paramétriques essaient quant à eux de permuter les résidus d'un modèle original à la nouvelle spécification du modèle. En répétant cette expérience, un intervalle de confiance peut être construit avec la méthode des centiles ou avec des corrections de biais au besoin.

Dans des cas de sondage sur population finie, des méthodes d'autoamorçage peuvent prendre des formes légèrement différentes pour respecter le plan d'échantillonnage et ne pas introduire de biais supplémentaires (Mashreghi et al., 2016). Les lecteurs avisés remarqueront que l'autoamorçage requiert l'indépendance des observations, une condition pour l'essentiel impossible dans un contexte géographique (Castillo-Páez et al., 2019) et cela sort du cadre de ce mémoire.

Cela complète la section sur les méthodes utilisées pour dénombrer le stationnement et les méthodes statistiques qui seront utilisées dans le cadre du mémoire. D'autres cadres théoriques ont été recensés en déterminant quelle procédure utiliser pour l'évaluation de la performance du modèle. Ils sont discutés en annexe A. La section suivante discutera des différents formats de données utilisés pour stocker de l'information sur le stationnement.

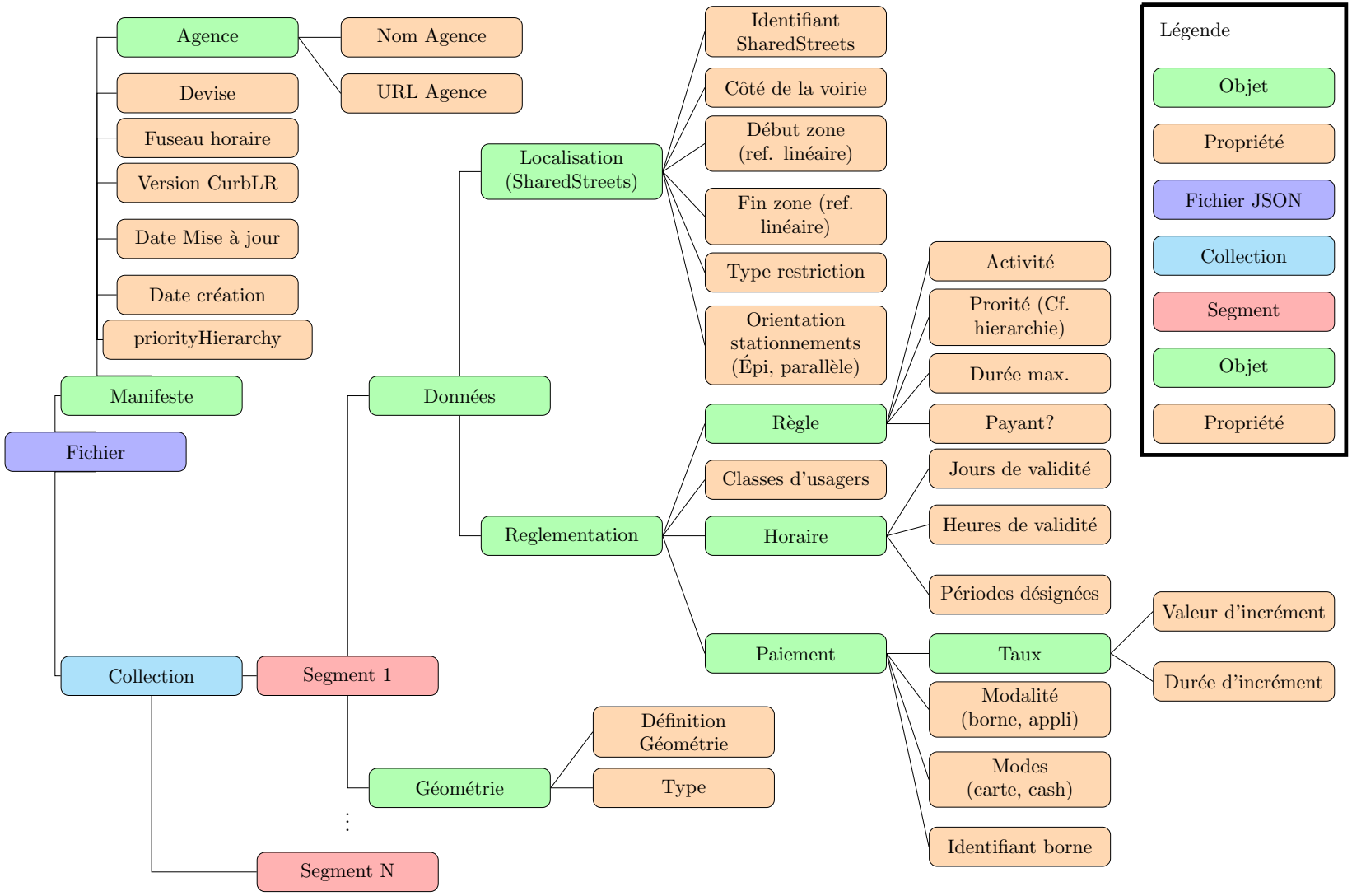


FIGURE 2.7 Format du modèle de données CurbLR

2.5 Formats de données pour représenter des données de stationnement

L'un des enjeux reliés au stationnement tient au manque d'uniformité dans les formats de données. Bien qu'un environnement normatif soit récemment apparu, la plupart des bases de données trouvées sont dans des formats hétérogènes et soumis aux besoins des personnes les ayant construites. Cette section énumérera quatre formats recensés : CurbLR (sec. 2.5.1), Curb Data Specification (sec. 2.5.2), OpenStreetMap (sec. 2.5.3) et la norme ISO5206-1 (sec. 2.5.4).

2.5.1 CurbLR

CurbLR est une spécification créée par l'Organisme à But Non Lucratif (OBNL) américain SharedStreets (SharedStreets, 2020a). Le standard de données vise à représenter les restrictions de stationnement sur rue en implémentant un modèle linéique. Les représentations des rues sont simplifiées en utilisant les points de départ et l'orientation aux intersections d'un tronçon de rue d'OSM (SharedStreets, 2018). Chaque tronçon de rue se voit attribuer un identifiant stable (ce qui n'est pas le cas d'OSM). Cette abstraction vise à permettre de plus facilement associer différentes représentations d'un même réseau routier. Les limitations de stationnement sont ensuite une représentation à l'aide d'une référence linéaire le long de la rue, en utilisant une spécification définie par l'OBNL (Eros et al., 2025). Fondamentalement, le format de données est un GeoJSON avec un manifeste définissant des informations sur la provenance du fichier, des « linestring » représentant les segments de côtés de rue et un ensemble de propriétés définissant les restrictions de stationnement en vigueur sur un segment de rue. En plus du format de données, SharedStreets a développé un ensemble d'outils pour convertir le réseau routier (SharedStreets, 2024) et la signalisation (SharedStreets, 2020b) dans le format de CurbLR ainsi que des outils de visualisation (SharedStreets, 2021). Ce format ne permet pas de gérer les évènements, mais simplement de visualiser la réglementation.

Le fichier débute avec un manifeste qui précise des données administratives ainsi que la priorisation des réglementations si plusieurs se superposent. Ceci est fait à l'aide du champ « priorityHierarchy » qui est une liste de chaînes de caractères. Le reste du fichier est articulé comme un GeoJSON standard. Chaque segment de bord de rue est représenté par un élément. Chaque élément a une géométrie de type polyligne représentant le bord de rue et une réglementation associée. Les règlements sont composés de quatre propriétés : une règle, une classe d'usager, des périodes de validité et une méthode de paiement. La figure 2.7 représente schématiquement le format de données spécifié par CurbLR. Un OBNL a créé des fichiers pour Montréal et Québec (Fabrique des Mobilités, 2021, 2022a). De plus l'Institute of

Transportation Engineers (ITE) a développé une suite d'outils pour faciliter la valorisation de ce format dans la suite de logiciels ArcGIS (ITE, 2021).

2.5.2 CDS

CDS est une API qui a été créée par un OBNL constitué de plusieurs municipalités aux États-Unis (Open Mobility Foundation, 2022). Comme CurbLR, CDS est focalisé exclusivement sur le stationnement sur rue. Cependant, CDS ajoute un contexte plus formel pour les restrictions de stationnement et la hiérarchie de ses restrictions. De plus, l'API inclut les évènements sur les places de stationnement, permettant ainsi de donner un portrait de l'offre et de la demande sur un territoire donné et de créer une hiérarchie de zones facilitant potentiellement la compréhension ou l'agrégation (contrairement à CurbLR qui ne fonctionne qu'en fonction de bords de rue). Il inclut des places individuelles et non seulement des zones. L'API est aussi formulé de manière à pouvoir agréger des statistiques telles que le taux d'occupation, le taux de roulement et le temps d'occupation moyen. La section suivante donnera un aperçu du modèle de données et les fonctions disponibles à l'utilisateur.

La figure 2.8 donne un aperçu des domaines de données traités par l'API.

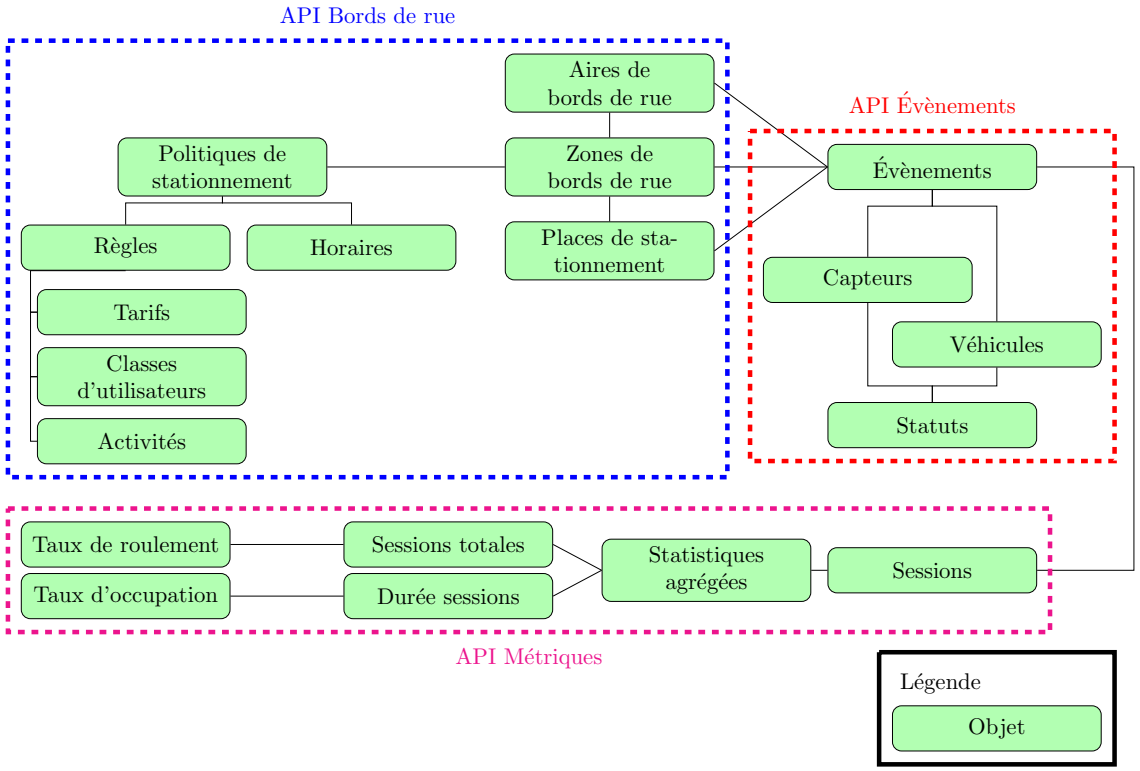


FIGURE 2.8 Survol des domaines de données de CDS

Le premier domaine de données représente les places de stationnement et est similaire au modèle de données de CurbLR. Cependant, le modèle permet de représenter les places de stationnement et des zones qui regroupent des segments de bords de rue par des caractéristiques ou des zones d'intérêt ou administratives. La figure 2.10 montre le modèle de données pour les BDR (Open Mobility Foundation, 2024b). Cependant, contrairement à CurbLR, le système utilise plus de polygones pour représenter les bords de rue plutôt que de segments linéaires. Bien que le modèle de zone de rue permet l'utilisation de référencement linéaire, la géométrie obligatoire est polygonale. Il permet aussi la création d'aires de stationnement pour agréger plusieurs zones (on peut penser à des limites administratives ou des zones de permis résidents). La zone de stationnement est définie comme une zone ne dépassant pas un pâté de maisons, où la réglementation est la même. Les zones et les places ne peuvent pas se superposer tandis que les aires le peuvent.

En plus du modèle de réglementation, l'API permet de représenter les transactions et les évènements sur les places de stationnement (Open Mobility Foundation, 2024a), créant un historique des transactions et des changements d'usage du BDR. Un évènement représente un action sur une place, une zone ou une heure. La figure 2.11 donne un aperçu des paramètres qui sont définis dans la spécification. En plus de l'objet évènement, un objet de statut existe qui permet de lister l'état de l'ensemble des capteurs qui permettent de surveiller l'état du bord de rue. La figure 2.9 montre la structure de l'objet de statut.

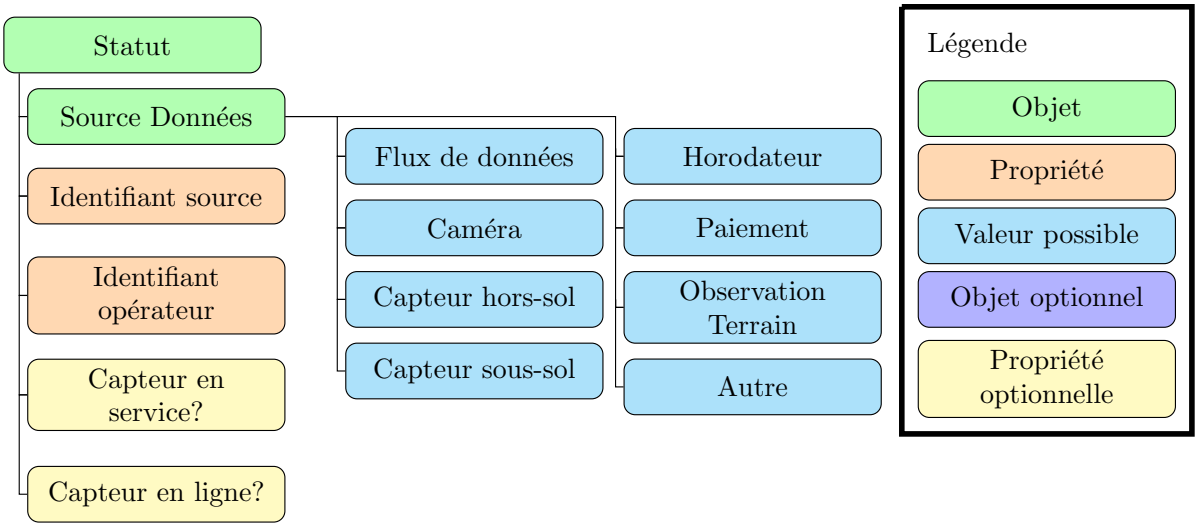


FIGURE 2.9 Propriétés de l'objet statut dans l'API métriques de CDS

L'API final est celui des métriques qui permet de données des statistiques agrégées par zone, aire ou place pour faciliter le portrait de l'occupation du bord de rue. Quatre statistiques principales sont disponibles dans l'API : le temps d'arrêt, le taux d'occupation, le taux

de roulement et le nombre de « sessions ». Les « sessions » sont une combinaison de deux évènements ou plus représentant une action. Deux types de « sessions » sont possibles : le stationnement et la présence dans une aire d'intérêt. Le temps d'arrêt est calculé à l'aide des propriétés d'heure de début et de fin d'une session. Les figures 2.13 et 2.12 montrent les modèles de données pour les « sessions » et les statistiques qui en découlent.

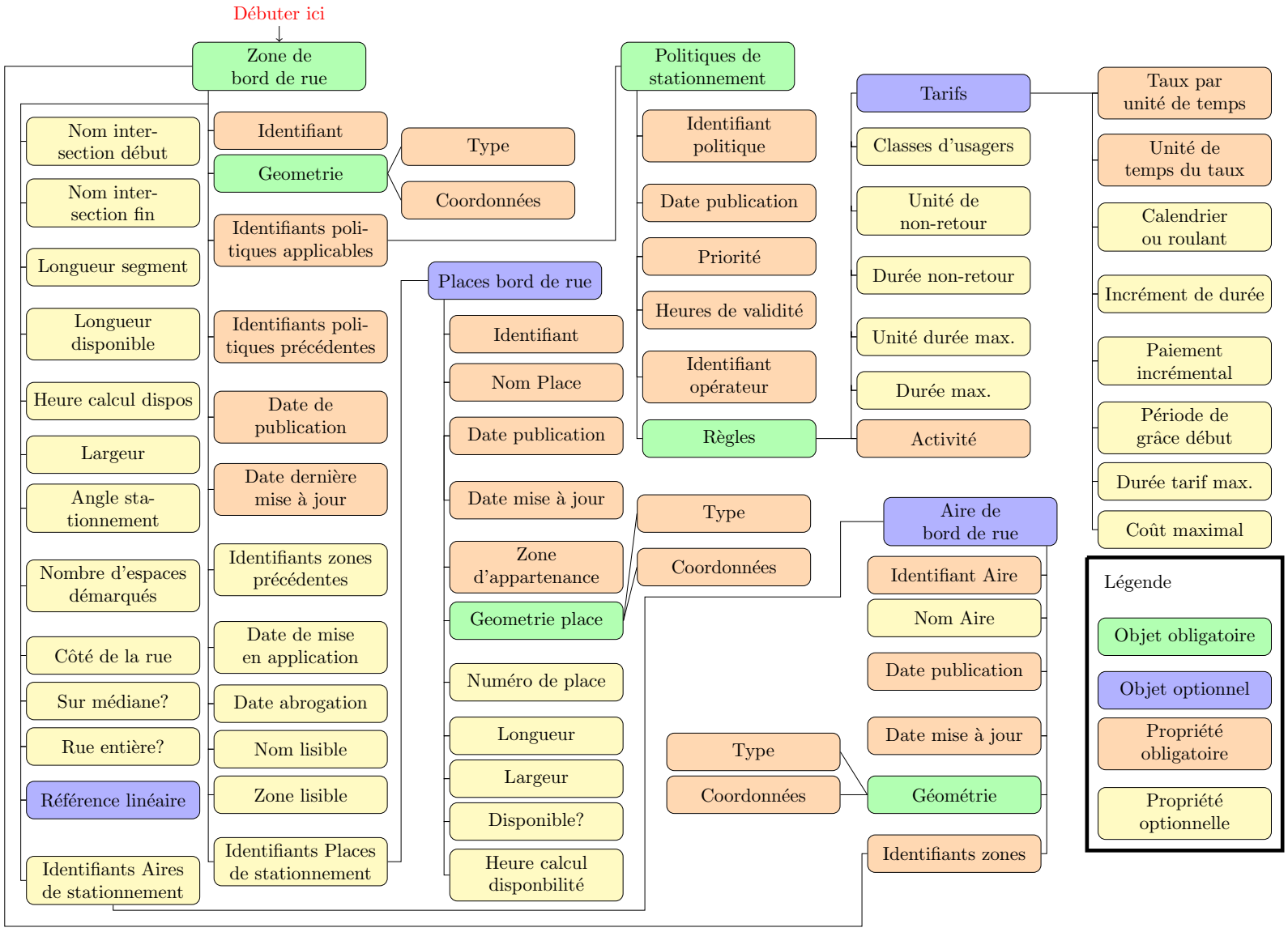


FIGURE 2.10 Modèles de données des bords de rue de CDS

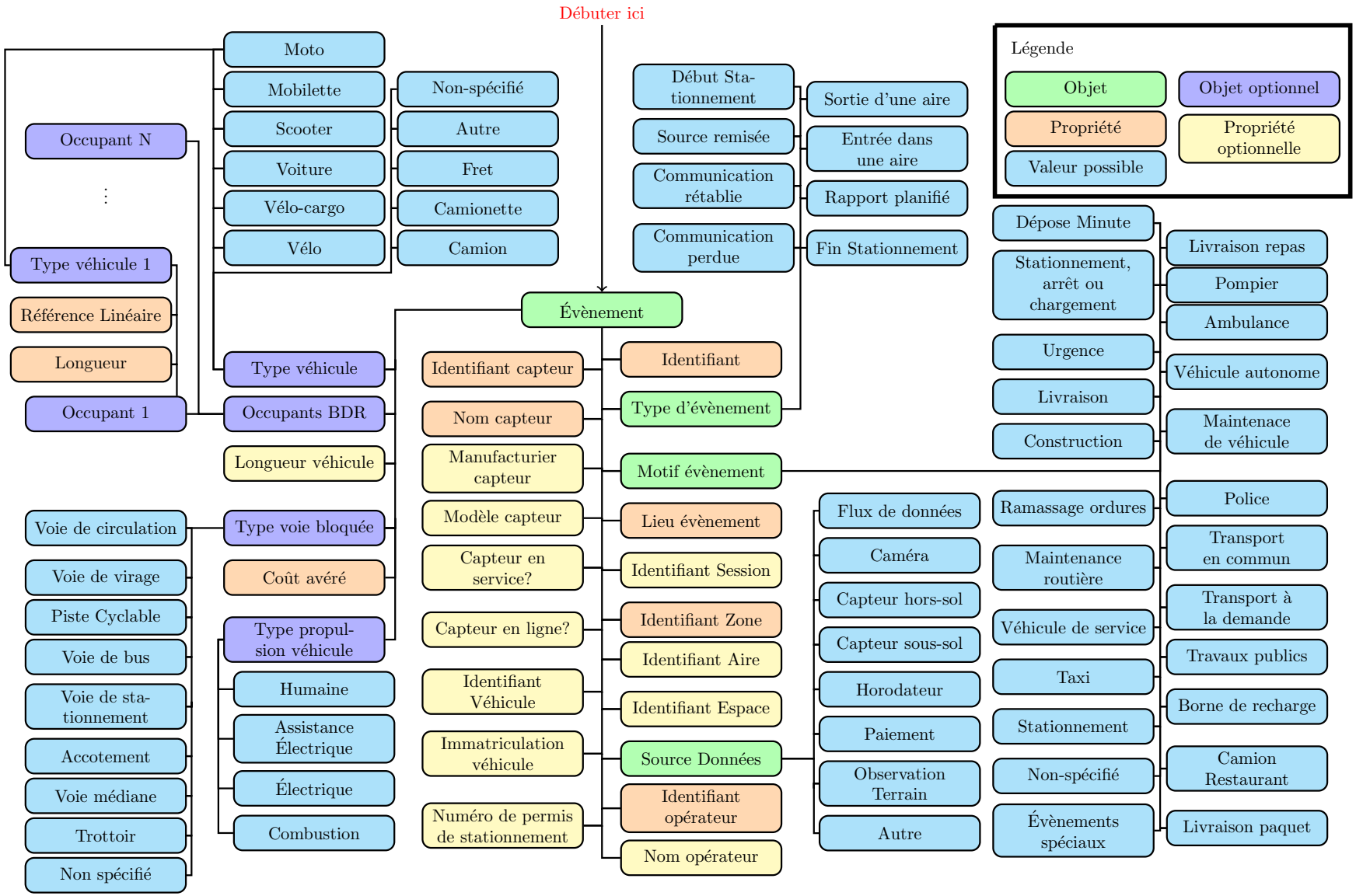


FIGURE 2.11 Modèle de données pour les évènements de CDS

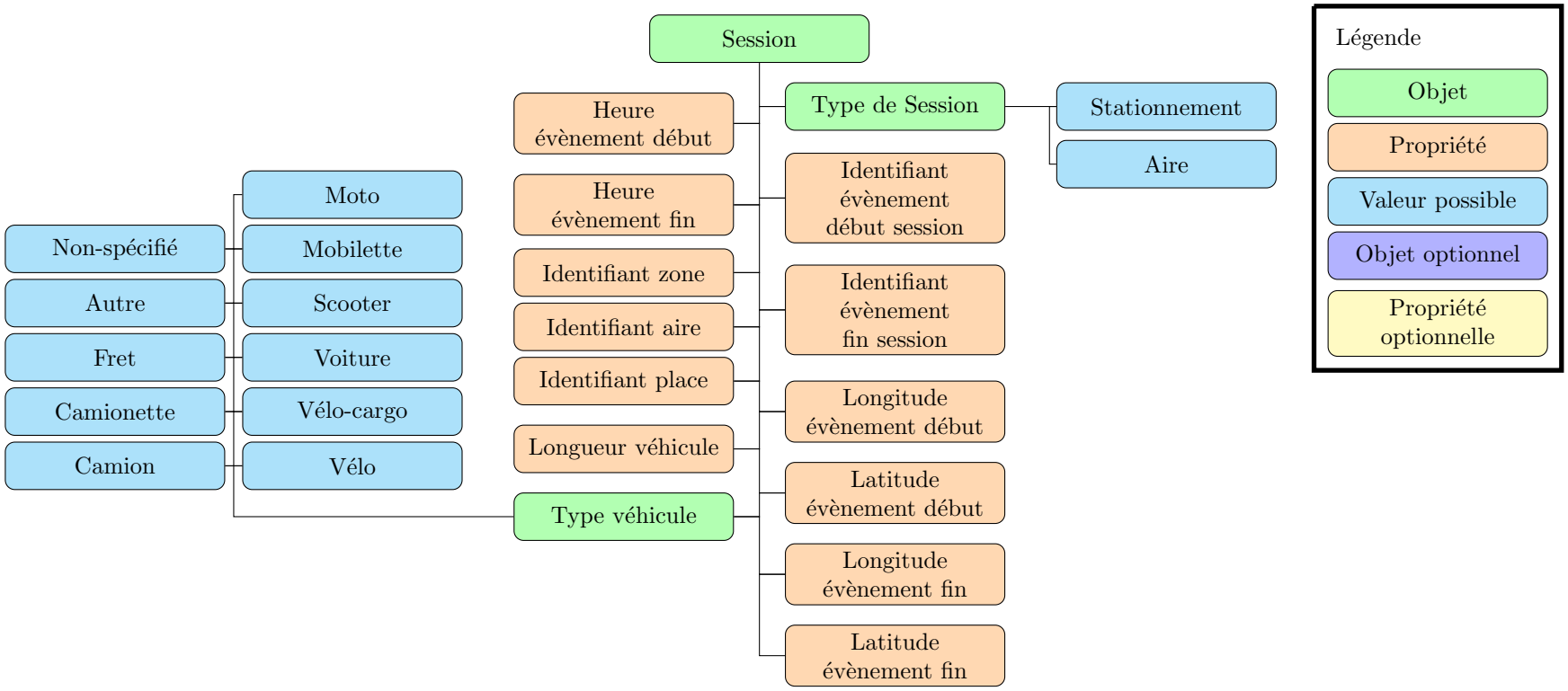


FIGURE 2.12 Modèle de données pour les sessions de l'API Métriques de CDS

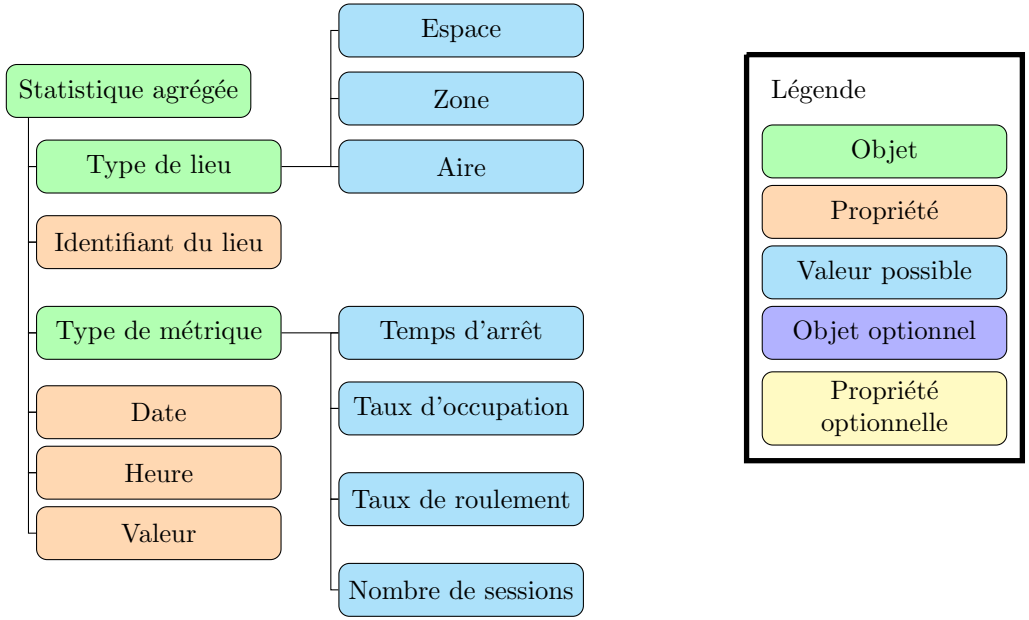


FIGURE 2.13 Modèle de données pour les statistiques issues de l'API Métriques de CDS

2.5.3 OpenStreetMap

OSM est un site web de cartographie(OSM Contributors, 2025a) en source ouverte qui permet de représenter la cartographique mondiale. Les données sont mises à jour par les utilisateurs avec un ensemble d'attributs définis sur un wiki (OSM Contributors, 2025c). Le site utilise trois éléments fondamentaux pour cartographier : des « nodes » représentant des points, des « ways » représentant des polylignes ou des polygones et des « relations » qui permettent de relier ces éléments. Les « ways » peuvent aussi représenter des polygones s'ils sont fermés et ont certains attributs.

Trois attributs, liés à des « ways », ont été recensés en relation avec le stationnement. Le premier est l'attribut « amenity » qui peut alors se voir attribuer la valeur « parking », voulant dire qu'il s'agit d'un lieu dédié au stationnement. Le deuxième est l'élément « highway » qui régit typiquement les voies de circulation. Cependant, certains attributs reliés au stationnement sur rue peuvent être utilisés pour décrire la réglementation du stationnement en bord de rue. Le troisième, moins commun, est lorsque « amenity » se voit attribuer la valeur « parking_space » qui permet de représenter une place de stationnement individuellement contrairement à la valeur « parking » qui représente souvent des aires de stationnement (OSM Contributors, 2025b). La figure 2.14 montre les attributs qui peuvent être définis pour les « ways » dont la propriété « amenity » s'est vue attribuer la valeur « parking ».

Des attributs peuvent aussi être attribués aux rues pour définir les dispositions de stationnement en utilisant les paramètres donnés à la figure 2.15. Plusieurs outils de visualisation ont été développés pour visualiser les paramètres de stationnement (OSM Contributors, 2023). Contrairement aux deux formats recensés plus haut, OSM permet de représenter le stationnement pour le stationnement sur rue et hors rue. Cependant, plusieurs limitations existent : la réglementation peut parfois être ambiguë, il n'existe pas de format hautement standardisé pour la tarification et l'absence de données sur l'utilisation du stationnement.

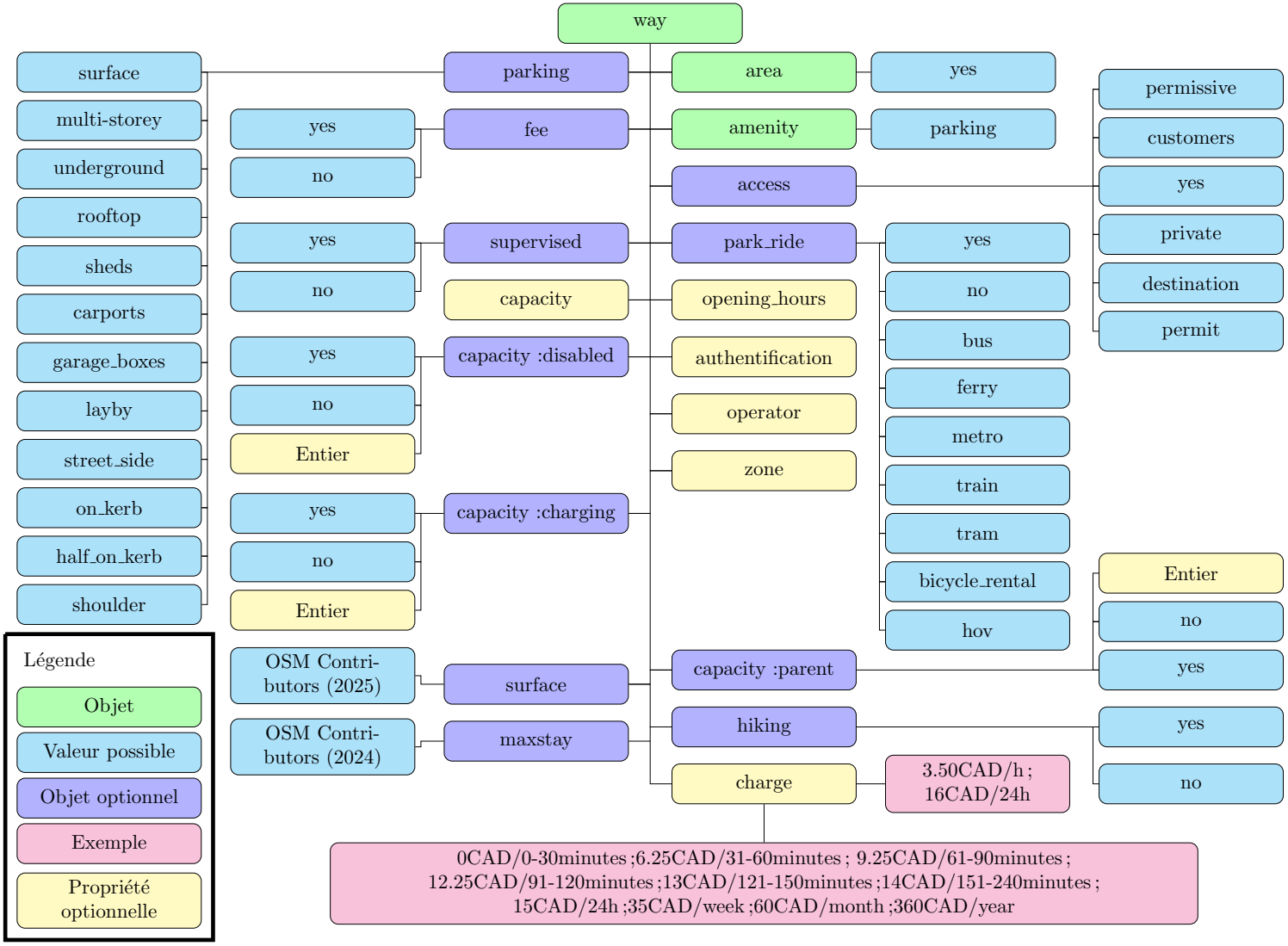


FIGURE 2.14 Modèle de données pour un « way » ayant la propriété « amenity=parking » (OSM Contributors, 2025b)

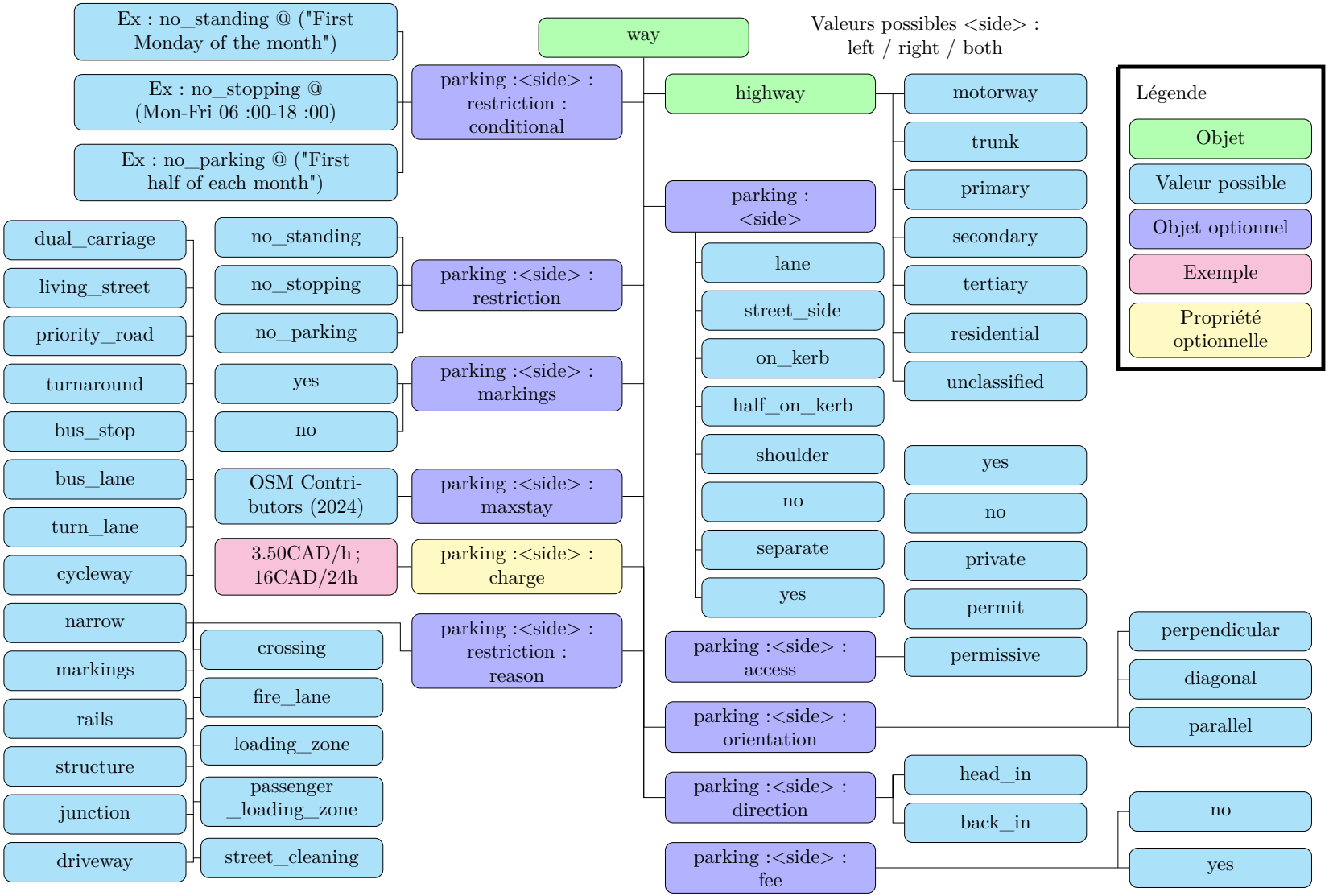


FIGURE 2.15 Modèle de données OSM pour le stationnement BDR pour un élément « highway » (OSM Contributors, 2025d)

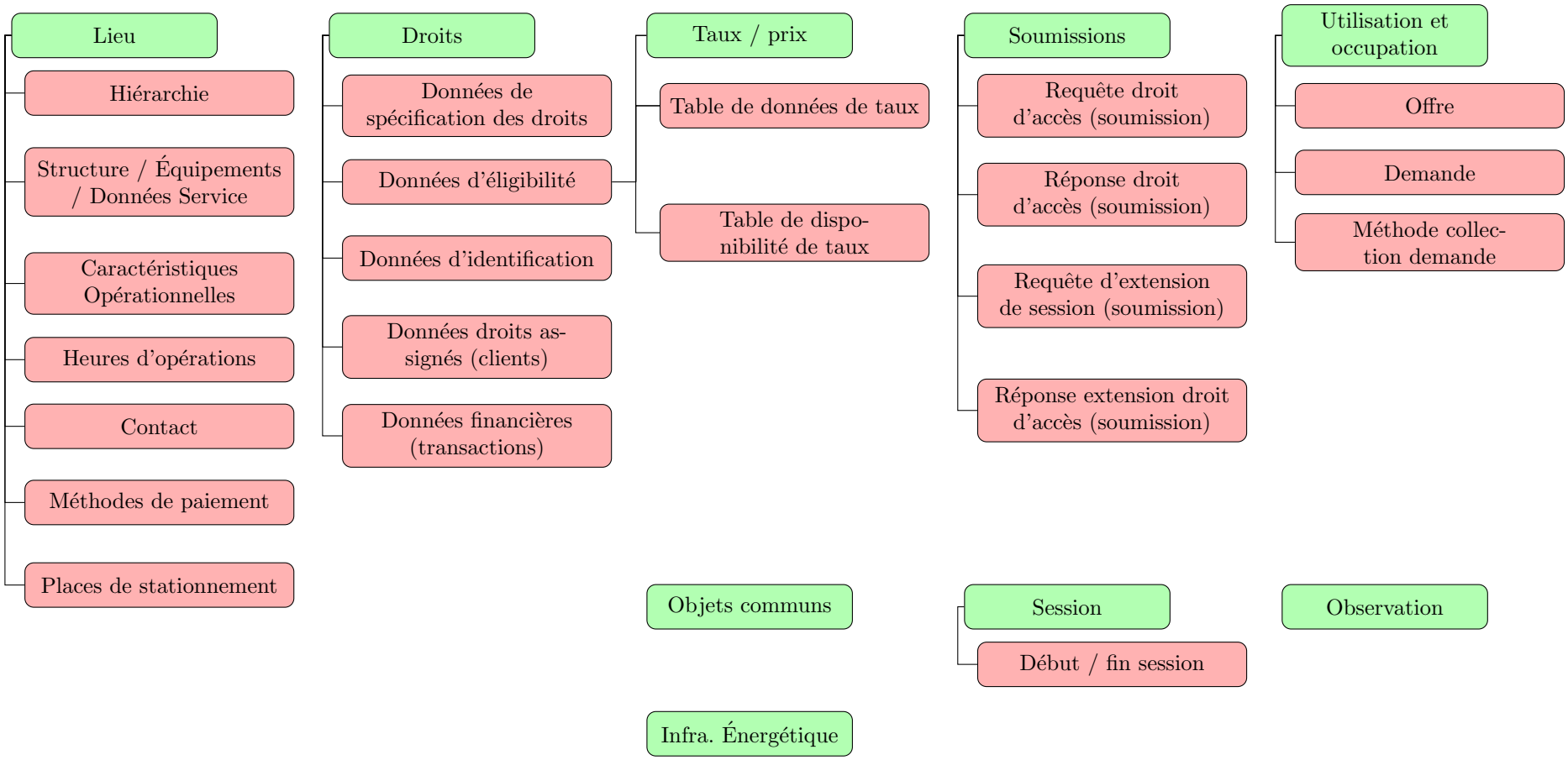
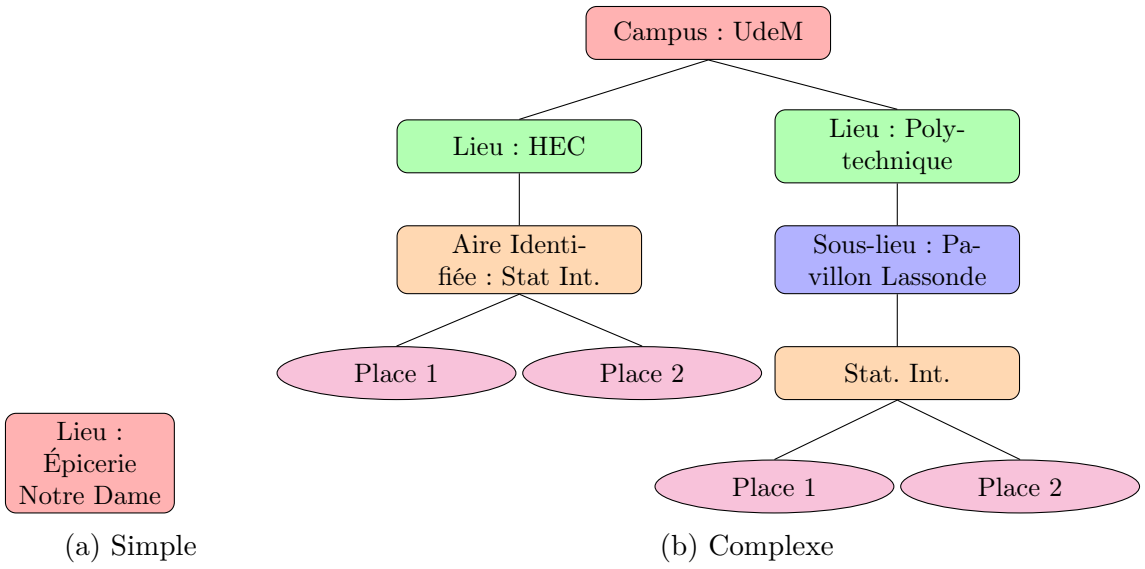


FIGURE 2.16 Domaines de données d'ISO 5206 (reproduit de Organisation internationale de normalisation (2023))

2.5.4 ISO5206-1 : Systèmes intelligents de transport - Stationnement - Partie 1 : Modèle de données de base

L'Organisation Intenrationale de Normalisation (ISO) a récemment adopté une norme de modèle de données pour représenter le stationnement (Organisation internationale de normalisation, 2023). Ce format de données a émergé à partir d'un effort européen de mettre en place un format de données cohérent pour améliorer l'interopérabilité entre les fournisseurs et répondre aux besoins de propriétaires de stationnement privé(Alliance for Parking Data Standards, 2017a, 2017b). L'alliance a d'ailleurs développé un API pour permettre de partager les informations associées au stationnement(Alliance for Parking Data Standards, 2020). L'API inclut un ensemble de tables, d'énumérations et de structures de données qui permettent de représenter des données de stationnement. La figure 2.16 donne un aperçu des différents domaines de données.



(a) Simple (b) Complexe

FIGURE 2.17 Illustration de deux hiérarchies de lieux différentes selon ISO5206

Le domaine « Lieu » représente la structure spatiale du stationnement sous forme d'un arbre qui peut avoir un nombre infini de branches. Chaque branche peut se voir attribuer une géométrie de type point, Ligne ou Aire. La figure 2.17 montre deux architectures variant du très simple au très compliqué. La norme admet 4 sous-types de lieux : un campus, un lieu, un sous-lieu, une aire identifiée et un espace de stationnement. Le campus permet de rejoindre des endroits institutionnels complexes (universités, aéroports), un lieu peut être très simple ou agir comme parent pour des sous-lieux qui sont créés pour aider le gestionnaire à

représenter l'organisation administrative ou spatiale du lieu. Une aire identifiée est un endroit avec une fonctionnalité ou des propriétés communes. Quatre spécialisations existent pour les aires identifiées : accès piéton, accès véhiculaire, aire spécifique ou service supplémentaire. Chacun de ses types peut être associé à une géométrie. Si les lieux et sous-lieux existent, chaque branche doit se terminer par une aire identifiée. Les espaces précis de stationnements doivent exister sous une aire identifiée, mais ne sont pas nécessaires à l'implémentation. Chaque lieu peut se voir affecter une adresse indépendamment des autres éléments qui y sont reliés. Chaque lieu ou aire identifiée peut être associé à un horaire, et des dimensions d'accès maximum pour les véhicules (restrictions de poids, hauteurs). Les accès piétons peuvent spécifier leurs propres heures d'opération.

Les composantes communes contiennent des informations qui peuvent être appliquées à de multiples endroits dans la hiérarchie comme les couleurs, l'automatisation du parc et de potentielles images communes. Les méthodes de paiement spécifient les modes de paiement acceptés (cartes, argent comptant, etc.) et les modalités de paiement (à la sortie, à l'entrée, prépaiement) et le mode de fonctionnement du lieu (par plaque, par espace, billettique, application numérique, etc.). Le domaine de données d'occupation permet de représenter l'offre et la demande. L'offre est représentée comme un entier sur une plage de temps tandis que la demande est représentée à intervalles réguliers. Un taux d'occupation est aussi prévu. L'occupation peut être énumérée pour chaque place dans le stationnement au besoin.

Le domaine de données « Taux / Prix » permet de représenter des combinaisons de modalités de tarification. L'éligibilité est tout d'abord définie. Cette dernière est typiquement appliquée à une spécification de droit. Celle-ci inclut un nom, une description, si cette éligibilité est payante et si elle peut être combinée avec d'autres. Des limites peuvent s'appliquer sur les véhicules (taille, poids, etc.) ou les personnes (membres, résidents, clients, etc.). L'éligibilité peut être limitée dans le temps ou liée à une autre éligibilité (c.-à-d. si la personne s'est stationnée dans la zone 1, elle peut se stationner dans la zone 2). Les taux sont définis sur trois tables : la table de taux, la table de collection de lignes de taux et la table de ligne de taux. La table de taux contient les informations administratives (qui administre le taux, la disponibilité ?) et une période de validité y est associée. La collection de lignes de taux permet de spécifier des durées ou des prix minimaux et maximaux pour une structure de tarification. La table de ligne de taux permet de spécifier comment le coût est facturé, quel taux de taxe s'applique. Par exemple, si le prix est échelonné selon la durée, cette structure sera définie dans une collection de lignes et chaque ligne représentera un échelon. Quatre types de tarification sont supportés :

— Montant fixe par visite (10 dollars par visite)

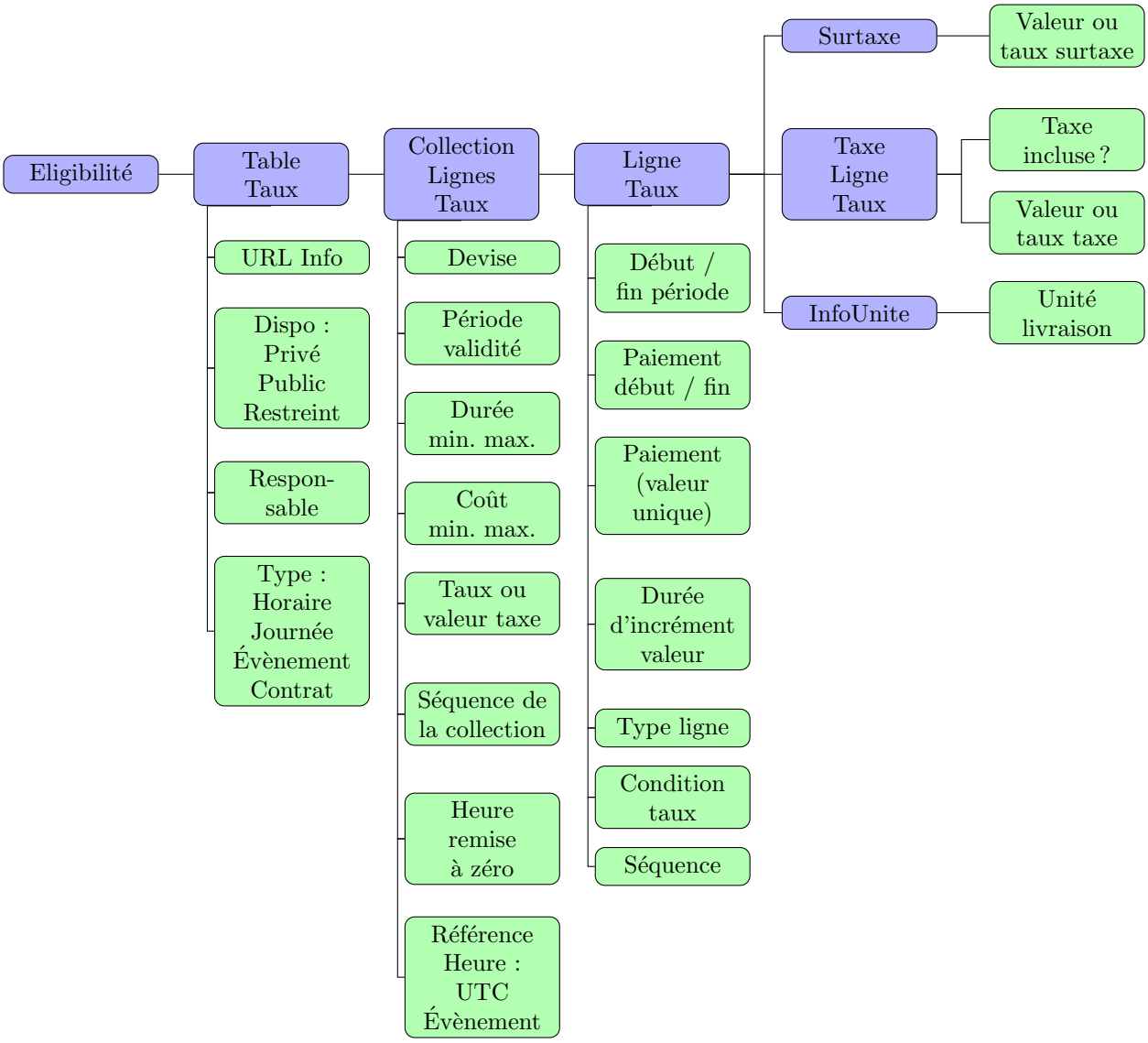


FIGURE 2.18 Représentation schématique du domaine de données des taux dans ISO5206

— Montant fixe par échelon de durée (2$ par heure, incrémenté à l'heure)
— Montant incrémental (0.05$ par minute)
— Par unité d'énergie

Des taux de taxation et des surcharges peuvent être ajoutés aux différentes lignes au besoin. Une matrice de tables de taux constitue l'ensemble des taux fournis. Des tables supplémentaires (Surtaxe, TaxeLigneTaux, InfoUnite) permettent de définir la taxation pour une ligne du taux, les surcharges peuvent représenter des coûts additionnels (frais à de tiers partis pour la réservation par exemple) tandis qu'InfoUnite représente la tarification de l'énergie si

la place a de l'infrastructure énergétique.

Le domaine de données de droits permet « de spécifier quelles activités sont permises pour certaines classes d'usagers et de véhicules à un lieu donné via un passe-droit à un prix donné si une table de taux s'applique ». La figure 2.19 montre synthétiquement les liens entre les données associées à la spécification de droit. On y retrouvera l'information sur la structure, sa tarification, l'éligibilité de la clientèle, la période de validité (c.-à-d. le mois, si c'est une passe mensuelle) et la période de disponibilité (si la passe mensuelle est seulement disponible sur un horaire fixé pour les travailleurs par exemple). Le passe-droit est un droit alloué à une personne qui permet l'accès et la disponibilité de droit fixe le nombre de passe-droits disponibles, en utilisation ou prévus d'être disponibles. Un calendrier peut être associé avec les disponibilités de droits au besoin. Un droit assigné signifie que le gestionnaire a accordé une spécification de droit à une personne ou entité définie (dite détentrice de droit). Au besoin, un usage planifié peut être assigné s'il s'agit d'une réservation et les informations sur les transactions financières sont associées au droit assigné.

Le modèle de données de « session » est utilisé pour représenter l'utilisation d'un droit assigné. Il est composé d'au moins un segment. Chaque segment est associé à une spécification de droit donnant accès à l'information tarifaire, le passe-droit, etc. Une « session » pourra avoir deux segments si elle est associée à deux spécifications de droit. Par exemple, si la tarification change pendant que le véhicule est stationné, chaque segment pourra représenter l'une des modalités de tarification. Chaque « session » aura un lieu, une date de début et de fin. La « session » peut être associée à une ou plusieurs observations.

Le modèle de données d'observations représente l'observation d'un véhicule ou d'une personne à un lieu. L'observation peut être visuelle ou électronique (par lecture de plaque, billetique, RFID, etc.). Chaque observation est liée à un passe-droit et a une heure et un lieu.

Le modèle de données de soumissions permet de gérer des requêtes d'information sur la disponibilité et le tarif d'une spécification de droit ou d'une « session » spécifique. Une requête de soumission de droit de spécification constitue la requête d'une entité éligible pour une période donnée. Un lieu peut être spécifié. Une réponse de soumission de droit de spécification donne les options disponibles qui satisfont les critères d'éligibilité. Chaque option peut être versionnée. Une requête de soumission d'extension de « session » étend une requête de soumission pour inclure une « session » active. Cette requête doit contenir une heure de requête, une nouvelle heure de fin de « session » et un passe-droit valide. Une réponse de soumission renvoie les options disponibles et les taux associés. D'autres modèles de données génériques sont aussi spécifiés comme les lieux, les organisations et les informations de contact. Il est important de noter que la norme ISO partage la majorité de son contenu avec la norme

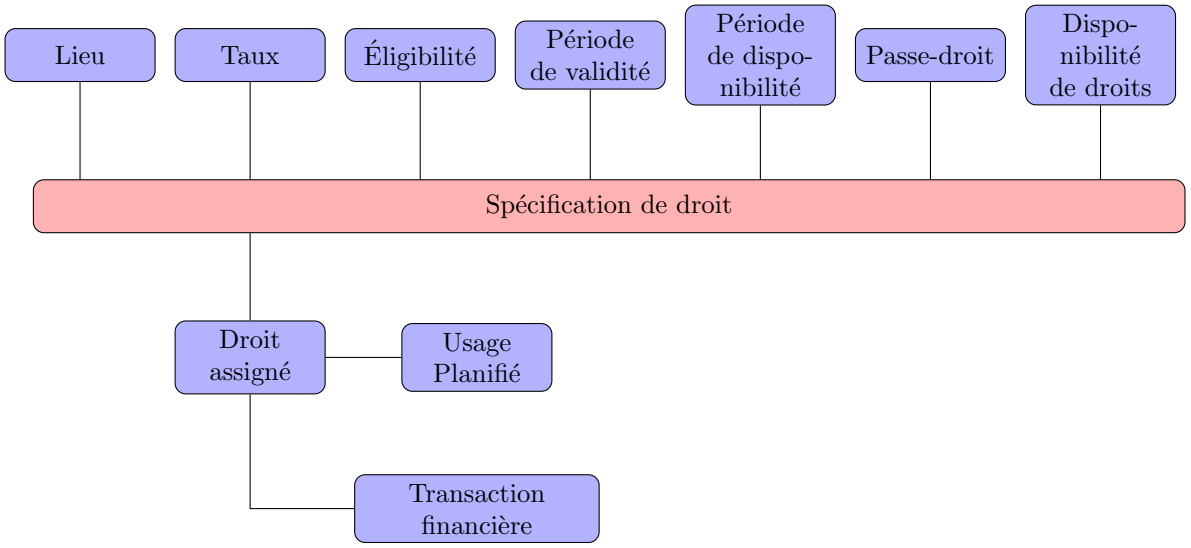


FIGURE 2.19 Schéma simplifié des données reliées au droit de stationnement (reproduit de (Organisation internationale de normalisation, 2023))

européenne (Deutsches Institut für Normung, 2022). D'autre part, le pan de tarification est repris dans la norme proposée de partage des données de circulation des municipalités en développement au Royaume-Uni.(Department for Transport, 2022, 2025)

2.6 Lacunes de recherche et opportunités

Les sections précédentes ont détaillé les coûts, les impacts environnementaux, les divers effets du stationnement sur la mobilité des personnes et la forme urbaine et les méthodes utilisées pour le dénombrer. L'offre de stationnement sur rue a jusqu'à présent reçu plus d'attention (Bourdeau, 2014 ; Eros et al., 2025 ; Open Mobility Foundation, 2024c) puisqu'il constitue la majorité l'offre de stationnement dans les lieux où il y a une forte demande et les plus hauts taux d'occupation (Aignel et al., 2015 ; Morency et al., 2017), et que c'est la responsabilité directe des gouvernements municipaux de gérer ce parc.

Cependant, plusieurs études montrent que le stationnement hors rue peut avoir une forte influence sur la mobilité des personnes même en présence d'alternatives viables (Currans et al., 2023 ; Guo, 2013b ; Weinberger et al., 2009). Malgré cela, il existe peu d'information détaillée sur l'offre de stationnement sur l'ensemble du territoire québécois. Bien qu'un dénombrement montréalais existe pour les stationnements non résidentiels (Aignel et al., 2015 ; Consortium CIMA+ - Daniel Arbour et associés, 1998), cette information est récoltée de manière manuelle et n'inclut pas le stationnement résidentiel. D'autre part, Chester et al. (2022) met à disposition un fichier Excel des règlements qui intègre un format de données(R. Li, 2022) intégrant les unités, il n'intègre pas toutes les variations constatées pour l'étude de cas et la variation temporelle des règlements n'est pas incluse. Même si certaines études ont utilisé les minimums de stationnements pour déduire une capacité de stationnement (Chester et al., 2015, 2022 ; Hoehne et al., 2019), les trois articles montrent des niveaux de complexité différents et ne sont pas explicites sur comment la variation temporelle des règlements est intégrée. D'autre part, bien que des efforts aient été mis en place pour numériser d'autres parties de la réglementation d'urbanisme (Xu et al., 2023), la compilation d'information sur la réglementation de stationnement se résume actuellement à l'abrogation des minimums de stationnement (Bronin et al., 2023 ; Parking Reform Network, 2025). L'absence de données sur ces règlements rend difficiles la comparaison de différents régimes réglementaires et l'illustration des coûts d'opportunités et des potentielles incohérences de ces politiques.

La mesure de phénomène et de quantités est centrale à la démarche scientifique, au génie et à la gestion en général (Dolence, 2015 ; Kelvin, 1891 ; Taylor, 1911). Lord Kelvin le statuait comme suit :

> [...] Une première étape essentielle dans l'apprentissage de tout sujet est de trouver des mécanismes de calcul numérique et des méthodes pratiques de mesure d'une quantité reliée au sujet. Je dis souvent que quand on mesure ce dont on parle et qu'on peut l'exprimer en chiffres, on en connaît quelque chose ; mais quand on ne peut le mesurer, quand on ne peut l'exprimer en chiffres, notre connaissance est

d'une nature maigre et insatisfaisante

Le stationnement a largement échappé à ce précepte. Cela est dû à la difficulté de la collecte des données reliées à la réglementation (Axelrod et al., 2023), mais aussi à la collecte de données fiables pour le parc existant (Héran & Ravalet, 2008 ; Morency et al., 2017). Plusieurs sources (Bronin et al., 2023 ; Currans et al., 2023 ; Morency et al., 2017 ; Xu et al., 2023) indiquent que la mise en place d'une plateforme de gestion et de communication d'information reliée à la réglementation, mais aussi à l'offre actuelle est un élément indispensable pour comprendre les usages et arbitrer leur partage dans l'espace urbain.

D'autre part, même s'il existe plusieurs formats pour représenter le stationnement(Eros et al., 2025 ; Organisation internationale de normalisation, 2023 ; OSM Contributors, 2025b), tous font l'hypothèse qu'il existe un estimateur précis pour la capacité de stationnement. Or plusieurs des méthodes impliquent le respect d'hypothèses ou un degré d'erreur. De plus, aucune ne prend en compte la possibilité de plusieurs estimateurs donnant des valeurs différentes pour un même lieu.

Finalement, bien qu'il existe plusieurs outils en source ouverte (Eros et al., 2025 ; Open Mobility Foundation, 2024c ; OSM Contributors, 2025a ; Seidel, 2021a) ou propriétaires (Arcadis, 2025 ; Populus, 2025) pour gérer des dénombrements de stationnement, aucun n'a été recensé pour faire le recensement du stationnement hors rue sans requérir la modélisation manuelle de chaque aire de stationnement. Finalement, aucun outil ne permet de rapidement comprendre l'offre combinée du stationnement hors rue et sur rue (sans avoir besoin d'onéreux processus manuels). Lorsqu'ils existent, ces outils sont souvent utilisés pour donner un portrait agrégé de l'offre plutôt que ce à quoi ferait face un voyageur.

Pour conclure, cette revue de littérature a révélé sept grandes lacunes dans les connaissances :

1. L'actuel dénombrement de stationnement hors rue pour la ville de Montréal requiert une collecte manuelle et ne représente que le stationnement non résidentiel. D'autre part, il n'existe à la connaissance de l'auteur pas d'autre juridiction québécoise ayant estimé la capacité de stationnement.
2. Le schéma de données de R. Li (2022) est spécifique au contexte de son étude (Chester et al., 2022) et n'intègre pas des éléments qui ont été constatés dans les règlements de la ville de Québec discutés au chapitre suivant
3. Bien que des schémas existent pour la représentation de la capacité de stationnement, aucun ne prend en compte la possibilité que différentes méthodes d'estimation puissent être utilisées. D'autre part, lorsque la méthode réglementaire a été utilisée, les résultats ont été agrégés par aire de diffusion.
4. La compilation des données sur le stationnement demeure onéreuse, manuelle et les

méthodes de calcul sont souvent difficiles à mettre en place. Une fois ces inventaires complétés, aucune infrastructure pour le partage et surtout la correction et la mise à jour des données n'est mise en place

5. Les études existantes montrent un lien significatif entre le stationnement et les comportements de mobilité désagrégés. Malgré cela, il n'existe à l'heure actuelle pas de modèle de causalité entre la provision de stationnements et le comportement des personnes comme cela a été le cas pour l'offre de transport en commun (Deschaintres et al., 2021)
6. Bien qu'il existe d'exemple d'atlas ouverts permettant de comparer la réglementation d'urbanisme entre différentes juridictions, l'automatisation de la création de tels atlas demeure onéreuse. Certains chercheurs ont émis des résultats montrant que les grands modèles de langage puissent accélérer leur création, le processus demeure manuel du fait de la subtilité des codes d'urbanisme. D'autre part, les atlas existants ne donnent que des indications sur la présence ou l'absence de requis de stationnement sans en spécifier l'intensité s'ils existent.
7. Plusieurs chercheurs ont développé des méthodes d'identification de la capacité de stationnement à l'aide de méthodes d'AP. Aucune étude n'a été recensée qui permette d'utiliser ces méthodes pour une région métropolitaine et d'en agréger des statistiques de manière ouverte. Les études recensées se limitent à lister la performance des méthodes par rapport aux annotations manuelles.

Les objectifs de recherche énumérés en introduction visent surtout à pallier les lacunes 1, 2, 3 et 4. Les autres points devront être poursuivis dans de futures recherches.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Portée du chapitre

Cette section portera sur la solution proposée pour répondre aux objectifs mis de l'avant en 1.2. Les sections 3.2 et 3.3 donneront un aperçu de la géopolitique de la ville de Québec depuis la Deuxième Guerre mondiale et les modalités des codes d'urbanisme depuis 1995. La section 3.4 présente les données disponibles pour créer l'estimation de la capacité. La section 3.5 présente la méthodologie utilisée pour calculer l'estimation basée sur les codes d'urbanisme. La section 3.6 discutera de la méthode utilisée pour évaluer le modèle de prédiction. La section 3.7 discutera de l'architecture de l'outil web développé dans le cadre du mémoire et la section 3.8 discutera des indicateurs utilisés pour l'analyse.

3.2 Géopolitique de la ville de Québec

Cette section va faire un historique de la géopolitique de la ville de Québec. Ce travail dégage de grandes époques où les frontières sont restées stables. On observe trois grandes séries de fusions (Ville de Québec, s. d.) :

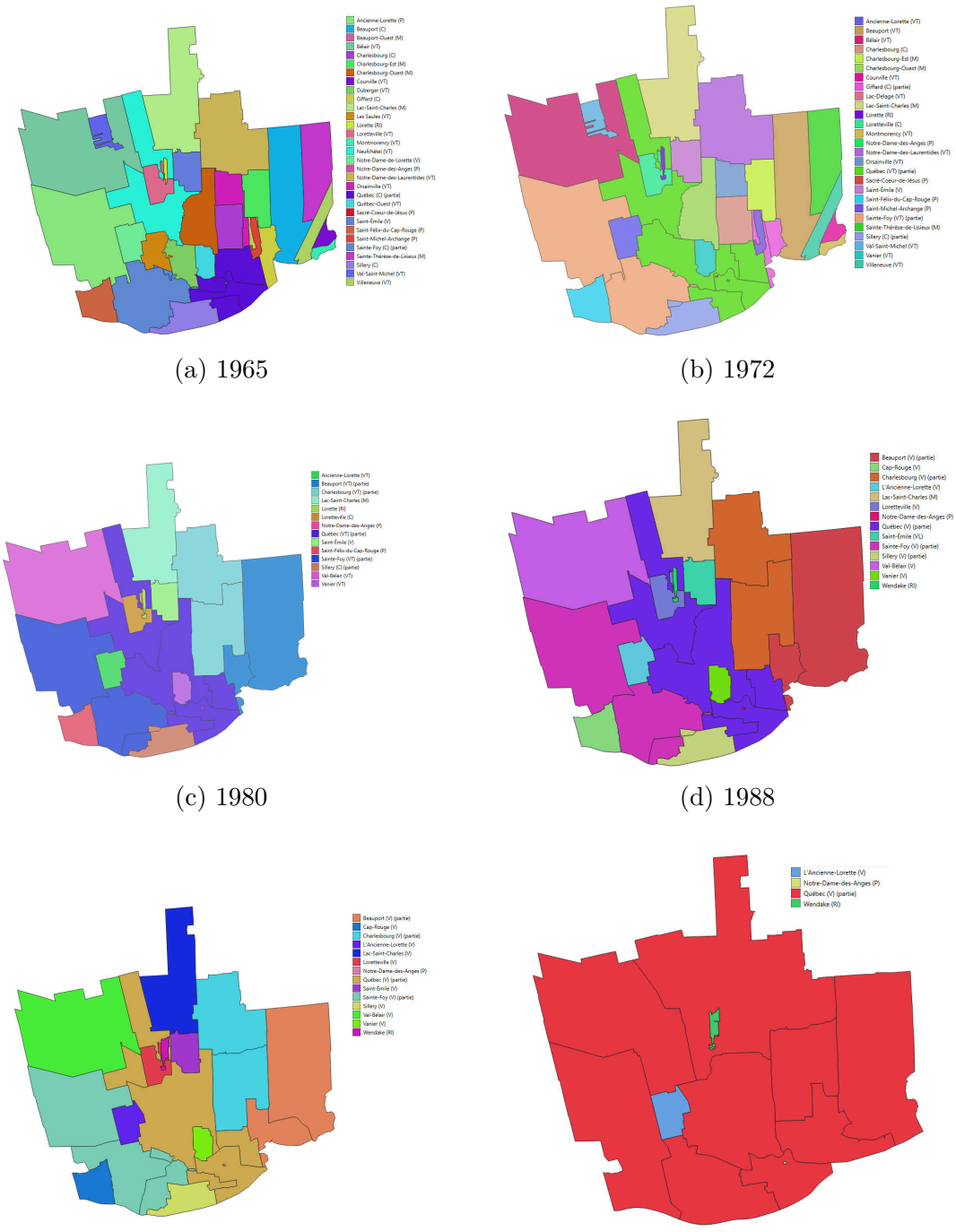
— '65 - '72 :
  - Duberger('70), Les Saules('70) et Neufchâtel ('71) rejoignent la ville de Québec
  - Ste-Foy et Ancienne Lorette fusionnent('70)
  - Beauport et Beauport-Ouest fusionnent('66)
  - Notre-Dame de Lorette devient L'Ancienne-Lorette('67)

— '72 - '76 :
  - Charlesbourg, Orsainville, Charlesbourg-Est et Notre-Dame des Laurentides fusionnent pour devenir Charlesbourg ('76)
  - Charlesbourg-Ouest est annexé par Québec('76)
  - Giffard, Beauport, Courville, Villeneuve et Montmorency fusionnent('76) pour devenir Beauport
  - Val-Belair et Val-Saint-Michel fusionnent et deviennent Val-Belair('73)

— 2002 : Fusions aux limites actuelles incluant Saint-Augustin et L'Ancienne-Lorette

— 2006 : Séparation St-Augustin de Desmaures et L'Ancienne-Lorette

La figure 3.1 montre l'évolution des municipalités, et la figure 3.2 montre les zones issues des codes d'urbanisme avec des règlements différents.



(a) 1965

(b) 1972

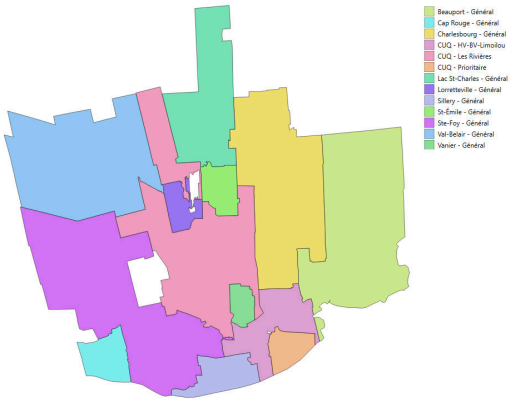
(c) 1980

(d) 1988

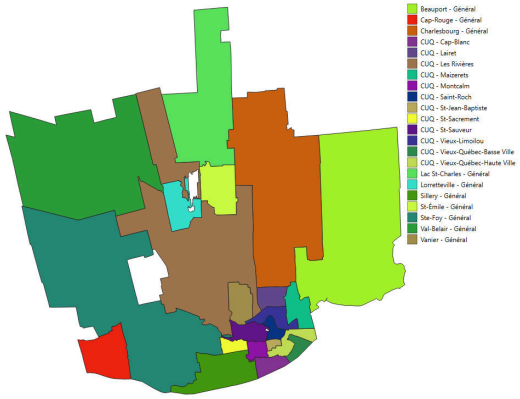
(e) 2001

(f) 2011

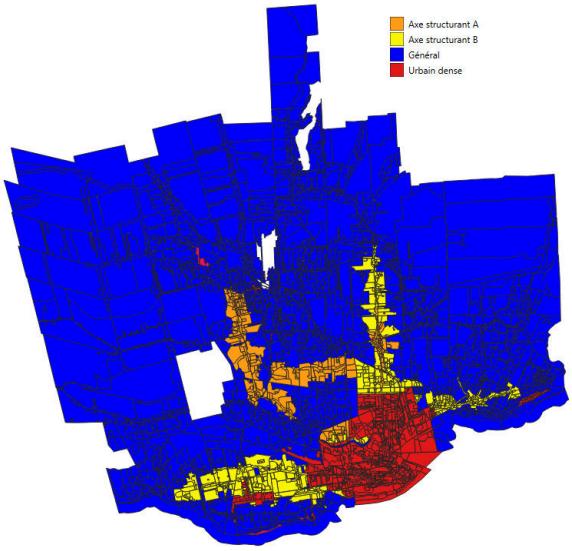
FIGURE 3.1 Séparation géopolitique du territoire de l'actuelle Ville de Québec (Élections Québec, 2021)



(a) 1995-1996



(b) 1997-2009



(c) 2010-présent

FIGURE 3.2 Secteurs ayant des minimums de stationnement différents (Ville de Québec, 1995, 2024f, 2024g)

3.3 Politiques de stationnement de la ville de Québec

La ville de Québec vient d'abroger ses requis pour l'habitation pour les zones en milieu dense ou le long des axes de transport en commun (Ville de Québec, 2024e).

En plus de l'hétérogénéité spatiale qui est décrite à la section 3.2, on constate aussi une hétérogénéité au niveau des catégories utilisées pour les requis de stationnement. Ceci est d'autant plus ardu que les catégories utilisées dans les minimums de stationnement n'ont pas nécessairement d'équivalents directs dans le CUBF utilisé dans le rôle foncier du Québec (Gouvernement du Québec, 2024a, Annexe 2C.1). Le tableau 3.1 et la figure 3.3 résument la présence d'un requis de stationnement explicité ou inféré pour un code CUBF donné (Ville de Québec, 1995, 2024e). Les codes d'urbanisme des municipalités avant harmonisation sont issus d'un résumé fourni par la ville(Ville de Québec, 2008a, 2008b). Cette synthèse est nécessairement sujette à interprétation : les catégories dans le code d'urbanisme ne sont pas constantes entre les codes avec différents niveaux de superposition ou catégorisation par municipalité, rendant une synthèse difficile. La synthèse est recalée sur les codes CUBF pour la simple raison que cette donnée sera exploitée pour choisir la réglementation à appliquer pour inférer une capacité de stationnement requise. Les données post-fusion sont issues de l'historique des règlements disponibles en ligne pour la ville de Québec (Ville de Québec, 1995, 2009). Les altérations du code (Ville de Québec, 2016, 2017, 2018a, 2018b, 2019, 2022, 2023a, 2023b, 2024e) depuis l'harmonisation en 2009 ont toutes été modélisées.

TABLEAU 3.1 Présence de réglementation de stationnement selon le code CUBF

Categ	Juridiction	Code CUBF	VDQ (2009-présent)	VDQ (1995-2009)	Beauport	Cap-Rouge	Charlesbourg	Lac St-Charles	Loretteville	Sillery	Ste-Foy	St-Émile	Val-Belair	Vanier	Nombre de requis
Résidentiel	Logement	10XX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
	Logement subventionné	10XX	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	2
	Habitation collectives	15XX	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	8
	Maison de chambres	151X	✓	✓	/	/	/	/	✓	✗	✓	/	✓	✓	6
	Maison de retraite non autonomes	1541	/	✓	✓	✓	/	/	✓	✓	✓	/	/	✗	6
	Maison de retraite autonomes	1543	/	✓	✓	✓	/	/	✓	✓	✓	/	/	✗	6
Industriel / Infra.	Industriel général	2XXX 3XXX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
	Industrie haute technologie	355X 356X 357X	✓	/	/	/	/	/	/	/	✓	/	/	/	2
	Industrie mise en valeur et récupération	487X	✓	/	/	/	/	/	/	/	✓	/	/	/	2
	Entreposage	637X	✓	✓	/	/	/	/	✓	✓	/	✓	✓	✓	7
	Service de construction	66XX	/	/	/	/	/	/	✓	/	/	/	/	✓	2
	Centre et immeuble commercial	50XX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
	Vente en gros	51XX	/	✓	/	/	/	/	✓	/	/	/	✓	/	3

✓ = Requis présent, ✗ = Requis absent, / = Requis implicite à une définition plus générale

TABLEAU 3.1 Présence de réglementation de stationnement selon le code CUBF(suite)

Categ	Juridiction	Code CUBF	VDQ (2009-présent)	VDQ (1995-2009)	Beauport	Cap-Rouge	Charlesbourg	Lac St-Charles	Loretteville	Sillery	Ste-Foy	St-Émile	Val-Belair	Vanier	Nombre de requis
Commerces	Vente au détail construction et quincaillerie	52XX	/	/	/	✓	/	/	✓	✓	✓	/	✓	/	5
	Vente au détail marchandises	53XX	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0
	Vente au détail de l'alimentation	54XX	✓	✓	/	/	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10
	Vente au détail de véhicules et produits connexes	55XX	✓	/	/	/	/	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	8
	Station essence	553X	✓	✓	✓	/	/	/	✓	/	✓	✓	✓	✓	7
	Vente au détail de vêtements	56XX	/	/	/	/	/	/	✓	/	✓	/	/	/	2
	Vente au détail de mobilier	57XX	✓	✓	/	/	/	/	✓	/	/	/	/	/	3
	Vente au détail autre	59XX	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0
Restaurants et bars	Restaurant	581X	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	7
	Restaurant plein service	5811 5812 5815	/	✓	/	✓	/	/	/	/	/	/	/	/	2
	Restaurant service restreint / libre service	5811 5812	/	✓	/	✓	/	/	/	/	/	/	/	/	2
	Débit d'alcool	582X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	11

✓ = Requis présent, ✗ = Requis absent, / = Requis implicite à une définition plus générale

TABLEAU 3.1 Présence de réglementation de stationnement selon le code CUBF(suite)

Categ	Juridiction	Code CUBF	VDQ (2009-présent)	VDQ (1995-2009)	Beauport	Cap-Rouge	Charlesbourg	Lac St-Charles	Loretteville	Sillery	Ste-Foy	St-Émile	Val-Belair	Vanier	Nombre de requis
Hôtels	Établissement d'hébergement	583X	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10
	Hôtel	5831	/	✓	✓	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2
	Môtel	5832	/	✓	✓	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2
Services	Services	6XXX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	10
	Immeubles à bureaux	60XX	✓	✓	/	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	9
	Finance, assurance et services immobiliers	61XX	/	✓	/	/	/	/	✓	/	/	✓	/	✓	4
	Banque	611X	/	✓	/	✓	/	✓	✓	✓	✓	/	✓	/	7
	Service personnels	62XX	/	/	/	/	✓	/	/	/	✓	/	/	/	2
	Salon de beauté / coiffure	623X	/	✓	/	/	/	/	✓	/	/	/	/	✓	3
	Salon funéraire	624X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
	Services d'affaires	63XX	/	/	✓	/	/	/	✓	/	/	✓	/	✓	4
	Services de réparation	64XX	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0
	Service de réparation d'automobiles	641X	✓	✓	✓	✓	/	/	✓	/	✓	✓	✓	✓	9
	Service de réparation de mobiliers, d'équipements et de machines	642X	/	/	/	/	/	/	✓	/	/	/	/	/	1
	Service de réparation de véhicules légers	643X	✓	✓	✓	✓	/	/	✓	/	✓	✓	✓	✓	9

✓ = Requis présent, ✗ = Requis absent, / = Requis implicite à une définition plus générale

TABLEAU 3.1 Présence de réglementation de stationnement selon le code CUBF(suite)

Categ	Juridiction	Code CUBF	VDQ (2009-présent)	VDQ (1995-2009)	Beauport	Cap-Rouge	Charlesbourg	Lac St-Charles	Loretteville	Sillery	Ste-Foy	St-Émile	Val-Belair	Vanier	Nombre de requis
Services	Service de réparation et d'entretien de véhicules lourds	644X	✓	✓	✓	✓	/	/	✓	/	✓	✓	✓	✓	9
	Service professionnel	65XX	✓	/	✓	✓	/	/	/	/	/	/	/	/	0
	Service médical et de santé	651X	✓	✓	/	/	✓	✓	✓	✓	✓	/	✓	/	9
	Service d'hôpital	6513	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
	Sanatorium, maison de convalescence et de repos	6516	✓	✓	✓	/	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	11
	Service gouvernemental	67XX	/	/	/	/	/	/	✓	/	✓	✓	✓	✓	5
	Pompiers / Police	672X	✓	✓	/	/	/	/	/	✓	/	✓	/	/	4
	Service éducationnel	68XX	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	9
	Service de garderie	6541	✓	/	/	/	✓	/	✓	/	✓	/	✓	/	5
	École maternelle	6811	/	/	/	/	/	/	✓	/	✓	/	✓	✓	4
	École primaire	6812	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	/	✓	✓	11
	École secondaire / Polyvalente	6813 6822	✓	✓	✓	/	✓	✓	✓	✓	✓	/	✓	✓	10
	CÉGEP	6823	✓	✓	✓	/	/	✓	✓	/	✓	/	/	/	6
	Université	6821	✓	✓	✓	/	✓	✓	✓	/	✓	/	/	/	7

✓ = Requis présent, ✗ = Requis absent, / = Requis implicite à une définition plus générale

TABLEAU 3.1 Présence de réglementation de stationnement selon le code CUBF(suite)

Categ	Juridiction	Code CUBF	VDQ (2009-présent)	VDQ (1995-2009)	Beauport	Cap-Rouge	Charlesbourg	Lac St-Charles	Loretteville	Sillery	Ste-Foy	St-Émile	Val-Belair	Vanier	Nombre de requis
	Services religieux	691X	✓	/	✓	✓	/	✓	✓	✓	✓	/	✓	✓	9
Culture	Culture, récréation et loisirs	7XXX	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	8
	Activité culturelle (Musée, Biblio)	711X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	/	/	/	9
	Assemblée de loisirs (Théâtre, Cinéma)	721X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	/	✓	/	10
	Installation sportive (Stade, Hippodrome)	722X	✓	/	/	✗	/	/	✓	/	✓	/	/	/	3
	Centre de congrès	723X	/	✓	/	✗	/	/	✓	/	/	/	/	/	2
Récréation	Activités récréatives	74XX	✓	/	✓	✗	/	/	✓	/	✓	/	/	/	4
	Terrains de golf	7411 7412	✓	/	/	✗	/	/	✓	/	✓	✓	/	/	4
	Arena	7451	✓	✓	/	✗	/	/	✓	✓	/	✓	✓	/	6
	Parcs / Camps	75XX 76XX	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	5
N/A	Extraction de ressources / Agriculture	8XXX	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	3

✓= Requis présent, ✗ = Requis absent, / = Requis implicite à une définition plus générale

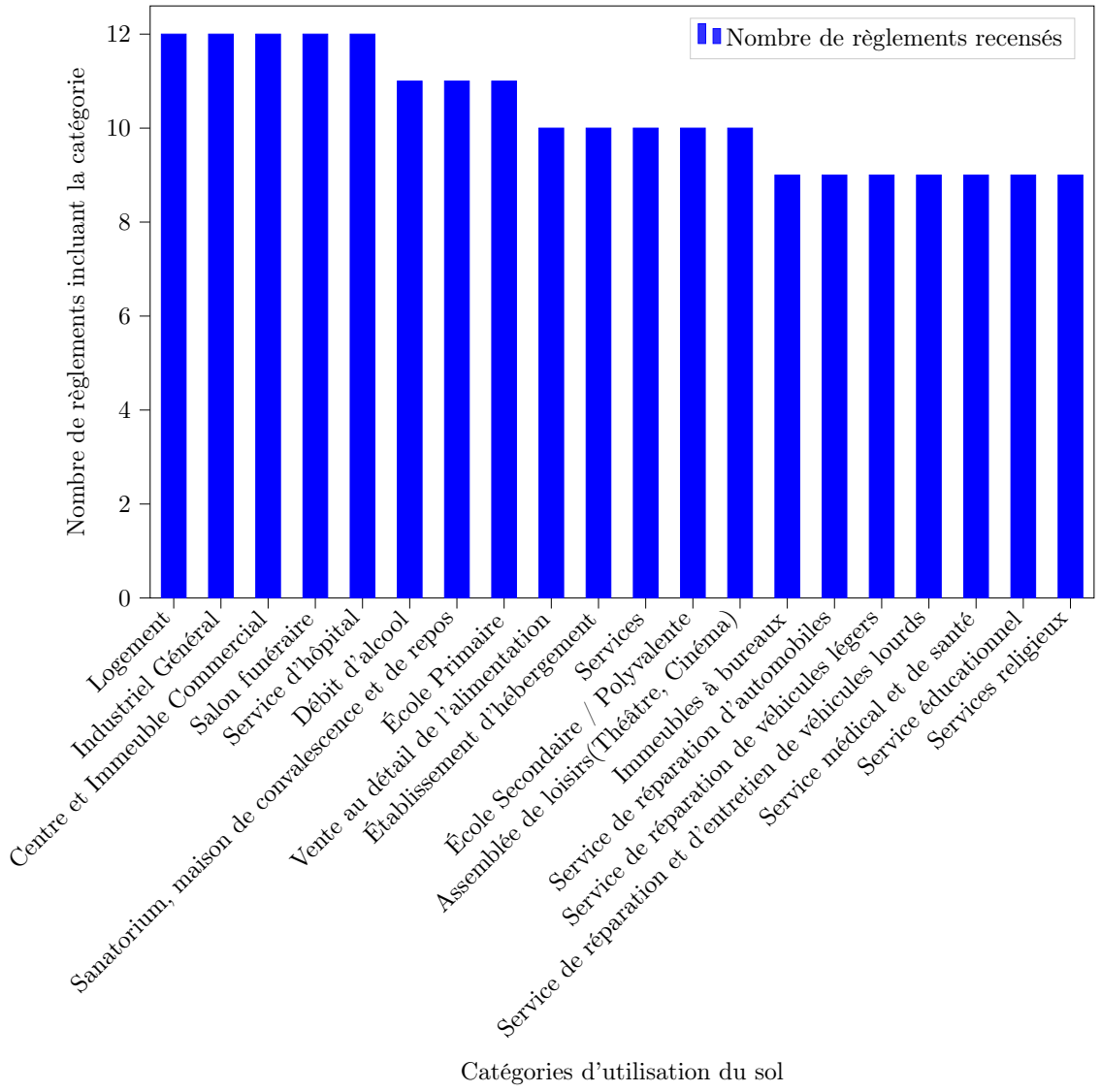


FIGURE 3.3 Utilisations du sol les plus récurrentes dans les règlements recensés

Les objets sur lesquels sont basés les codes d'urbanisme sont aussi hétérogènes. Bien que la plupart des requis soient basés sur une surface de plancher, certains sont exprimés en fonction d'autres objets considérés pertinents. D'autre part, deux municipalités n'utiliseront pas nécessairement la même unité pour formuler leur règlement. Le tableau 3.2 synthétise les objets considérés et les usages pour lesquels ils sont utilisés.

Tableau 3.2 Récapitulatif des objets considérés pour fixer les capacités de stationnement

Objets considérés	Usages pertinents
Superficie de plancher	Majoritaire
Superficie par usage (bureau, plateau TV)	Station télé
Superficie de terrain	parc, zoo
Logement	Logement
Chambres	Maison de chambres, hébergement touristique, établissement de santé
Lit	Établissement de santé, auberges de jeunesse, établissement carcéral
Baie de service	Commerces liés à l'automobile
Siège	Lieux de rassemblement, cinéma, théâtres, stades
Salle	Cabinet médical, établissement scolaire, salon funéraire
Personne	Débit d'alcool
Employé	Services et vente au détail et industries
Médecin	Établissement de santé
Étudiant	Établissement scolaire
Plateau sportif	Golf, tennis, quilles, billards
Poste de travail	Services personnels (salon de beauté)

3.4 Données de départ

3.4.1 Données géographiques (SIG)

Le tableau 3.3 résume les données disponibles Système d'Information Géographique (SIG) pour la ville de Québec et leur source. Les données cadastrales(Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023) représentent les limites des lots cadastraux sous forme de polygone. Un polygone existe par lot cadastral. Les données du rôle foncier, quant à elles, sont représentées sous forme ponctuelle, au centroïde de l'ensemble de lots associés à l'évaluation foncière. La difficulté réside dans le fait qu'il s'agisse d'une relation n à n. Plusieurs évaluations foncières peuvent être associés à un seul lot (par exemple dans le cas de copropriétés divisées où chaque unité a une entrée au rôle) et plusieurs lots peuvent être associés à une seule entrée du rôle foncier, souvent dans le cas de grandes propriétés agricoles.

La municipalité met à disposition des données sur les unités de voisinage (Ville de Québec, 2024g) et les spécifications du zonage sous forme d'un fichier Excel qui indique quelle norme de stationnement est applicable dans chaque zone ainsi que les usages autorisés ainsi que d'autres règlements d'urbanisme (marges, couverture de lot, etc.) (Ville de Québec, 2024f) et doit être interprété en fonction du code de zonage de la ville (Ville de Québec, 2009). Chaque unité de voisinage a un identifiant unique. Dans le cadre du mémoire, les unités de voisinage ayant la même norme de stationnement ont été fusionnées afin de réduire le nombre de zones.

Élections Québec met à disposition les limites géographiques de municipalités (Élections Québec, 2021) à plusieurs dates avec une description de la municipalité. Les noms de municipalités ont été légèrement édités pour rendre les données plus lisibles. Les limites administratives des quartiers pour certains anciens codes d'urbanismes ont dû être recréées manuellement à partir des municipalités précurseurs ou à partir des plans imprimés (Ville de Québec, 1995). Finalement, les quartiers listés par la ville de Québec ont été utilisés comme unité spatiale d'analyse dans le cadre du mémoire (Ville de Québec, 2024d).

La section 3.5.4 donne un aperçu des données du cadastre et du rôle. Les données des limites géographiques des municipalités et des unités de voisinage sont utilisées dans la section 3.5.7 et les données représentant les quartiers de la municipalité sont discutées dans la section 3.5.3.

Tableau 3.3 Géobases pour le territoire de la ville de Québec

Géobase	Type	Description	Source
vdq-zonage-grille.xlsx	Tableau	Usages autorisés et classification (urbain/structurant/général)	(Ville de Québec, 2024f)
vdq-zonagemunicipalzones	Polygones	Unités de voisinages selon le zonage municipal	(Ville de Québec, 2024g)
vdq_quartiers	Polygones	Séparation de la ville en quartiers	(Ville de Québec, 2024d)
Rôle foncier géobase	FGDB (Points + tables)	Données SIG du rôle foncier	(Gouvernement du Québec, 2024b)
Limites géographiques municipales	Polygones	Limites municipales du Québec en 1965, 1972, 1980, 1985, 1988, 1992, 2001, 2008	(Élections Québec, 2021)
Cadastre	Polygones	Limites de lots	(Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2023)

Les données foncières sont un des éléments principaux utilisés pour déterminer la capacité de stationnement. La principale information de cette donnée est reliée à la valeur du terrain, mais certaines informations physiques (superficie, date de construction, superficie d'étages) sont aussi disponibles pour la plupart des entrées. Les données ne sont pas nécessairement en lien 1-à-1 avec le cadastre requérant quelques manipulations et hypothèses pour associer les données du rôle au cadastre. Leurs attributs utiles dans le cadre de cette étude sont donnés dans le tableau 3.6. Un dictionnaire complet des données est mis à disposition par le gouvernement (Gouvernement du Québec, 2024b) et les données proviennent du site de données Québec (Gouvernement du Québec, 2022).

3.4.2 Enquête OD

L'enquête Origine-Destination est une enquête de transport descriptive caractérisant les habitudes de déplacement des Québécois. L'enquête est commandée par le Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD) ou l'Autorité Régionale de Transport Métropolitain (ARTM) dans la région de Montréal. Dans le cadre de ce mémoire, les données ont été obtenues auprès de la Chaire Mobilité pour la région de Québec pour permettre de calculer certains indicateurs reliés au nombre de voitures dans différentes zones selon l'heure de la journée (Morency & Trépanier, 2008). Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (2019) donne un aperçu de la stratégie d'échantillonnage et des principaux constats et Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (2017) donne les définitions des différents champs. Le fichier donne un relevé des déplacements de tous les membres des ménages sondés. Les résultats sont pondérés en se basant sur les données du recensement pour assurer la représentativité de l'échantillon. Les caractéristiques de ménages et des personnes doivent être pondérées de manière différente. Les données O-D sont principalement utilisées pour estimer le parc de véhicules et sont la base des profils d'accumulation de véhicules et des taux d'occupation. La section 3.8.5 donne les détails des données utilisées ainsi que leur structure dans la base de données.

3.4.3 Recensement

Les données du recensement sont récoltées par Statistique Canada pour donner un portrait de la population du Canada (Statistique Canada, 2021a) sur un ensemble de sujets comme le lieu de naissance, le lieu de résidence , le lieu et le type de travail, le niveau de scolarisation et les limitations physiques. Les données sont agrégées à différentes échelles spatiales. Dans le cadre de ce mémoire, les données de population ont été utilisées au niveau des aires de diffusion pour trouver la population des quartiers d'analyse. Les limites de la géographie

du recensement sont disponibles en ligne (Statistique Canada, 2021b) et les données ont été téléchargées à partir de CHASS (University of Toronto CHASS, 2024). Il est important de noter que ces données pourraient être obtenues directement du site web de Statistique Canada au besoin (Statistique Canada, 2022) si un utilisateur n'avait pas accès à CHASS. Les aires de diffusion représentent des zones contenant entre 0 et 5000 habitants dans la région de Québec. La structure des données est montrée à la section 3.8.5

3.5 Prédiction de la capacité de stationnement à partir des règlements d'urbanisme

Cette section va couvrir la structure de données et la méthodologie pour l'estimation de la capacité par la méthode des règlements. La section commence par justifier le niveau d'agrégation choisi pour l'estimation et la méthode choisie (sec. 3.5.1). Le schéma relationnel de données est par la suite présenté pour l'ensemble de la section (sec. 3.5.2) et le format de données utilisé pour les quartiers qui sont utilisés pour l'analyse agrégée des données (sec. 3.5.3). Ensuite, le chapitre rentre dans chaque détail de la structure de données en commençant par les données cadastrales et du rôle foncier (sec. 3.5.4) ainsi qu'une analyse descriptive de leur distribution et des données manquantes (sec. 3.5.5). La structure pour entreposer les estimations est présentée (sec. 3.5.6) avant d'introduire la représentation de l'historique géopolitique (sec. 3.5.7), la représentation des règlements (sec. 3.5.8) et leur association pour représenter la réglementation en vigueur sur un territoire (sec. 3.5.9).

Cette partie du mémoire se tourne ensuite vers les objets informatiques implémentés pour représenter les différentes quantités d'intérêt (sec. 3.5.10), l'introduction du logigramme du calcul de l'estimation de stationnement (sec. 3.5.11). Quatre parties du calcul sont ensuite détaillées en profondeur : la procédure de sélection des données foncières (sec. 3.5.12), la sélection des données du rôle géopolitiques et de réglementation (sec. 3.5.13), l'affectation des données du rôle foncier à ces dernières (sec. 3.5.14). La section se termine en détaillant la procédure de calcul des minimums de stationnement (sec. 3.5.14).

Dans les sections qui suivent, le mot tableau fait référence à un tableau de résultats dans le texte. Ils sont référencés à l'aide du numéro de tableau. Le mot table fait référence à une table dans la base de données. Ces dernières seront nommées et soulignées dans le texte.

3.5.1 Choix d'une unité spatiale et d'une méthode d'estimation

Dans un monde idéal, il serait possible d'avoir la localisation de chaque place de stationnement sur le territoire. Cela permettrait de déterminer des temps d'accès pour chaque place et d'affecter ce temps d'accès en fonction de l'achalandage du stationnement. Cette approche éviterait aussi des problèmes de microagrégation menant à de grands changements du nombre de places de stationnement accessibles si un lot en a beaucoup et est à la marge d'une zone d'intérêt. Malheureusement, en utilisant la méthode à partir du rôle foncier, ce niveau de détail n'est pas possible et l'échelle la plus petite possible est au niveau du lot cadastral.

En ce qui concerne la méthode choisie, il y en a deux. La première est que la littérature émet beaucoup de recommandations sur l'abrogation de minimums de stationnement ainsi que des

preuves supportant que ces derniers aient une influence. Cependant, dans la plupart des cas, le recensement des minimums et leur application sont parfois approximatifs. La mise à disposition des données foncières par le gouvernement du Québec donne une opportunité de tester l'hypothèse que les requis sont l'élément déterminant dans la construction de stationnement. En appliquant les règlements à un grand ensemble, les conditions sont mises en place pour vérifier que la réglementation est l'élément déterminant à la production de stationnement. La création d'un format de données pour entreposer ces minimums donne aussi le potentiel de prouver la nature arbitraire de ces règlements si assez de règlements sont numérisés. Finalement, en discussion avec les employés de la ville de Québec, il a été révélé qu'ils poursuivaient déjà une approche par AP. L'approche par les règlements est complémentaire ici particulièrement pour les quartiers centraux avec plus de stationnements en structure qui ne sont pas nécessairement visibles.

Pour conclure, la structure de données est implémentée pour permettre que plusieurs méthodes d'estimations cohabitent pour un même lot. À terme, l'inclusion de méthodes avec une plus forte base empirique permettrait de mieux comprendre les contextes où les règlements de stationnement imposent des contraintes aux promoteurs immobiliers.

3.5.2 Schéma relationnel de données

La figure 3.4 montre la structure de la base de données utilisée pour l'estimation de l'offre de stationnement. De manière simplifiée, les **règlements** sont réunis en **ensembles de règlements**. Ces ensembles de règlements sont associés à un **territoire**. Chaque territoire est associé à une **période** où les limites géographiques des municipalités sont restées stables.

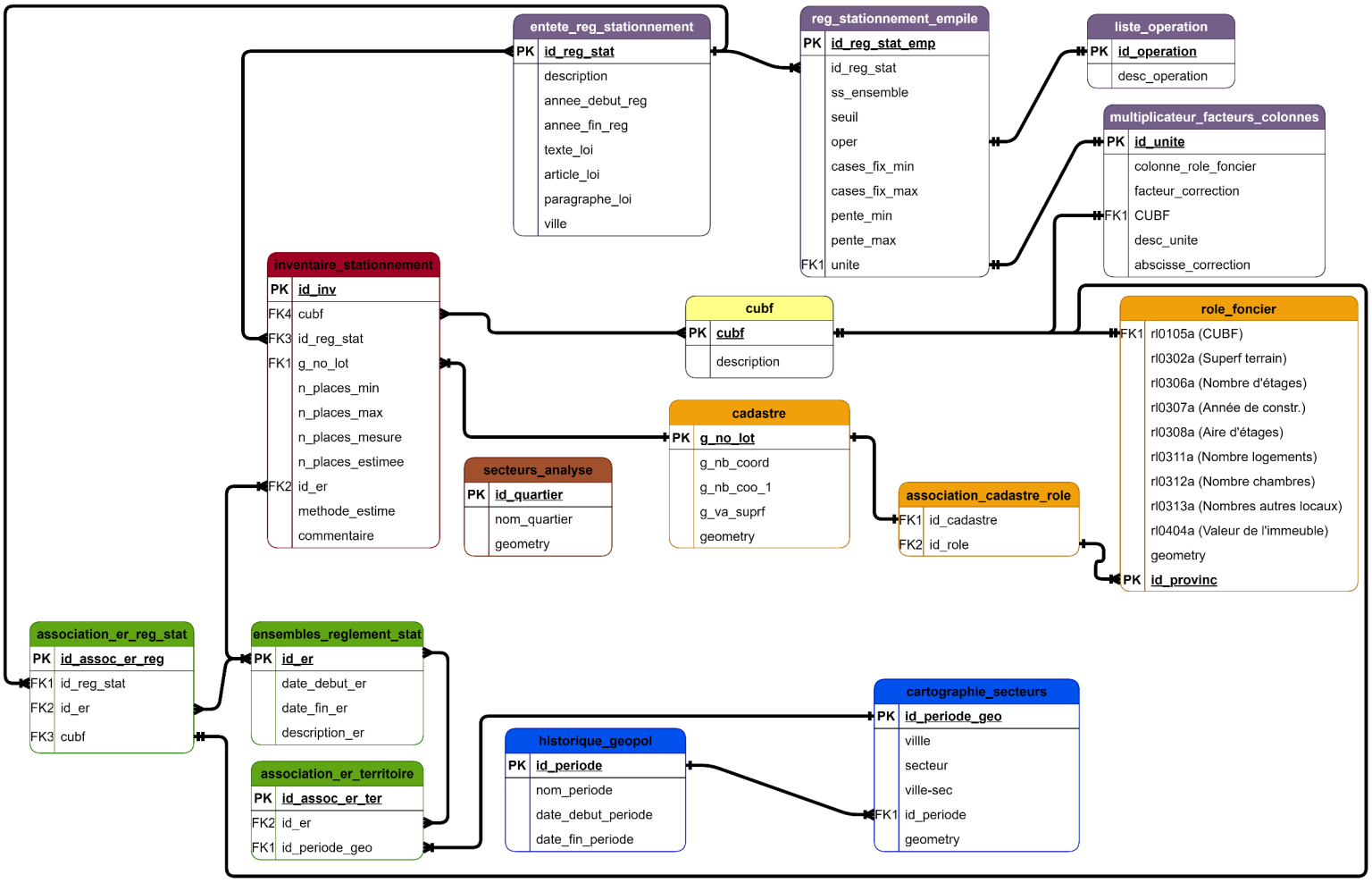


FIGURE 3.4 Diagramme entité-association de la partie de la base de données utilisée pour la prédiction

La base de données est implémentée dans PostgreSQL avec PostGIS pour pouvoir gérer les données spatiales du rôle foncier, du cadastre ainsi que de la division géopolitique du territoire.

3.5.3 Structure des données représentant les secteurs d'analyse

Les quartiers énumérés par la ville de Québec sont utilisés comme base de comparaison et pour diviser le territoire dans la table sec_analyse. Les colonnes de la table sont listées dans le tableau 3.4. Les acronymes listés au tableau 3.5 sont utilisés tout au long du mémoire pour réduire la taille des légendes et rendre les graphiques plus lisibles.

Tableau 3.4 Colonnes pour la table sec_analyse

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_quartier	Clé primaire	Entier	CP
nom_quartier	Nom du quartier	Texte	
acro	Acronyme du quartier	Texte	
superf_quartier	Superficie du quartier	Réel	
peri_quartier	Périmètre du quartier	Réel	
geometry	Géométrie des quartiers	Géométrie	

Tableau 3.5 Acronymes affectés aux quartiers

ID	Nom	Acronyme
1	Saint-Jean-Baptiste	SJBA
2	Cap-Rouge	CARO
3	Cité-Universitaire	CUNI
4	Vieux Québec - Cap Blanc - Colline Parlementaire	VQ-CP
5	Des Châtels	CHAT
6	Duberger-Les Saules	DU-LS
7	L'Aéroport	AERO
8	Lac-St-Charles	LSC
9	Lairet	LAIR
10	Vieux-Limoilou	VLIM
11	Loretteville	LRTV
12	Maizerets	MAIZ
13	Montcalm	MCLM

Tableau 3.5 Acronymes affectés aux quartiers (suite)

ID	Nom	Acronyme
14	Neufchatel Est - Lebourgneuf	NE-LB
15	Notre-Dame-des-Laurentides	NDL
16	Plateau	PLAT
17	Saint-Louis	STLO
18	Pointe-de-Sainte-Foy	PSFO
19	Orsainville	ORSA
20	Quartier 4-3	4-3
21	Jésuites	JESU
22	Quartier 4-5	4-5
23	Quartier 4-6	4-6
24	Sainte-Thérèse-de-Lisieux	STLI
25	Quartier 5-2	5-2
26	Chutes-Montmorency	CHMO
27	Vieux-Bourg	VIBO
28	Saint-Émile	STEM
29	Saint-Sacrament	SSAC
30	Saint-Roch	STRO
31	Saint-Sauveur	SSAU
32	Sillery	SILR
33	Val-Bélair	VBEL
34	Vanier	VANI
35	Vieux-Moulin	VIMO

La figure 3.5 montre les secteurs utilisés qui sont les quartiers listés dans les données ouvertes de la ville(Ville de Québec, 2024d). Une autre division géographique (comme les secteurs de l'enquête OD) pourrait être substituée au besoin.

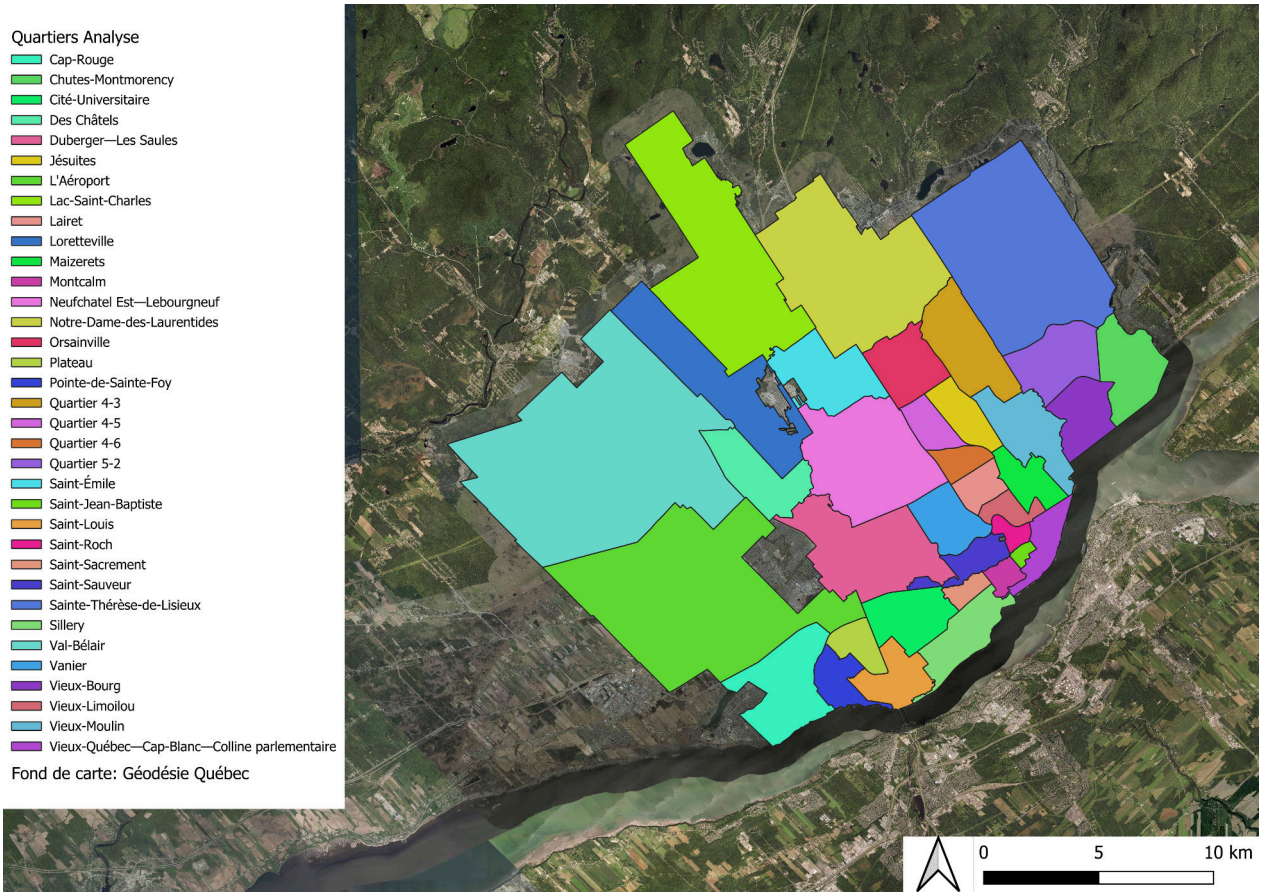


FIGURE 3.5 Secteurs utilisés pour l'analyse

La section suivante dressera le portrait des données cadastrales et foncières utilisées dans ce mémoire.

3.5.4 Données cadastrales et de taxation foncière

Structure des données

La figure 3.6 montre le diagramme entité-association spécifique aux données foncières utilisées en intrants du calcul. Il est concevable que ces tables soient entreposées dans un serveur différent si cette méthodologie était implémentée dans un milieu municipal. Les données de

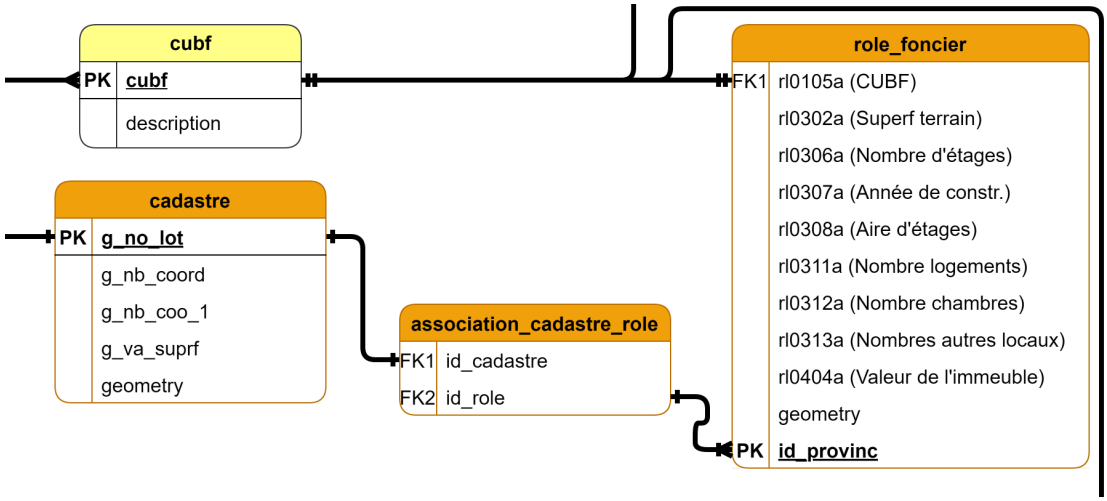


FIGURE 3.6 Diagramme entité association pour le rôle foncier et le cadastre

départ sont le rôle foncier brut ainsi que le cadastre représenté dans les tables cadastre et role_foncier. Le tableau 3.6 donne une définition des colonnes pertinentes à ce mémoire. Certains champs qui ne sont pas utilisés ont été omis. Le tableau 3.6 montre les colonnes pertinentes dans le rôle foncier. Les descriptions sont tirées de Gouvernement du Québec (2022).

La table association_cadastre_role associe le cadastre avec le rôle foncier. En premier lieu, une jointure géométrique a été complétée et sauvegardée. Initialement, une nouvelle requête spatiale était lancée à chaque chargement de données, mais cela ralentissait substantiellement la visualisation.

L'approche proposée utilise directement les données brutes issues de Gouvernement du Québec (2024a). La clé primaire pour le cadastre est g_no_lot et la clé primaire pour le rôle est l'id_provinc. Les champs de la table association_cadastre_role sont donnés au tableau 3.7.

Le tableau 3.8 donne les détails sur les entrées dans la table cadastre. D'autres colonnes existent, mais ne sont pas détaillées, car elles ne sont pas utilisées au sein de ce mémoire.

Tableau 3.6 Colonnes pour la table role_foncier

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_provinc	Clé primaire de la table	Texte	CP
rl0105a	Utilisation prédominante	Entier	CS
rl0302a	Superficie du terrain en mètres carrés	Réel	
rl0306a	Nombre d'étages	Entier	
rl0307a	Année de construction	Entier	
rl0308a	Aire d'étages en mètres carrés	Réel	
rl0311a	Nombre de logements	Entier	
rl0312a	Nombre de chambres locatives	Entier	
rl0313a	Nombre de locaux non résidentiels	Entier	
rl0404a	Valeur de l'immeuble (terrain + bâtiment)	Entier	
géométrie	Géométrie (Point) du rôle foncier	Géométrie	

Tableau 3.7 Colonnes pour la table association_cadastre_role

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
g_no_lot	Identifiant du lot cadastral	Texte	
id_provinc	Identifiant du rôle	Texte	

Tableau 3.8 Colonnes pour la table cadastre

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
g_no_lot	Identifiant du lot cadastral	Texte	CP
g_nb_coord	Longitude du centre de lot	Réel	
g_nb_coo_1	Latitude du centre de lot	Réel	
g_va_suprf	Superficie du lot en mètres carré	Réel	
géométrie	Géométrie du lot	Géométrie	

3.5.5 Analyse descriptive des données foncières

Les données foncières sont centrales à la création de l'estimation. Cette section fera une analyse descriptive des données. La classe résidentielle forme la majorité des données foncières. Sur environ 175 000 lots, 126 000 sont dans la classe résidentielle comme le montre la figure 3.7. D'autre part, environ 35 000 lots n'ont pas d'affectation au rôle foncier. Ces lots peuvent être des routes ou des propriétés agricoles où plusieurs lots cadastraux sont entrés dans une même entrée du rôle foncier.

Ce constat est légèrement différent si on compare le nombre de lots à la valeur des lots. La figure montre que les lots commerciaux, de service et à usage mixte prennent une plus grande partie de la valeur foncière totale que du nombre de lots.

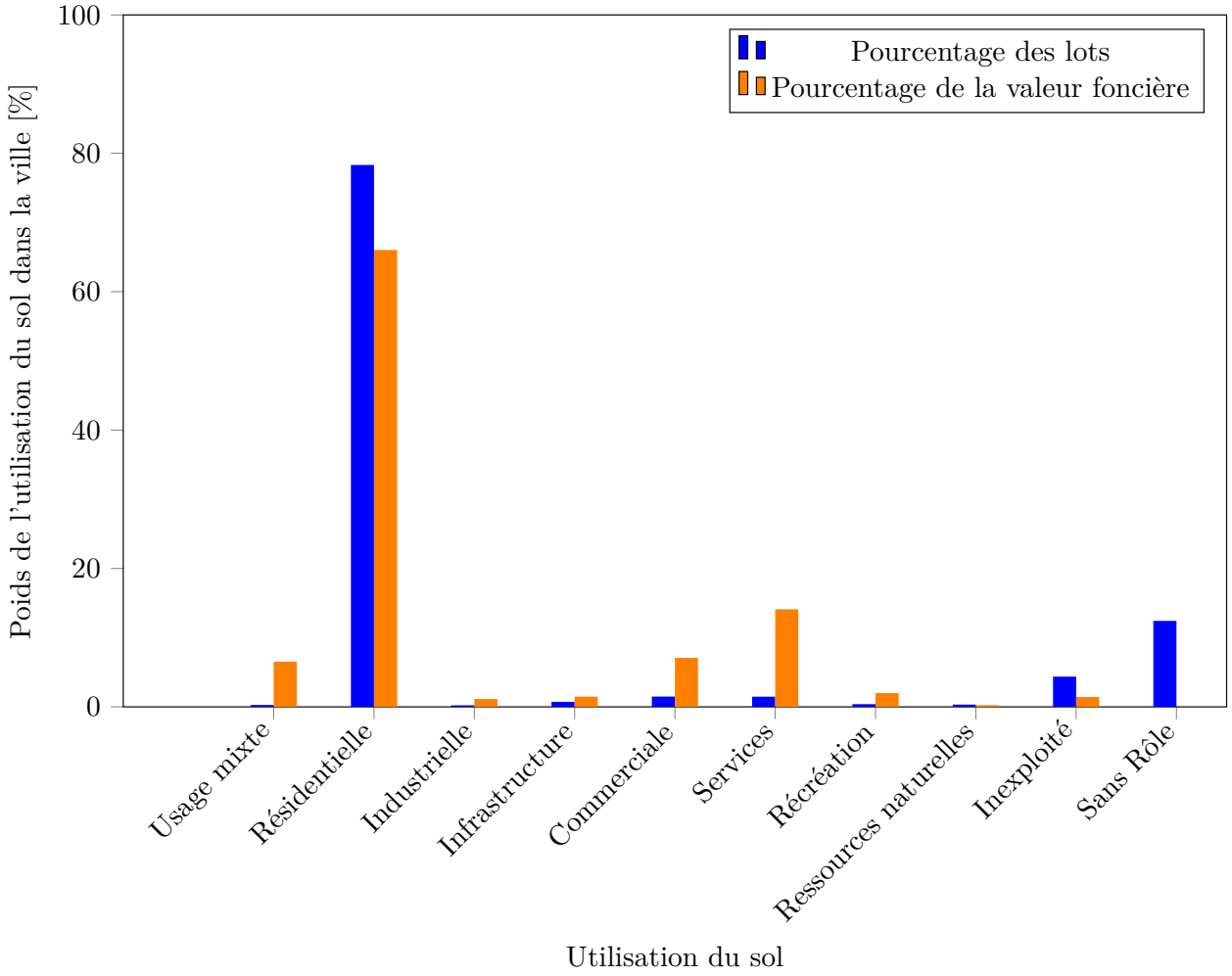
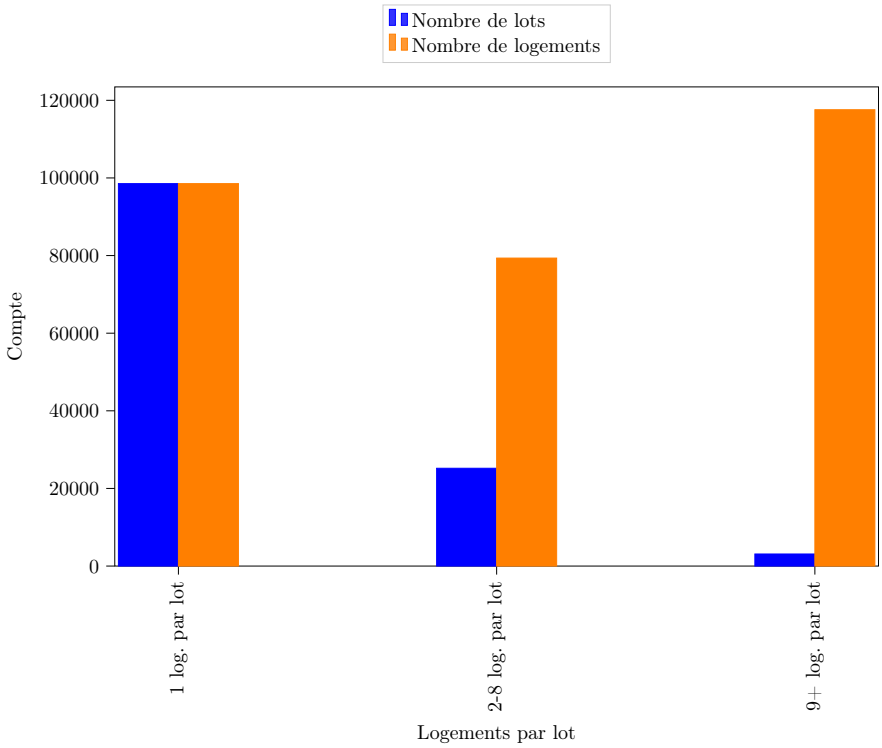
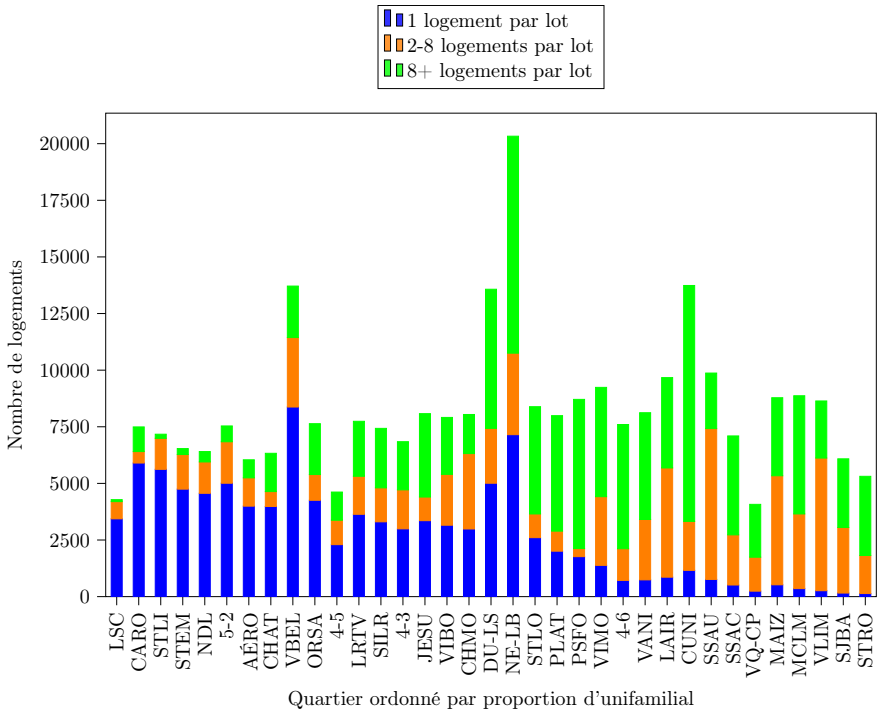


FIGURE 3.7 Proportion des lots et de la valeur foncière selon l'utilisation du sol pour la ville de Québec

On peut aussi regarder le logement de manière plus fine en segmentant les lots de nature résidentielle en fonction du nombre de logements par lot. On constate que même si une majorité de lots ont un seul logement, la plupart des logements disponibles sont sur des lots avec plusieurs logements comme le montre la figure 3.8a. Ce constat est cependant fortement lié à la géographie puisque le parc de logement n'est pas uniformément réparti sur le territoire comme le montre la figure 3.8b. Les quartiers centraux tendent à avoir plus de lots avec de multiples logements.



(a) Compte par type



(b) Répartition par type et quartier

FIGURE 3.8 Nombre de logements et de lots par compte de logement par lot et quartier

D'autre part, malgré leur exhaustivité apparente, une importante proportion des entrées ont des données physiques manquantes. Ce problème est généralement plus prononcé sur les propriétés agricoles ou d'infrastructure qui n'ont pas nécessairement de bâtiment principal, mais est aussi présent dans les propriétés affichées comme inexploitées au rôle (par exemple les logements vacants). De plus, la date de construction n'est pas toujours précisée ou même commune entre différentes entrées sur un même lot. La figure 3.9 montre le pourcentage d'entrées où des données sont manquantes pour chaque catégorie d'utilisation du sol. Il est intéressant de noter que toutes les entrées du rôle ont une valeur affectée, ouvrant la porte à une prédiction des propriétés requise en fonction de la valeur au rôle au besoin.

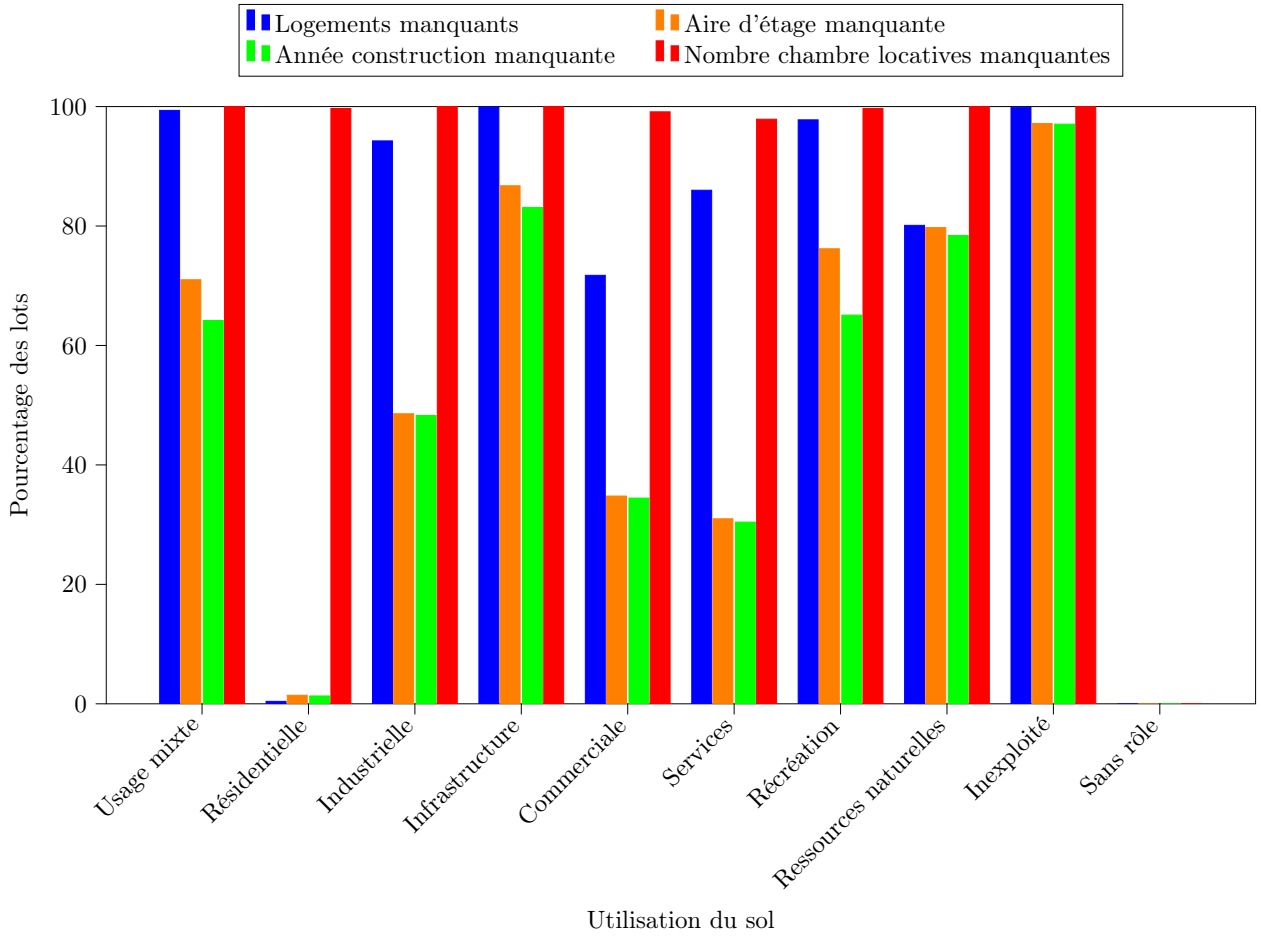


FIGURE 3.9 Pourcentage des lots avec des propriétés manquantes

Le constat est pire lorsque l'on prend en compte la valeur foncière des propriétés où les données sont manquantes. Les propriétés où le nombre de logements (pour l'utilisation résidentielle) ou la superficie (pour les autres) sont manquants tendent à représenter une plus grande proportion de la valeur foncière comme le montre la figure 3.10.

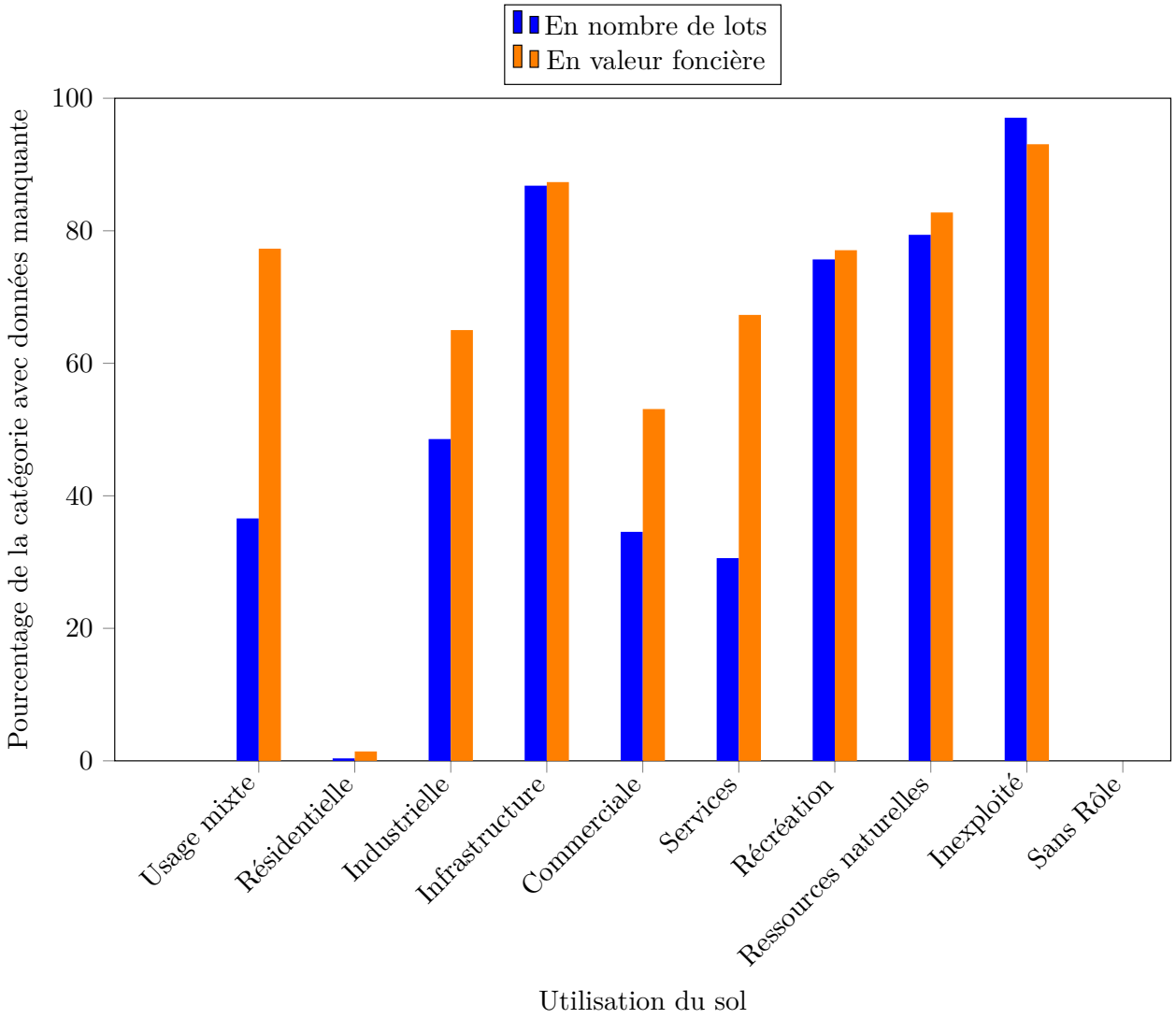


FIGURE 3.10 Proportion de chaque utilisation du sol avec des données manquantes

La figure 3.11 montre une carte de chaleur de la proportion de lots et de la valeur foncière où une donnée clé est absente. Pour la ville complète, 31% et 35% des lots de service et commerciaux respectivement ont des données manquantes, constituant 67% et 53% de la valeur foncière pour ces mêmes catégories. Le quartier de la Cité Universitaire (CUNI) se démarque pour la quantité importante de valeur foncière avec des données absentes. L'inspection des données révèle que la majeure partie du campus universitaire n'a pas les propriétés requises remplies ainsi que les deux grands centres commerciaux.

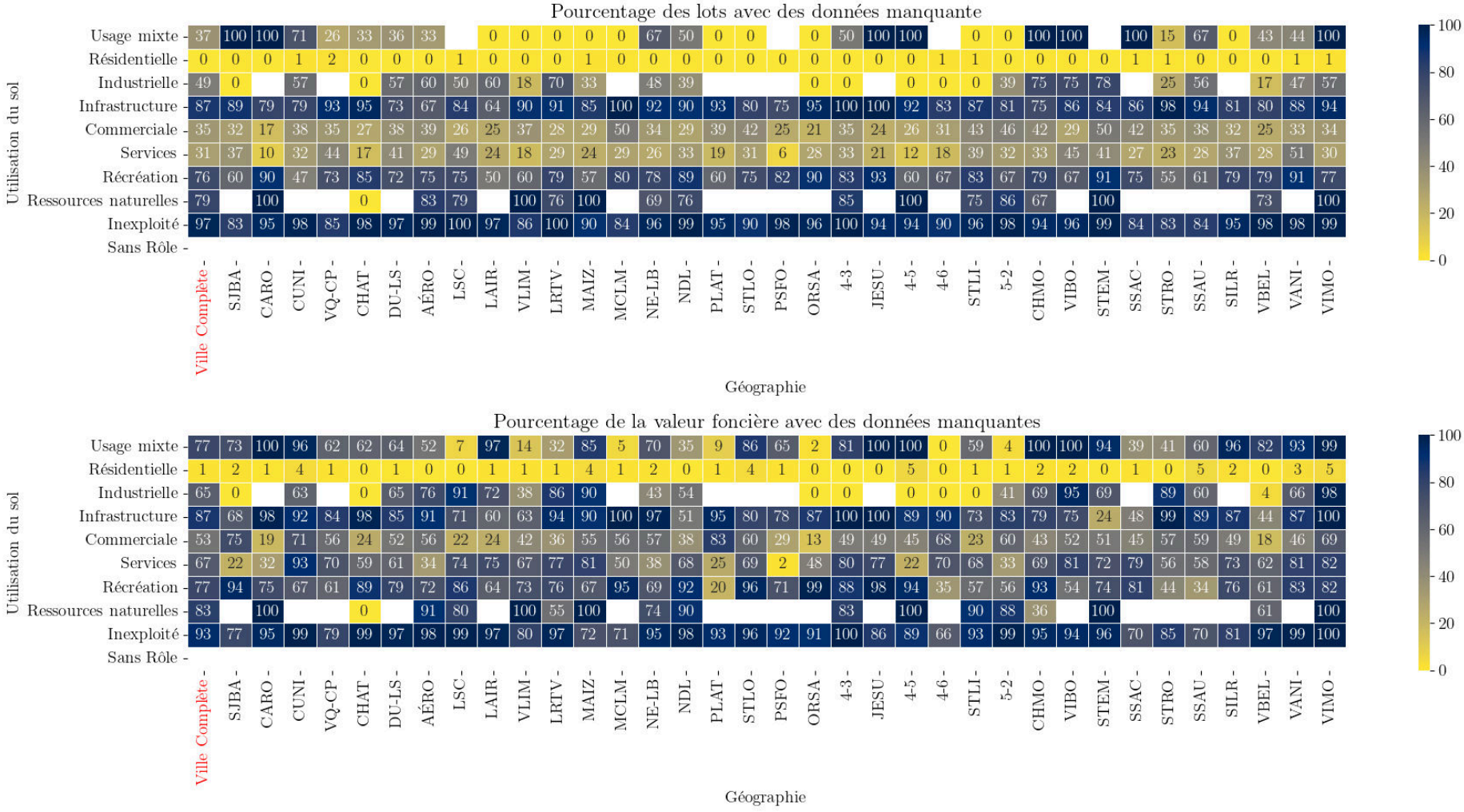


FIGURE 3.11 Carte de chaleur de la proportion de lots et de valeur foncière avec une donnée essentielle manquante

Les lots où il manque des données ont typiquement une plus grande valeur foncière que ceux où toutes les données sont présentes. Cette variation peut changer selon l'utilisation du sol comme le montrent les figures 3.12 à 3.20. Le tableau 3.9 montre un sommaire des médianes en fonction de l'absence ou de la présence de données nécessaires.

TABLEAU 3.9 Récapitulatif de la médiane des valeurs au rôle en fonction de l'utilisation du sol et de la présence ou l'absence de données physiques requises

Utilisation du sol	N_{lots} donnée manquante	Médiane de la valeur au rôle donnée manquante	N_{lots} donnée présente	Médiane de la valeur au rôle donnée présente
Résidentiel	466	254,500	125,363	296,000
Industriel	169	1,750,000	179	815,000
Infrastructure	1,024	30,000	160	384,000
Commercial	826	1,280,000	1563	725,000
Services	723	1,555,000	1640	660,000
Récréation	477	394,000	153	1,400,000
Ressources naturelles	420	112,000	108	119,000
Inexploité	6,830	19,000	206	206,000
Usage Mixte	52	2,840,000	417	1,691,000

Dans le cas des propriétés où les données physiques sont présentes, on constate une corrélation entre la valeur au rôle comme le montrent les figures 3.12 à 3.20. Un meilleur filtrage des données aberrantes pourrait en outre permettre d'améliorer l'accord entre les données et une régression simple pour imputer les données manquantes. D'autre part, pour certaines propriétés (e.g. parcs), d'autres métriques et méthodes seraient potentiellement nécessaires pour imputer la capacité de stationnement de certains lots.

Pour conclure, les données du rôle foncier illustrent l'utilisation des sols partout dans la métropole de manière désagrégée, permettant, lorsque les données sont présentes, de déduire les différentes variables requises pour estimer une capacité de stationnement.

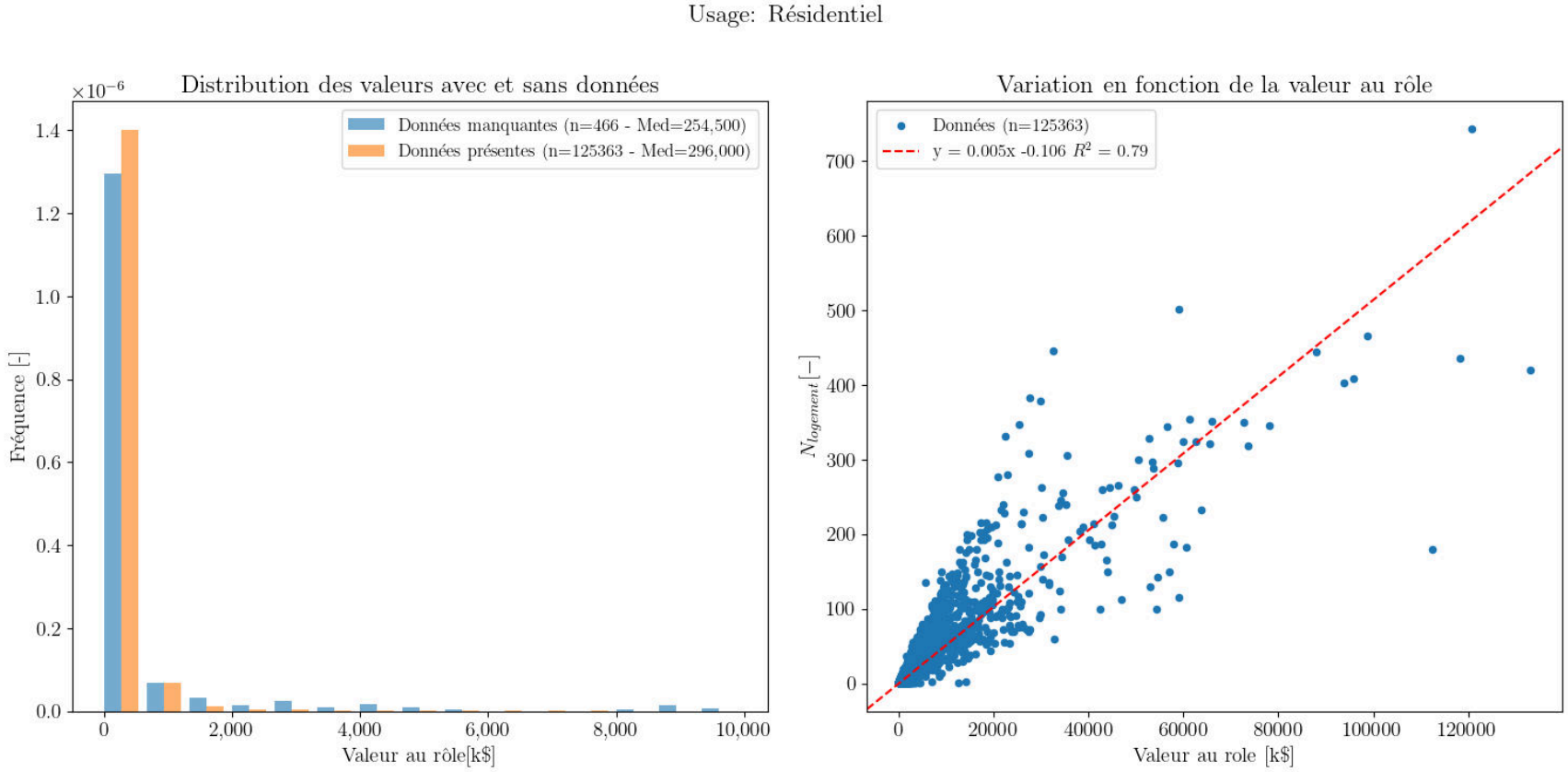


FIGURE 3.12 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Usage résidentiel

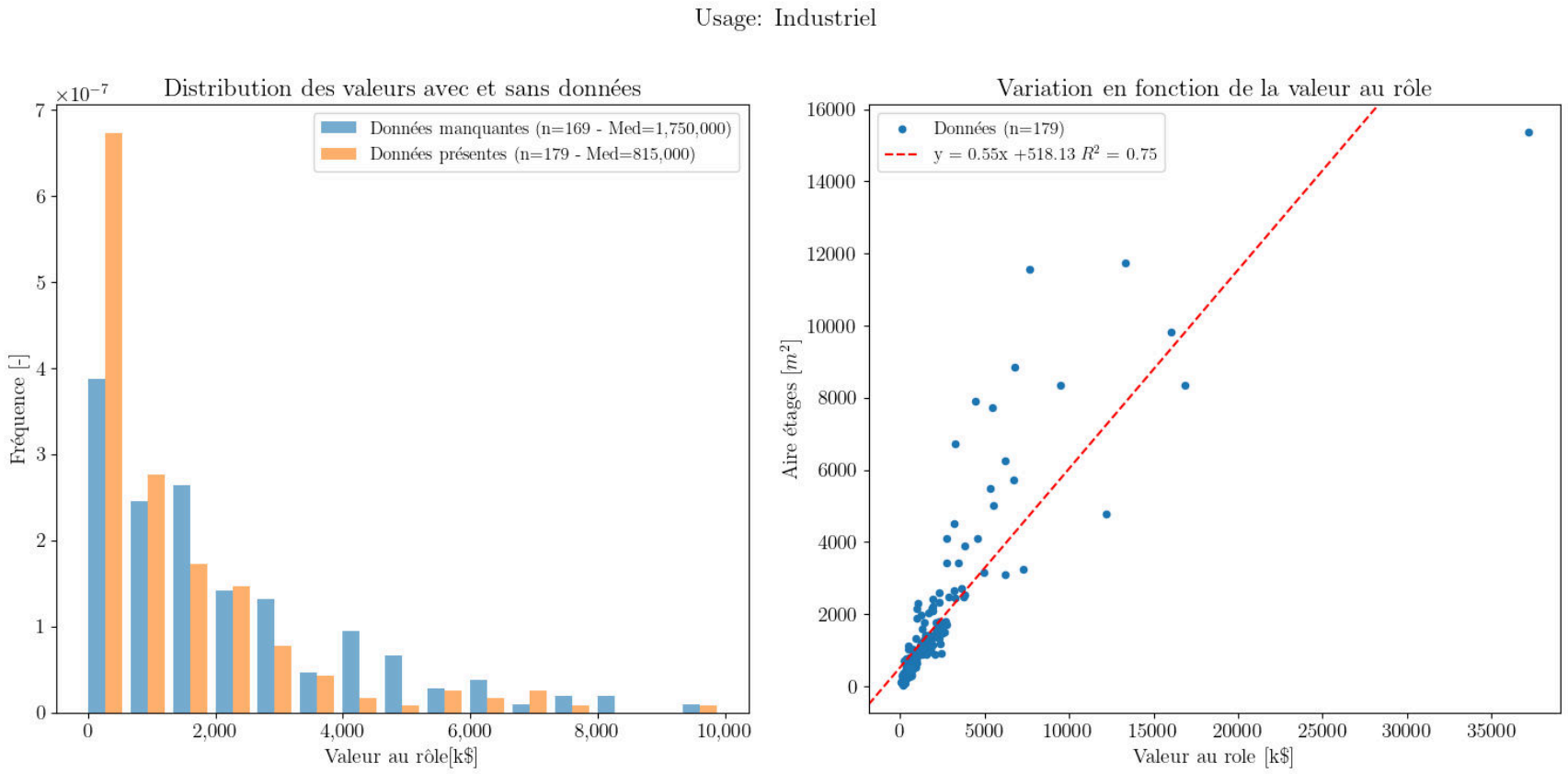


FIGURE 3.13 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Usage industriel

Usage: Infrastructure

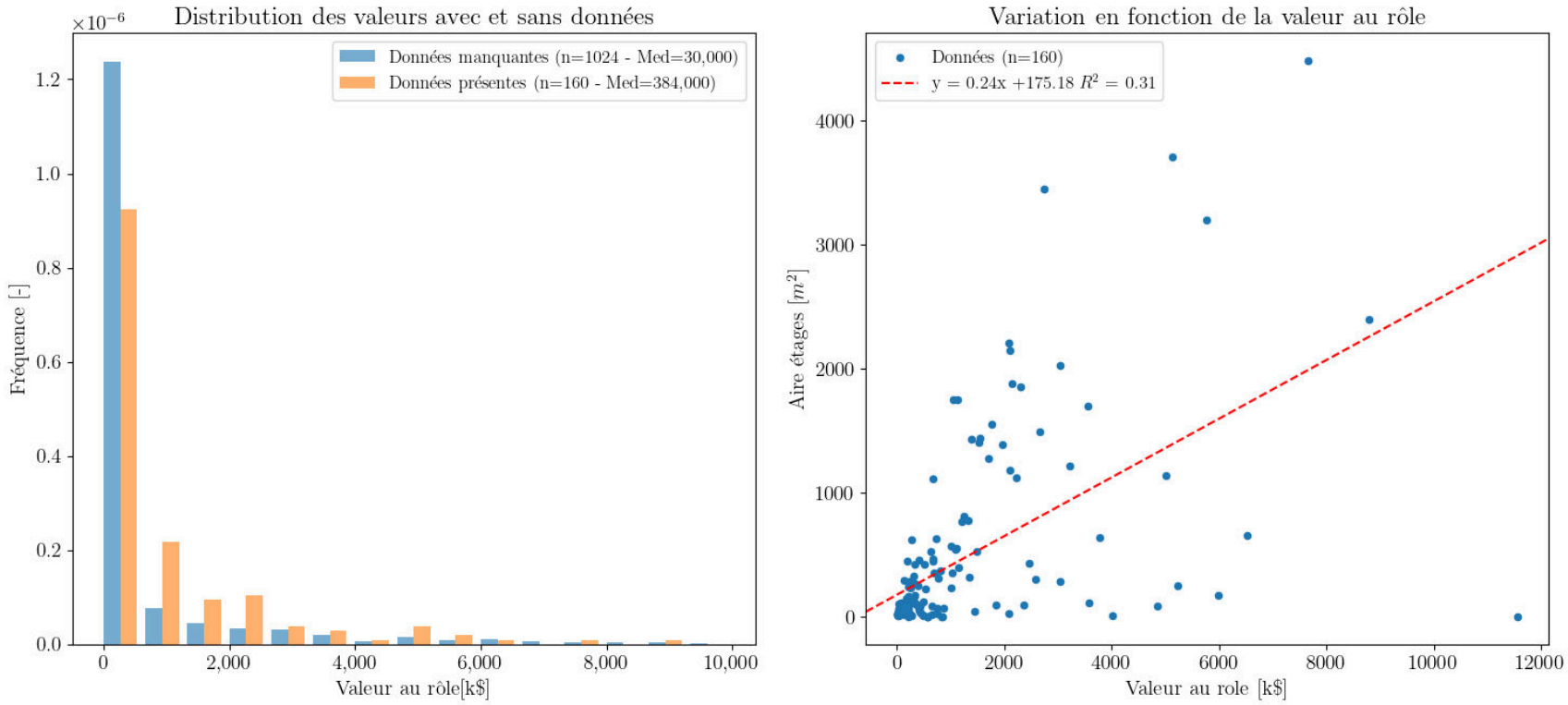


FIGURE 3.14 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Infrastructures

Usage: Commercial

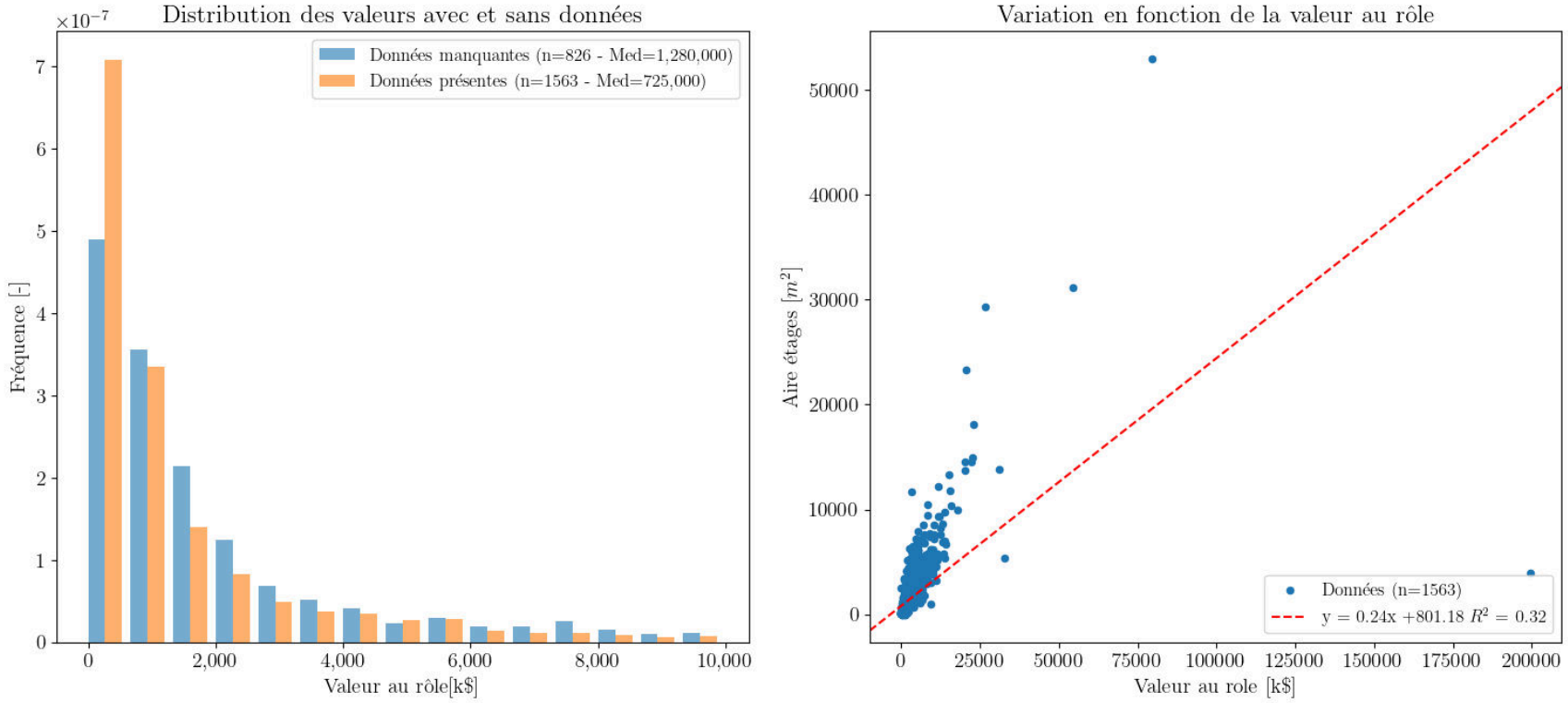


FIGURE 3.15 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Commercial

Usage: Services

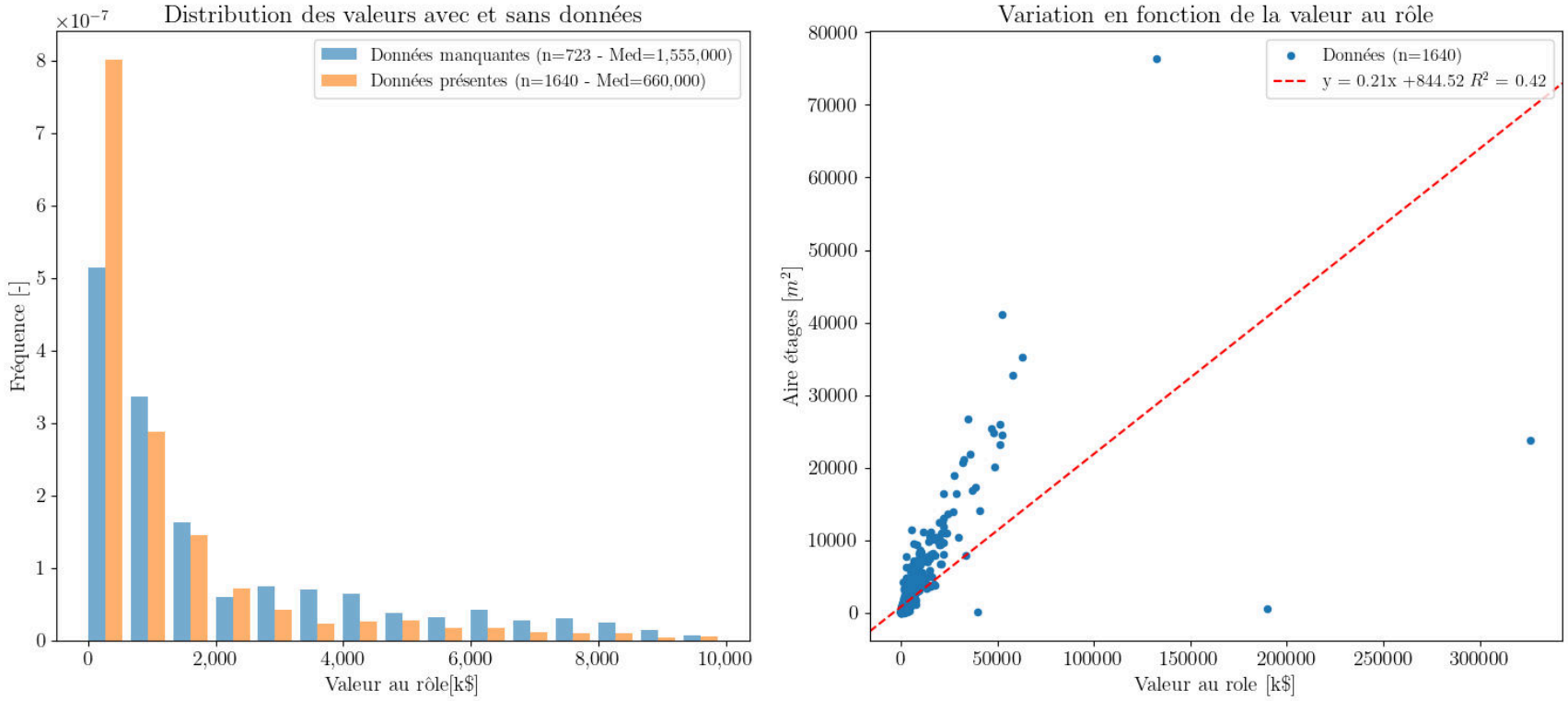


FIGURE 3.16 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Services

Usage: Récréation

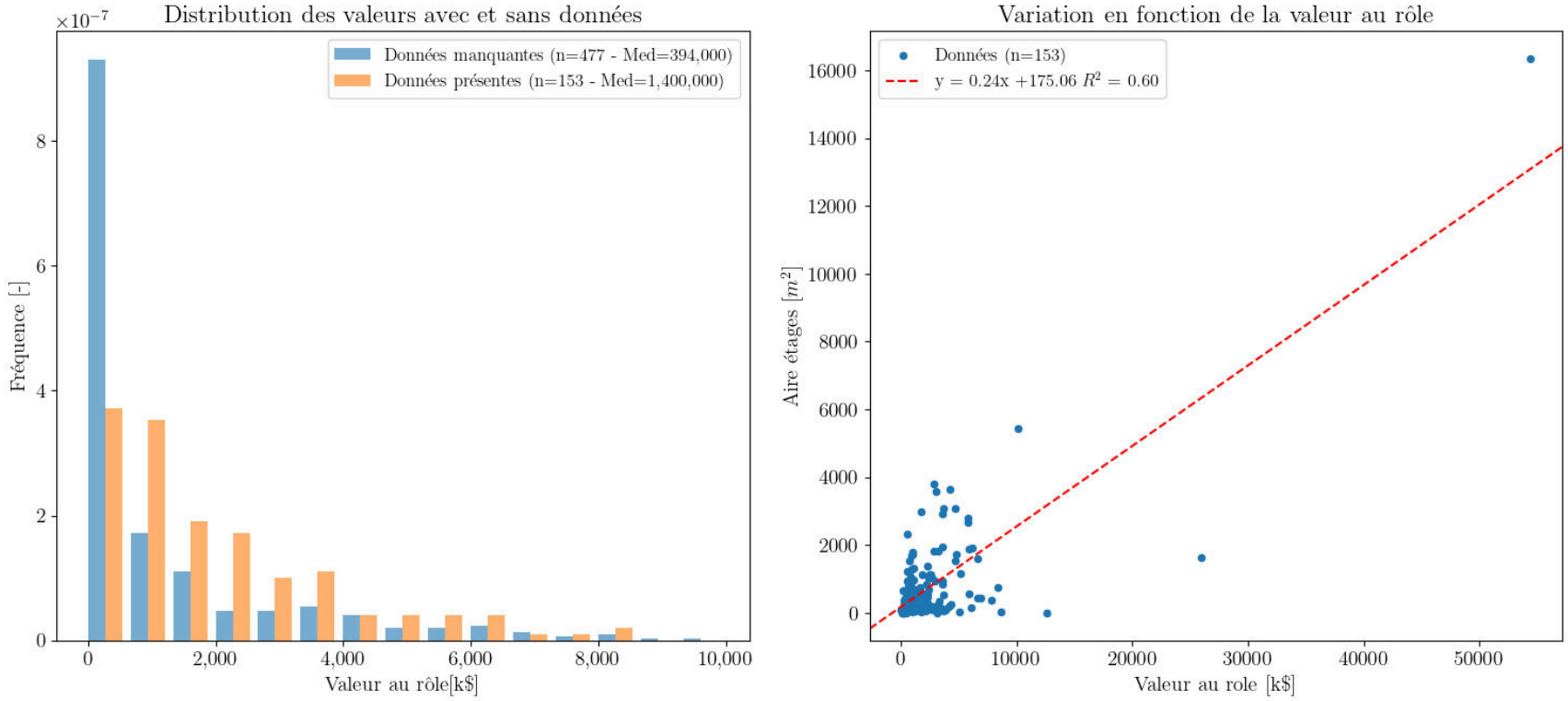


FIGURE 3.17 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Récréation

Usage: Ressources Nat

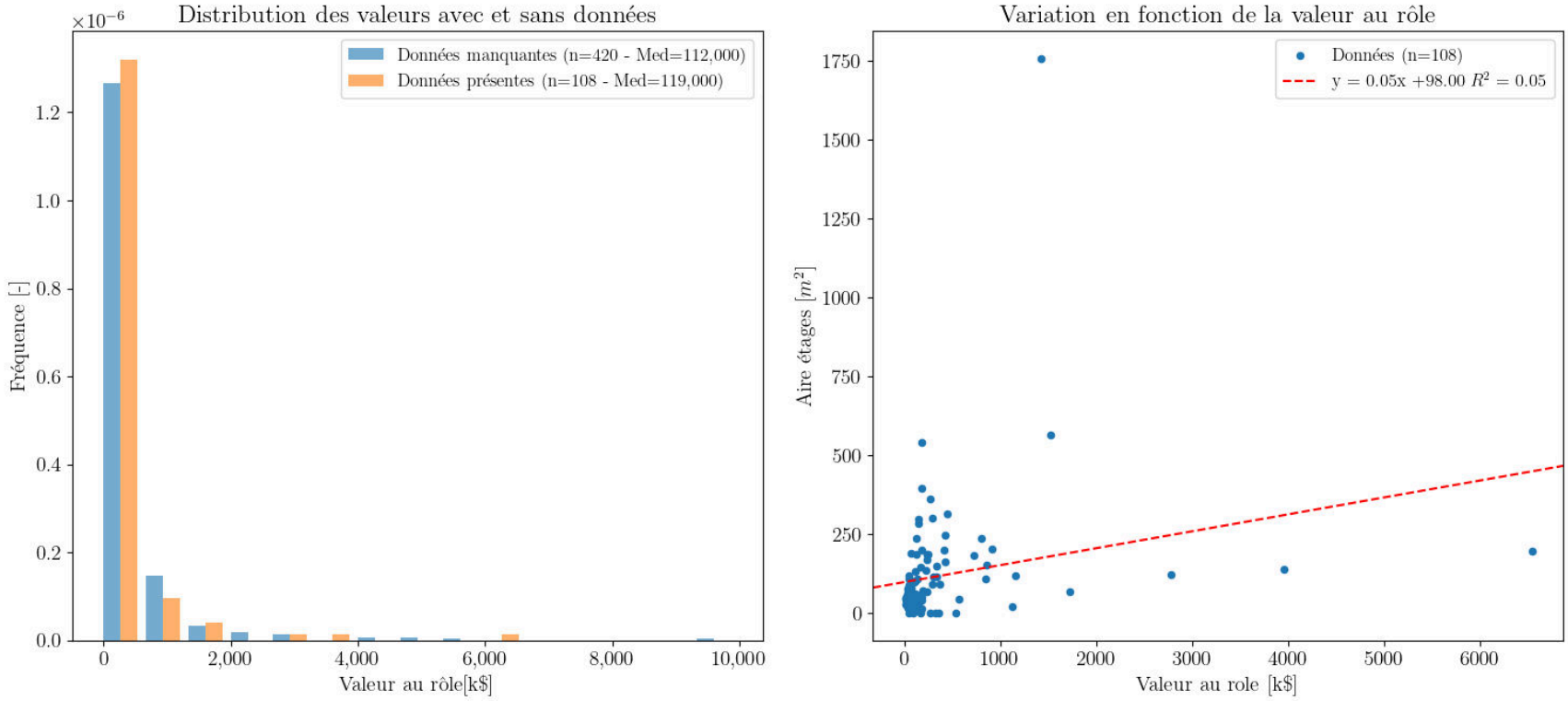


FIGURE 3.18 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Ressources naturelles

Usage: Inexploité

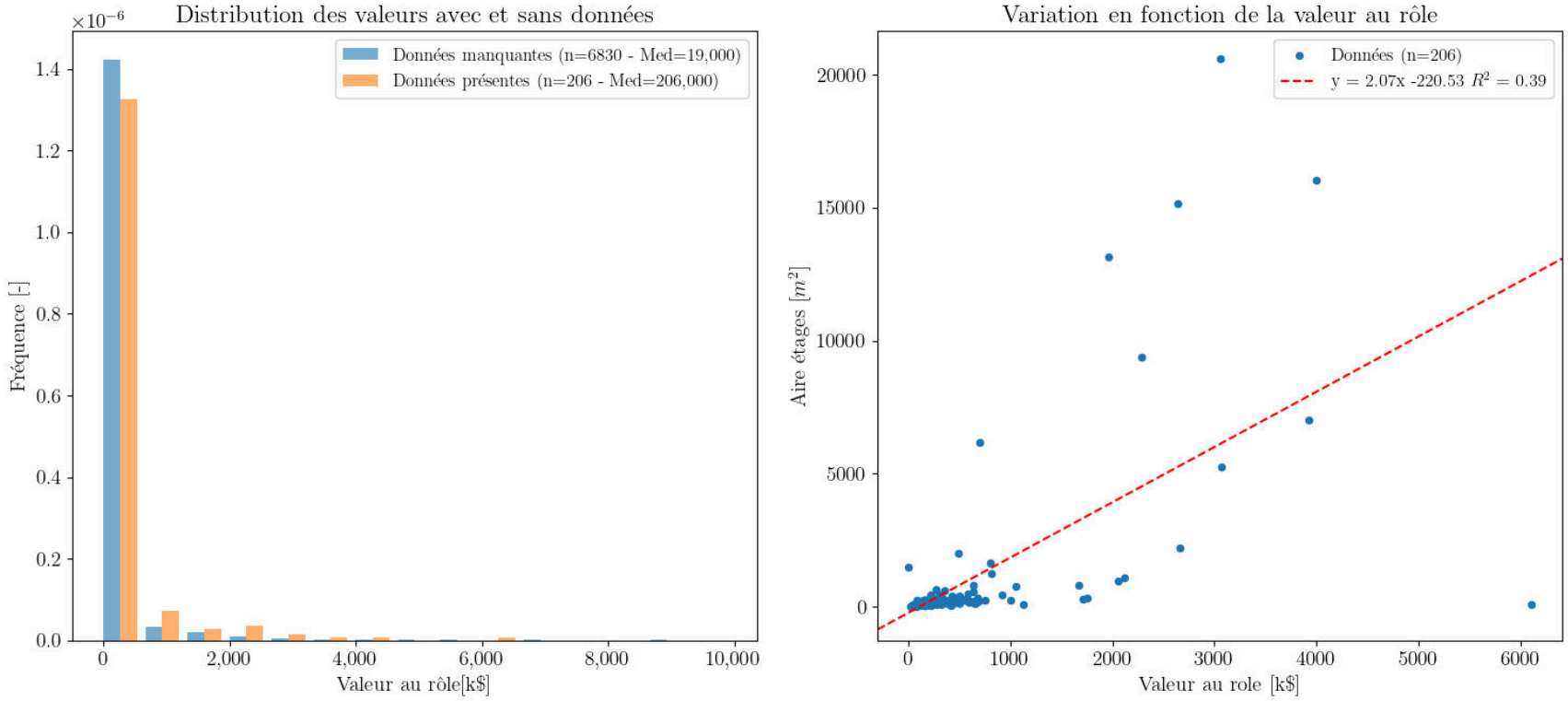


FIGURE 3.19 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Inexploité

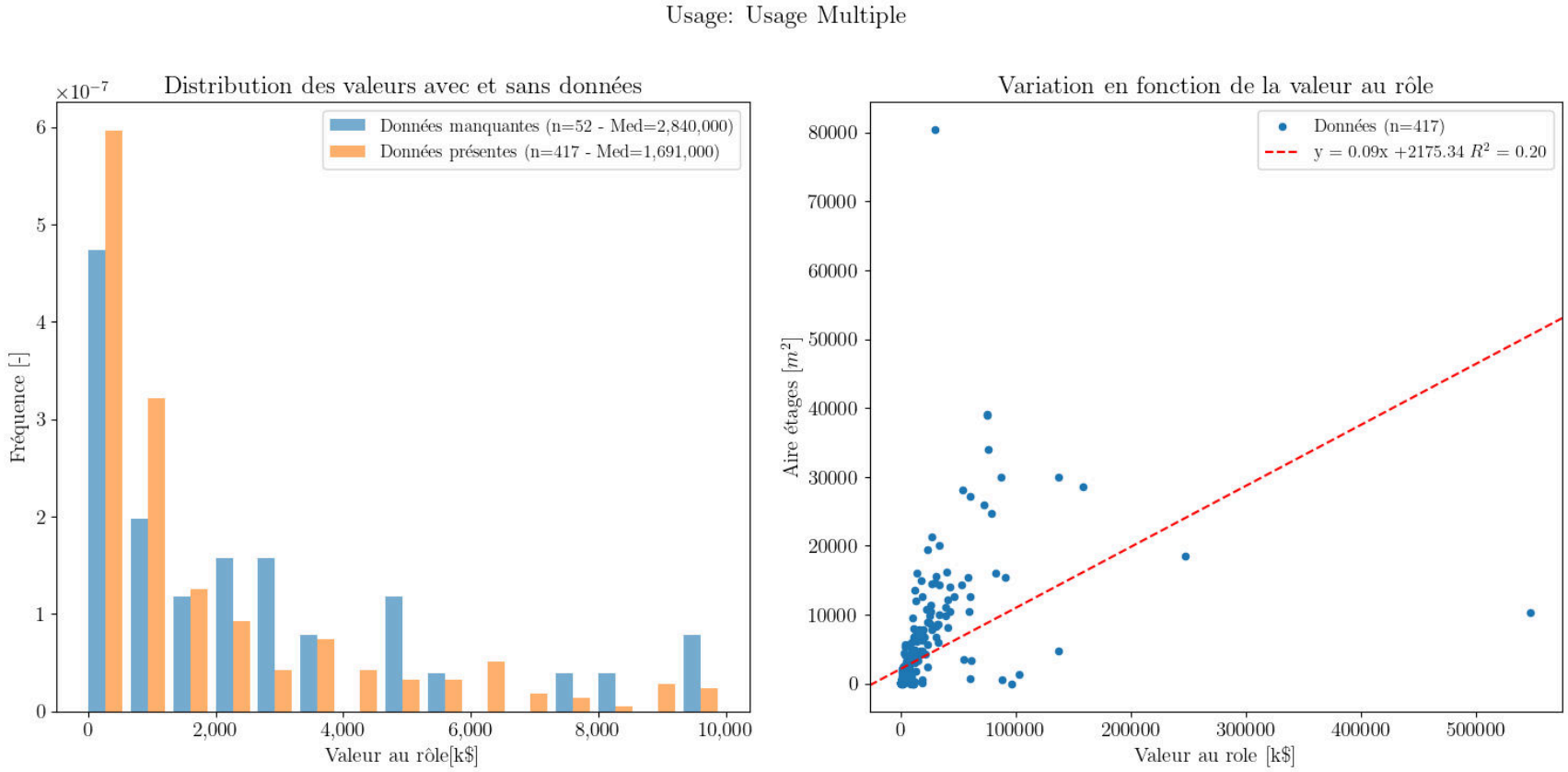


FIGURE 3.20 Graphiques descriptifs du rôle foncier : Usage mixte

3.5.6 Structure des données de dénombrement

La table inventaire_stationnement contient les estimations de capacité. La table laisse la possibilité d'avoir plusieurs estimations par lot cadastral. À l'heure actuelle, l'usager peut utiliser une estimation réglementaire, entrer une valeur manuellement ou utiliser une méthode d'estimation utilisant les règlements avec des données manuelles pour remplir cette table. Le tableau 3.10 résume les champs, le type de données et propose une brève description pour chaque variable :

Tableau 3.10 Colonnes pour la table inventaire_stationnement

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_inv	Clé primaire	Sériel	CP
n_places_min	Nombres de places minimales requises par le code d'urbanisme	Nombre réel	
n_places_max	Nombres de places minimales requises par le code d'urbanisme	Nombre réel	
n_places_estime	Nombres de places estimées si une méthode automatique est utilisée	Nombre réel	
n_places_mesure	Entrée manuelle du nombre de places de stationnement	Nombre réel	
methode_estime	Champ pour indiquer le type d'estimé pour la ligne	Entier 1 - Manuel 2 - Régl. 3 - Régl. entrée manuelle	
id_reg_stat	Règlements utilisés pour générer l'estimé. Si plusieurs sont utilisés, ils peuvent être séparés par des virgules ou \	Texte	
id_er	Ensembles de règlements utilisés pour générer l'estimation. Si plusieurs sont utilisés, ils peuvent être séparés par des , ou des \	Texte	
commentaire	Texte contenant un commentaire au besoin	Texte	
g_no_lot	Identifiant du lot pour l'inventaire	Texte	

3.5.7 Données de la géopolitique du territoire à l'étude

Structure de données

Les règlements régissant la capacité de stationnement changent du fait de changements réglementaires, de fusions municipales et de l'altération du plan de zonage des municipalités. Cette section va détailler la structure de données permettant de prendre en compte la variation temporelle de la réglementation. Cet historique est représenté au moyen de deux tables : historique_geopol et cartographie_secteurs. historique_geopol représente les grandes périodes où le territoire a été stable. Le tableau 3.11 montre les colonnes de la table historique_geopol.

Tableau 3.11 Colonnes pour la table historique_geopol

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_periode	Clé primaire	Sériel	CP
nom_periode	Nom de la période à montrer	Texte	
date_debut_periode	Année de début de la période	Entier	
date_fin_periode	Année de fin de la période	Entier	

Le tableau 3.12 montre les colonnes de la table cartographie_secteurs. Cette table sépare le territoire d'étude en municipalités pour la période définie dans la colonne id_periode.

Tableau 3.12 Colonnes pour la table cartographie_secteurs

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_periode_geo	Clé primaire	Seriel	CP
id_periode	Colonne d'association à l'historique	Entier	CS
ville	Nom de la ville	Texte	
secteur	Secteur de la ville	Texte	
géométrie	Géométrie du secteur	Géométrie	

La figure 3.21 montre le détail du diagramme d'entité association de l'évolution des variations géopolitiques du territoire. La figure 3.33 montre le nombre de territoires par période. Maintenant que la structure est donnée, le portrait du découpage spatio-temporel sera donné à la section suivante.

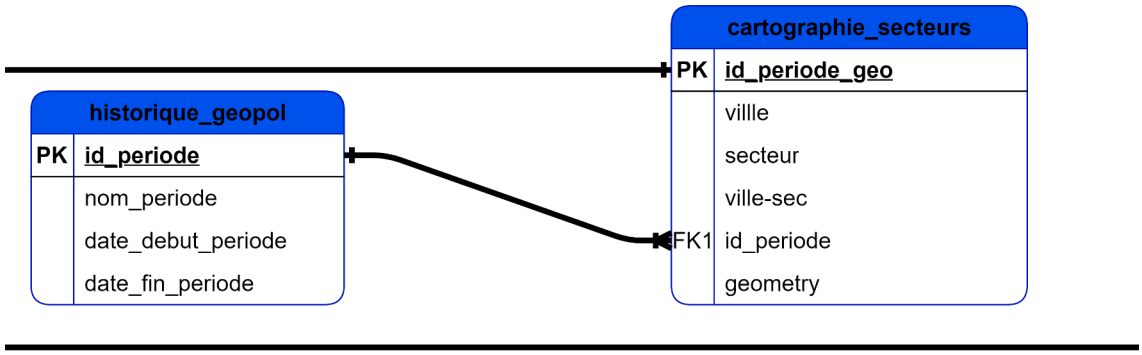


FIGURE 3.21 Diagramme entité association pour l'historique géopolitique

Choix de la séparation géopolitique

Dans le cas de la ville de Québec, 6 grandes périodes ont été identifiées (Élections Québec, 2021 ; Ville de Québec, s. d.). Elles sont listées au tableau 3.13. L'utilisation d'une valeur nulle (S.V. dans le tableau) dans la colonne d'année de début implique que cette période sera utilisée pour toute construction avant 1970. L'utilisation d'une valeur nulle dans l'année de fin dénote une période encore en vigueur aujourd'hui.

TABLEAU 3.13 Valeurs dans l'historique géopolitique utilisé dans le cadre de ce mémoire

Identifiant id_periode	Nom nom_periode	Année début date_debut_periode	Année fin date_fin_periode
1	Fondation - 1970	S.V.	1970
3	Duberger, Saules et Neufchâtel fusion Québec	1971	1975
4	Fusions Charlesbourg	1976	1994
5	Inauguration VQZ-3	1995	1996
6	Abrogation Zone Prioritaire Ville de Québec	1997	2009
7	Harmonisation	2010	S.V.

Le découpage spatial précis est synthétisé à l'annexe E. De manière générale, les découpages suivent la géopolitique de la ville des figures 3.1d, 3.1c, 3.1b et 3.1a. Pour la ville centre, le découpage de la figure 3.2 est répliqué. Une exception est faite pour Québec : l'hypothèse que le zonage avant 1995 était tout de même différencié entre le secteur des Rivières et les quartiers centraux.

3.5.8 Données représentant les règlements

Structure des données

Cette section montrera la structure de données développée pour stocker les règlements de stationnement. La première entete_reg_stationnement représente les données administratives communes, tandis que reg_stationnement_empile entrepose la représentation mathématique des règlements. Les champs de la table entete_reg_stationnement sont énumérés dans le tableau 3.14.

Chaque règlement peut être divisé en sous-ensembles si le règlement propose plusieurs méthodes de calcul. L'hypothèse fondamentale est que les règlements sont essentiellement des combinaisons de formules mathématiques linéaires. La première ligne de chaque sous-ensemble dénote l'opération à utiliser pour choisir entre l'estimation du sous-ensemble courant et du sous-ensemble précédent tandis que les lignes suivantes du sous-ensemble contiennent toutes le même opérateur qui dicte le type d'opération à utiliser à l'intérieur du sous-ensemble.

Si un opérateur de seuil (cf. tableau 3.16) est utilisé dans la formulation du règlement, les variables $p_{s,min}$, $p_{s,max}$, $c_{s,min}$ et $c_{s,max}$ sont sélectionnées en fonction de la condition $x_{entree} \geq t_{s,reg}$. Si plusieurs seuils existent, les variables sont sélectionnées par intervalles de $t_{s,reg}$.

La formulation mathématique du nombre de places requises est entreposée dans la table reg_stat_empile. Les étapes mathématiques pour une ligne d'un règlement de stationnement sont données aux équations 3.1, 3.3 et 3.2 .

$$x_{entree} = R[C_{conv,i}] \times p_{conv,i} + c_{conv,i} \tag{3.1}$$

$$n_{places,min} = c_{s,min} + p_{s,min} \times x_{entree} \tag{3.2}$$

$$n_{places,max} = c_{s,max} + p_{s,max} \times x_{entree} \tag{3.3}$$

où R est la ligne du rôle foncier en train d'être calculée, $C_{conv,i}$ représente la colonne à utiliser pour l'unité i, $p_{conv,i}$ représente la pente de conversion pour l'unité i, $c_{conv,i}$ représente l'ordonnée à l'origine pour la conversion de l'unité i. Ces constantes sont stockées dans la table multiplicateur_facteur_colonne. $p_{s,min}$ et $p_{s,max}$ représentent les pentes des requis minimums tandis que $c_{s,min}$ et $c_{s,max}$ sont les ordonnées à l'origine qui sont stockées dans la table reg_stat_empile discutée plus loin. L'unité à utiliser i est elle aussi spécifiée dans la même table avec les seuils d'applicabilité $t_{s,reg}$.

Cette sélection s'opère en ordonnant les seuils avant sélection puis en identifiant automatiquement les intervalles.

Tableau 3.14 Colonnes pour la table entete_reg_stationnement

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_reg_stat	Clé primaire	Sériel	CP
description	Description	Texte	
annee_debut_reg	Année où le règlement est entré en vigueur	Entier	
annee_fin_reg	Année d'abrogation du règlement	Entier	
texte_loi	Texte de loi où le règlement est introduit	Texte	
article_loi	Article de loi détaillant le règlement	Texte	
paragraphe_loi	Paragraphe de la loi détaillant le règlement	Texte	
ville	Ville où le règlement s'applique	Texte	

Tableau 3.15 Colonnes pour la table reg_stat_empile

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_reg_stat_emp	Clé primaire	Sériel	CP
id_reg_stat	Référence à l'entête du règlement	Entier	CS
ss_ensemble	Sous-ensemble pour la ligne	Entier	
seuil	Seuil inférieur de validité du règlement $t_{s,reg}$	Entier	
oper	Opération utilisée	Entier	
cases_fix_min	Ordonnée à l'origine pour le minimum $c_{s,min}$	Réel	
cases_fix_max	Ordonnée à l'origine pour le maximum $c_{s,max}$	Réel	
pente_min	Pente de la droite pour le minimum $p_{s,min}$	Réel	
pente_max	Pente de la droite pour le maximum $p_{s,max}$	Réel	
unite	Unité à utiliser. cf. tableau 3.16	Entier	

Les valeurs possibles des opérateurs sont listées au tableau 3.16. Il est important de noter que les opérations 1 et 4 sont implémentées à l'intérieur d'un même sous-ensemble, alors que

les opérations 3-6 sont implémentées entre deux sous-ensembles.

Tableau 3.16 Entrées dans la table liste_operations

id_operation	desc_operation
1	+ (absolu)
3	ou (plus contraignant)
4	changement critère au-delà seuil (>=)
6	ou simple

Le champ unité de la table reg_stat_empile est la clé primaire pour la table multiplicateur_facteurs_colonnes. Le tableau 3.17 en décrit les champs. Cette table permet de faire la conversion entre les données du rôle foncier et les unités contenues dans la réglementation en utilisant l'équation 3.1.

Tableau 3.17 Colonnes pour la table multiplicateur_facteur_colonne

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_unite	Clé primaire	Sériel	CP
colonne_role_foncier	Colonne du rôle foncier à utiliser pour cette unité $C_{conv,i}$	Texte	
facteur_correction	Facteur de multiplication pour l'unité $p_{conv,i}$	Réel	
cubf	Pas implémenté : facteur différent pour un CUBF spécifique	Entier	
desc_unite	Description de l'unité	Texte	
abscisse_correction	Ordonnée à l'origine de la pente de régression $c_{conv,i}$	Réel	

Le tableau 3.18 donne le contenu de la table multiplicateur_facteur_colonnes. Cette table contient les facteurs de conversion d'unités, toutes les conversions sont supposées linéaires. Ces conversions ont été déterminées par heuristique sans en faire la calibration. Malgré l'intention initiale de permettre différents facteurs de conversions en fonction du CUBF, cette fonctionnalité n'a pas été mise en place par manque de temps.

Tableau 3.18 Contenu type de la table multiplicateur_facteur_colonnes

id_unite	colonne_role_foncier $C_{conv,i}$	facteur_correction $p_{conv,i}$	abscisse_correction $c_{conv,i}$	desc_unite
1	rl0312a	1	0	chambre
2	rl0311a	1	0	logement
4	rl0308a	1	0	mètre carré d'étage
5	rl0308a	1	0	mètre carré bureau
6	rl0308a	1	0	mètre carré salle production
7	rl0302a	1	0	mètre carré terrain
8	rl0308a	0.5	0	siège
9	S.V.	1	0	poste de travail
10	rl0308a	0.04	0	salle
11	rl0308a	0.04	0	lit
12	S.V.	1	0	personne
13	rl0308a	0.1	0	employé
14	0.1	1	0	étudiant
15	rl0308a	0.05	0	médecin
16	S.V.	1	0	quai
17	rl0308a	0.05	0	voie de service
18	rl0302a	0.00036	0	vert
19	rl0302a	0.00036	0	allée de pratique
20	rl0308a	0.0006	0	plateau sportif

La figure 3.22 montre le diagramme entité association pour les règlements :

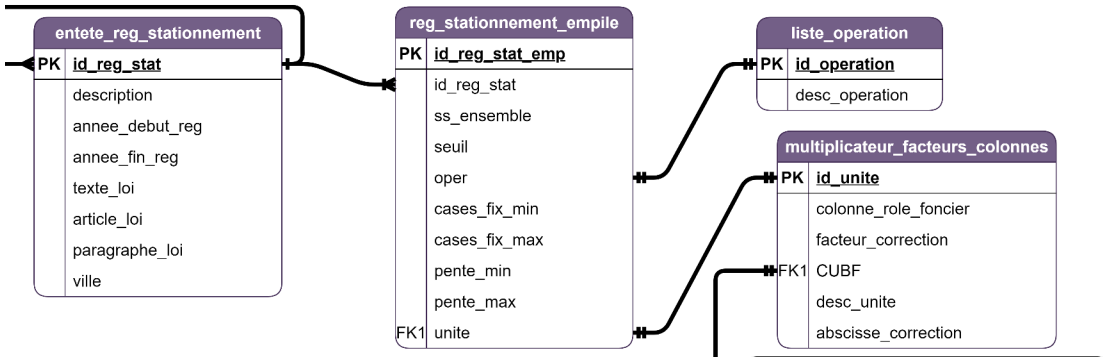


FIGURE 3.22 Diagramme entité association pour les règlements

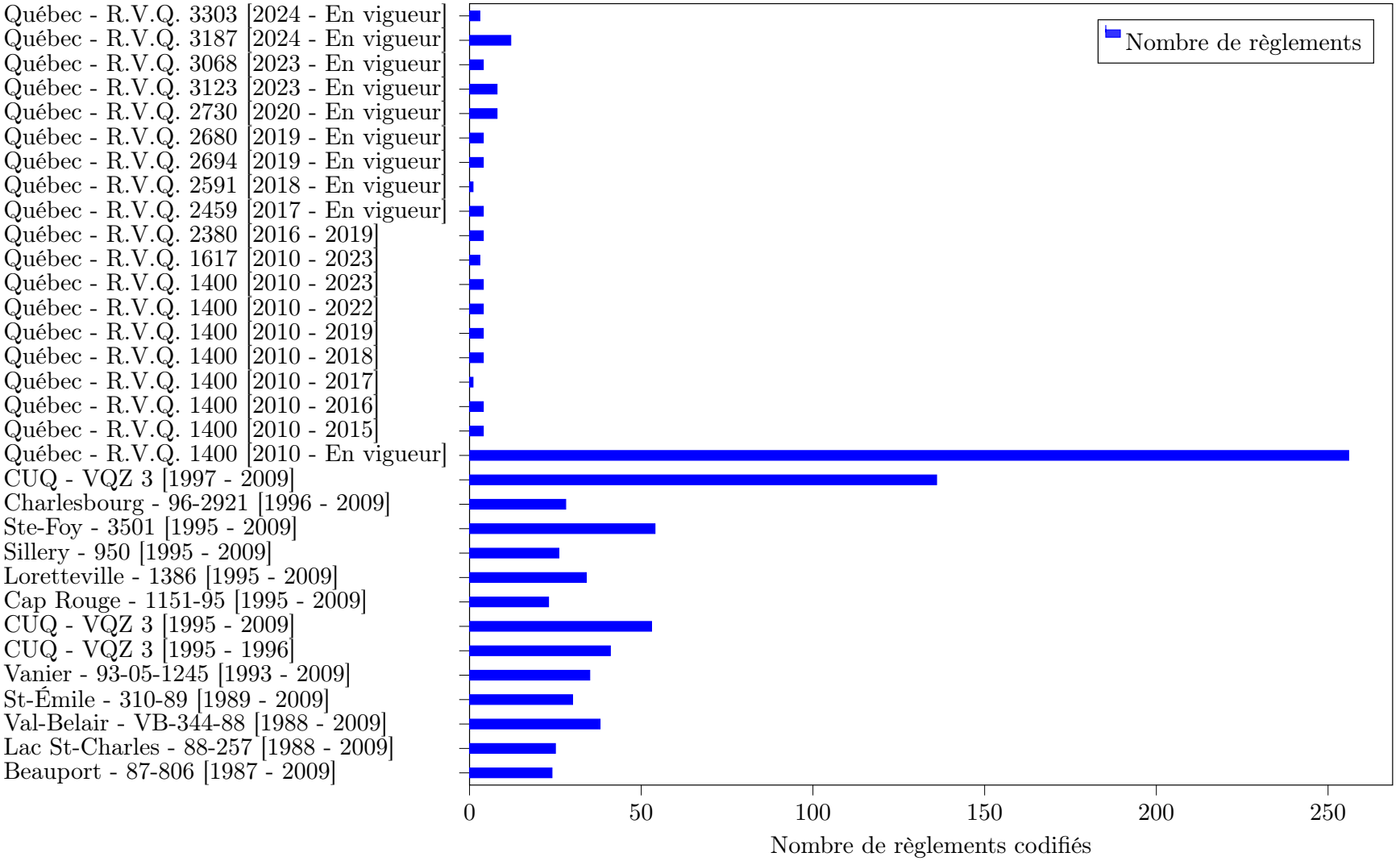


FIGURE 3.23 Nombre de règlements par ville, texte de loi et date d'entrée en vigueur

Analyse descriptive des règlements recensés

Les graphiques de cette section donnent un portrait des règlements recensés. Il est important de noter que les règlements n'ont été recensés que jusqu'au milieu des années '90. Les plus vieux règlements recensés ont été répliqués pour être utilisés pour les plus vieilles juridictions. Ceci implique que même les propriétés construites avant l'avènement de l'automobile sont modélisées comme ayant un nombre de places minimum. Cette approche peut sembler contre-intuitive puisque ces règlements n'existaient pas auparavant, mais beaucoup de vieilles propriétés ont vu des stationnements aménagés après construction. Aucune analyse de sensibilité n'a été complétée pour voir quel effet cela aurait sur l'offre de stationnement prédite, particulièrement dans les quartiers centraux.

La figure 3.23 montre la distribution des règlements par ville, texte de loi, année d'entrée en vigueur et d'abrogation et ville. On constate que les règlements après l'harmonisation des règlements dominent les comptes. Ceci est dû au fait que ces règlements étaient facilement disponibles et constitue un important biais de l'étude.

Pour les règlements recensés, la figure 3.24 montre la distribution du nombre de lignes requises pour définir les règlements, ceci est un proxy pour la complexité du règlement.

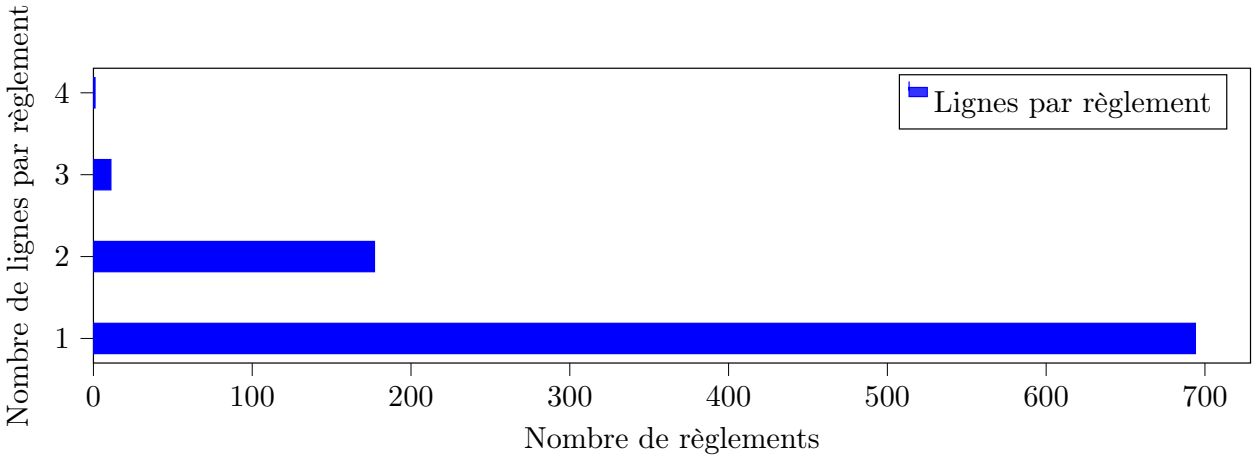


FIGURE 3.24 Distribution du nombre de lignes pour définir les règlements recensés

La figure 3.25 donne le nombre de règlements par combinaison d'opérateurs en présence.

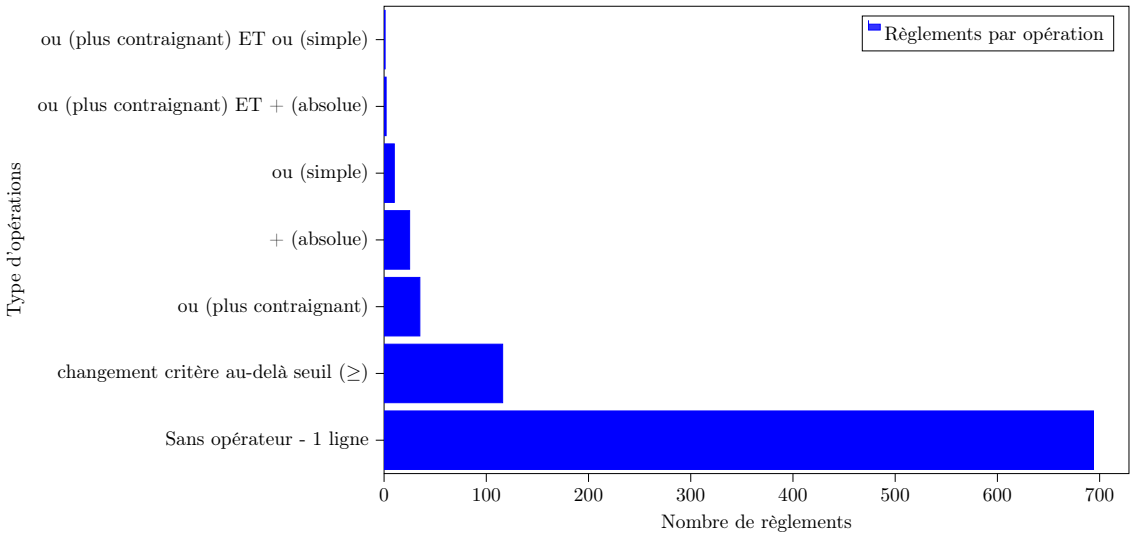


FIGURE 3.25 Nombre de règlements par type d'opération

La figure 3.26 donne le nombre de règlements utilisant les unités mentionnées à la section 3.3.

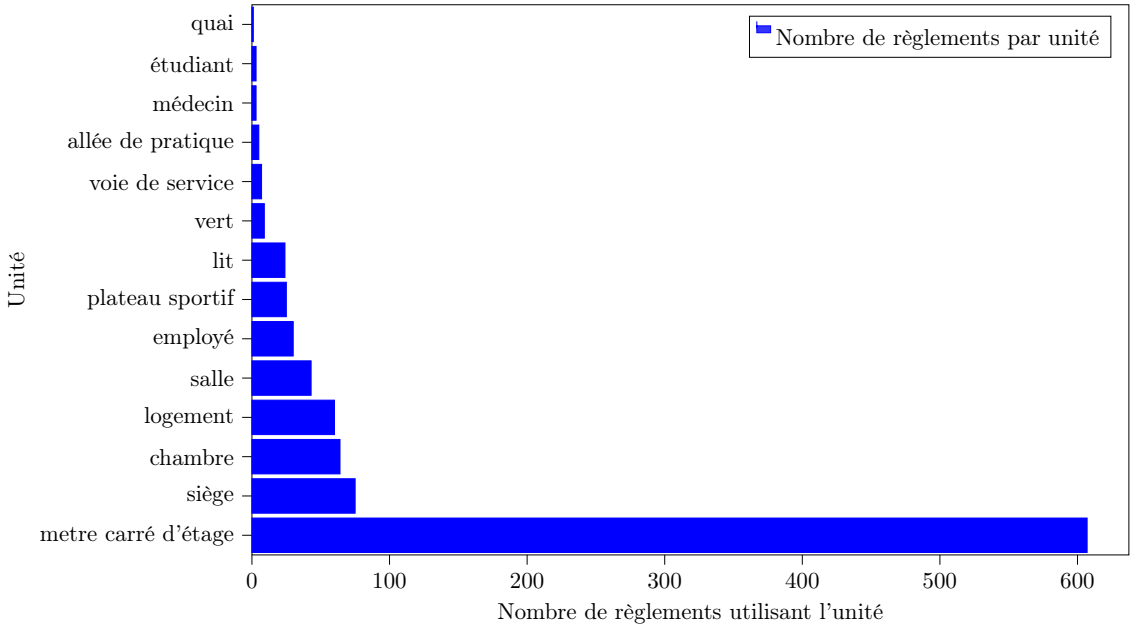


FIGURE 3.26 Nombre d'utilisation de différentes unités dans les règlements recensés

Plusieurs règlements ont des seuils qui sont utilisés pour différentier le nombre de places selon

la quantité d'intérêt. Ce type de règlement est particulièrement présent pour les logements où les municipalités ont typiquement requis des stationnements supplémentaires pour les lots avec plusieurs logements pour accommoder les visiteurs. La figure 3.27 montre le nombre de fois que différents seuils sont utilisés parmi les 81 règlements de stationnement, dont 27 utilisent des seuils. Certains règlements ont plusieurs seuils dans leur définition.

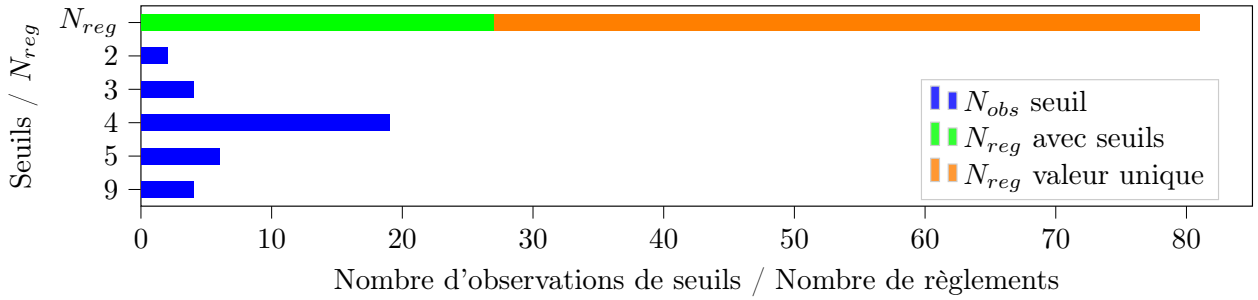


FIGURE 3.27 Nombre d'observation de seuil dans les règlements de logement

Comme mentionné plus haut, des règlements qui sont des duplications des règlements les plus vieux sondés ont été créés. Leur nombre est donné à la figure 3.28 :

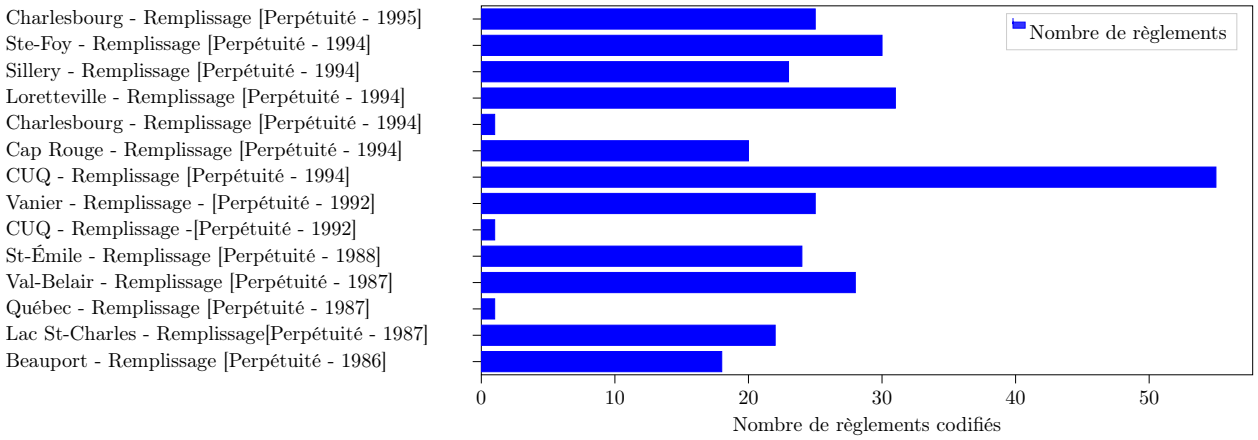


FIGURE 3.28 Règlements dupliqués pour faire prédictions avant recensement

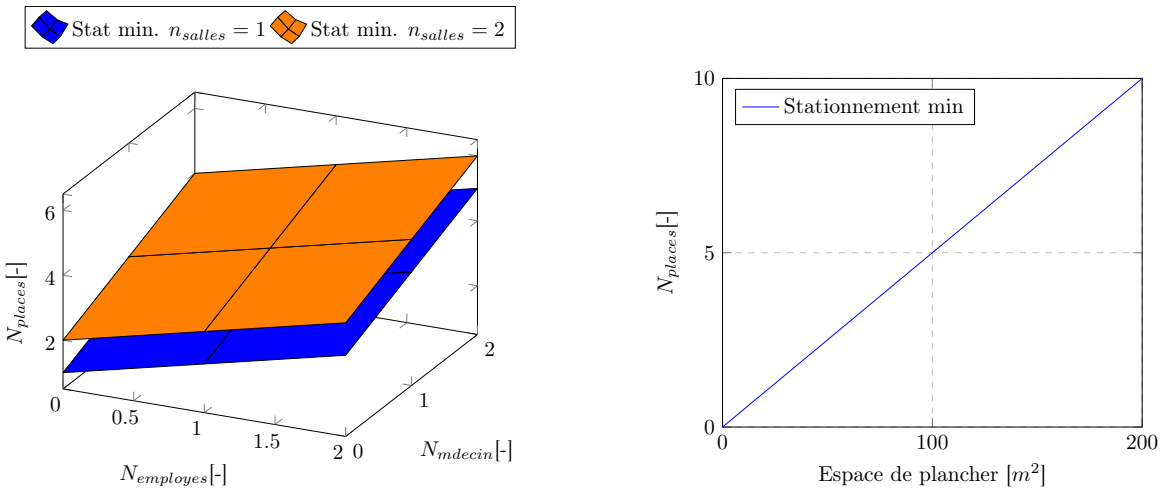
Ceci conclut le bref survol des règlements recensés. Quelques exemples de règlements seront maintenant présentés.

Exemple 1 : Clinique médicale

Admettons un règlement qui requiert 1 place par salle de consultation plus une place par employé plus une place par médecin ou une place par 20 mètres carrés, au plus contraignant. Les entrées dans la table reg_stat_empile seraient telles que montrées au tableau 3.19

TABLEAU 3.19 Exemple règlements dans la table reg_stat_empile pour une clinique médicale

id_emp	id_reg_stat	ss_ensemble	seuil	oper	cases_fix_min	cases_fix_max	pente_min	pente_max	unite
1	1	1	0	S.V.	0	S.V.	1	S.V.	15
2	1	1	0	1	0	S.V.	1	S.V.	13
3	1	1	0	1	0	S.V.	1	S.V.	10
4	1	2	0	3	0	S.V.	0.05	S.V.	4



(a) Sous-ensemble 1 du règlement

(b) Sous-ensemble 2 du règlement

FIGURE 3.29 Exemple de règlement de stationnement pour une clinique médicale

Exemple 2 : Logements

Dans le cas d'un logement, les règlements changent souvent en fonction du nombre de logements au sein d'un même bâtiment. Dans ce cas hypothétique, le requis serait d'une case par logement pour des bâtiments de moins de 4 logements, 1.5 case par logement pour les bâtiments entre 4 et 7 logements et 1.25 case par logement pour tout bâtiment de 8 logements ou plus. Dans ce cas, les entrées à la table seraient telles que montrées au tableau 3.20.

TABLEAU 3.20 Exemple règlements dans la table reg_stat_empile pour le logement

id_emp	id_reg_stat	ss_ensemble	seuil	oper	cases_fix_min	cases_fix_max	pente_min	pente_max	unite
5	2	1	0	S.V.	0	S.V.	1	S.V.	2
6	2	1	4	4	0	S.V.	1.5	S.V.	2
7	2	1	8	4	0	S.V.	1.25	S.V.	2

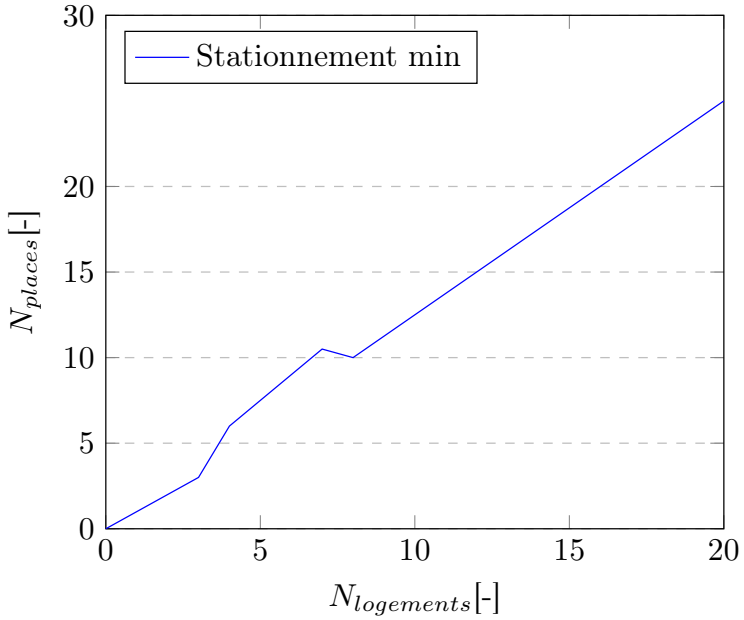


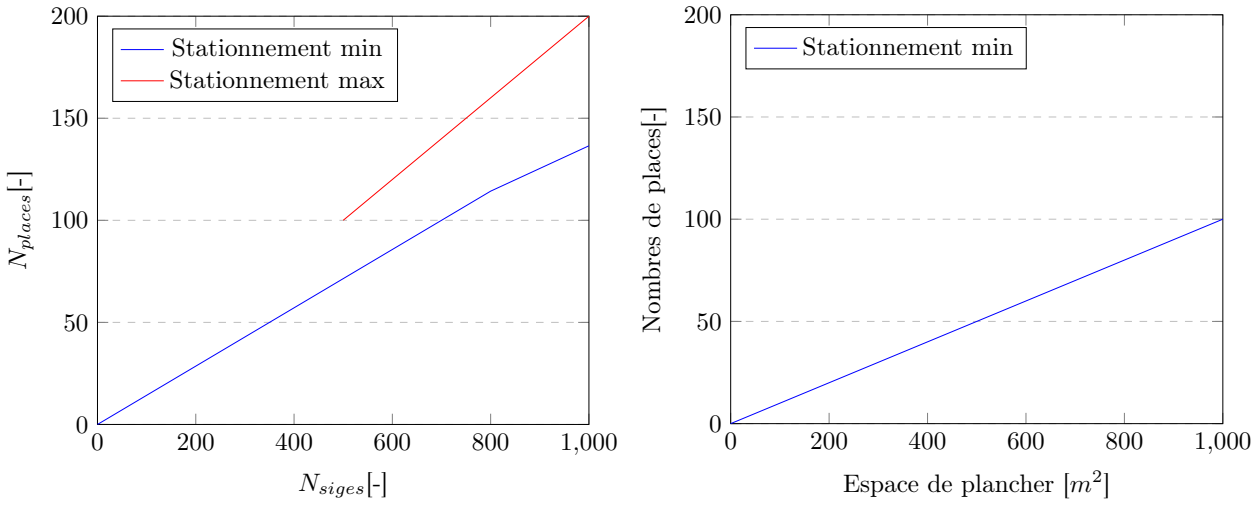
FIGURE 3.30 Exemple de règle de stationnement pour logement

Exemple 3 : Lieux d'assemblée

Dans le cas de lieux d'assemblée, les requis peuvent être exprimés en fonction du nombre de sièges ou en fonction de l'espace au sol. Dans notre cas hypothétique, le requis serait un minimum d'une place par 7 sièges jusqu'à 800 sièges et d'un minimum de 1 place par 9 sièges pour toute place au-delà de 800 sièges. Un maximum d'une place par 5 sièges est applicable au-delà de 500 sièges. Quand il n'y a pas de siège, un requis d'une place par 10 mètres carrés est applicable et il n'y a pas de maximum.

TABLEAU 3.21 Exemple règlements dans la table reg_stat_empile pour un lieu d'assemblée

id_emp	id_reg_stat	ss_ensemble	seuil	oper	cases_fix_min	cases_fix_max	pente_min	pente_max	unite
8	3	1	0	S.V.	0	S.V.	0.142857	S.V.	8
9	3	1	500	4	0	0	0.142857	0.2	8
10	3	1	800	4	25.396825	0	0.111111	0.2	8
11	3	2	0	6	0	S.V.	0.1	S.V.	4



(a) Avec sièges

(b) Sans sièges

FIGURE 3.31 Exemple de règle de stationnement pour lieux d'assemblée

3.5.9 Ensemble des règlements et association à la géopolitique

Structure des données

Cette section va introduire le schéma relationnel de données qui permet d'associer un ensemble de règlements à un territoire pour une période donnée. Quatre tables sont utilisées pour représenter la variation spatio-temporelle de la réglementation : ensembles_reglements_stat, cubf, association_er_reg_stat et assoc_er_territoire.

ensembles_reglements_stat contient un entête pour chaque ensemble de règlements. Le tableau 3.22 en montre les colonnes.

Tableau 3.22 Colonnes pour la table ensembles_reglement_stat

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_er	Clé primaire	Sériel	CP
date_debut_er	Année où l'ensemble de règlements entre en vigueur	Entier	
date_fin_er	Année où l'ensemble de règlements est abrogé	Entier	
description_er	Description à la discrétion de l'utilisateur	Texte	

La table CUBF reproduit les données du gouvernement sur le code d'utilisation du bien-fonds, associant un numéro à une description sommaire. Toutes les entrées dans le rôle foncier se voient attribuer un code à 4 chiffres entre 1000 et 9999 qui définit l'usage prédominant sur la propriété. En plus de ces codes, la table entreposée dans le cadre de ce projet contient les entêtes de chaque section (e.g., 1 - logement, 15 - Habitation en commun, 154 - Maison de retraite ou orphelinat, 1542 - Orphelinat). La description des colonnes de la table cubf est donnée au tableau 3.23.

Tableau 3.23 Colonnes pour la table cubf

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
cubf	Code d'utilisation du bien-fonds	Entier	CP
description	Description de l'utilisation du sol	Texte	

association_er_reg_stat permet de faire l'association entre les CUBF, les ensembles de règlements et les règlements décrits à la section précédente. Le tableau 3.24 montre les colonnes de cette table.

Tableau 3.24 Colonnes pour la table association_er_reg_stat

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_assoc_er_reg	Clé primaire de la table	Entier	CP
id_reg_stat	Identifiant du règlement à appliquer	Entier	CS
cubf	CUBF auquel on doit appliquer le règlement	Entier	CS
id_er	Ensemble de règlements auquel appartient l'association	Entier	CS

La table association_er_territoire est nécessaire pour associer les territoires aux ensembles de règlements. Le tableau 3.25 montre les colonnes de la table. La figure 3.32 montre les

Tableau 3.25 Colonnes pour la table association_er_territoire

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_assoc_er_ter	Clé primaire de la table	Entier	CP
id_er	Identifiant de l'ensemble de règlements à appliquer	Entier	CS
id_periode_geo	Identifiant du territoire auquel s'applique l'ensemble de règlements	Entier	CS

tables de la base de données qui permettent de définir un ensemble de règlements. Notons que la table cubf est visible à la figure 3.6.

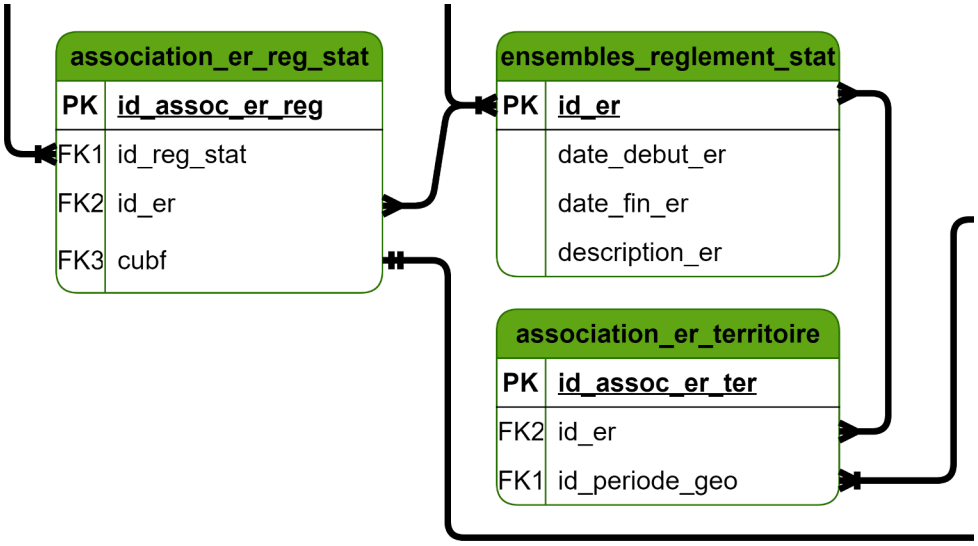


FIGURE 3.32 Diagramme entité association pour la définition d'ensembles de règlements et leur association au territoire

Convention pour les règles d'association de règlement

Par convention, toute entrée dans la table association_er_reg_stat qui s'applique à un nombre de moins de quatre chiffres s'appliquera à un ensemble plus grand. Ainsi :

- Associer 1 à un règlement verra l'ensemble des CUBF entre 1000 et 1999 associés à cette règle
- Associer 15 à un règlement verra l'ensemble des CUBF entre 1500 et 1599 associés à cette règle
- Associer 154 à un règlement verra l'ensemble des CUBF entre 1540 et 1549 associés à cette règle

La règle la plus détaillée (avec le plus grand nombre de chiffres) aura donc préséance en cas de conflits. À minima, une entrée sera requise pour les entrées 1 à 9 pour assurer une couverture réglementaire sur l'ensemble des CUBF.

Convention pour les années

Pour représenter la variabilité des règlements au travers du temps, des dates de validité sont mises en place sur plusieurs objets. Certains règlements ou territoires sont représentés sans date de début pour capturer tous les bâtiments construits avant une certaine date. D'autre part, il est nécessaire de représenter des règlements qui sont encore valides et n'ont donc pas de date d'abrogation. La convention suivante est donc appliquée sur les dates :

— Les règlements, ensembles de règlements ou territoires n'ayant pas de date de début sont en vigueur pour toute année avant la date de fin.

— Les règlements, ensembles de règlements ou territoires n'ayant pas de date de fin sont en vigueur après la date de début jusqu'au présent.

Description des ensembles de règlements

Cette section donnera un survol de la structure des ensembles de règlements utilisés dans le cadre de ce mémoire. Ceci est loin d'être la seule structure possible. La version actuelle a été compilée en essayant d'assurer la couverture des catégories les plus communes sans devoir être exhaustive. La méthode pourrait fonctionner avec seulement les CUBF 1-9 spécifiés, ou avec tous les CUBF individuellement spécifiés.

Le tableau 3.26 donne le nombre d'associations entre un ensemble de règlements et un règlement par CUBF. De manière générale, les mêmes CUBF apparaissent de manière répétée dans les 57 ensembles de règlements constitués.

Tableau 3.26 Nombre de définitions par utilisation du sol

Utilisation du sol	N
CUBF = 1 - RÉSIDENTIELLE	58
CUBF = 15 - HABITATION EN COMMUN	57
CUBF = 151 - MAISON DE CHAMBRES ET PENSION	57
CUBF = 3 - INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES	58
CUBF = 4 - TRANSPORTS, COMMUNICATIONS ET SERVICES PUBLICS	58
CUBF = 5 - COMMERCIALE	58
CUBF = 500 - CENTRE COMMERCIAL	57
CUBF = 54 - VENTE AU DÉTAIL DE PRODUITS DE L'ALIMENTATION	57
CUBF = 55 - VENTE AU DÉTAIL DE VÉHICULES ET DE PRODUITS CONNEXES	57
CUBF = 553 - STATION-SERVICE	57
CUBF = 57 - VENTE AU DÉTAIL DE MOBILIERS DE MAISON ET D'ÉQUIPEMENTS CONNEXES	57
CUBF = 58 - HÉBERGEMENT ET RESTAURATION	57
CUBF = 581 - RESTAURATION AVEC SERVICE COMPLET OU RESTREINT	57

Tableau 3.26 Nombre de définitions par utilisation du sol (suite)

Utilisation du sol	N
CUBF = 582 - ÉTABLISSEMENT OÙ L'ON SERT À BOIRE (BOISSONS ALCOOLISÉES) ET ACTIVITÉS DIVERSES	57
CUBF = 583 - ÉTABLISSEMENT D'HÉBERGEMENT	57
CUBF = 6 - SERVICES	58
CUBF = 60 - IMMEUBLE À BUREAUX	57
CUBF = 61 - FINANCE, ASSURANCE ET SERVICE IMMOBILIER	57
CUBF = 62 - SERVICE PERSONNEL	57
CUBF = 624 - SERVICE FUNÉRAIRE, CRÉMATOIRE, CIMETIÈRE ET MAUSOLÉE	57
CUBF = 63 - SERVICE D'AFFAIRES	57
CUBF = 637 - ENTREPOSAGE ET SERVICE D'ENTREPOSAGE	57
CUBF = 64 - SERVICE DE RÉPARATION	57
CUBF = 641 - SERVICE DE RÉPARATION D'AUTOMOBILES	57
CUBF = 6412 - SERVICE DE LAVAGE D'AUTOMOBILES	57
CUBF = 65 - SERVICE PROFESSIONNEL	57
CUBF = 651 - SERVICE MÉDICAL ET DE SANTÉ	57
CUBF = 6513 - SERVICE D'HÔPITAL	57
CUBF = 6516 - SANATORIUM, MAISON DE CONVALESCENCE ET MAISON DE REPOS	57
CUBF = 6541 - SERVICE DE GARDERIE (PRÉMATERNELLE, MOINS DE 50 CUBF = 66 - SERVICE DE CONSTRUCTION	57
CUBF = 67 - SERVICE GOUVERNEMENTAL	57
CUBF = 672 - FONCTION PRÉVENTIVE ET ACTIVITÉS CONNEXES	57
CUBF = 674 - ÉTABLISSEMENT DE DÉTENTION ET INSTITUTION CORRECTIONNELLE	57
CUBF = 675 - BASE ET RÉSERVE MILITAIRE	57
CUBF = 68 - SERVICE ÉDUCATIONNEL	57
CUBF = 6811 - ÉCOLE MATERNELLE	57
CUBF = 6812 - ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE	57
CUBF = 6813 - ÉCOLE SECONDAIRE	57
CUBF = 6815 - ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE ET SECONDAIRE	57
CUBF = 6821 - UNIVERSITÉ	57

Tableau 3.26 Nombre de définitions par utilisation du sol (suite)

Utilisation du sol	N
CUBF = 6822 - ÉCOLE POLYVALENTE	57
CUBF = 6823 - CEGEP (COLLÈGE D'ENSEIGNEMENT GÉNÉRAL ET PROFESSIONNEL)	57
CUBF = 69 - SERVICES DIVERS	57
CUBF = 6911 - ÉGLISE, SYNAGOGUE, MOSQUÉE ET TEMPLE	57
CUBF = 7 - CULTURELLE, RÉCRÉATIVE ET DE LOISIRS	58
CUBF = 71 - EXPOSITION D'OBJETS CULTURELS	57
CUBF = 721 - ASSEMBLÉE DE LOISIRS	57
CUBF = 722 - INSTALLATION SPORTIVE	57
CUBF = 7392 - GOLF MINIATURE	55
CUBF = 7393 - TERRAIN DE GOLF POUR EXERCICE SEULEMENT	55
CUBF = 7411 - TERRAIN DE GOLF (SANS CHALET ET AUTRES AMÉNAGEMENTS SPORTIFS)	55
CUBF = 7412 - TERRAIN DE GOLF (AVEC CHALET ET AUTRES AMÉNAGEMENTS SPORTIFS)	55
CUBF = 7423 - TERRAIN DE SPORT	55
CUBF = 7451 - ARÉNA ET ACTIVITÉS CONNEXES (PATINAGE SUR GLACE)	57
CUBF = 8 - PRODUCTION ET EXTRACTION DE RICHESSES NATURELLES	58
CUBF = 9 - IMMEUBLES NON EXPLOITÉS ET ÉTENDUES D'EAU	58
CUBF = 9410 - LOGEMENT VACANT DANS UN BÂTIMENT COMPORTANT PLUSIEURS LOGEMENTS OU AUTRES LOCAUX	57
CUBF = 9420 - ESPACE DE PLANCHER INOCCUPÉ DONT L'USAGE SERAIT INDUSTRIEL	57
CUBF = 9451 - ESPACE DE PLANCHER INOCCUPÉ DONT L'USAGE SERAIT LA VENTE AU DÉTAIL	57
CUBF = 9452 - ESPACE DE PLANCHER INOCCUPÉ DONT L'USAGE SERAIT POUR DES FINS DE RÉPARATION (ATELIER)	57
CUBF = 9458 - ESPACE DE PLANCHER INOCCUPÉ DONT L'USAGE SERAIT POUR DE LA RESTAURATION	57

Tableau 3.26 Nombre de définitions par utilisation du sol (suite)

Utilisation du sol	N
CUBF = 9459 - AUTRES ESPACES DE PLANCHER INOCCUPÉS DONT L'USAGE SERAIT COMMERCIAL	57
CUBF = 9460 - ESPACE DE PLANCHER INOCCUPÉ DONT L'USAGE SERAIT POUR DES FINS DE SERVICES PROFESSIONNELS	57
CUBF = 9470 - ESPACE DE PLANCHER INOCCUPÉ DONT L'USAGE SERAIT POUR DES FINS CULTURELLES	57

Le tableau C.1 à l'annexe C.1 donne une liste des ensembles de règlements créés. La figure 3.33 montre le nombre d'ensembles de règlements par période. La période après l'harmonisation des règlements d'urbanisme (2009-aujourd'hui) comporte le plus d'ensembles de règlements par territoire puisque l'historique détaillé est compilé pour cette période alors que les autres ont une couverture nettement plus faible.

Ceci complète le survol des données requises pour stocker l'inventaire et la réglementation. La section suivante définira les objets informatiques implémentés pour représenter les quantités d'intérêts.

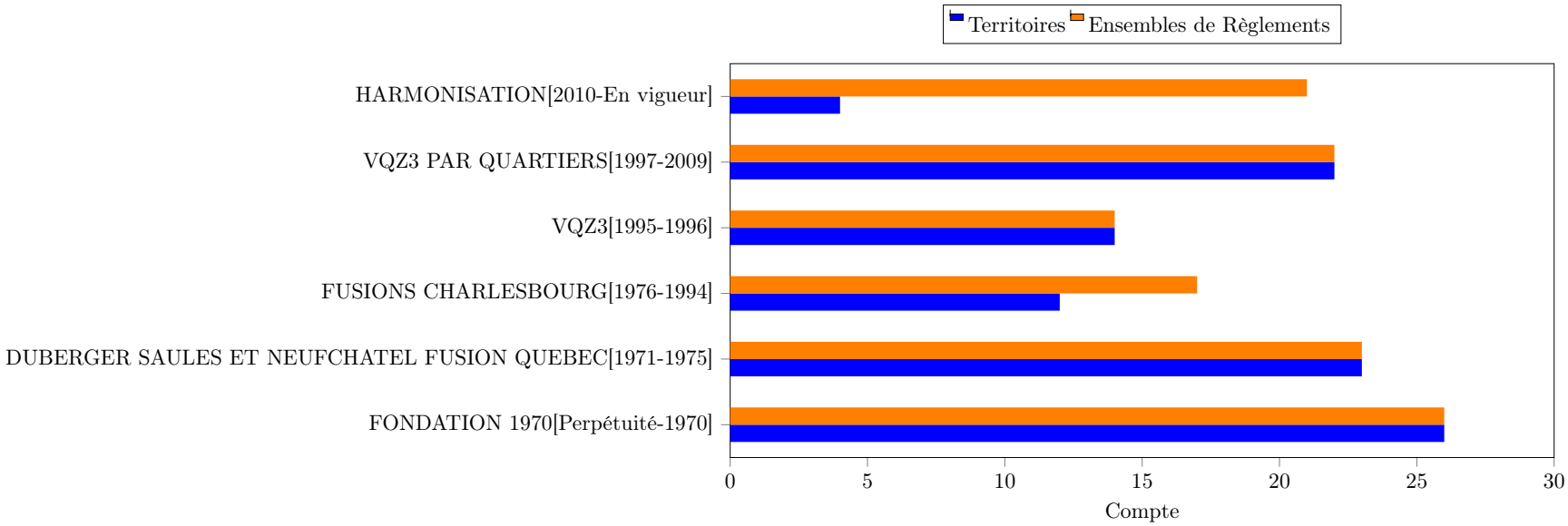


FIGURE 3.33 Compte d'ensembles de règlements par période géopolitique

3.5.10 Objets informatiques : Attributs, méthodes et utilitaires

Selon l'Office Québecois de la Langue Française (OQLF) (OQLF, 2006), les langages à objets sont définis de la manière suivante :

Définition 3. *Langage de programmation dans lequel les composantes d'un programme sont modulaires et définies comme des objets indépendants. [...] Les concepts d'encapsulation et d'héritage sont à la base des langages orientés objet. Ainsi, l'encapsulation permet la réunion des données et des procédures dans une même entité appelée objet.*

Ces langages sont associés à un degré d'abstraction où les objets représentent un concept associé au problème résolu. Les objets sont définis par des classes. Les classes ont des attributs les définissant et des méthodes qui modifient leurs attributs. Des fonctions utilitaires additionnelles peuvent être associées à un objet, par exemple pour le créer. Cela permet une représentation fonctionnelle du problème et met l'emphase sur les structures de données utilisées et tend à être utilisé pour des problèmes plus complexes et pour faciliter la maintenance et la compréhension (Lawhead, 2023). Pour ce projet, les classes suivantes suivantes ont été définies dans le cadre du mémoire.

— TaxDataset ou ensemble de données foncières (TD)
— ParkingRegulation ou règlement de stationnement (PR)
— ParkingRegulationSet ou ensemble de règlement (PRS)
— RegulationSetTerritory ou ensemble de règlements de territoire (RST)
— ParkingInventory ou inventaire de stationnement (PI)
— ParkingCalculationInputs ou entrées d'inventaire de stationement (PCI)

Classe TaxDataset ou ensemble de données foncières

L'ensemble de données foncières est constitué de 3 attributs représentés au moyen des librairies Pandas et GeoPandas. Quatre méthodes ont été implémentées pour filtrer les données foncières selon des critères liés à leurs attributs.

Tableau 3.27 Attributs, méthodes et utilitaires de la classe **TaxDataset**

Type	**Description**
Attributs	
tax_table	Rôle foncier incluant la géométrie (*GeoDataFrame*) (cf. Tableau 3.6).
association_table	Association du rôle foncier au cadastre (*DataFrame*) (cf. Tableau 3.7).
lot_table	Géométrie des lots du cadastre (*GeoDataFrame*) (cf. Tableau 3.8).
Méthodes	
plot	Crée un graphique *matplotlib* à partir des données.
explore	Génère une carte interactive HTML navigable dans un navigateur web.
year_filter	Filtre l'ensemble de données en fonction des années de construction.
territory_filter	Filtre les points du rôle foncier situés à l'intérieur d'un territoire.
select_by_land_uses	Filtre l'ensemble de données en fonction des CUBF.
get_land_uses_in_set	Renvoie la liste des CUBF présents dans l'ensemble de données.
Fonctions utilitaires	
tax_database_points_ from_date_territory	Renvoie un ensemble de données en fonction de l'identifiant du territoire, d'une date de début et d'une date de fin.
tax_database_for_ analysis_territory	Renvoie un ensemble de données pour un territoire d'analyse en fournissant l'identifiant du quartier

Classe ParkingRegulation ou Règlement de Stationnement

Cet objet représente un ou plusieurs règlements. Il est composé des tables suivantes :

Tableau 3.28 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingRegulation**

Type	**Description**
Attributs	
reg_head	Entête de règlement contenant les informations de la table entete_reg_stationnement (*DataFrame*) (cf. Tableau 3.14).
reg_def	Définition mathématique à appliquer pour le règlement donné (*DataFrame*) (cf. Tableau 3.15).
units_table	Table représentant les unités associées aux règlements définis (*DataFrame*) (cf. Tableau 3.17).
Méthodes	
get_city_regs	Renvoie les règles dont l'attribut ville correspond à la chaîne de caractères fournie.
get_current_reg	Renvoie les règlements dont l'année de fin est absente de l'entête.
get_regs_for_year	Renvoie les règlements en vigueur à l'année fournie.
get_reg_by_id	Renvoie les règlements dont les identifiants correspondent aux entiers fournis.
Fonctions utilitaires	
from_postgis	Renvoie un ou plusieurs règlements dont l'identifiant correspond à ceux fournis, en interrogeant la base de données *PostGIS*.

Classe ParkingRegulationSet ou ensemble de règlements

Un ensemble de règlements représente une liste de règlements en vigueur au même moment et affecte les règlements aux CUBF. Il a pour but de représenter un ensemble de règlements qui ont été en vigueur sur une période commune (et un territoire commun qui sera défini à l'aide d'un autre objet). Il hérite de l'objet PR en reprenant reg_def, reg_head et units_table auxquels s'ajoutent les attributs suivants :

Tableau 3.29 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingRegulationSet**

Type	**Description**
Attributs	
start_date	Date d'entrée en vigueur de l'ensemble de règlements.
end_date	Date d'abrogation de l'ensemble de règlements.
description	Chaîne de caractères décrivant textuellement l'ensemble.
association_table	Table contenant les associations entre les CUBF et les identifiants de règlements. Ces associations sont définies par l'utilisateur.
expanded_table	Table représentant les associations à l'ensemble des CUBF selon la convention décrite en 3.5.9. Générée automatiquement à partir de association_table
ruleset_id	Identifiant unique de l'ensemble de règlements.
land_use_table	Table des CUBF (cf. Tableau 3.23).
Méthodes	
validate_dates	Vérifie que les règlements qui composent l'ensemble sont valides pour la période de validité de l'ensemble.
verify_minimum_fill	Vérifie qu'au minimum, les entrées pour les CUBF 1 à 10 sont présentes afin de permettre la généralisation.
expand_land_ use_table	Génère la table `expanded_table` à partir de `association_table`.
get_unique_ reg_ids	Renvoie la liste des règlements utilisés dans l'ensemble de règlements.
get_unique_ reg_ids_using_land_use	Renvoie la liste des règlements utilisés pour les CUBF fournis en entrée.
get_parking_ reg_by_id	Renvoie un règlement dont l'identifiant correspond à celui fourni en entrée.
Fonctions utilitaires	
from_sql	Renvoie un ensemble de règlements dont l'identifiant correspond à celui fourni, à partir d'une requête SQL.

Classe RegSetTerritory ou ensemble de règlements de territoires

Un RST associe un territoire à un ensemble de règlements. Ces paramètres sont listés ci-dessous :

Tableau 3.30 Structure et fonctions principales de l'objet **RegSetTerritory** (RST)

Type	**Description**
Attributs	
assoc_id	Identifiant unique de l'association.
territory_info	*DataSeries* représentant une ligne dans la table cartographie_secteurs (cf. Tableau 3.12)
parking_regulation_set	Un PRS associé au territoire.
start_year	Année de début de l'association, correspondant au maximum entre l'année de début du PRS et la période à laquelle appartient le territoire.
end_year	Année de fin de l'association, correspondant au minimum entre l'année de fin du PRS et la fin de la période à laquelle appartient le territoire.
Fonctions associées	
get_postgis_ rst_by_terr_id	Renvoie une liste de RST associés au territoire dont l'identifiant est égal à l'entier fourni.
get_rst_by_tax_data	Renvoie deux listes : (1) une liste de RST qui ont une intersection spatiale avec les points du rôle foncier dans le TD ; (2) une liste de TD dont les points ont été construits pendant la période de validité du RST et se trouvent à l'intérieur du territoire.
explore_RST_TD	Crée une carte dynamique dans un fichier HTML permettant de visualiser les ensembles de données.

Classe ParkingCalculationInput ou intrant au calcul de stationnement

Le PCI hérite des DataFrame Pandas (Pandas contributors, 2025). La table a les colonnes suivantes :

Tableau 3.31 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingCalculationInput**

Type	**Description**
Colonnes dynamiques héritées du DataFrame	
g_no_lot	Identifiant du lot.
CUBF	Code d'utilisation du bien-fonds.
unite	Unité représentée par la ligne.
id_reg_stat	Identifiant du règlement à appliquer.
valeur	Valeur d'intérêt pour la prédiction en unités converties pour le lot et le règlement spécifiés
Méthodes	
get_by_reg	Renvoie les entrées associées à un règlement.
filter_by_threshold	Renvoie les entrées dont les valeurs se situent entre un seuil inférieur et un seuil supérieur.
get_by_unites	Renvoie les données associées à l'identifiant d'unités.
check_units_present	Vérifie la présence des unités requises pour chaque règlement.
Fonction additionnelle	
generate_input_ from_PRS_TD	Convertit les données foncières en données utilisables pour le calcul des capacités minimale et maximale selon les unités définies dans les règlements.

Classe ParkingInventory ou inventaire de stationnement

L'inventaire de stationnement a un seul attribut qui est un DataFrame :

TABLEAU 3.32 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingInventory**

Type	**Description**
parking_frame	Table décrivant l'inventaire (cf. Tableau 3.10)
Méthodes	
concat	Concatène deux inventaires pour former un seul ensemble cohérent.
to_postgis	Sauvegarde l'inventaire dans la base de données PostgreSQL/-PostGIS.
merge_lot_data	Vérifie la présence de multiples inventaires pour un même lot (si deux unités du rôle pour un même lot viennent d'un période différente). Applique inventory_duplicates_agg_function à chaque lot
Fonctions utilitaires	
subset_operation	Arbitre entre deux estimations lorsque le règlement impose des sous-ensembles distincts.
dissolve_list	Dissout une liste d'inventaires en un seul objet d'inventaire
inventory_duplicates_agg_function	Agrège les estimations de plusieurs périodes pour un même lot en additionnant les valeurs et en concaténant les références aux règlements, ensembles de règlements et CUBF
calculate_inventory_by_analysis_sector	Fonction d'entrée pour calculer un inventaire pour un secteur d'analyse donné
calculate_inventory_by_lot	Fonction d'entrée pour calculer la capacité de stationnement pour un lot spécifique.
to_sql	Sauvegarde l'inventaire avec vérification des doublons. Permet à l'utilisateur de confirmer le remplacement d'un estimé existant.
calculate_parking_for_reg_set_territories	Itère sur les RST fournis. Lance generate_input_from_PRS_TD et calculate_inventory_from_inputs_class

Tableau 3.32 Structure et méthodes principales de l'objet **ParkingInventory** (suite)

Type	Description
calculate_inventory_from_inputs_class	Itère sur les id_reg_set dans l'input classe et lance
calculate_parking_specific_reg_from_inputs_class	Itère sur les sous-ensembles de chaque PR et lance calculate_parking_subset_ from_inputs_class
calculate_parking_subset_from_inputs_class	Calcule la capacité de stationnement requise pour chaque sous-ensemble d'un règlement donné

Cette section a donné un aperçu de l'organisation des classes créées pour faire le calcul de l'inventaire à partir des données entreposées dans la base de données détaillée auparavant. La section suivante montrera schématiquement comment les différentes fonctions et méthodes sont utilisées pour sélectionner, assembler, et faire le traitement des données avant de les retourner à l'utilisateur.

3.5.11 Logigramme de la procédure d'estimation de la capacité

La méthode suivante est proposée pour le calcul de la capacité de stationnement basé sur les règlements d'urbanisme. Ce calcul est déclenché soit en sélectionnant un quartier à analyser, soit en demandant de calculer pour un lot particulier. Dans les deux cas, la procédure est la même. Le script de calcul a été implémenté en utilisant le langage Python. La figure 3.34 montre le logigramme de haut niveau pour l'approche par les minimums.

On commence par sélectionner les points du rôle foncier dans une zone prescrite, on trouve les municipalités actuelles et historiques qui interceptent l'ensemble des points, on trouve les ensembles de règlements qui sont associés à chaque territoire, on segmente ensuite les données du rôle foncier en fonction de la réglementation qui s'y applique, et on applique les règlements. Une fois les calculs complétés, on agrège les calculs par lot pour l'ensemble des périodes avant de les sauvegarder dans la table appropriée. Ce cas de figure arrive si deux entrées du rôle sur un même lot ont des dates de construction différentes.

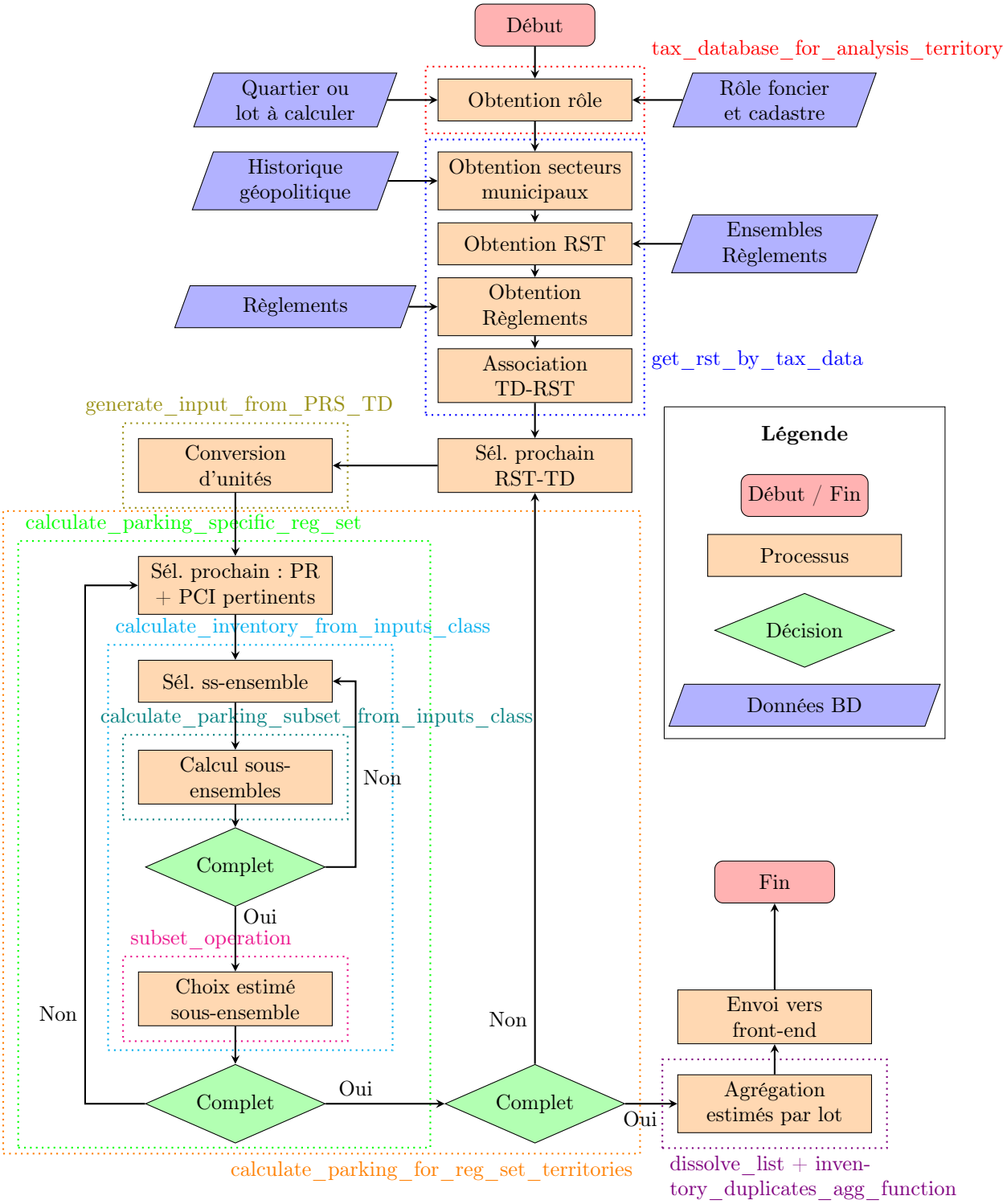


FIGURE 3.34 Logigramme de calcul

3.5.12 Procédure de sélection des données foncières

Le script commence par obtenir les entrées du rôle foncier qui se trouvent à l'intérieur du quartier visé comme montré à la figure 3.36. La requête SQL associe ensuite les entrées du rôle foncier au cadastre. Les requêtes SQL pertinentes sont données en annexe D.1. Le résultat

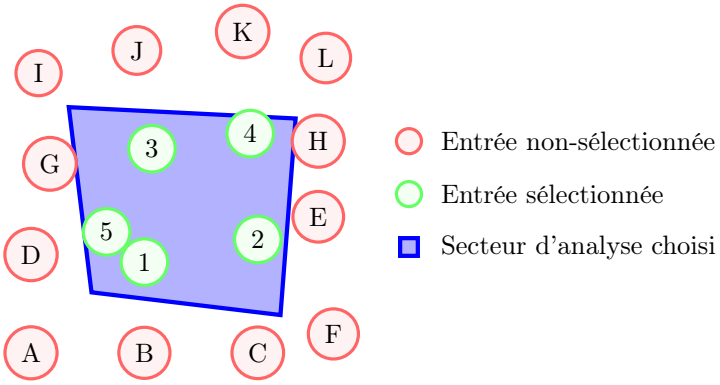


FIGURE 3.35 Sélection des entrées du rôle pertinentes pour un territoire donné

représente les limites et propriétés de lots, l'association entre les lots et les entrées du rôle. La figure 3.36 donne une représentation schématique d'un TD qui est une combinaison des données du rôle foncier et du cadastre.

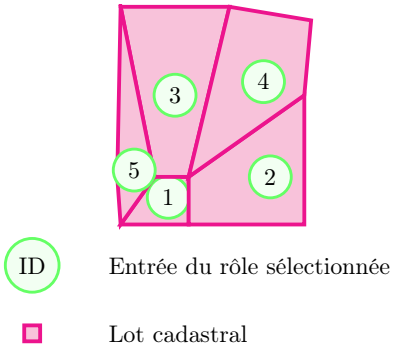


FIGURE 3.36 Représentation schématique d'un TD

3.5.13 Procédure de sélection des territoires et règlements

À ce stade-ci, le script a les entrées du rôle à l'intérieur d'un secteur d'intérêt. Le script utilise alors des requêtes spatiales pour trouver les territoires géopolitiques qui touchent aux points du rôle foncier. Les entrées du rôle foncier sont ensuite réparties entre les différents territoires historiques et se voient affecter un ensemble de règlements en fonction de la date

de construction. La figure 3.37 montre les dates de construction pour l'exemple de la figure 3.36.

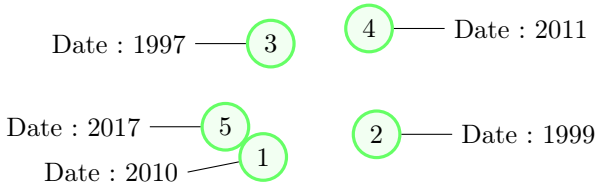
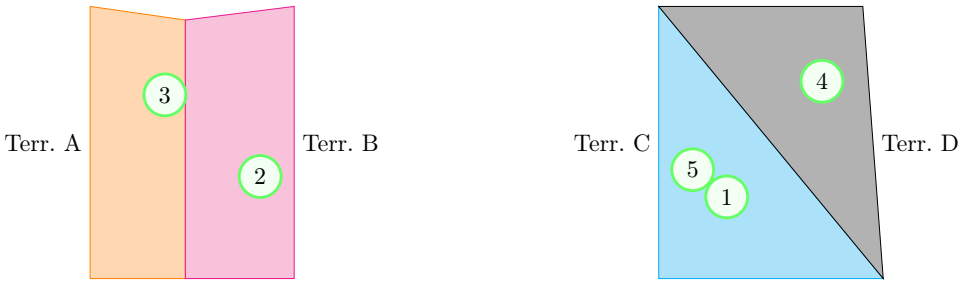


FIGURE 3.37 Affectations de dates à l'exemple de données foncières

Postulons un cas hypothétique où deux périodes couvrent ces 5 propriétés. La figure 3.38 montre comment les données foncières se répartissent sur les territoires en fonction de la date de construction.



(a) Période 1 : 1995-2009 (b) Période 2 : 2010-2017

FIGURE 3.38 Exemple d'historique géopolitique

Une fois les territoires obtenus, il faut aller chercher les ensembles de règlements associés aux territoires en question. Ces associations proviennent de la table association_er_territoire. Dans ce cas-ci, le territoire C a eu un changement de règlement en 2013 menant à la création d'un ensemble de règlements différents. La figure 3.39 montre l'affectation des ensembles de règlements aux territoires.

Les requêtes SQL et quelques morceaux de script Python sont présentés à l'annexe D.2

3.5.14 Procédure d'affectation des données foncières aux RST

Les données foncières obtenues initialement doivent ensuite être assignées à chaque ensemble de règlements en préparation à l'estimation de la capacité de stationnement. Cette opération est complétée dans une boucle au sein de la fonction get_rst_by_tax_tax_data. Les détails de cette boucle sont donnés à l'annexe D.3.

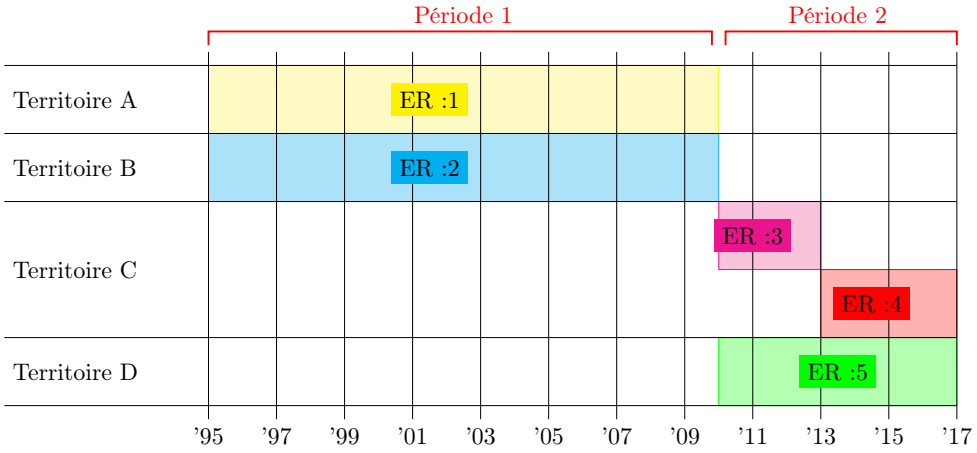


FIGURE 3.39 Représentation schématique de la validité des RST en fonction de la date et du territoire

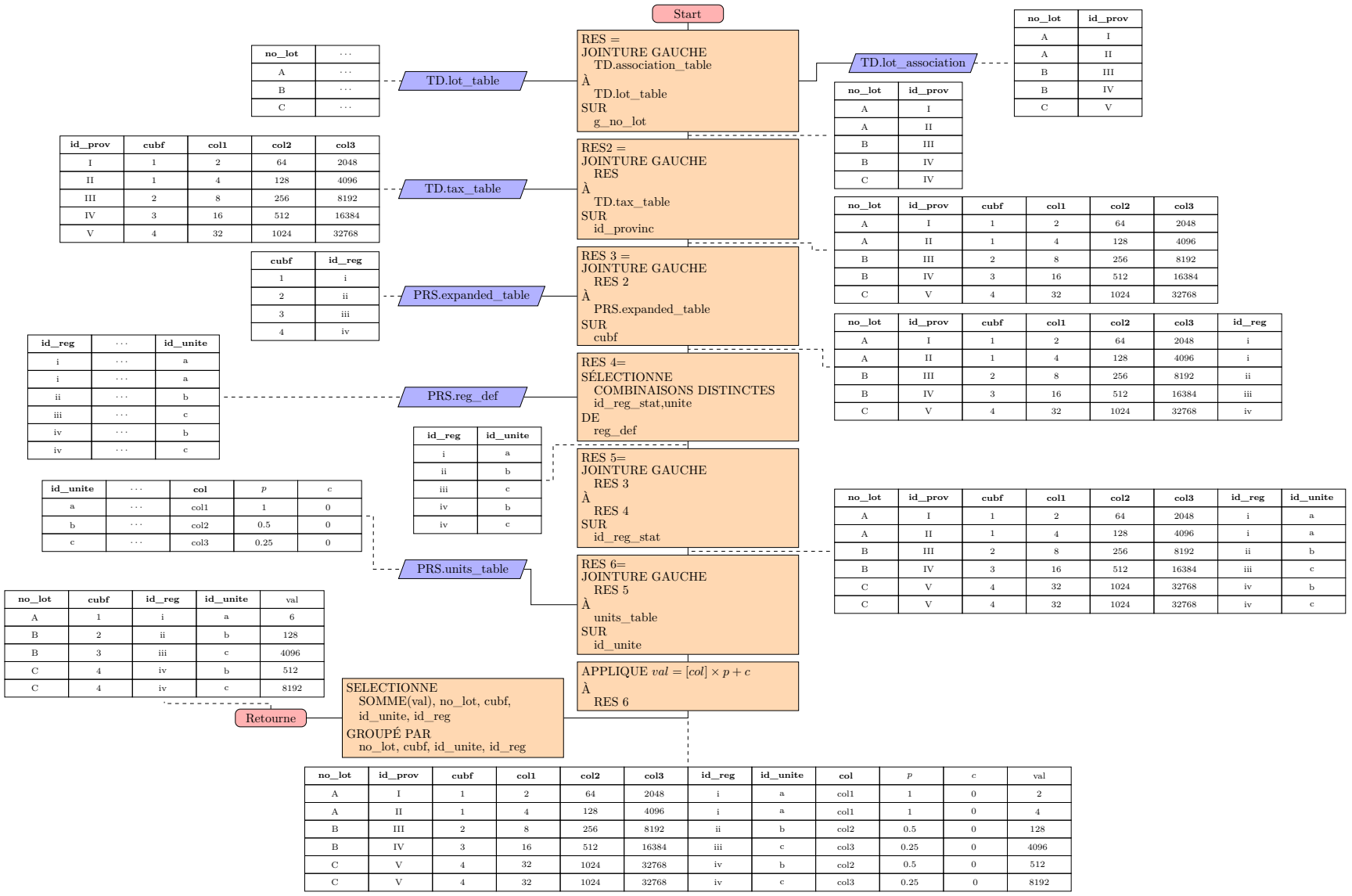
Cette boucle utilise deux fonctions : year_filter et territory_filter. Year filter extrait les points du rôle dont les dates de construction sont à l'intérieur de la plage de validité du RST. La méthode year_filter est donnée à l'extrait de code D.12.

La méthode territory_filter quant à elle élimine les points en dehors d'un territoire. On utilise alors la fonction Python « clip » (Geopandas developers, s. d.). L'extrait de code D.11 montre la fonction territory_filter.

La résultante de cet ensemble d'opérations est deux listes qui associent un RST avec un TD en fonction des limites géographiques et des dates de construction. Ces deux listes sont ensuite utilisées comme intrants pour l'estimation de la capacité. Le tableau 3.33 donne un aperçu de la liste pour le cas hypothétique dressée dans cette section.

TABLEAU 3.33 Affectation des éléments du rôle à un Ensemble de Règlements Territoire

Rôle	Ensemble Règlement Territoire			
	Période	Territoire	ER	RST
1	2	C	3	I
2	1	B	2	II
3	1	A	1	III
4	2	D	5	IV
5	2	C	4	V



no_lot	...
A	...
B	...
C	...

id_prov	cubf	col1	col2	col3
I	1	2	64	2048
II	1	4	128	4096
III	2	8	256	8192
IV	3	16	512	16384
V	4	32	1024	32768

cubf	id_reg
1	i
2	ii
3	iii
4	iv

id_reg	...	id_unite
i	...	a
i	...	a
ii	...	b
iii	...	c
iv	...	b
iv	...	c

id_unite	...	col	p	c
a	...	col1	1	0
b	...	col2	0.5	0
c	...	col3	0.25	0

no_lot	cubf	id_reg	id_unite	val
A	1	i	a	6
B	2	ii	b	128
B	3	iii	c	4096
C	4	iv	b	512
C	4	iv	c	8192

no_lot	id_prov
A	I
A	II
B	III
B	IV
C	V

no_lot	id_prov
A	I
A	II
B	III
B	IV
C	IV

no_lot	id_prov	cubf	col1	col2	col3
A	I	1	2	64	2048
A	II	1	4	128	4096
B	III	2	8	256	8192
B	IV	3	16	512	16384
C	V	4	32	1024	32768

no_lot	id_prov	cubf	col1	col2	col3	id_reg
A	I	1	2	64	2048	i
A	II	1	4	128	4096	i
B	III	2	8	256	8192	ii
B	IV	3	16	512	16384	iii
C	V	4	32	1024	32768	iv

no_lot	id_prov	cubf	col1	col2	col3	id_reg	id_unite
A	I	1	2	64	2048	i	a
A	II	1	4	128	4096	i	a
B	III	2	8	256	8192	ii	b
B	IV	3	16	512	16384	iii	c
C	V	4	32	1024	32768	iv	b
C	V	4	32	1024	32768	iv	c

no_lot	id_prov	cubf	col1	col2	col3	id_reg	id_unite	col	p	c	val
A	I	1	2	64	2048	i	a	col1	1	0	2
A	II	1	4	128	4096	i	a	col1	1	0	4
B	III	2	8	256	8192	ii	b	col2	0.5	0	128
B	IV	3	16	512	16384	iii	c	col3	0.25	0	4096
C	V	4	32	1024	32768	iv	b	col2	0.5	0	512
C	V	4	32	1024	32768	iv	c	col3	0.25	0	8192

FIGURE 3.40 Logigramme et exemple de conversion d'unités

3.5.15 Conversions d'unités

À ce stade, le logiciel aura nettoyé les données d'entrées de manière à avoir un TD et un RST prêts pour le calcul. Il faut maintenant convertir les unités du rôle foncier vers les unités dans lesquelles sont formulés les règlements. Ce processus est relativement simple et formalise simplement les associations décrites aux sections précédentes. La figure 3.40 montre le processus avec des données simples fixées comme exemple.

3.5.16 Procédure de calcul des minimums

Comme le montre le logigramme à la figure 3.34, les TD et RST obtenus voient d'abord un PCI calculé avant de compléter l'estimation de la capacité à l'aide de la fonction calculate_parking_for_reg_set_territories. La conversion d'unités est gérée par la fonction generate_input_from_PRS_TD. Une fois la conversion complétée, les données sont envoyées à calculate_parking_reg_set. Des boucles imbriquées sont utilisées pour traiter chaque RST, PRS, PR et sous-ensembles de règlement successivement. Le cœur de la fonctionnalité se trouve dans deux fonctions : calculate_parking_subset_ from_inputs_class et subset_operation. La première calcule les requis de stationnement et la deuxième fait un choix de l'estimation à utiliser s'il y a plusieurs sous-ensembles.

Calcul des sous-ensembles : calculate_parking_specific_reg

Cette fonction calcule le nombre de places de stationnement pour un sous-ensemble de règlements. Le logigramme 3.41 détaille la procédure. Le code est disponible à l'annexe D.5 pour l'opérateur d'addition (1) et à l'annexe D.6 pour l'opérateur de seuil (4) ou sur GitHub (Charbonneau, 2025a).

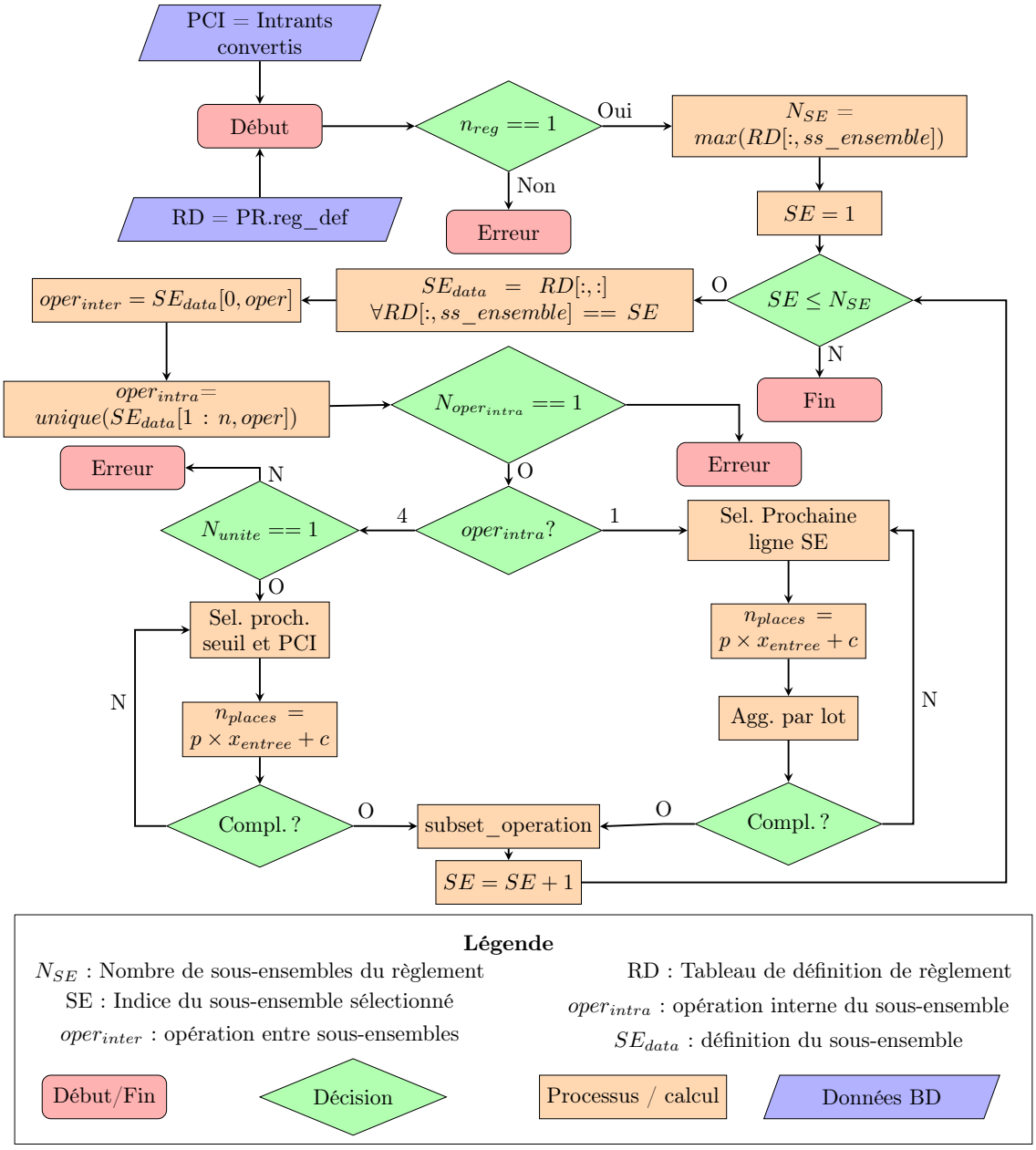


FIGURE 3.41 Logigramme de calcul d'un règlement

Arbitrage entre deux sous-ensembles : subset_operation

Une fois qu'une estimation est calculée pour chaque sous-ensemble d'un règlement, il est nécessaire d'arbitrer sur quel sous-ensemble prend préséance. Cet arbitrage est fait par une succession de décisions logiques. Deux conditions peuvent s'appliquer : un « ou simple » ou un « ou plus contraignant ». Le logigramme 3.42 montre la procédure d'arbitrage et le code est disponible à l'annexe D.7. Maintenant que la procédure de calcul est définie, la

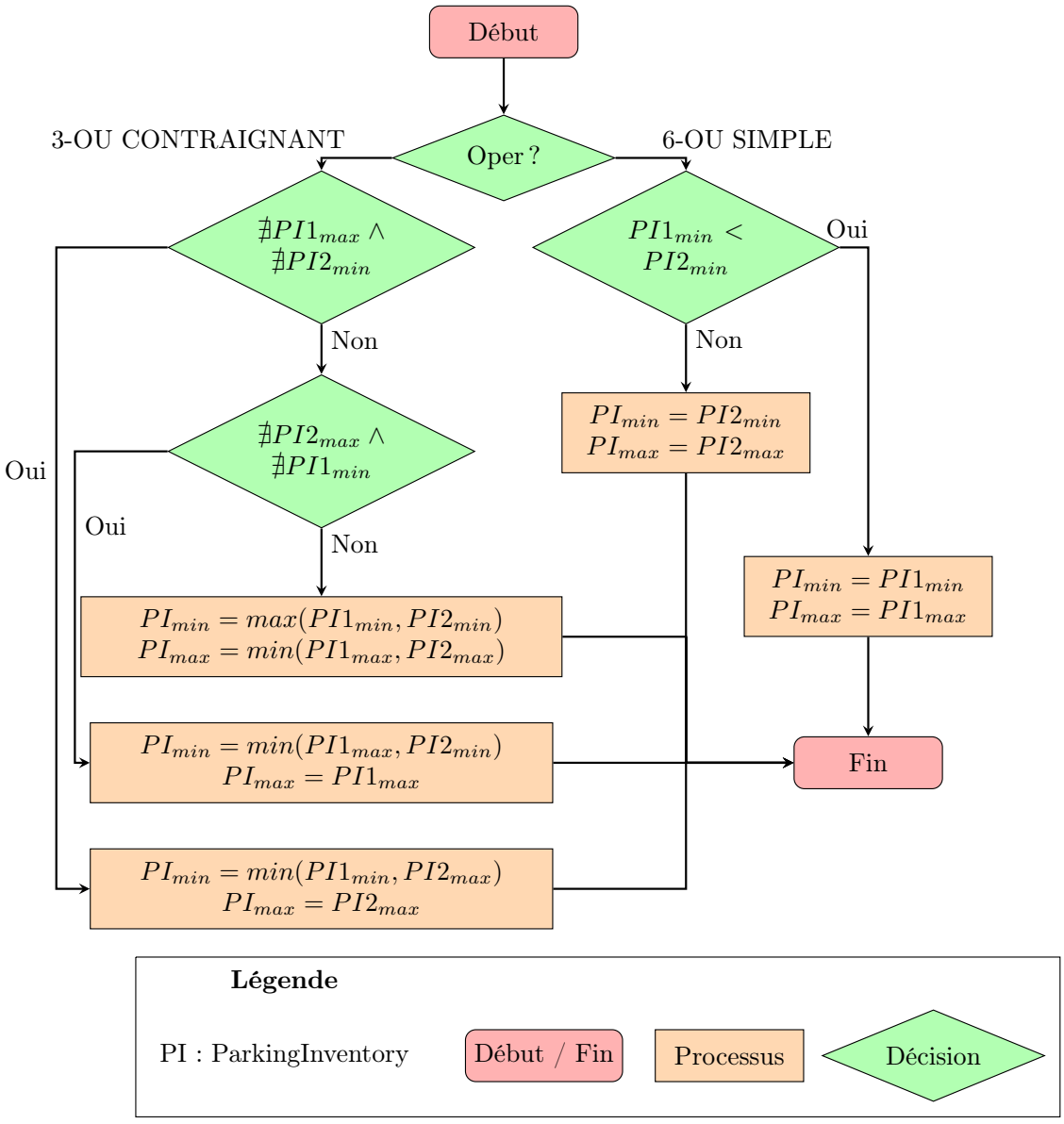


FIGURE 3.42 Arbitrage entre deux estimations

section suivante discutera des structures de données et des méthodes utilisées pour créer un échantillon de validation et les méthodes pour quantifier l'erreur du modèle d'estimation.

3.6 Évaluation quantitative du modèle de dénombrement

Comme il est mentionné dans la revue de littérature, la validation de modèles est une étape indispensable pour donner assez de confiance aux décideurs dans l'établissement de politiques publiques. Cette section va donner un aperçu de la méthodologie utilisée en première approche. Des recommandations pour une validation plus systématique seront données en conclusion du mémoire.

3.6.1 Sélection de lots pour l'évaluation

Un échantillon de lots a été tiré au hasard pour faire la validation du dénombrement. Puisqu'on essaie de qualifier le modèle par rapport à la réalité, les lots avec des données partielles ont été ignorés puisqu'on sait que les prédictions seront erronées pour ces lots.

Une interface graphique a donc été créée pour permettre à l'utilisateur de créer l'ensemble de lots de validation et d'agréger des statistiques par catégorie. Ces catégories ont une définition récursive permettant à chaque strate d'avoir un ensemble de sous-catégories. Cette fonctionnalité peut être utile par exemple pour valider un segment de la population de lots cadastraux de manière plus fine. L'interface permet de modifier les strates laissant de la flexibilité à l'utilisateur final. Les tailles d'échantillons et de population sont en nombre de lots. Tout cela étant dit, les études futures devraient utiliser la connaissance a priori de l'erreur

Tableau 3.34 Synthèse de sélection de lots de validation

Description	Conditions	$n_{choisis}$	N	Données valides ?		
				Année	N_{log}	Aire
Usage mixte	$N_{\text{CUBF}} > 1$	30	156	Oui	s.o.	Oui
Usage unique	$N_{\text{CUBF}} = 1$	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
Résidentiel	$1000 \leq \text{CUBF} \leq 1999$	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
Unifamilial	$N_{log} = 1$	30	97748	Oui	Oui	s.o.
Multi plex	$2 \leq N_{log} \leq 8$	30	23621	Oui	Oui	s.o.
Grands immeubles	$9 \leq N_{log}$	30	2465	Oui	Oui	s.o.
Industriel	$2000 \leq \text{CUBF} \leq 3999$	30	176	Oui	s.o.	Oui
Commerces	$5000 \leq \text{CUBF} \leq 5999$	30	1552	Oui	s.o.	Oui
Services	$6000 \leq \text{CUBF} \leq 6999$	30	1623	Oui	s.o.	Oui
Assemblée	$7000 \leq \text{CUBF} \leq 7999$	30	149	Oui	s.o.	Oui
Résidus		0	13286	s.o.	s.o.	s.o.
Total		240	140776			

de la méthode de prédiction pour modifier la structure des catégories pour mieux quantifier l'erreur.

Le tableau 3.34 donne les paramètres des catégories d'évaluation choisies. Une allocation de 30 lots a été mise en place pour chaque catégorie.

3.6.2 Méthode de quantification de l'erreur du modèle

Une approche descriptive basée sur les métriques de statistique prédictive est proposée pour évaluer la précision des prédictions du modèle. Une approche normative aurait été également valide et aurait utilisé des méthodes d'équivalence discutées à l'annexe A. Elle a été mise de côté du fait de l'absence de seuils clairs qui décrivent la précision requise dans différents contextes d'étude.

Concernant la métrique d'intérêt, ce mémoire se concentrera sur l'erreur moyenne absolue. L'erreur moyenne (indiquant un biais) est aussi rapportée.

Une approche par autoamorçage avec extraction des centiles avec 2000 répétitions est utilisée pour fournir des intervalles d'erreur moyenne et d'erreur absolue moyenne . Cette procédure sous-estime fort probablement la variance puisqu'elle n'inclut pas la nature spatiale des données (Castillo-Páez et al., 2019). Elle devrait être revue dans le futur. Le nombre d'itérations a été fixé arbitrairement au début de l'étude. Une analyse de sensibilité a montré que les intervalles calculés étaient stables au-delà de 500 itérations. Le point de départ a été conservé, car le temps d'exécution était acceptable à 2000 itérations. Il est important de noter que cette métrique ne statue que sur la manière dont le choix d'échantillon influence l'erreur. Il ne peut statuer sur la manière dont la formulation influence l'erreur. Pour le lot sélectionné, l'erreur entre la prédiction et l'observation est donnée par :

$$e_{h,i} = y_{h,i,o} - y_{h,i,p} \tag{3.4}$$

où $e_{h,i}$ est l'erreur pour le lot i de la catégorie h, $y_{h,i,o}$ est le nombre observé de places de stationnement, $y_{h,i,p}$ est le nombre prédit de places soit $\lceil y_{h,i,min} \rceil$ le nombre minimum de places requis, arrondi à l'entier supérieur.

Cette procédure est développée séparément de l'outil principal. Ceci est dû à un manque de temps pour l'intégrer dans l'outil principal. Les scripts de validation peuvent être trouvés sur un dépôt GitHub supplémentaire (Charbonneau, 2025b). La section 4.3 montrera que certaines strates ont de fortes variations d'erreur avec le nombre de places prédites même en filtrant les données aberrantes facilement identifiables. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est aussi quantifiée ponctuellement (sans autoamorçage). Cette métrique tend à être plus sensible aux fortes erreurs.

3.6.3 Structure de données de l'échantillon d'évaluation des prédictions

L'évaluation du modèle requiert une structure de données pour définir les catégories pour la validation, entreposer les résultats et des données accessoires. La figure 3.43 montre le diagramme entité-relation des données utilisées pour les conditions de sélection des lots.

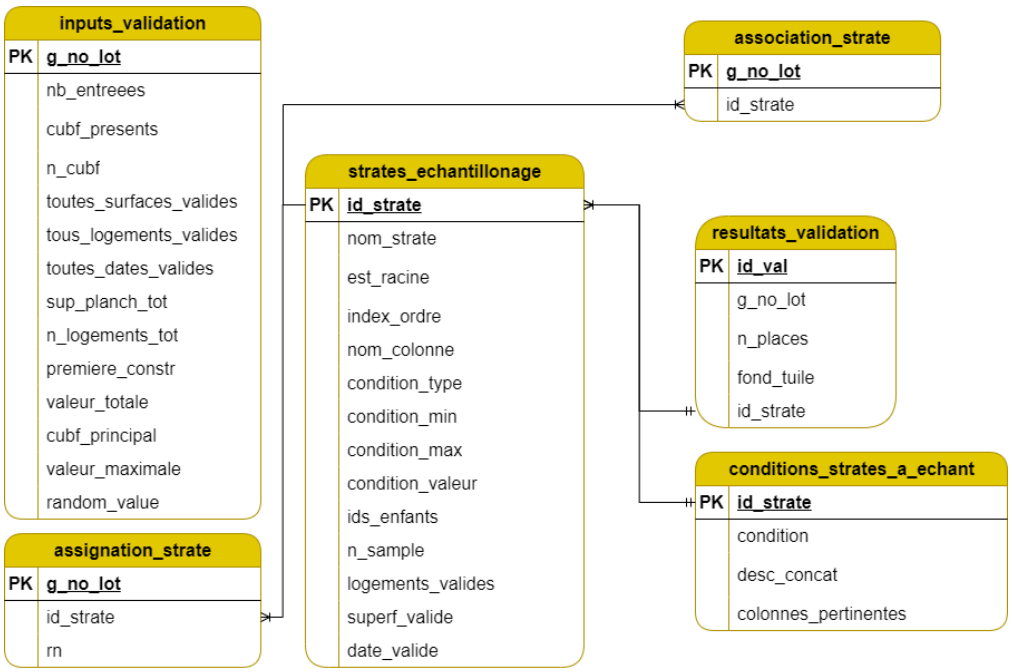


FIGURE 3.43 Diagramme entité association pour l'évaluation de performance du modèle de prédiction

Définition des catégories de validation

La table strates_echantillonnage contient la définition des paramètres pour les catégories de validation. Les catégories sont définies de manière récursive c'est-à-dire qu'une catégorie peut définir des enfants avec la même structure de données. Les sous-catégories héritent des conditions fixées aux parents. Les parents ne se voient pas eux-mêmes fixer un échantillon, mais servent de réceptacle pour les sous-catégories. Cette approche permet de créer chaque catégorie avec une seule condition plutôt que de devoir affecter plusieurs conditions à une même catégorie. Si cette approche avait été poursuivie, il aurait fallu définir une table de définition des catégories avec une association à plusieurs conditions qui seraient dans une table séparée. Le tableau 3.35 donne la définition de la table strates_echantillonnage.

Tableau 3.35 Colonnes pour la table strates_echantillonnage

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_strate	Identifiant de la strate	Entier	CP
nom_strate	Description de la strate visible à l'usager	Texte	
est_racine	Booléen pour indiquer que la strate est un point d'entrée	Booléen	
index_ordre	Paramètre non utilisé pour changer l'ordre d'affichage	Entier	
nom_colonne	Nom de la colonne à laquelle s'applique la condition	Texte	
condition_type	Type de condition	Texte — « range » — « equals »	
condition_min	Minimum de l'étendue si condition_type est range	Float	
condition_max	Maximum de l'étendue si condition_type est range	Float	
condition_valeur	Valeur de la colonne si condition_type est equals	Float	
ids_enfants	Identifiants des strates enfants	Liste d'entiers	
n_sample	Taille de l'échantillon	Entier	
logements_valides	Spécifie si les membres de la strate doivent avoir des valeurs de logements présentes sur toutes les entrées du lot	Booléen — Vrai = doit être vrai — Faux = doit être faux — NULL = est ignoré	

Tableau 3.35 Colonnes pour la table strates_echantillonnage (suite)

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
dates_valides	Spécifie si les membres de la strate doivent avoir une date de construction valide sur toutes les entrées du lot	Booléen — Vrai = doit être vrai — Faux = doit être faux — NULL = est ignoré	
superf_valide	Spécifie si les membres de la strate doivent avoir une superficie valide sur toutes les entrées du lot	Booléen — Vrai = doit être vrai — Faux = doit être faux — NULL = est ignoré	

Une fois la définition des catégories complétées, des manipulations sont nécessaires au rôle et au cadastre pour pouvoir appliquer les conditions spécifiées dans condition_type, condition_min, condition_max et condition_valeur. La table qui stocke les manipulations est discutée à la prochaine section.

Intrants pour sélectionner l'échantillon

Les données de lots pour la sélection sont agrégées dans la table inputs_validation. Ce sont des valeurs du rôle foncier agrégées par lot ainsi que des tests logiques pour le nombre de CUBF sur le lot et une affectation de l'utilisation principale en fonction de la valeur au rôle. Les données sont compilées à l'aide de la requête présentée à l'annexe D.13. Les champs de la table sont donnés au tableau 3.36. Toutes les colonnes à l'exception de random_value et g_no_lot peuvent être sélectionnées comme conditions dans la table strates_echantillonnage.

Tableau 3.36 Colonnes pour la table inputs_validation

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
g_no_lot	Identifiant de lot	Texte	CP
nb_entrees	Nombre d'entrées du rôle pour le lot	Entier	
cubf_presents	Liste des CUBF uniques pour le lot	Entier	
n_cubf	Nombre de codes d'utilisation du bien fonds	Entier	
toutes_surfaces_valides	Booléen indiquant que toutes les entrées du rôle ont l'aire d'étage disponible	Booléen	
tous_logements_valides	Booléen indiquant que toutes les entrées du rôle ont un nombre de logements spécifiés	Booléen	
toutes_dates_valides	Booléen indique que toutes les entrées du rôle ont des dates de construction entrées	Booléen	
sup_planch_tot	Superficie totale de plancher du lot	Float	
n_log_tot	Nombre de logements total sur le lot	Entier	
premiere_constr	Première année de construction sur le lot	Entier	
valeur_totale	Valeur totale inscrite au rôle pour le lot	Entier	
cubf_principal	CUBF de l'entrée du rôle avec la plus grande valeur	Entier	
random_value	Valeur pseudo-aléatoire affectée au lot	Réel	

La valeur random_value est générée par une fonction cryptographique implémentée dans PostgreSQL à partir de l'identifiant du lot (PostgreSQL Global Development Group, 2025b). Cette approche permet d'avoir toujours les mêmes lots dans la sélection pendant le développement tout en assurant que la sélection est aléatoire. Des approches alternatives seront discutées à la conclusion si l'outil venait à être mis en production. Une fois ces statistiques agrégées et un chiffre pseudoaléatoire affecté à chaque lot, il faut sélectionner l'échantillon de validation. Cela est fait en sélectionnant le nombre requis de lots n_{sample}. Les lots avec les

n_{sample} plus petites valeurs de la variable aléatoire sont sélectionnées et affectées à l'échantillon. L'outil crée aussi une table d'association à la strate pour tous les lots pour pouvoir trouver les lots avec des propriétés similaires après la validation. La section suivante donner les détails sur les tables contenant les affectations aux strates.

Association des lots aux strates et affectation à l'échantillon d'évaluation

La table association_strate est principalement destinée à des fins de vérification d'affectation aux strates. Elle contient seulement deux champs : id_strate, l'identifiant de strate et g_no_lot l'identifiant de lot.

La table assignation_strate contient les échantillons choisis pour l'évaluation et contient n_sample entrées pour chaque strate. Les champs sont les suivants : id_strate, g_no_lot et rn, le rang du chiffre aléatoire assigné au lot dans le tableau 3.36. Maintenant que l'échantillon est sélectionné, il reste à aller faire le comptage et sauvegarder cette valeur. La section suivante donnera les détails sur la table utilisée à cet effet.

Résultats de validation

La table resultats_validation contient le relevé terrain du nombre de places de stationnement pour les lots sélectionnés. Le fond de tuile utilisé, l'identifiant de strate et un identifiant unique sont aussi sauvegardés.

Tableau 3.37 Colonnes pour la table resultats_validation

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_val	Identifiant unique d'entrée	Entier	CP
id_strate	identifiant de strate	Entier	CS
g_no_lot	Identifiant de lot	Texte	CS
n_places	Nombre de places comptées	Entier	
fond_tuile	Identifiant de fond de tuile lors de la sauvegarde	Texte : — OSM — Géodésie Québec — ESRI	

Propriétés des catégories sans enfants

Comme mentionné au début de la section, les catégories sont définies de manière récursive. Cela complique l'affichage de titres et la création des conditions nécessaires à la sélection des lots. La table conditions_strates_a_echant est donc une table de diagnostic et d'aide à l'affichage. Le tableau 3.38 donne les champs de cette table. Il est important de noter que les conditions listées ici sont typiquement utilisées à des fins de diagnostic. Les conditions sont toujours régénérées dans le serveur à partir de la définition dans la table strates_echantillonnage.

Tableau 3.38 Colonnes pour la table conditions_strates_a_echant

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_strate	Identifiant unique de strate	Entier	CP
condition	Condition en format SQL pour extraire les données	Texte	
desc_concat	Concaténation des noms des strates parents de la strate	Texte	
colonnes_pertinentes	Colonnes utilisées dans la requête	Liste de texte	

Maintenant que la méthode d'évaluation et la structure de données qui y est rattachée sont définies, il reste à détailler comment l'interface fonctionne.

3.7 Outil de gestion proposé

La section 3.5 a décrit la méthode utilisée pour entreposer les informations réglementaires et calculer une estimation à partir de ces informations. Cependant, la création de cette réglementation est onéreuse et peu intuitive. Cette section visera à proposer un outil qui permet de générer la réglementation, d'en extraire l'information pertinente, et de permettre à des praticiens d'accéder aux estimations de capacités pour d'autres études. La section commence par discuter des requis informels mis en place en début de projet avant de montrer comment l'outil est implémenté. Les détails d'implémentation sont discutés dans la section des résultats d'outils à la section 4.1.

3.7.1 Requis

Interface avec la base de données et cohérence des données En premier lieu, il doit être possible de créer, modifier et supprimer des données sur la base de données tout en assurant la cohérence des données. Idéalement, il serait possible d'automatiser des fonctionnalités de validation de la base de données pour trouver de potentielles erreurs dans les données fournies.

Calcul réglementaire basé sur les données foncières L'interface doit permettre la création d'une estimation à partir des données du rôle foncier au moyen de l'algorithme détaillé dans la section 3.5. Il devrait ensuite être possible de valider les estimations contre un échantillon d'évaluation.

Calcul réglementaire avec entrée manuelle Environ 30 à 35% des lots commerciaux et de service dans le rôle foncier n'ont pas de superficies listées. L'implémentation d'une méthode semi-automatique est un outil qui permet de pallier cet enjeu en partie. Si une conversion est mal implémentée, cette fonctionnalité permet aussi de rapidement modifier le résultat tout en gardant la prédiction automatique stockée.

Entrée manuelle d'une capacité de stationnement L'outil doit permettre la saisie d'un comptage manuel sur un lot.

Comparaison des ensembles de règlements L'outil doit permettre de faire une comparaison graphique entre différents ensembles de règlements pour différentes utilisations du sol en fonction du temps et de la géographie.

Visualisation de l'estimation du nombre de places sur un territoire L'outil devra permettre une représentation graphique de l'estimation à différents niveaux d'agrégation (quartier, territoire complet).

Capacité de créer un échantillon de validation L'outil doit permettre de créer des échantillons de lots selon des critères définis par l'utilisateur pour évaluer la précision du modèle.

Accessibilité à partir de tierces parties Une partie ou l'ensemble des données devra être accessible à partir d'autres scripts au moyen d'une API. Le but sera ici d'assurer que les données générées puissent être utilisées pour comprendre l'effet de l'offre de stationnement sur les comportements de mobilité dans le contexte québécois.

3.7.2 Architecture de l'outil proposé

Différentes solutions peuvent être envisagées pour gérer des données spécialisées. Une estimation de la capacité de stationnement pourrait être générée et interprétée dans différents logiciels (SIG, tableurs), mais cela rend la création, le maintien et l'interprétation et la visualisation des estimations complexes, particulièrement si plusieurs estimations doivent cohabiter. Alternativement, un outil spécialisé peut être créé. Cette approche a été privilégiée principalement parce que l'auteur avait de la difficulté à s'y retrouver en devant se référer uniquement à des tables. Différentes implémentations sont cependant possibles.

Ce dernier peut être un logiciel installé sur les ordinateurs personnels de différents analystes ou une application web avec une infrastructure centralisée pour faire les calculs et publier l'information, ou une solution hybride avec une infrastructure centralisée qui est utilisée pour la sauvegarde des données avec un outil local pour manipuler les valeurs.

La solution entièrement en ligne a été retenue pour plusieurs raisons. Premièrement, cela évite la duplication d'information et permettrait à un organisme de maintenir l'inventaire et de le rendre disponible à d'autres parties prenantes pour faire des analyses. D'autre part, cela permet de centraliser les ressources de calcul et de mettre à jour l'outil au besoin sans avoir à assurer le support de différentes versions. Ce type d'implémentation serait aussi compatible avec l'utilisation des données par d'autres logiciels. Ces derniers feront alors appel à l'API. Le diagramme 3.44 montre comment les différents utilisateurs et grands blocs interagissent.

Ce type d'arrangement est typique dans les applications web (Chernenko, 2024). Dans ce cas, un morceau de code TypeScript est téléchargé sur la machine « client » à partir du serveur. Cet ensemble de procédures informatiques fait le rendu de la page web. Les informations

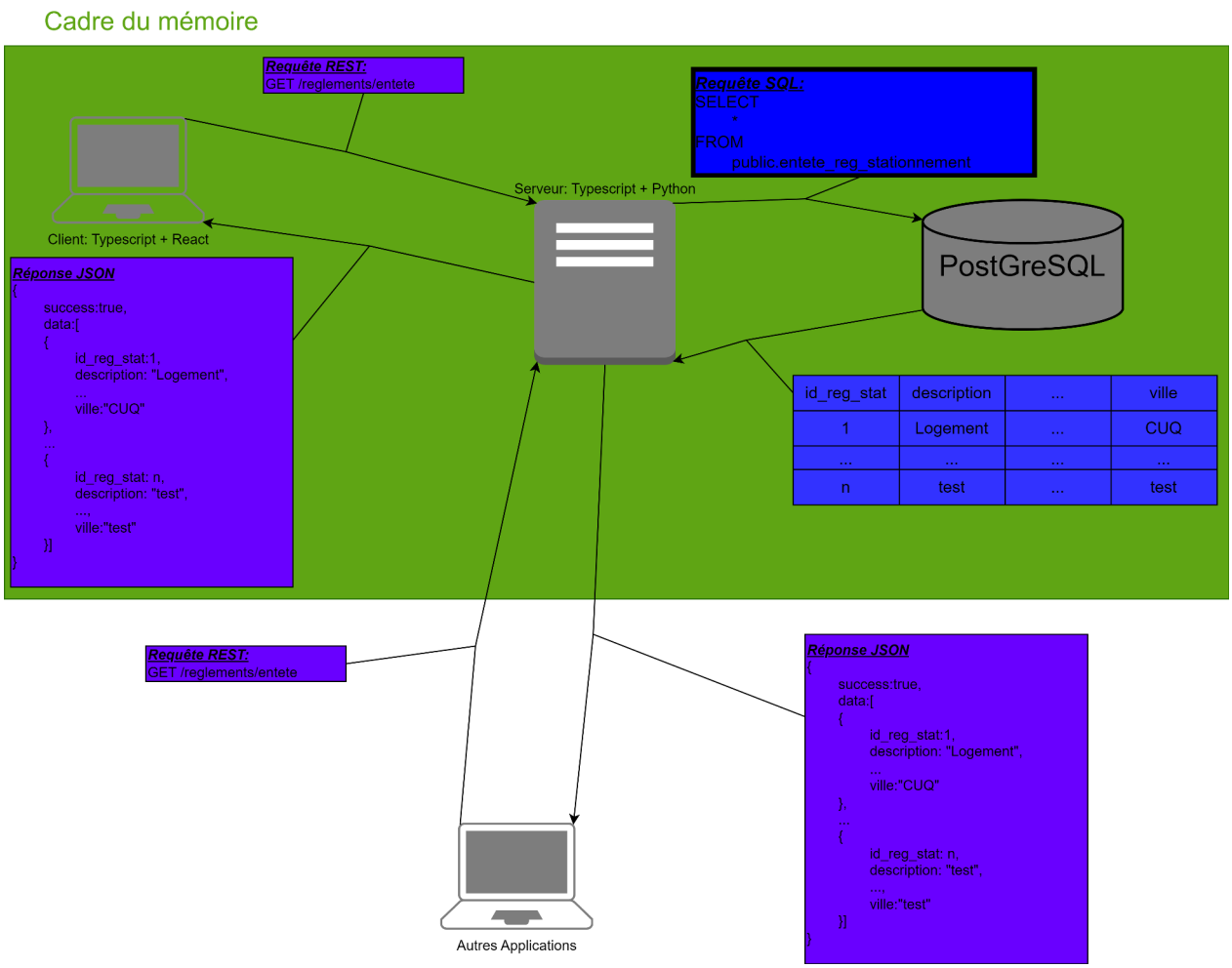


FIGURE 3.44 Architecture de l'outil développé dans le cadre du mémoire

et les données sont demandées par le script « client » au serveur de données qui renvoie les données pertinentes à la requête.

L'API est un format de requête utilisée entre le script « client » qui fonctionne sur le fureteur et les scripts « serveur » qui interagissent avec la base de données. L'implémentation proposée reprend librement le standard Representational State Transfer (REST) (Fielding, 2000) qui transmet les requêtes et les réponses au moyen du protocole HyperText Transfer Protocol (HTTP). Ce type d'interface a typiquement 4 grandes fonctions : GET, PUT, POST, DELETE. GET sert à obtenir un élément de la base de données. PUT permet de modifier un élément déjà existant. POST permet de créer un nouvel élément dans une table. DELETE sert à supprimer un élément. Le chemin (Uniform Resource Identifier (URI)) auquel ces instructions sont transmises détermine quelle table dans la base de données est consultée

ou modifiée. Une liste complète des variations de GET/PUT/POST/DELETE, d'URI et de paramètres est dressée à l'annexe B. Une synthèse visuelle de l'API est dressée à la section 4.1.2.

D'autre part, de l'information peut être envoyée dans l'URI ou dans le corps du message. Dans le cas de l'URI, un identifiant peut être communiqué dans l'adresse directement qui peut être ainsi lu. Ceci est souvent le cas quand on connait l'identifiant unique de l'élément à obtenir. L'autre option pour l'URL consiste à communiquer l'information au moyen de requête de filtrage (« query parameters » en anglais). Ces derniers sont implémentés en insérant un point d'interrogation dans l'URI , puis en séparant les paramètres de recherche par des &. Ce type d'implémentation est souvent mis en place si l'identifiant n'est pas disponible. Dans le cadre de ce mémoire, ce type d'implémentation est principalement mis en place pour la recherche de règlement. Ainsi, un appel d'API pour des règlements dont la date de début est après 2008 serait un appel GET à l'adresse « /api/reglements/entetes ?annee_debut_après=2008 ». Dans le cas de figure où l'on connait l'identifiant, par exemple si l'on veut voir les détails d'un règlement à la requête de l'utilisateur, on pourrait faire l'appel GET à l'adresse « /api/reglements/complet/<id> » où l'identifiant est directement spécifié dans l'adresse sans chaîne de caractère supplémentaire. L'information peut aussi être contenue dans le corps du message plutôt que dans l'adresse. Ce type de fonctionnalité est principalement utilisé pour les cas de figure où l'on veut modifier ou créer un élément dans la base de données.

Le code principal est structuré dans un dépôt GitHub (Charbonneau, 2025a). La structure du dossier est donnée à la figure 3.45. Le dépôt est structuré à l'aide de trois grands dossiers : « client » où les fichiers envoyés au fureteur sont entreposés, « serveur » où sont entreposés les scripts TypeScript qui gèrent la plupart des requêtes de données et « serveur_calcul_python » qui contient des scripts Python qui gèrent les requêtes plus complexes. Le reste de la section élaborera la structure des dossiers et des fichiers de paramétrage.

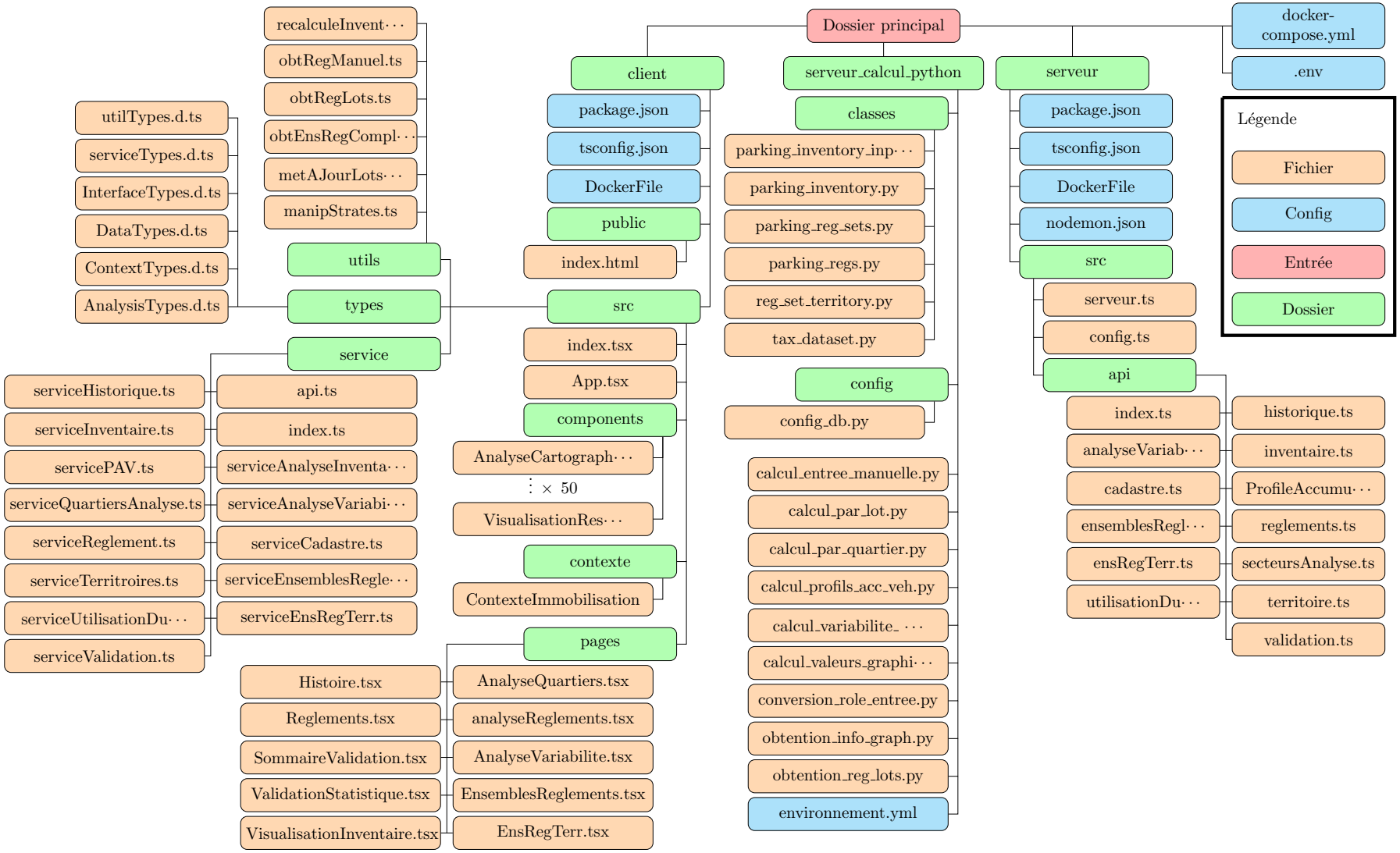


FIGURE 3.45 Structure du dossier de programmation

Le dossier « client » contient les scripts qui gèrent le rendu de l'application sur le fureteur de l'utilisateur. Le fichier « index.html » est le point d'entrée du site web qui navigue via « index.tsx » et « App.tsx » aux 10 pages implémentées dans le dossier « pages ». Ces pages sont constituées de composantes qui se trouvent dans le dossier « components ». Les composantes ou les pages utilisent les scripts situés dans le dossier « service » pour faire des requêtes au moyen du protocole formalisé par l'API au serveur qui lui fait l'interaction avec la base de données. Les types sont définis dans le dossier du même nom. Finalement, le dossier « utils » contient des utilitaires qui sont utilisés par plusieurs pages ou requièrent des manipulations plus complexes et sont implémentés séparément. Les fichiers « package.json » et « tsconfig.json » sont des fichiers de configuration. Le premier définit les librairies externes à installer tandis que le deuxième fixe la configuration TypeScript.

Les fonctionnalités exécutées sur le serveur sont implémentées dans deux dossiers. Le premier est nommé « serveur » et sert de point d'entrée pour les requêtes formulées selon le standard défini par l'API. Les requêtes faites au serveur sont acheminées via le script « serveur.ts » à « index.ts » dans le dossier « api ». « index.ts » achemine ensuite les requêtes aux 12 scripts (« historique.ts », « Inventaire.ts », etc.) qui gèrent chacun les opérations pour un grand type de donnée. Les scripts exécutent des requêtes SQL et formatent les données pour les renvoyer au client. Encore une fois, des fichiers « package.json », « tsconfig.json » configurent les librairies et Typescript. « nodemon.json » quant à lui configure des fonctions pour permettre le débogage.

Lorsqu'une opération ne peut être faite par une simple requête SQL, les 12 scripts peuvent lancer un des 9 scripts Python dans la racine du dossier « serveur_calcul_python ». Ils appellent des fonctions et méthodes implémentées dans le dossier « classes ». Les classes se situent dans le dossier « classes » et suivent le schéma mis de l'avant dans la section 3.5.10. Le fichier « environnement.yml » contient la liste des librairies Python à installer pour faire fonctionner les méthodes et fonctions contenues dans le dossier.

Le code est implémenté pour utiliser des conteneurs « Docker ». « Docker » est une machine virtuelle. Ceci permet de garantir un environnement stable et la réplication relativement simple sur un serveur tiers. La base de données est implémentée directement sur l'ordinateur de l'utilisateur. Cette approche a été prise pour assurer la persistance de la base de données en cas de corruption de l'instance « Docker ». Trois fichiers de configuration sont utilisés pour configurer le système. Le premier, « docker-compose.yml », crée les conteneurs « Docker », définit leur structure, les fichiers « DockerFile » à utiliser et les variables d'environnement pour le conteneur. Les deux fichiers « DockerFile » sont une liste de commandes à exécuter au démarrage de l'instance. Ces commandes installent les différentes librairies et logiciels dans

chacun des conteneurs.

Ceci complète la partie décrivant l'implémentation technique de l'outil d'estimation de la capacité de stationnement. La section suivante donnera les formules pour les indicateurs que l'outil permet d'afficher pour l'utilisateur.

3.8 Indicateurs utilisés pour l'analyse

La majorité de l'analyse se basera sur le calcul d'indicateurs agrégés. Les indicateurs permettent de synthétiser de l'information complexe sous forme digestible pour le praticien. Cette section détaillera les indicateurs implémentés dans l'outil. Certains sont tirés de la littérature tandis que d'autres ont été mis en place pour essayer de comprendre les relations entre le stationnement, l'utilisation du territoire, la fiscalité municipale et les comportements de mobilité. Le tableau 3.39 résume les symboles pour la section.

Tableau 3.39 Symboles utilisés dans la section

Expression	Veut dire
$A \cap B = \varnothing$	A est à l'extérieur de B
$A \cap B \neq \varnothing$	A est à l'intérieur de B
$A \wedge B$	A et B sont vrais
$A \vee B$	A ou B est vrai
$D(P_1, P_2) < 50$	Distance du point 1 au point 2 est inférieure à 50m

3.8.1 Indicateurs issus des profils d'accumulation de véhicules

Les Profil d'Accumulation de Véhicules (PAV) ont été introduits par Morency et Trépanier (2008) pour déterminer le nombre de véhicules dans une zone d'analyse en utilisant les données de l'enquête OD.

Méthodologie de calcul des profils

Initialisation du nombre de véhicules En début de journée, un nombre de véhicules de résidents du quartier est calculé en utilisant les formules détaillées dans la section 3.8.3. Essentiellement, le nombre de voitures des résidents du quartier est déduit à partir du nombre de véhicules déclarés par les ménages de l'enquête multiplié par le facteur de ménages.

Entrées et sorties de quartier Pour chaque heure de la journée, les déplacements en mode auto-conducteur entrants et sortants du quartier sont identifiés. Chaque déplacement est multiplié par le facteur de pondération de la personne pour obtenir un nombre de véhicules

entrants et sortants comme montré aux équations suivantes.

$$N_{auto,ent,q,h} = \sum_{\substack{M_{dep}=1 \\ P_{ori} \cap G_q = \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing \\ H=h}} F_{dep} \tag{3.5}$$

$$N_{auto,sor,q,h} = \sum_{\substack{M_{dep}=1 \\ P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q = \varnothing \\ H=h}} F_{dep} \tag{3.6}$$

où F_{dep} est le facteur de déplacement,$M_{dep} = 1$ dénote le mode auto-conducteur, P_{ori} est la position d'origine, P_{des} est la position de destination, G_q est le polygone représentant le quartier à l'étude, H est l'heure de départ du déplacement et h est l'heure pour laquelle le calcul est en cours. Le facteur de déplacement est utilisé ici en conformité avec le guide fourni avec les données (Ministère des Transports et de la Mobilité Durable, 2017). Un calcul similaire peut être fait pour trouver le nombre de personnes et de permis à chaque heure dans un territoire en ignorant la contrainte de mode et en mettant une contrainte sur la variable de permis.

$$N_{pers,ent,q,h} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q = \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing \\ H=h}} F_{dep} \tag{3.7}$$

$$N_{pers,sor,q,h} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q = \varnothing \\ H=h}} F_{dep} \tag{3.8}$$

$$N_{perm,ent,q,h} = \sum_{\substack{PP_{per}=1 \\ P_{ori} \cap G_q = \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing \\ H=h}} F_{dep} \tag{3.9}$$

$$N_{perm,sor,q,h} = \sum_{\substack{PP_{per}=1 \\ P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q = \varnothing \\ H=h}} F_{dep} \tag{3.10}$$

où $PP_{per} = 1$ dénote la possession de permis de conduire. Il est par ailleurs possible d'améliorer l'analyse en segmentant le bassin de stationnement entre les stationnements résidentiels auxquels seuls les résidents ont accès et les stationnements autres qui seront utilisés pour les diverses activités. Il faut cependant à ce moment prendre en compte les transferts internes entre le stationnement résidentiel et le stationnement. Les équations suivantes résument les

termes :

$$N_{auto,ent,q,h,res} = \sum_{\substack{M_{dep}=1 \\ P_{ori}\cap G_q=\varnothing \\ P_{des}\cap G_q\neq\varnothing \\ H=h \\ (D(P_{des},P_{res})<50 \vee m_{dep}=12)}} F_{dep} \tag{3.11}$$

$$N_{auto,ent,q,h,pub} = \sum_{\substack{M_{dep}=1 \\ P_{ori}\cap G_q\neq\varnothing \\ P_{des}\cap G_q=\varnothing \\ H=h \\ (D(P_{des},P_{res})\geq 50)}} F_{dep} \tag{3.12}$$

$$N_{auto,sor,q,h,res} = \sum_{\substack{M_{dep}=1 \\ P_{ori}\cap G_q=\varnothing \\ P_{des}\cap G_q\neq\varnothing \\ H=h \\ (D(P_{ori},P_{res})<50)}} F_{dep} \tag{3.13}$$

$$N_{auto,sor,q,h,pub} = \sum_{\substack{M_{dep}=1 \\ P_{ori}\cap G_q\neq\varnothing \\ P_{des}\not\cap G_q=\varnothing \\ H=h \\ (D(P_{ori},P_{res})\geq 50)}} F_{dep} \tag{3.14}$$

où $m_{dep} = 12$ dénote le motif retour à la maison. Il faut aussi formuler le nombre de déplacements entre ces deux bassins de stationnement à l'intérieur du quartier :

$$N_{transfer,q,\text{pub-res}} = \sum_{\substack{M_{dep}==1 \\ P_{ori}\cap G_q\neq\varnothing \\ P_{des}\cap G_q\neq\varnothing \\ H==h \\ (D(P_{des},P_{res})<50 \vee m_{dep}=12)}} F_{dep} \tag{3.15}$$

$$N_{transfer,q,\text{res-pub}} = \sum_{\substack{M_{dep}==1 \\ P_{ori}\cap G_q\neq\varnothing \\ P_{des}\cap G_q\neq\varnothing \\ H=h \\ D(P_{ori},P_{res})<50}} F_{dep}\forall \tag{3.16}$$

La condition de transfert tient à la distance au lieu de résidence. Une condition additionnelle utilise le motif de retour à la maison pour assurer que tous les retours sont bien capturés.

Nombre de véhicules ou de personnes à l'heure h Une fois les entrées et sorties calculées, elles sont additionnées à l'aide de la formule suivante pour obtenir la population de véhicules dans le quartier à l'heure donnée. Tous les véhicules sont affectés à la résidence

en début de journée.

$$N_{auto,q,h} = N_{auto,q,h-1} + N_{auto,ent,q,h} - N_{auto,sor,q,h} \tag{3.17}$$

$$N_{pers,q,h} = N_{pers,q,h-1} + N_{pers,ent,q,h} - N_{pers,sor,q,h} \tag{3.18}$$

$$N_{perm,q,h} = N_{perm,q,h-1} + N_{perm,ent,q,h} - N_{perm,sor,q,h} \tag{3.19}$$

$$N_{auto,res,q,h} = N_{auto,res,q,h-1} + N_{auto,res,ent,q,h} - N_{auto,res,sor,q,h} + N_{transfer,q,\text{pub-res}} - N_{transfer,q,\text{res-pub}} \tag{3.20}$$

$$N_{auto,pub,q,h} = N_{auto,pub,q,h-1} + N_{auto,pub,ent,q,h} - N_{auto,pub,sor,q,h} - N_{transfer,q,\text{pub-res}} + N_{transfer,q,\text{res-pub}} \tag{3.21}$$

$$\tag{3.22}$$

Itération Le script itère chaque heure pour calculer la population d'automobiles dans le quartier. Le script renvoie le résultat à l'interface web pour approbation par l'analyste avant d'être sauvegardé dans la base de données.

3.8.2 Indicateurs pour les lots

Indicateurs de stationnement

Nombre de places minimums Le nombre de places minimums est le nombre de places requises par le règlement d'urbanisme qui a été calculé à l'aide des règlements. La méthode est détaillée à la section 3.5.

Nombre de places maximums Le nombre de places maximums est le nombre de places maximales que le promoteur a le droit de construire sur sa propriété. Ce type de règlements est apparu principalement après l'harmonisation des règlements d'urbanisme en 2009. Comme pour les minimums, il est calculé à l'aide de la méthode établie à la section 3.5.

Nombre de places estimées Cette colonne dans la table d'inventaire n'est pas présentement utilisée, mais serait remplie si des méthodes de détection automatique étaient implémentées pour estimer le nombre de places de stationnement ou en utilisant l'aire du stationnement si par exemple des données OSM étaient utilisées comme source.

Nombre de places mesurées Cette colonne dans la table d'inventaire est utilisée pour tout inventaire manuel.

Nombre de places par hectare Le nombre de places par hectare est calculé en divisant la capacité de stationnement par la superficie du lot cadastral. La superficie est fournie dans les propriétés de chaque lot cadastral. Cette mesure peut utiliser les 4 types d'inventaire mentionnés plus haut dans le paragraphe. Cet indicateur est utilisé pour trouver les entrées du cadastre avec un inventaire erroné. La formule suivante dénote la méthode de calcul. Les hectares ont été choisis pour avoir une échelle raisonnable sur les valeurs.

$$d_s = \frac{s_l \times 10000}{a_l} \tag{3.23}$$

Indicateurs d'utilisation du sol

Valeur foncière par hectare Cette métrique est principalement utilisée à titre indicatif comme proxy pour la rentabilité d'une propriété pour la municipalité. Cette métrique ne prend pas en compte les taux d'imposition différenciés entre différentes utilisations du sol ni entre différents secteurs. En effet, certains secteurs de la municipalité ont des taux préférentiels. Ces derniers sont dus à un taux d'endettement de la municipalité qui a été fusionné par rapport à la ville de Québec de l'époque. La valeur est calculée de la manière suivante :

$$d_f = \frac{10000 \times \sum_{P_{role} \cap G_l \neq \varnothing} (f_l)}{a_l} \tag{3.24}$$

Indicateurs combinés

Intensité de stationnement prédit L'intensité foncière de stationnement est un paramètre qui a été identifié comme un indicateur de surestimation du modèle pendant le processus d'évaluation. Elle est donnée par la formule suivante et sera discutée dans la section d'évaluation du modèle.

$$i_s = \frac{s_{pred,l} \times a_l}{\sum_{P_{role} \cap G_l \neq \varnothing} f_l} \tag{3.25}$$

L'indicateur aurait pu être formulé en utilisant l'aire d'étages par mètre carré de lot, mais l'absence de telles données sur une proportion des lots rend l'indicateur potentiellement moins utile si des méthodes d'inférence de l'aire d'étage sont développées dans le futur et qu'il est souhaitable d'avoir un comparatif applicable à l'ensemble des lots, peu importe la méthode de prédiction.

3.8.3 Indicateurs de secteurs municipaux

Indicateurs de stationnement

Stationnement total Le stationnement total est la somme des places de stationnement des lots cadastraux à l'intérieur d'un secteur municipal. Si plusieurs estimations existent pour un même lot, l'une des estimations doit être choisie. Ce choix est opéré en sélectionnant la préférence de méthode. Les estimations par quartiers sont compilées à l'aide de la requête spécifiée à l'annexe D.8. Un lot est assigné à un quartier si 90% ou plus de sa superficie se trouvent à l'intérieur du quartier. Cette approche (plutôt que de requérir que l'ensemble du lot soit à l'intérieur du quartier) est mise en place pour que les lots limitrophes soient tout de même pris en compte. On peut ainsi formuler l'indicateur ainsi :

$$S_q = \sum_{\frac{A(G_l \cap G_q)}{A(G_l)} > 0.9} s_l \tag{3.26}$$

Indicateurs d'utilisation du sol

Superficie du quartier La superficie du quartier est utilisée pour normaliser les variables pour des territoires ayant des géographies différentes. Le fichier des données ouvertes fournissait une estimation de la superficie calculée pour chaque quartier (Ville de Québec, 2024d). Cette dernière a été validée avec QGIS et était exacte. On peut formuler l'indicateur de la manière suivante :

$$A_q = A(G_q) \tag{3.27}$$

Superficie dédiée au stationnement La superficie des stationnements est calculée en multipliant le nombre de places de stationnement pour chaque quartier par la superficie minimale d'une case. La ville de Québec requiert des dimensions minimales pour les cases de stationnement de 2.6 m x 5.5 m (Ville de Québec, 2009, 2024a, 2024b, 2024c, 2025b), soit $14.3m^2$. Il semble important de noter que la ville requiert des voies de circulation de 6.5m de large. La taille attribuée à chaque espace de stationnement pourrait donc croître jusqu'à $22.5m^2$ en incluant une voie de circulation. Ce chiffre néglige les travaux de verdissements requis pour les grands stationnements de bâtiments institutionnels (Ville de Québec, 2024a). On peut formuler l'indicateur de la manière suivante :

$$AS_q = 14.3 \times S_q \tag{3.28}$$

Indicateurs de mobilité et de population

Nombre de véhicules des résidents du quartier Le nombre de véhicules est inféré à l'aide des enquêtes OD en utilisant la formule suivante. Il s'agit d'une somme pondérée du nombre de véhicules pour tout entrée des données OD où le logis est à l'intérieur du quartier et la ligne est la tête d'un ménage. La requête SQL est donnée à l'annexe D.9.

$$V_q = \sum_{\substack{T_{men} \\ P_{log} \cap G_q \neq \varnothing}} (v_{men} \times F_{men}) \tag{3.29}$$

où v_{men} est le nombre de véhicules déclarés pour le ménage, F_{men} est le facteur de pondération de ménages et T_{men} est un booléen indiquant qu'il s'agit de la première entrée d'un ménage dans la base de données.

Nombre de véhicules maximum dans le quartier Cet indicateur est calculé en prenant le maximum du profil d'accumulation de véhicules. L'indicateur est calculé de la manière suivante. La requête SQL requise pour en faire le calcul est donnée à l'annexe D.9.

$$V_{q,max} = \max_{h \in [4,\, 28]} (N_{auto,q,h}) \tag{3.30}$$

Nombre de véhicules minimum dans le quartier Cet indicateur est calculé en prenant le minimum du profil d'accumulation de véhicules. L'indicateur est calculé de la manière suivante. La requête SQL requise pour en faire le calcul est donnée à l'annexe D.9.

$$V_{q,min} = \min_{h \in [4,\, 28]} (N_{auto,q,h}) \tag{3.31}$$

Différence signée d'automobiles Cet indicateur vise à rapidement indiquer si le nombre de voitures sur un territoire augmente ou diminue au fil de la journée. Pour ce faire, on trouve l'heure à laquelle le nombre de voitures a le plus grand écart par rapport au nombre de voitures appartenant aux résidents. Un signe positif indique que le quartier reçoit des voitures de l'extérieur, tandis qu'un nombre négatif que le quartier est débiteur. La requête SQL pour obtenir le résultat est donnée dans l'annexe D.9

$$\Delta_{voit,q} = \max(|V_{q,min} - V_q)|, |V_{q,max} - V_q|) \times \sigma \tag{3.32}$$

$$\sigma = \begin{cases} -1 & \text{si } |V_{q,min} - V_q| > |V_{q,max} - V_q| \\ 1 & \text{si } |V_{q,min} - V_q| < |V_{q,max} - V_q| \end{cases} \tag{3.33}$$

Nombre de permis du quartier Le nombre de permis dans un quartier peut être obtenu de manière similaire au nombre de voitures en utilisant les données de l'enquête OD. Dans ce cas-ci, on doit chercher la tête de liste pour chaque personne et sommer le facteur de pondération de personnes si la variable de permis de conduire est égale à 1. La formule suivante :

$$PT_q = \sum_{\substack{T_{per} \\ PP_{per}=1 \\ P_{log} \cap G_q \neq \varnothing}} (F_{per}) \tag{3.34}$$

où $PP_{per} = 1$ dénote la possession de permis et T_{per} est un booléen indiquant que la ligne est la première entrée de la personne dans la base de données.

Population du quartier Des estimations de population issues des recensements de 2016 et 2021 sont disponibles. Pour assurer la robustesse de la requête spatiale, un critère de chevauchement de 90% de l'aire de diffusion et du quartier est utilisé pour affecter les aires de diffusions aux quartiers. La requête SQL requise pour obtenir cette variable est donnée en annexe D.10. Les variables sont entreposées dans une table supplémentaire pour améliorer la performance de la requête.

$$P_q = \sum_{\frac{A(G_{AD} \cap G_q)}{A(G_{AD})} > 0.9} p_{AD} \tag{3.35}$$

Part modale des résidents La part modale des résidents vise à donner une indication des comportements de mobilité des personnes vivant dans un quartier. L'indicateur est potentiellement problématique puisque le nombre de déplacements varie entre les enquêtes, mais il est très utilisé. La formule est donnée ci-dessous et la requête SQL est listée en annexe D.12.

$$N_{depl,mode,res,q} = \sum_{\substack{P_{logis} \cap G_q \neq \varnothing \\ M_{dep} == mode}} F_{dep} \tag{3.36}$$

$$N_{depl,res,q} = \sum_{P_{logis} \cap G_q \neq \varnothing} F_{dep} \tag{3.37}$$

$$PM_{res,mode,q} = \frac{N_{depl,mode,res,q}}{N_{depl,res,q}} \tag{3.38}$$

Part modale des déplacements internes La part modale des déplacements internes vise à comprendre la mobilité dans un quartier, peu importe le lieu de résidence. L'indicateur est imparfait puisque les quartiers ont des superficies variables, mais donne une indication des

comportements de mobilité à l'intérieur d'un quartier. Il est calculé selon la formule donnée ci-dessous et la requête SQL est donnée en annexe D.12.

$$N_{depl,mode,int,q} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing \\ M_{dep} = mode}} F_{dep} \tag{3.39}$$

$$N_{depl,int,q} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing}} F_{dep} \tag{3.40}$$

$$PM_{int,mode,q} = \frac{N_{depl,mode,int,q}}{N_{depl,int,q}} \tag{3.41}$$

Part modale des déplacements provenant d'un secteur Cet indicateur donne la répartition des modes pour les déplacements provenant du secteur et qui ne sont pas des déplacements internes. La formule de calcul est donnée ci-dessous et la requête SQL est donnée en annexe D.12

$$N_{depl,mode,ori,q} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q = \varnothing \\ M_{dep} = mode}} F_{dep} \tag{3.42}$$

$$N_{depl,ori,q} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q \neq \varnothing \\ P_{des} \cap G_q = \varnothing}} F_{dep} \tag{3.43}$$

$$PM_{ori,mode,q} = \frac{N_{depl,mode,ori,q}}{N_{depl,ori,q}} \tag{3.44}$$

Part modale des déplacements à destination d'un secteur Cet indicateur donne la répartition des modes pour les déplacements provenant du secteur et qui ne sont pas des déplacements internes. La formule de calcul est donnée ci-dessous et la requête SQL est donnée en annexe D.12.

$$N_{depl,mode,des,q} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q = \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing \\ M_{dep} = mode}} F_{dep} \tag{3.45}$$

$$N_{depl,des,q} = \sum_{\substack{P_{ori} \cap G_q = \varnothing \\ P_{des} \cap G_q \neq \varnothing}} F_{dep} \tag{3.46}$$

$$PM_{des,mode,q} = \frac{N_{depl,mode,des,q}}{N_{depl,des,q}} \tag{3.47}$$

Indicateurs de fiscalité municipale

La requête SQL qui calcule les indicateurs de fiscalité est donnée à l'annexe D.11.

Valeur foncière totale du quartier La valeur foncière totale du quartier est agrégée en faisant la somme des valeurs totales des entrées du rôle foncier (champs rl0404a de la table role_foncier) pour tous les points qui sont à l'intérieur de la géométrie du quartier. La formule suivante montre la méthodologie de calcul

$$F_{T,q} = \sum_{P_{role} \cap G_q \neq \varnothing} f_l \tag{3.48}$$

où f_l est la somme des valeurs au rôle de toutes les entrées associées à un lot.

Valeur foncière résidentielle du quartier Les propriétés résidentielles constituent la majorité des entrées du rôle et sont imposées différemment des autres utilisations du sol et sont directement attribuables aux résidents (alors que les autres propriétés sont potentiellement utilisées par des résidents d'autres quartiers). Il peut donc être intéressant de séparer la valeur foncière résidentielle des autres valeurs. La formule suivante en donne la méthode de calcul. La requête SQL est détaillée à l'annexe D.11.

$$F_{R,q} = \sum_{\substack{P_{Role} \cap G_q \neq \varnothing \\ \text{CUBF=1000}}} f_l \tag{3.49}$$

Superficie moyenne des logements La superficie moyenne des logements est pertinente pour comprendre les préférences des résidents des quartiers.

$$\bar{A}_{log,q} = \frac{\sum_{\substack{\text{CUBF=1000} \\ P_{role} \cap G_q}} a_{etage}}{\sum_{\substack{\text{CUBF=1000} \\ P_{role} \cap G_q}} n_{logements}} \tag{3.50}$$

Valeur moyenne des logements La valeur moyenne des logements peut être calculée comme la superficie moyenne des logements

$$\bar{f}_{log,q} = \frac{\sum_{\substack{\text{CUBF==1000} \\ P_{role} \cap G_q}} f_l}{\sum_{\substack{\text{CUBF==1000} \\ P_{role} \cap G_q}} n_{logmements}} \tag{3.51}$$

Indicateurs combinés et ratios

Nombre de places par hectare Le nombre de places par hectare permet de normaliser la mesure de stationnement pour des superficies de quartiers différents

$$D_s = \frac{S_q \times 10000}{A(G_q)} \tag{3.52}$$

Nombre de places par résident Le nombre de places de stationnement par personne permet de donner une indication de l'offre de stationnement relatif à la population. Il peut être calculé avec le recensement de 2016 ou de 2021.

$$D_{s,cap} = \frac{S_q}{P_q} \tag{3.53}$$

Nombre de places par permis Le nombre de places par permis permet de permet de normaliser l'offre de stationnement en fonction de la population qui a le droit de conduire, plutôt que la population totale. Cela permet de prendre en compte la composition différente de ménages entre les quartiers.

$$S_{s,perm} = \frac{S_q}{PT_q} \tag{3.54}$$

Pourcentage du quartier recouvert par le stationnement Cette métrique vise à illustrer le pourcentage du territoire dédié à l'entreposage de véhicules. Cela donne un ordre de grandeur plus compréhensible de la consommation d'espace due au stationnement. Comme pour la métrique issue des lots, la taille de stationnement minimale issue des règlements de la ville est utilisée (Ville de Québec, 2009), soit $14.3m^2$.

$$AS_{q,\%} = \frac{AS_q}{A_q} \tag{3.55}$$

Nombre de places par voitures des résidents Cet indicateur vise à montrer la capacité excédentaire pour l'entreposage des véhicules des résidents. Il est calculé selon la formule suivante.

$$VS_{res,q} = \frac{S_q}{V_q} \tag{3.56}$$

Nombre de places par voitures maximales Cet indicateur vise à montrer la capacité excédentaire pour l'entreposage de la demande maximale en stationnement. Il est calculé

selon la formule suivante :

$$VS_{q,max} = \frac{S_q}{V_{q,max}} \tag{3.57}$$

Taux d'occupation des stationnements par les résidents Cet indicateur est l'inverse du nombre de places de stationnement par voiture des résidents et est calculé de la manière suivante

$$O_{res,q} = \frac{V_q}{S_q} \tag{3.58}$$

Taux d'occupation maximal des stationnements Comme pour le taux d'occupation des résidents, cet indicateur est l'inverse du nombre de places de stationnement par voitures maximales

$$O_{max,q} = \frac{V_{q,max}}{S_q} \tag{3.59}$$

Taux de motorisation Le taux de motorisation est un indicateur de possession automobile. Plus il est grand, plus la population a accès à l'automobile personnelle pour ses besoins en mobilité

$$M_q = \frac{V_q}{P_q} \tag{3.60}$$

Nombre de voitures par permis Le nombre de voitures par permis permet de prendre en compte les potentiels effets des variations de composition démographique sur la disponibilité de l'automobile

$$M_{q,P} = \frac{V_q}{PT_q} \tag{3.61}$$

Densité de population La densité de population constitue l'un de proxy pour l'aménagement du territoire utilisé dans les études sur le lien entre les comportements de mobilité et l'aménagement du territoire.

$$D_p = \frac{P_q}{A_q} \tag{3.62}$$

Valeur foncière par hectare Cette métrique vise à comparer l'intensité de l'utilisation du sol entre des quartiers de superficie différente. Environ 56% des revenus proviennent de la taxe foncière directement et 75% des revenus proviennent de taxes ou de frais aux résidents (Ville de Québec, 2025a). D'autre part, Metro Vancouver Regional Planning (2023) montre qu'environ 40% des dépenses des municipalités sont associées à la densité plutôt que la capitation. Une haute valeur pour cet indicateur indiquerait donc une réduction des coûts (puisque les coûts de provision sont réduits), mais aussi une plus haute contribution aux revenus. L'indicateur est calculé de la manière suivante :

$$D_{f,T,q} = \frac{F_{T,q}}{A_q} \tag{3.63}$$

$$D_{f,R,q} = \frac{F_{R,q}}{A_q} \tag{3.64}$$

Nombre de places inutilisées Le nombre de places de stationnements inutilisées vise à estimer la capacité de stationnement inutilisée. En réalité, les restrictions d'accès, notamment pour le stationnement résidentiel, limitent potentiellement le partage de la capacité de stationnement. La superficie de stationnement peut être inférée d'une manière similaire à la superficie de stationnement totale. Les indicateurs sont calculés comme suit :

$$I_q = S_q - V_{q,max} \tag{3.65}$$

$$A_{I,q} = (S_q - V_{q,max}) \times 14.3 \tag{3.66}$$

3.8.4 Analyse de variabilité

L'analyse de variabilité vise à améliorer la compréhension des différences de production de stationnement pour les ensembles de règlements définis par l'utilisateur. Pour ce faire, une estimation du nombre de places de stationnement requises est calculée pour tous les lots avec tous les ensembles de règlements. Les totaux sont ensuite agrégés pour estimer les totaux par utilisation du sol. Les résultats bruts sont entreposés dans la base de données. L'outil web permet ensuite d'accéder aux totaux et de les illustrer au moyen de différents graphiques. D'autre part, l'analyse de variabilité met aussi en place des facteurs d'échelle sur les conversions d'unités où le facteur de pente facteur_correction est différent de 1 (indiquant qu'on ne transcrit pas simplement la valeur du rôle sans mise à l'échelle).

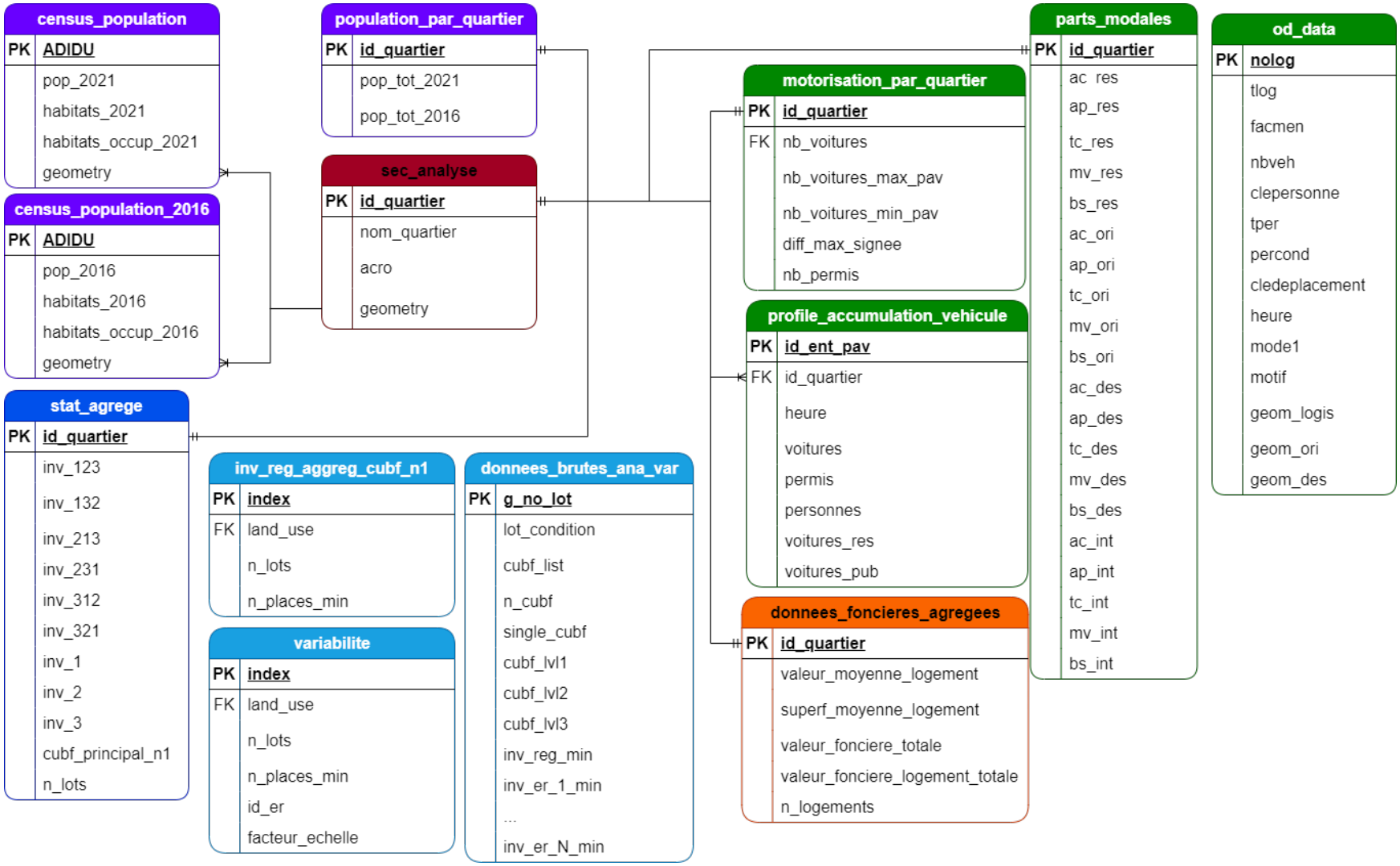


FIGURE 3.46 Diagramme entité association des tables d'analyse et de validation

3.8.5 Structure de données pour l'analyse

En plus des données entreposées pour créer l'estimation, un ensemble de tables ont été créées pour contenir les données annexes ou précurseurs aux différents indicateurs. Ces données doivent être précalculées pour accélérer l'affichage des graphiques. Le diagramme de relation entité pour ces données complémentaires est donné à la figure 3.46.

Stationnement agrégé

Le stationnement calculé pour chaque lot est agrégé par quartier pour visualiser les résultats et comparer ces derniers avec les profils d'accumulation de véhicule. Ces résultats sont précompilés dans la table stat_agrege. L'annexe D.8 donne la requête SQL utilisée. Cette requête est lancée à la demande de l'utilisateur et peut prendre jusqu'à une minute à compléter. Les champs de cette table sont au tableau 3.40. L'estimation peut être compilée directement à partir de l'estimation réglementaire ou en utilisant une préférence entre les différentes estimations s'ils existent pour un même lot. Les chiffres 1,2 et 3 correspondent au type des estimations selon la définition du tableau 3.10. Ainsi, inv_132 représente la prédiction agrégée où le comptage manuel sera d'abord choisi, puis la prédiction semi-automatique (donc avec des intrants fournis manuellement, mais les règlements spécifiés), puis la prédiction purement à partir du rôle. Puisque la prédiction réglementaire est la seule avec une couverture quasi complète du territoire, elle forme la base de la plupart des lots. Cependant, la formulation prise permet de corriger ponctuellement certains lots en gardant les données de base de la prédiction réglementaire comme colonne vertébrale.

Tableau 3.40 Champs de la table donnees_foncieres_agregees

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_quartier	Identifiant du quartier	Entier	CP
cubf_principal_n1	Utilisation du sol	Entier	
inv_123	Estimation agrégée selon l'ordre 1,2 et 3	Entier	
inv_132	Estimation agrégée selon l'ordre 1,3 et 2	Entier	
inv_213	Estimation agrégée selon l'ordre 2,1 et 3	Entier	
inv_231	Estimation agrégée selon l'ordre 2,3 et 1	Entier	
inv_312	Estimation agrégée selon l'ordre 3,1 et 2	Entier	
inv_321	Estimation agrégée selon l'ordre 3,2 et 1	Entier	
inv_1	Somme des entrées manuelles	Entier	
inv_2	Somme des entrées réglementaire	Entier	
inv_3	Somme des entrées semi-automatiques	Entier	
n_lots	Nombre de lots ayant cette utilisation du sol dans le quartier	Entier	

Population agrégée par quartiers

La population est agrégée selon la méthode donnée à l'équation 3.35. Les données de population du recensement 2016 et 2021 sont entreposées dans les tables census_population_2016 et census_population. La population y est agrégée par aire de diffusion qui est plus petite que les quartiers administratifs. La population est donc sommée selon une jointure spatiale. Les populations agrégées par quartier sont entreposées dans la table population_par_quartier. Des estimations pour 2016 et 2021 sont mises à disposition de l'utilisateur. Les tableaux 3.42 et 3.43 donnent quelques détails sur le contenu des tables census_population et census_population_2016.

Tableau 3.41 Champs de la table population_par_quartier

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_quartier	Identifiant de quartier	Entier	CP
pop_tot_2016	Population selon le recensement 2016	Entier	
pop_tot_2021	Population du quartier selon le recensement 2021	Entier	

Tableau 3.42 Champs de la table census_population

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
ADIDU	Identifiant unique de l'aire de diffusion	Texte	CP
pop_2021	Population du recensement 2021	Entier	
habitats_2021	Nombre de logements en 2021	Entier	
habitats_occup_2021	Nombre de logements occupés en 2021	Entier	
geometry	Géométrie de l'aire de diffusion	Géométrie	

Tableau 3.43 Champs de la table census_population_2016

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
ADIDU	Identifiant unique de l'aire de diffusion	Texte	CP
pop_2016	Population du recensement 2016	Nombre réel	
habitats_2016	Nombre de logements en 2016	Entier	
habitats_occup_2016	Nombre de logements occupés en 2016	Entier	
geometry	Géométrie de l'aire de diffusion	Géométrie	

L'estimation de population globale par quartier est compilée dans la requête de mise à jour

des données complémentaires qui est spécifiée à l'annexe D.10. Les champs de la table sont spécifiés au tableau 3.41.

Données d'enquête OD

Les données entrantes de l'enquête OD sont entreposées dans la table od_data dont les champs sont spécifiés au tableau 3.44.

Tableau 3.44 Champs de la table od_data

Nom champ	Description	Type de données
nolog	Identifiant unique du logis	Entier
tlog	Booléen indiquant la première entrée pour un logis	Booléen
facmen	Facteur de pondération du ménage	Nombre réel
nbveh	Nombre de véhicule du ménage	Entier
clepersonne	Identifiant unique de personne	Entier
tper	Booléen indiquant la première entrée pour une personne	Booléen
percond	Statut du permis de conduire	Entier — 1- Oui — 2- Non — 3- NSP/Refus — 4- N/A (moins de 16 ans)
cledeplacement	Identifiant unique de déplacement	Entier
facdep	Facteur de pondération du déplacement	Réel
heure	Heure de départ pour le déplacement	Entier (4-28)
mode1	Mode du déplacement	Entier 1-17 selon le mode 1 - Auto-conducteur
motif	Motif du déplacement	Entier 1-14 selon le motif 12 - Retour au domicile
geom_logis	Localisation du domicile du ménage	Géométrie
geom_ori	Localisation de l'origine du déplacement	Géométrie

TABLEAU3.44 Champs de la table od_data (suite)

Nom champ	Description	Type de données
geom_des	Localisation de la destination du déplacement	Géométrie

Données de motorisation

Les données de motorisation sont calculées selon les équations données à l'équation 3.29. Le tableau 3.45 montre les colonnes de la table motorisation_par_quartier.

TABLEAU 3.45 Champs de la table motorisation_par_quartier

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_quartier	Identifiant quartier	Entier	CP
nb_voitures	Nombre de voitures des résidents	Entier	
nb_voitures_max_pav	Maximum du profile d'accumulation de véhicules du quartier	Entier	
nb_voitures_min_pav	Minimum du profile d'accumulation de véhicule	Entier	
diff_max_signee	Différence max signée (cf. eq. 3.32)	Entier	
nb_permis	Nombre de détenteurs de permis de conduire	Entier	

Profils d'accumulation de véhicules

Les détails de la méthode de calcul des profils d'accumulation de véhicules sont donnés à la section 3.8.1. Les données d'enquête sont ensuite traitées comme indiqué dans la section 3.8.1 pour obtenir les profils d'accumulation de véhicules. Ces profils sont sauvegardés pour analyse dans la table profil_accumulation_vehicules. Les détails de cette table sont indiqués au tableau 3.46.

Tableau 3.46 Champs de la table profil_accumulation_vehicules

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_ent_pav	Identifiant unique	Entier	CP
id_quartier	Identifiant de quartier	Entier	CS
heure	Heure à laquelle les valeurs sont comptabilisées	Entier	
voitures	Nombre de voitures dans le quartier	Entier	
personnes	Nombre de personnes dans le quartier	Entier	
permis	Nombre de détenteurs de permis dans le quartier	Entier	
voitures_res	Nombre de voitures entreposées à la résidence	Entier	
voitures_pub	Nombre de voitures entreposées en lieu public	Entier	
voit_entrantes_tot	Nombre de voitures entrant dans le quartier	Entier	
voit_entrantes_res	Nombre de voitures entrant à destination de résidences	Entier	
voit_entrantes_pub	Nombre de voitures entrant à destination de lieux publics	Entier	
voit_sortantes_tot	Nombre de voitures sortant du quartier	Entier	
voit_sortantes_res	Nombre de voitures sortant de résidences du quartier	Entier	
voit_sortantes_pub	Nombre de voitures sortant de lieux publics du quartier	Entier	
voit_transfer_res_a_pub	Nombre de voitures se déplaçant d'une résidence à un lieu public à l'intérieur d'un quartier	Entier	
voit_transfer_pub_a_res	Nombre de voitures se déplaçant d'un lieu public à une résidence à l'intérieur d'un quartier	Entier	
pers_entrantes_tot	Nombre de personnes entrant dans le quartier	Entier	

Tableau 3.46 Champs de la table profil_accumulation_vehicules (suite)

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
pers_sortantes_tot	Nombre de personnes sortant du quartier	Entier	
perm_entrants_tot	Nombre de détenteurs de permis entrant dans le quartier	Entier	
perm_sortants_tot	Nombre de détenteurs de permis sortant du quartier	Entier	

Données foncières agrégées

Comme indiqué dans la section 3.8.3, des données foncières sont agrégées pour donner des indications sur l'intensité du développement d'un quartier. Ces données sont entreposées dans la table donnees_foncieres_agregees. Les champs de cette table sont donnés dans le tableau 3.47

Tableau 3.47 Champs de la table donnees_foncieres_agregees

Nom champ	Description	Type de données	CP/CS
id_quartier	Identifiant du quartier	Entier	CP
valeur_moyenne_logement	Valeur moyenne des logements du quartier	Entier	
superf_moyenne_logement	Superficie moyenne des logements du quartier	Entier	
valeur_fonciere_totale	Valeur totale des entrées du rôle foncier dans le quartier	Entier	
valeur_fonciere_logement_totale	Valeur totale des entrées du rôle dont le CUBF est égal à 1000	Entier	
n_logements	Nombre de logements dans le quartier	Entier	

Analyse de variabilité

Trois tables sont utilisées dans le cadre de l'analyse de variabilité. inv_reg_aggreg_cubf_n1 donne l'estimation de capacité agrégée à partir de l'estimation principale. Seules les estima-

tions réglementaires sont prises en compte. donnees_brutes_ana_var contient l'ensemble des prédictions calculées lorsque le facteur d'échelle est gardé constant. Ceci permettrait dans le futur de donner un aperçu désagrégé de la distribution par type de propriété. Pour l'instant, cette table est seulement utilisée pour diagnostiquer le calcul. La table variabilite contient la prédiction agrégée par utilisation du sol, ensemble de règlement et facteur d'échelle. Cette dernière table est celle qui est le plus communément utilisée pour générer les visualisations dans l'outil. Les calculs pour cette analyse sont très similaires à ceux du calcul de la prédiction. Ils sont lancés dans un script Python. Le lecteur peut se référer à la figure 4.6 pour l'appel d'API.

Ceci conclut la section méthodologique. La section suivant illustrera les résultats.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Cette section va donner un aperçu des résultats obtenus. La section 4.1 montrera la structure de l'API et de l'interface de l'outil développé. Ensuite, la section 4.2 donne un aperçu des prédictions émises par le modèle. La section 4.3 montre les résultats du processus d'évaluation de la performance du modèle. Finalement, la section 4.5 montre comment l'outil peut être utilisé pour informer l'analyste sur l'état prédit du stationnement.

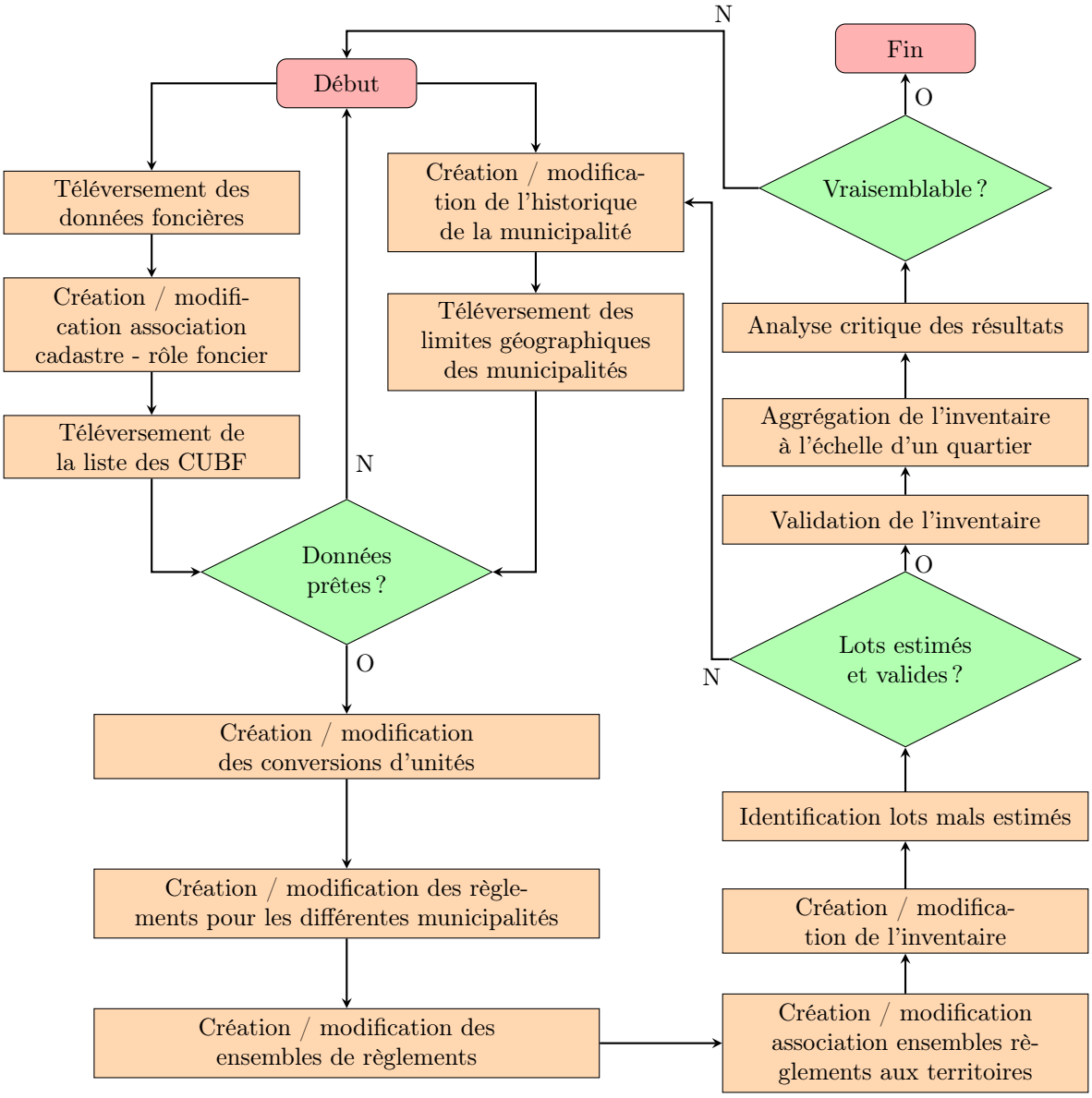


FIGURE 4.1 Procédure de génération de la prédiction de la capacité de stationnement

4.1 Outil développé

4.1.1 Procédure suggérée d'estimation de la capacité

Le logigramme 4.1 montre la procédure générale de création de l'estimation que devrait entreprendre un analyste pour obtenir une estimation de capacité. Comme tout processus de génération d'ensembles de données, le processus est itératif et requiert des mises à jour pour améliorer l'estimation ainsi qu'une mise à jour avec de nouvelles constructions.

4.1.2 Fonctions de l'API serveur

Les figures 4.2, 4.3, 4.4,4.5 et 4.6 donnent une représentation des domaines de données et des fonctions implémentées.

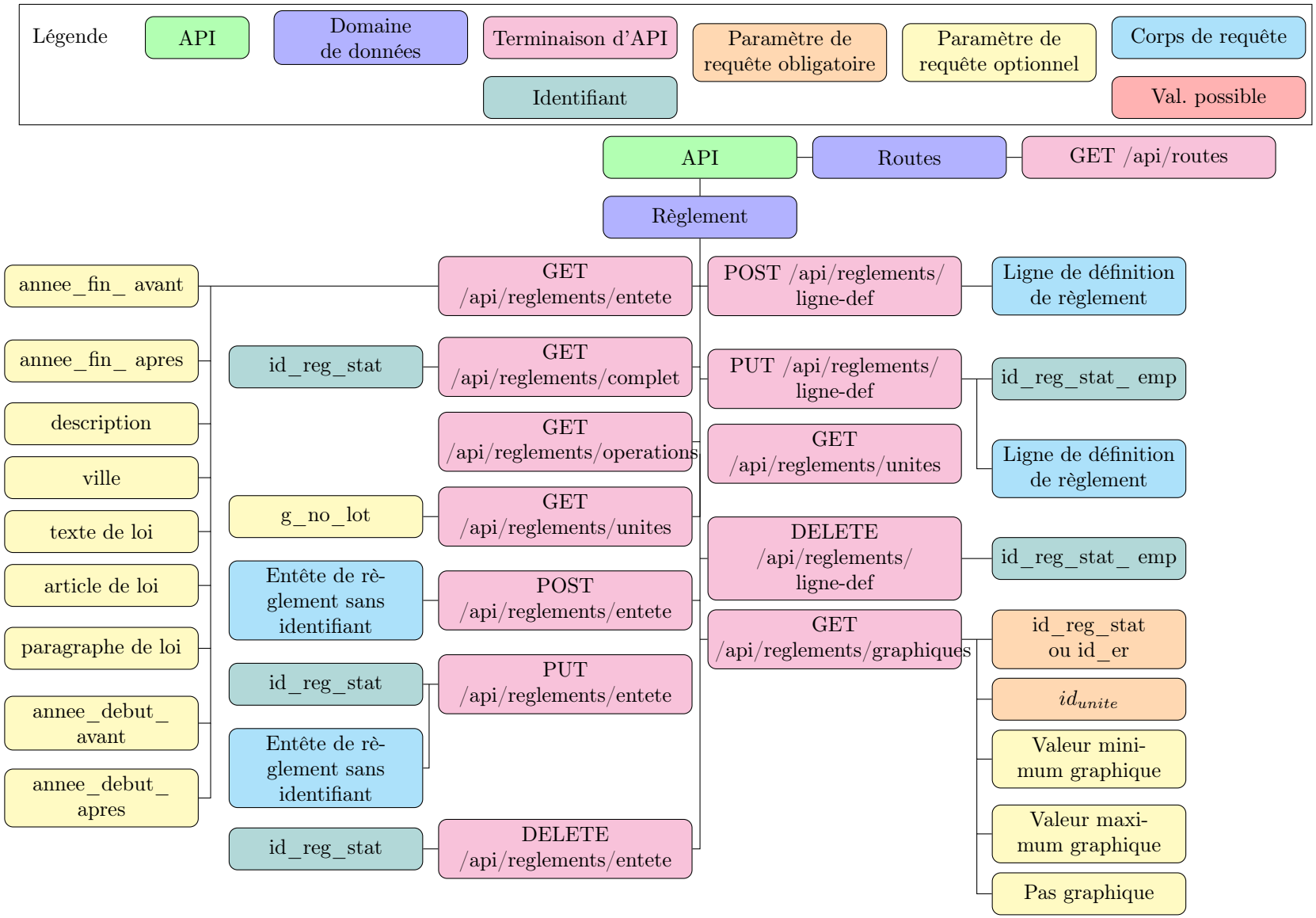


FIGURE 4.2 Représentation schématique de l'API pour les règlements

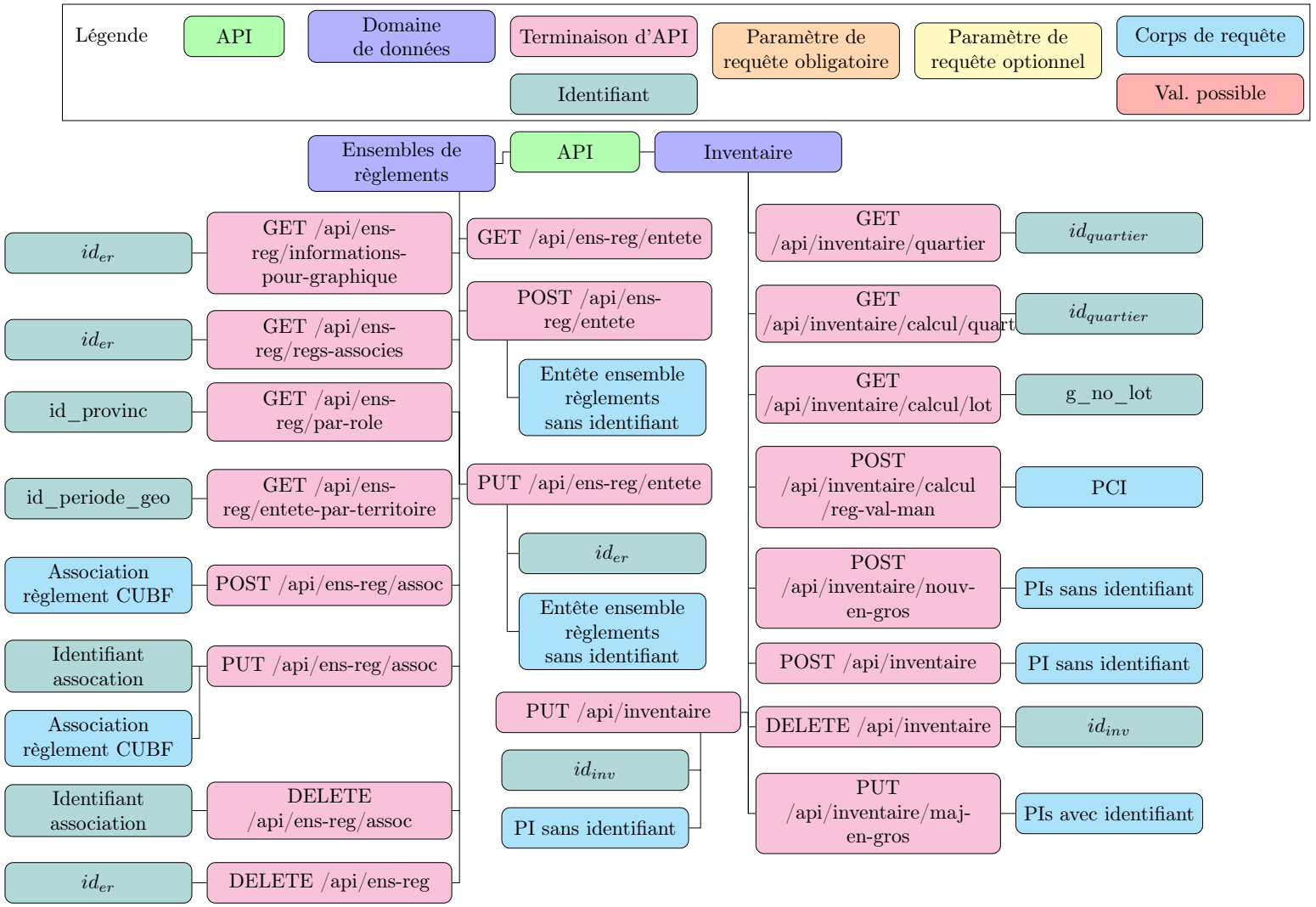


FIGURE 4.3 Représentation schématique de l'API pour l'inventaire et les ensembles de règlements

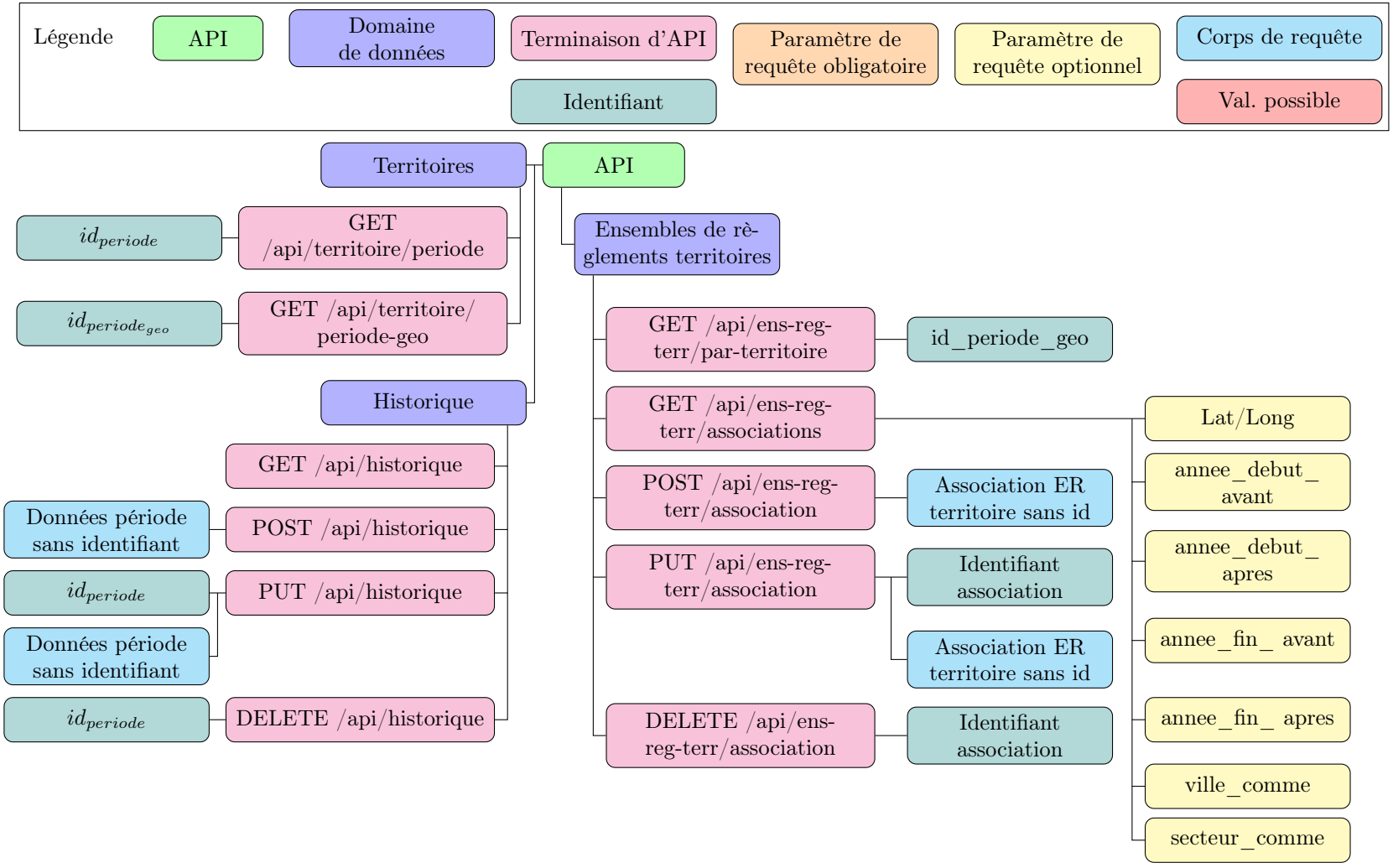


FIGURE 4.4 Représentation schématique de l'API pour les territoires et ensembles de règlements territoire

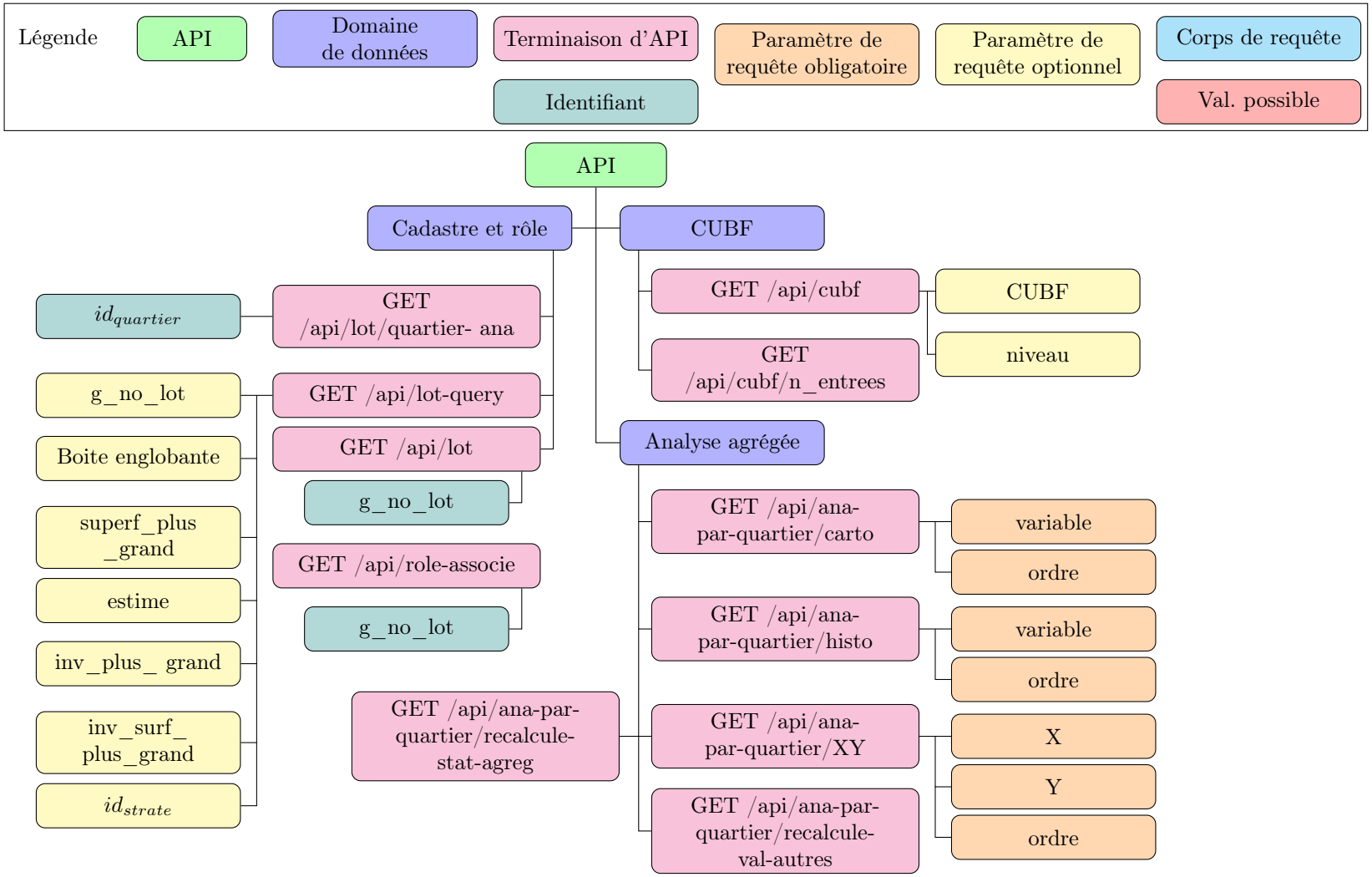


FIGURE 4.5 Représentation schématique de l'API pour les données cadastrales, les CUBF et l'analyse agrégée

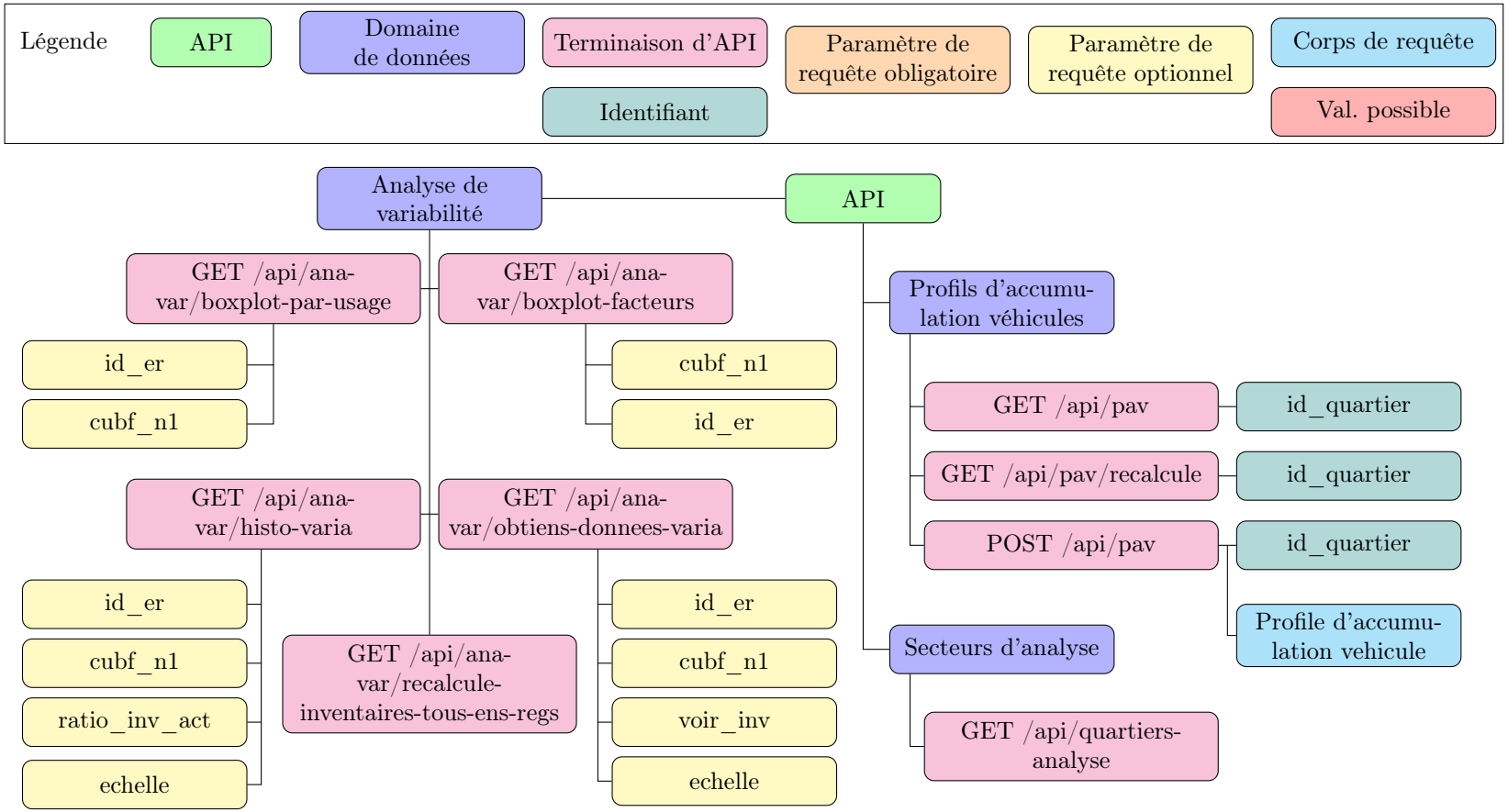


FIGURE 4.6 Représentation schématique de l'API pour l'analyse de variabilité, les secteurs d'analyse et les profils d'accumulation véhicules

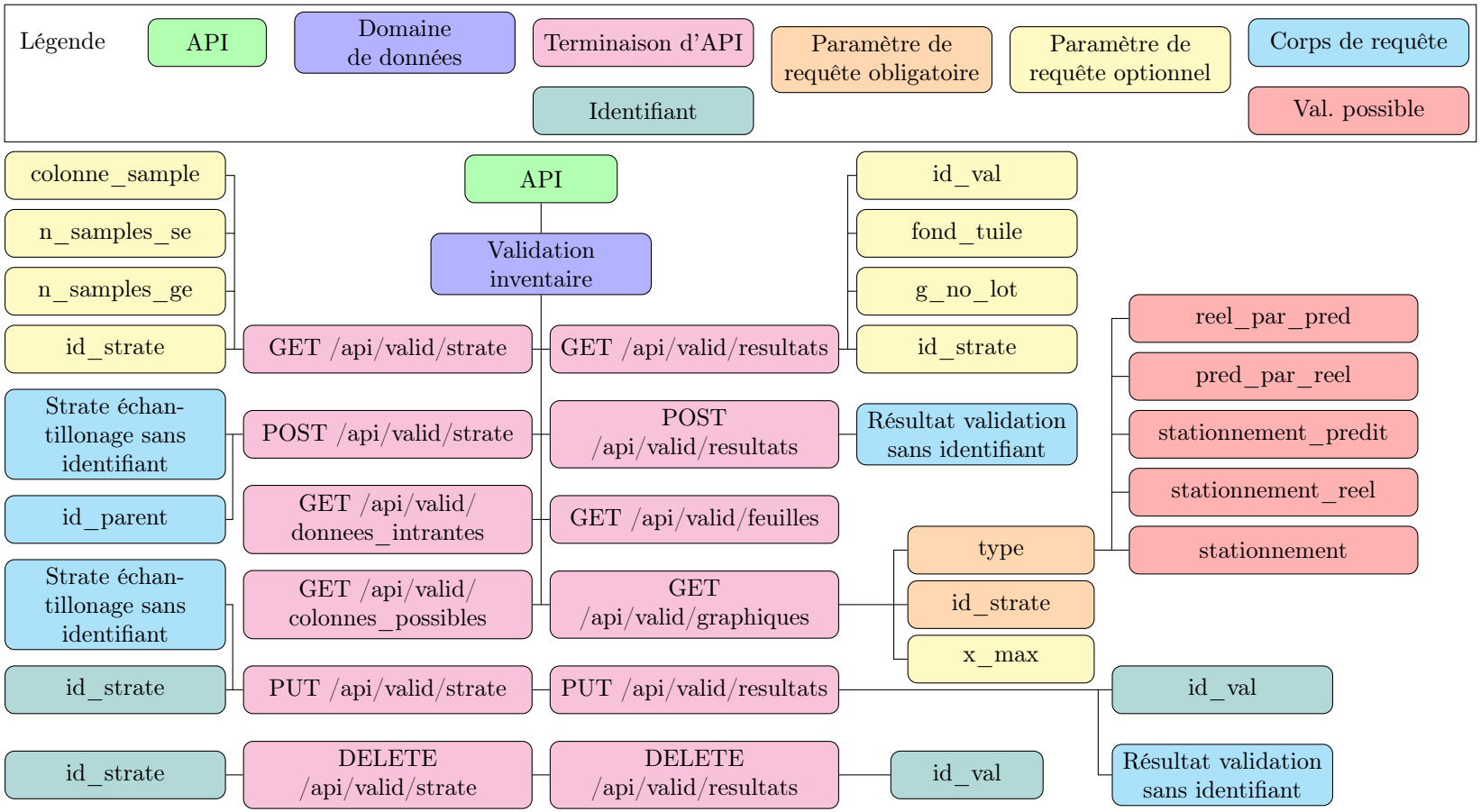


FIGURE 4.7 Représentation schématique de l'API pour l'évaluation des prédictions

Normalement, l'API a des fonctions de validations qui vérifient que les paramètres soient du bon type, dans des limites raisonnables et qu'elles ne présentent pas un risque à l'intégrité de la base de données. Ces fonctions de validation n'ont pas été mises en place. Les tests unitaires qui typiquement assurent la qualité et la robustesse du code n'ont pas été implémentés non plus. Pour les graphiques d'analyse agrégée, les variables que peuvent demander les analystes sont données au tableau 4.1 ainsi que la référence à l'équation utilisée pour calculer l'indicateur. La colonne ordre dénote si la variable nécessite qu'un ordre de priorité des estimations de capacité soit spécifié.

Tableau 4.1 Sigles de variables pour les requêtes de graphique

Variable	Équation	Sigle requête	Ordre ?
Stationnement total	3.26	stat-tot	Oui
Densité stationnement	3.52	stat-sup	Oui
Stationnement par personne (2021)	3.53	stat-popu-2021	Oui
Stationnement par personne (2016)	3.53	stat-popu-2016	Oui
Stationnement par permis	3.54	stat-perm	Oui
Stationnement par voiture	3.56	stat-voit	Oui
Pourcentage du territoire dédié au stationnement	3.55	stat-perc	Oui
Superficie du quartier	3.27	superf	Non
Nombre de permis	3.34	perm	Non
Population (2021)	3.35	popu-2021	Non
Population (2016)	3.35	popu-2016	Non
Voiture par personne (2021)	3.60	voit-par-pers-2021	Non
Voiture par personne (2016)	3.60	voit-par-pers-2016	Non
Voiture par permis	3.61	voit-par-perm	Non
Densité de population (2021)	3.62	dens-pop-2021	Non
Densité de population (2016)	3.62	dens-pop-2016	Non
Valeur moyenne de logements	3.51	val-log-moy	Non
Superficie moyenne des logements	3.50	sup-log-moy	Non
Valeur foncière totale du quartier	3.48	val-tot-quart	Non
Valeur foncière résidentielle du quartier	3.49	val-tot-log-quart	Non
Valeur foncière totale par superficie brute de quartier	3.63	val-tot-sup	Non

TABLEAU 4.1 Sigles de variables pour les requêtes de graphique (suite)

Variable	Équation	Sigle requête	Ordre ?
Valeur foncière résidentielle par superficie brute de quartier	3.64	val-tot-log-sup	Non
Nombre de voitures des résidents	3.29	nb-voit	Non
Différence absolue maximale signée	3.32	nb-voit-delta	Non
Nombre de voitures max	3.30	nb-voit-max	Non
Stationnement par voiture max	3.57	stat-voit-max	Oui
Nombre de places de stationnement inutilisées	3.65	stat-inu	Oui
Superficie de stationnement inutilisée	3.66	stat-inu-sup	Oui
Part modale auto-conducteur des résidents	3.38	pm-ac-res	Non
Part modale auto-passager des résidents	3.38	pm-ap-res	Non
Part modale TC des résidents	3.38	pm-tc-res	Non
Part modale marche-vélo des résidents	3.38	pm-mv-res	Non
Part modale bus scolaire des résidents	3.38	pm-bs-res	Non
Part modale auto-conducteur interne	3.41	pm-ac-int	Non
Part modale auto-passager interne	3.41	pm-ap-int	Non
Part modale TC interne	3.41	pm-tc-int	Non
Part modale marche-vélo interne	3.41	pm-mv-int	Non
Part modale bus scolaire interne	3.41	pm-bs-int	Non
Part modale auto-conducteur des déplacements à destination du quartier	3.47	pm-ac-des	Non
Part modale auto-passager des déplacements à destination du quartier	3.47	pm-ap-des	Non
Part modale TC des déplacements à destination du quartier	3.47	pm-tc-des	Non
Part modale marche vélo des déplacements à destination du quartier	3.47	pm-mv-des	Non
Part modale bus scolaire des déplacements à destination du quartier	3.47	pm-bs-des	Non
Part modale auto-conducteur des déplacements provenant du quartier	3.44	pm-ac-ori	Non
Part modale auto-passager des déplacements provenant du quartier	3.44	pm-ap-ori	Non

Tableau 4.1 Sigles de variables pour les requêtes de graphique (suite)

Variable	Équation	Sigle requête	Ordre ?
Part modale TC des déplacements provenant du quartier	3.44	pm-tc-ori	Non
Part modale marche vélo des déplacements provenant du quartier	3.44	pm-mv-ori	Non
Part modale bus scolaire des déplacements provenant du quartier	3.44	pm-bs-ori	Non

Cela conclut la section sur l'API. Les pages web conçues pour modifier et manipuler toutes les données sont discutées à la section suivante.

4.1.3 Pages de l'interface

Plusieurs pages ont été développées pour permettre à un analyste de visualiser, modifier les intrants et analyser les résultats de l'estimation. Ces pages seront décrites dans cette section. Il est important de noter qu'aucune page de modification ou d'association du rôle et du cadastre n'a encore été mise en place. Cette omission sera discutée dans les limites de l'étude.

Historique

La page d'historique constitue la page d'accueil du site web. L'utilisateur pourra y modifier les périodes et téléverser les cartes. Dans l'implémentation actuelle, les fonctionnalités de modification ne sont que partiellement implémentées. Le haut de la page est le menu principal qui est commun à l'ensemble des pages.

Le bandeau gauche manipule l'historique tel que défini dans la table historique_geopol définie au tableau 3.11. On peut y ajouter des périodes, changer les dates des périodes et le nom des grandes périodes de l'historique. Les années sont inclusives (i.e 2023-2027 inclut les années 2023, 2024, 2025, 2026 et 2027).

Le bandeau en bas permet de modifier certaines informations quant au nom de la ville et du secteur. Il est important de noter que les noms des municipalités peuvent être corrigés

et des secteurs supprimés, mais aucune modification des limites géopolitiques ne peut être complétée. Les limites doivent être ajoutées à partir de fichiers GeoJSON.

Les secteurs ne peuvent être supprimés que s'ils ne sont pas utilisés dans des RST.

La carte montre les secteurs et est mise à jour en fonction de la période sélectionnée en même temps que le tableau en bas de page. Seuls les territoires associés à la période sélectionnée sont affichés. Une fois que l'utilisateur a rempli l'historique, il peut passer à la définition des règlements.

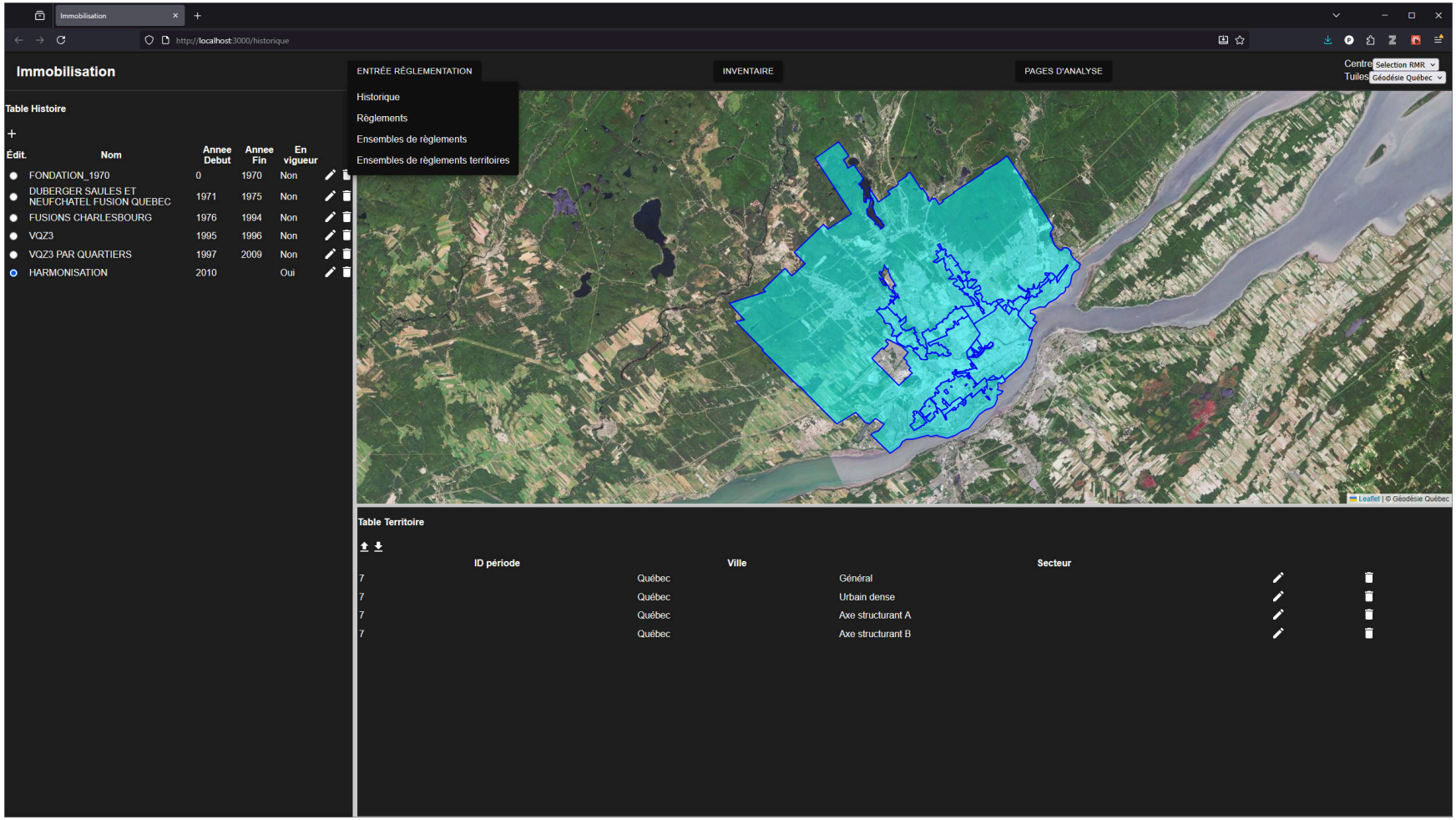


FIGURE 4.8 Page d'historique

Règlements

La page règlements permet de créer et modifier les différents règlements. La figure 4.10 montre l'interface permettant de modifier les règlements.

Deux icônes se trouvent en dessous du menu. La première permet de faire une recherche dans les règlements et la deuxième permet d'ajouter un nouveau règlement. La partie centrale est une liste des règlements entreposés dans la base de données, en montrant les informations entreposées dans l'entête du règlement incluant :une description du règlement, les dates d'entrée en vigueur et d'abrogation du règlement, des informations sur le texte de loi, l'article et le paragraphe où sont définis les règlements dans la loi et le nom de la ville d'où vient le règlement. Il est important de noter que le nom de cette ville n'est pas associé aux informations d'historique, mais est simplement là pour référence. En cliquant sur un élément dans la liste, l'utilisateur peut accéder à la définition complète du règlement dans le panneau du bas.

La partie inférieure de l'écran permet de visualiser et modifier la définition du règlement. Une fois que l'utilisateur a défini les règlements, il passe à l'étape de construction des ensembles de règlements. La figure 4.9 montre la fonction de filtre avec des résultats.

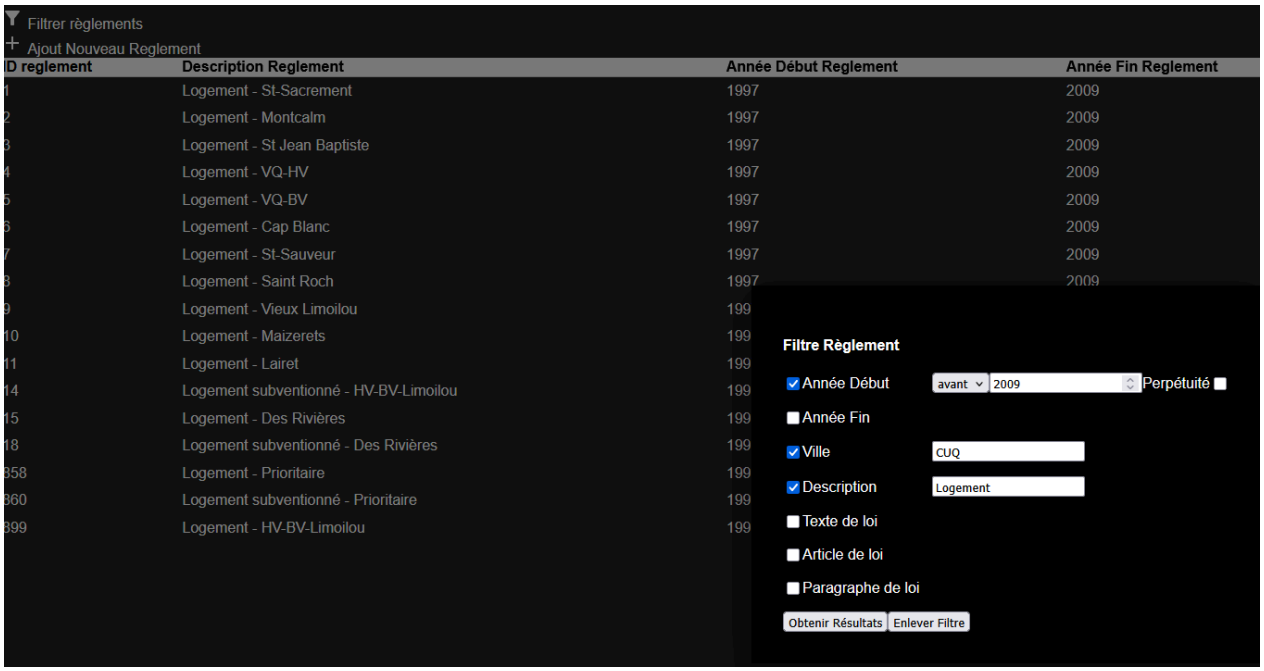


FIGURE 4.9 Recherche de règlements

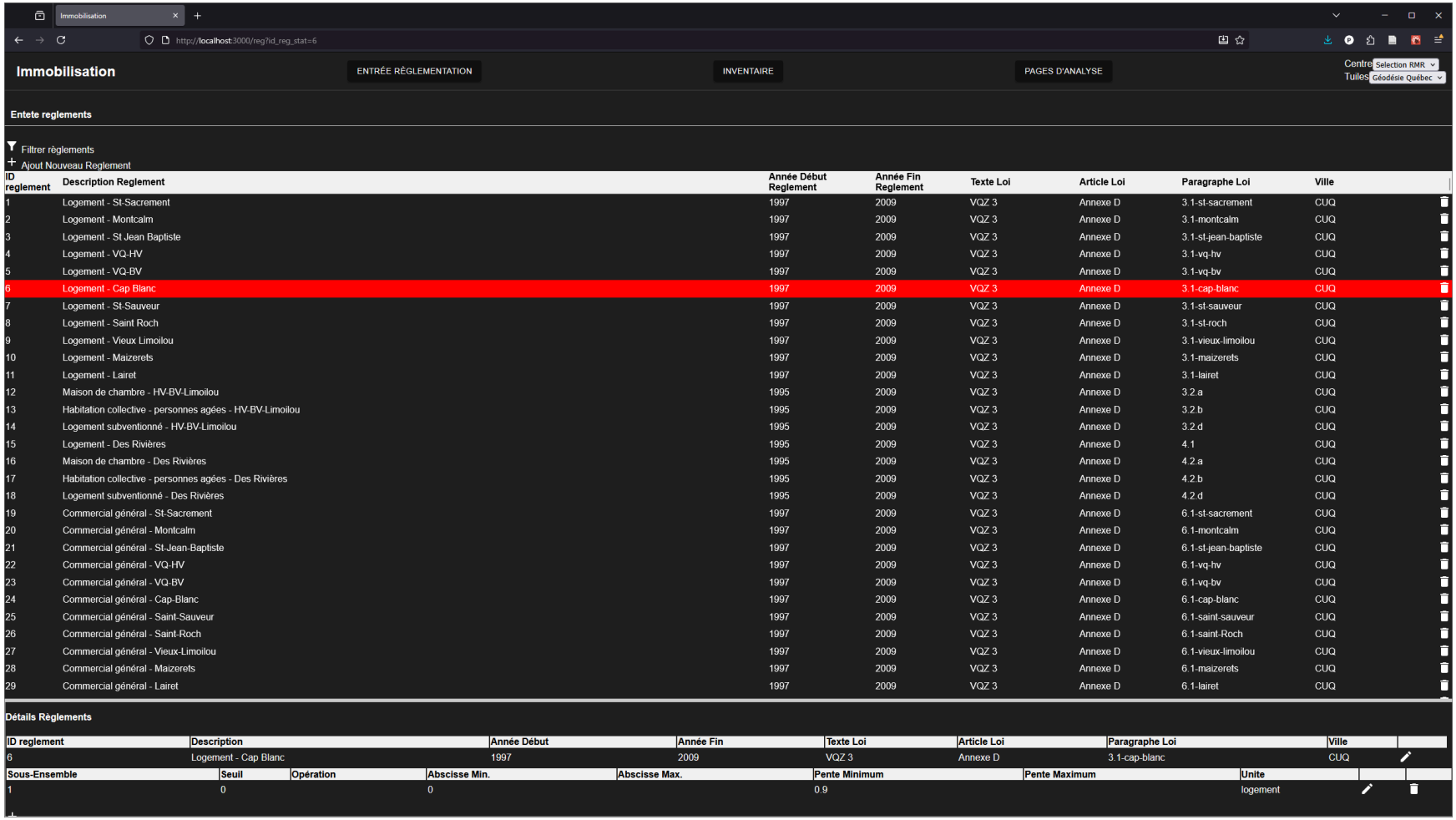


FIGURE 4.10 Page de visualisation et d'édition de règlements

Ensembles de règlements

La page d'ensembles de règlements permet de modifier les ensembles de règlements et est montrée à la figure 4.12. Le bandeau de gauche donne une liste de tous les ensembles de règlements entreposés dans la table ensembles_reglement_stat. L'icône en haut de la page permet d'ajouter un nouvel ensemble de règlements. La corbeille à côté de chaque ensemble de règlements permet de le supprimer au besoin.

Le panneau de droite permet de voir les associations qui sont faites dans la table association_er_reg_stat. Ces associations spécifient les règlements à utiliser pour chaque utilisation du sol. Les icônes de crayons permettent de commencer la modification des différents éléments. La modification des associations est faite dans une fenêtre montrée à la figure 4.11. Les associations peuvent aussi être supprimées à l'aide de l'icône de corbeille. La fenêtre supplémentaire permet de sélectionner les CUBF en commençant par la catégorie la plus générale. Si l'utilisateur désire plus de précision, les bandes déroulantes sous la bande déroulante initiale permettent de spécifier des CUBF de plus en plus détaillés. Les ensembles de règlements sont ensuite associés aux territoires en utilisant la page des ensembles de règlements-territoires.

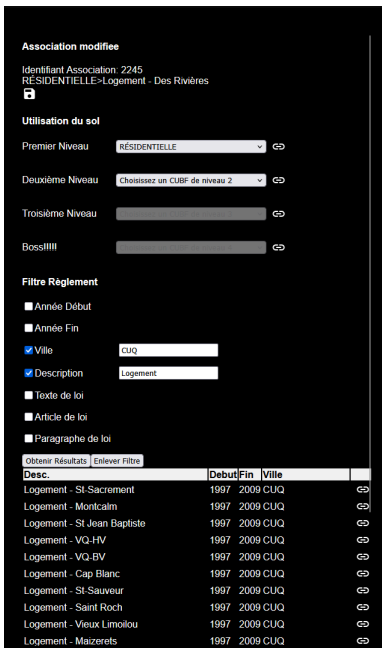


FIGURE 4.11 Création d'une association entre un CUBF et un règlement

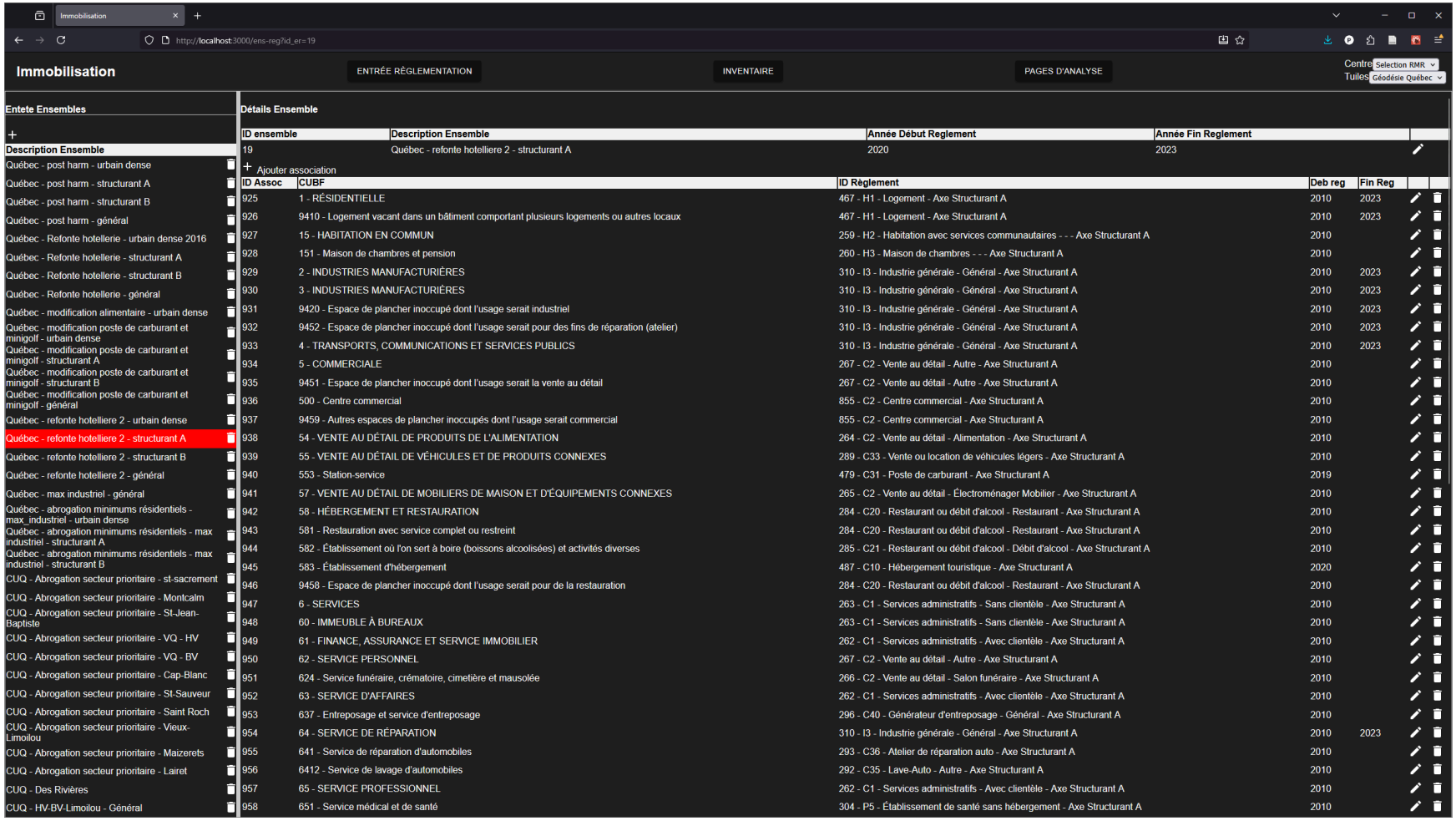


FIGURE 4.12 Page de visualisation et d'édition des ensembles de règlements

Ensembles de Règlements Territoires

La page d'ensembles de règlements-territoire permet d'associer les ensembles de règlements aux territoires, modifiant ainsi la table association_er_territoire. Cette étape se fait en sélectionnant une période et un territoire à l'aide des listes déroulantes en haut de la page. Un diagramme de Gantt montre l'évolution de la réglementation sur un territoire au fil des années. L'utilisateur peut ensuite ajouter ou modifier la liste des ensembles de règlements associés avec le territoire ou supprimer une association. À droite du diagramme de Gantt, une carte montre le territoire auquel on associe les ensembles de règlements.

La figure 4.13 montre l'interface qui a été complétée pour permettre cette édition. Une fois que l'utilisateur a défini ces associations, il peut passer aller voir comment les différents ensembles de règlements se comparent à la page d'analyse des règlements.

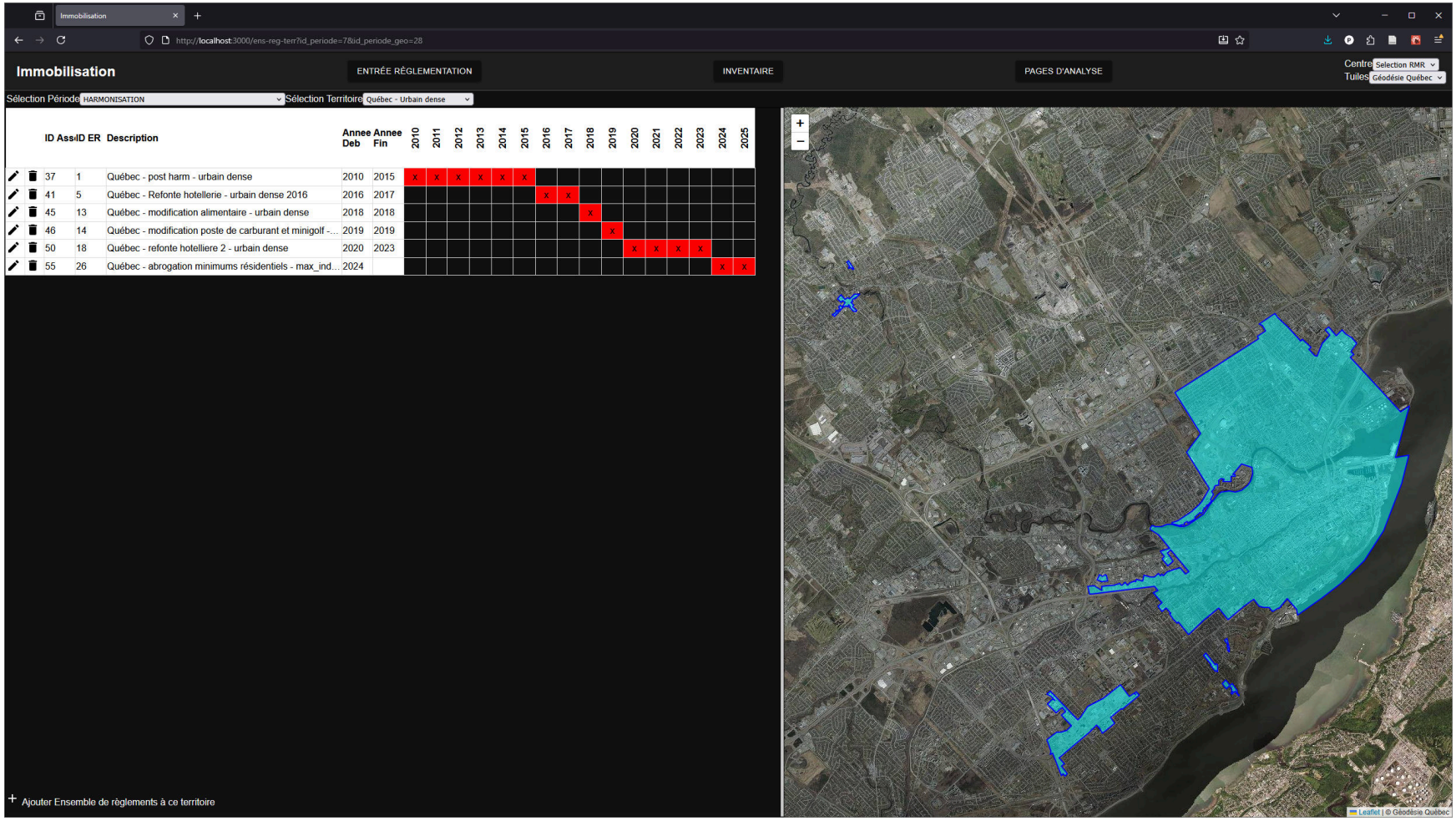


FIGURE 4.13 Page de modification des ensembles de règlements territoire

Analyse Règlements

La page d'analyse de règlements permet de comparer les ensembles de règlements graphiquement. L'utilisateur peut choisir des ensembles de règlements par localisation (pour voir l'évolution dans le temps), par date de validité (pour voir la distribution spatiale) ou manuellement. Une fois les ensembles de règlements choisis, l'utilisateur doit choisir une utilisation du sol en cliquant sur le crayon en haut à gauche de chaque graphique. La figure 4.14 montre le menu d'édition des graphiques. Les limites de l'axe des X peuvent aussi être changées dans le panneau d'édition. Les règlements qui n'ont pas d'unités compatibles sont ensuite éliminés de la sélection. Une fois l'utilisation du sol choisie, les ensembles de règlements qui n'ont pas des unités compatibles sont automatiquement enlevés des graphiques. La figure 4.15 montre la page avec les graphiques. Si l'utilisateur est satisfait, il peut passer à la phase d'estimation de la capacité de stationnement.

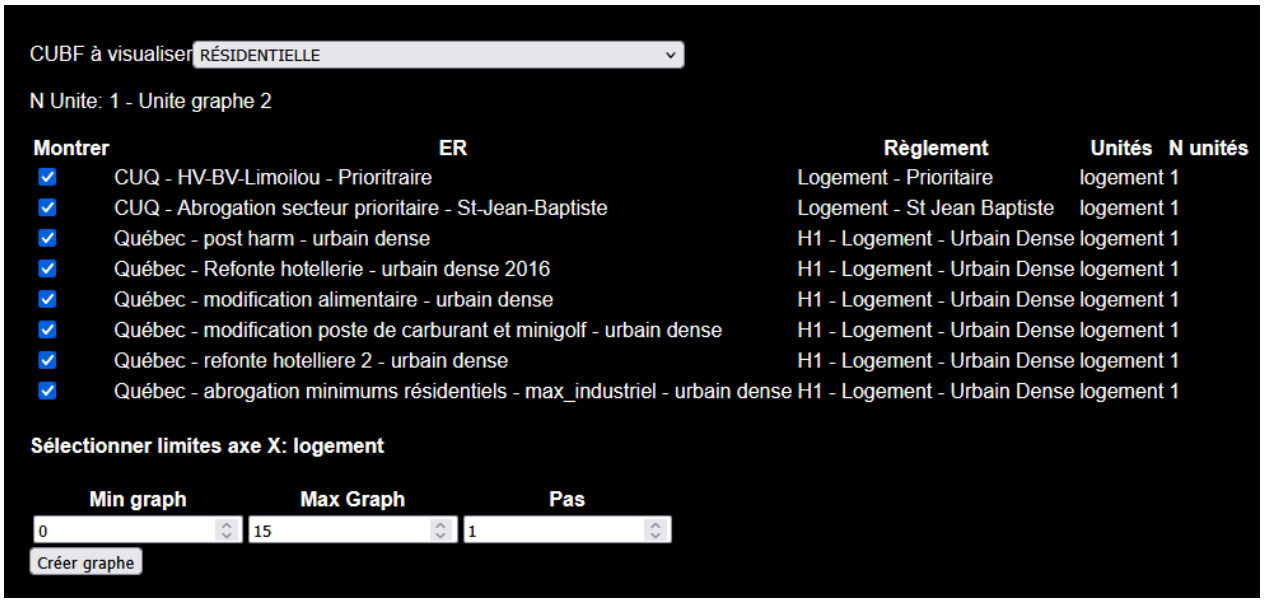


FIGURE 4.14 Édition des paramètres d'un graphique

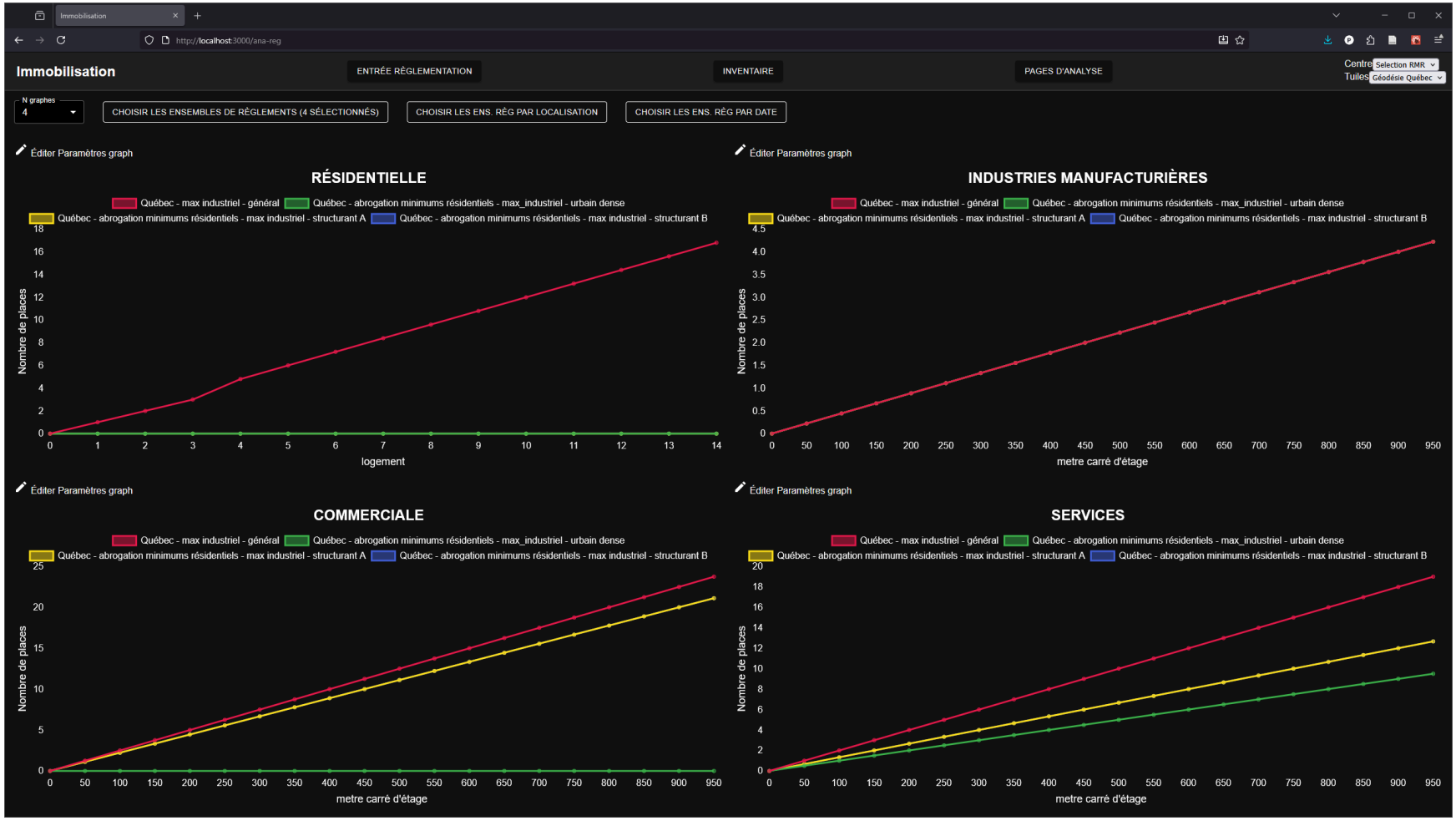
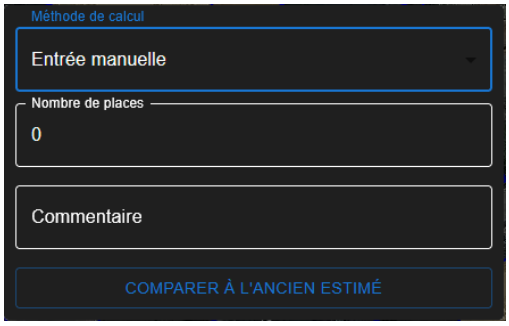


FIGURE 4.15 Page de graphiques de règlements

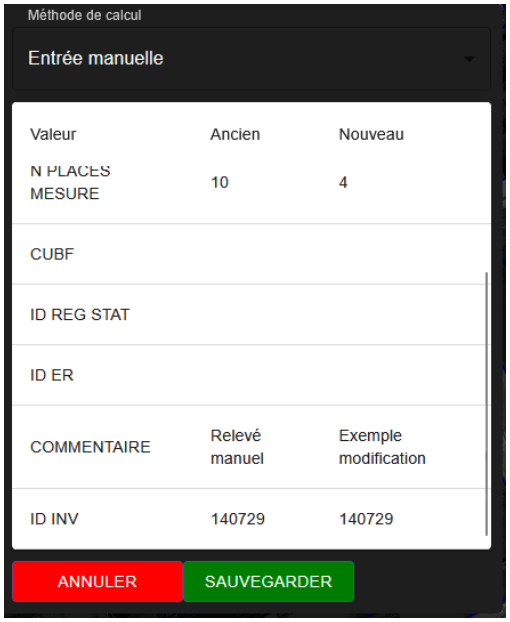
Modification des estimations

La page de modification d'inventaire permet de visualiser et modifier les estimations créées. Elle est montrée à la figure 4.19. L'écran est divisé en 4 sections. La première en haut contrôle quatre fonctions ; la liste déroulante à gauche sélectionne le quartier à modifier. Juste à sa droite, un bouton permet de recalculer l'ensemble des lots du quartier. La case à cocher permet d'alterner entre voir tous les lots ou seulement les lots associés à des entrées du rôle. Finalement, la liste déroulante permettra à terme de changer la coloration des lots en fonction de différentes variables. L'implémentation actuelle permet seulement de mettre le nombre de places de stationnement. L'écran central donne une carte qui permet de voir le cadastre et de cliquer sur les lots à modifier. La section du bas donne une table avec l'ensemble des estimations de stationnement dans le quartier pour toutes les méthodes d'estimation. La carte et la table affichent le même lot s'il est sélectionné. Le bandeau à droite donne accès aux détails reliés aux estimations de la capacité de stationnement pour le lot sélectionné. On peut accéder aux données foncières, aux champs du cadastre et aux entêtes des règlements qui ont été utilisés pour calculer l'estimation. La fonctionnalité permettant de naviguer aux règlements à partir de cette page n'a pas encore été implémentée.

En cliquant sur le bouton « modifier l'inventaire », une fenêtre modale (Figure 4.20) s'ouvre ce qui permet de sélectionner la méthode d'estimation à utiliser. Les étapes reliées à chaque méthode sont montrées dans les figures 4.16, 4.17 et 4.18. Dans tous les cas, un tableau de confirmation est affiché qui compare la nouvelle valeur à l'estimation enregistrée. L'analyste peut alors écraser l'ancienne valeur ou annuler s'il le veut.

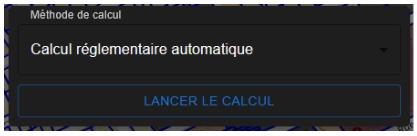


(a) Entrée d'un comptage manuel

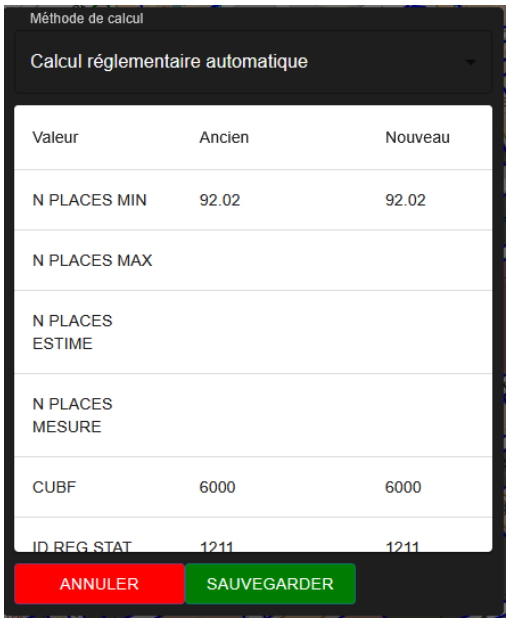


(b) Confirmation d'un comptage manuel

FIGURE 4.16 Processus pour un comptage manuel

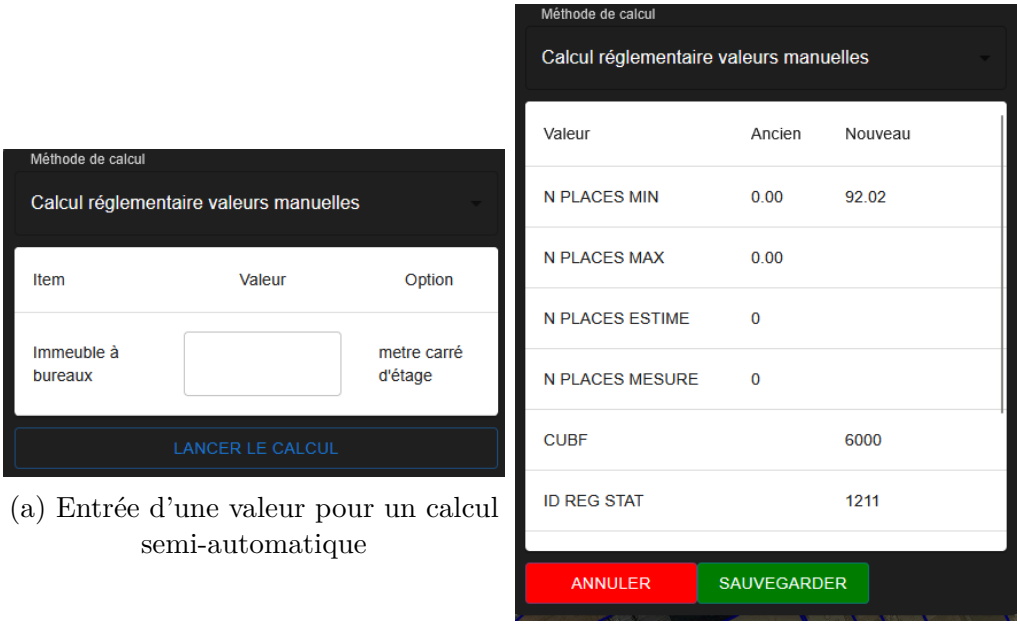


(a) Lancement de prédiction pour un lot



(b) Confirmation d'une prédiction automatique

FIGURE 4.18 Processus de prédiction automatique



(a) Entrée d'une valeur pour un calcul semi-automatique

(b) Confirmation entrée semi-automatique

FIGURE 4.17 Processus de calcul d'une estimation semi-automatique

Finalement, l'outil permet aussi de lancer une prédiction pour un quartier complet à l'aide du bouton situé à côté de la sélection du quartier. Les nouvelles prédictions sont alors comparées à l'ancienne. Elles peuvent alors être approuvées et sauvegardées une à une ou approuvées en bloc. La figure 4.21 montre la page permettant la comparaison de l'ancienne estimation à la nouvelle.

La moitié gauche montre l'ancienne estimation (en jaune) tandis que la nouvelle estimation est montrée à droite (en bleu). Les couleurs sont choisies selon le mnémonique « Old is gold, new is blue ». Les valeurs ayant changé sont surlignées en rouge. Un enjeu demeure autour de la précision d'arrondi menant à un nombre important de lots montrant un grand changement entre deux itérations.

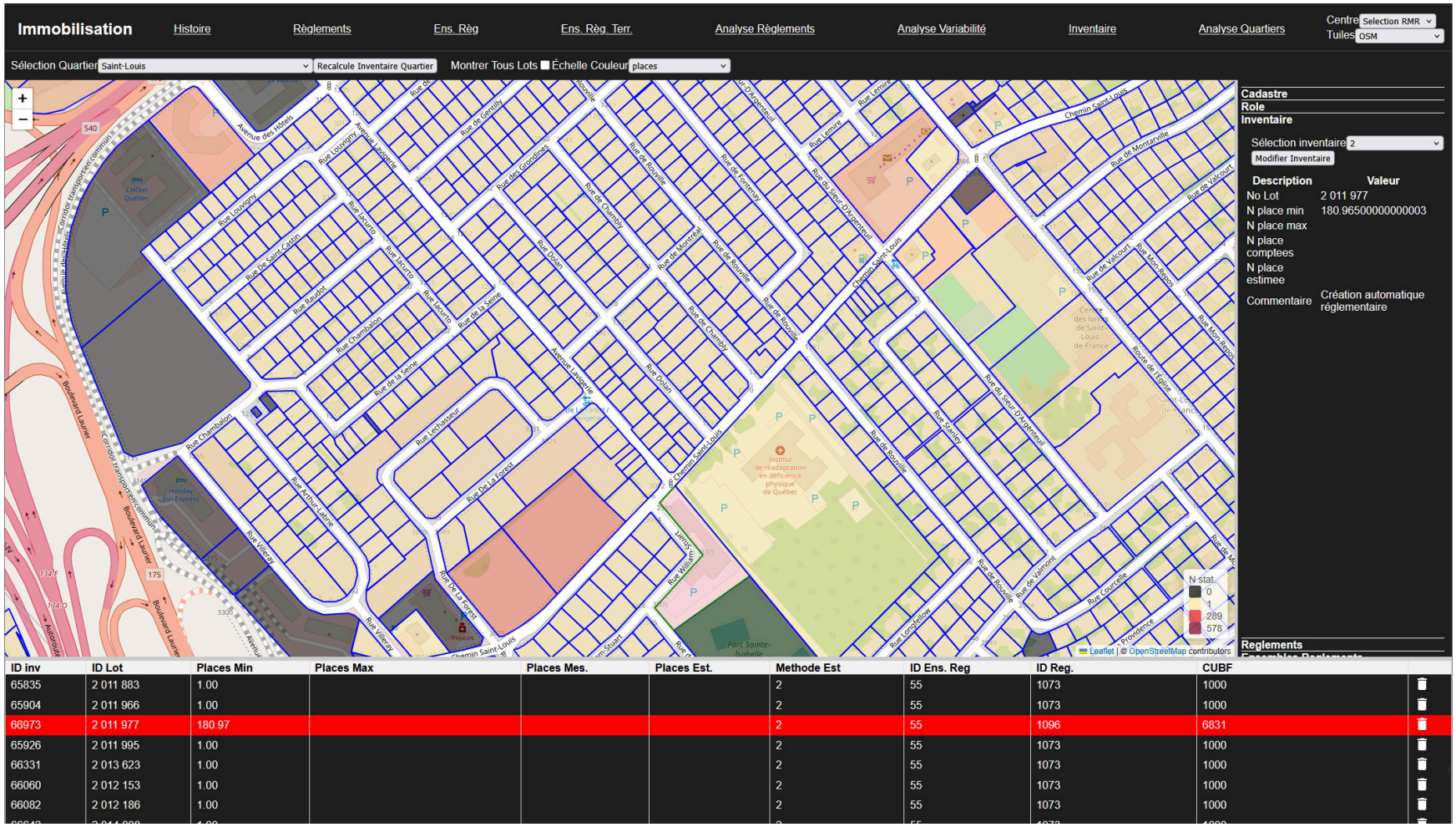


FIGURE 4.19 Page de visualisation des prédictions

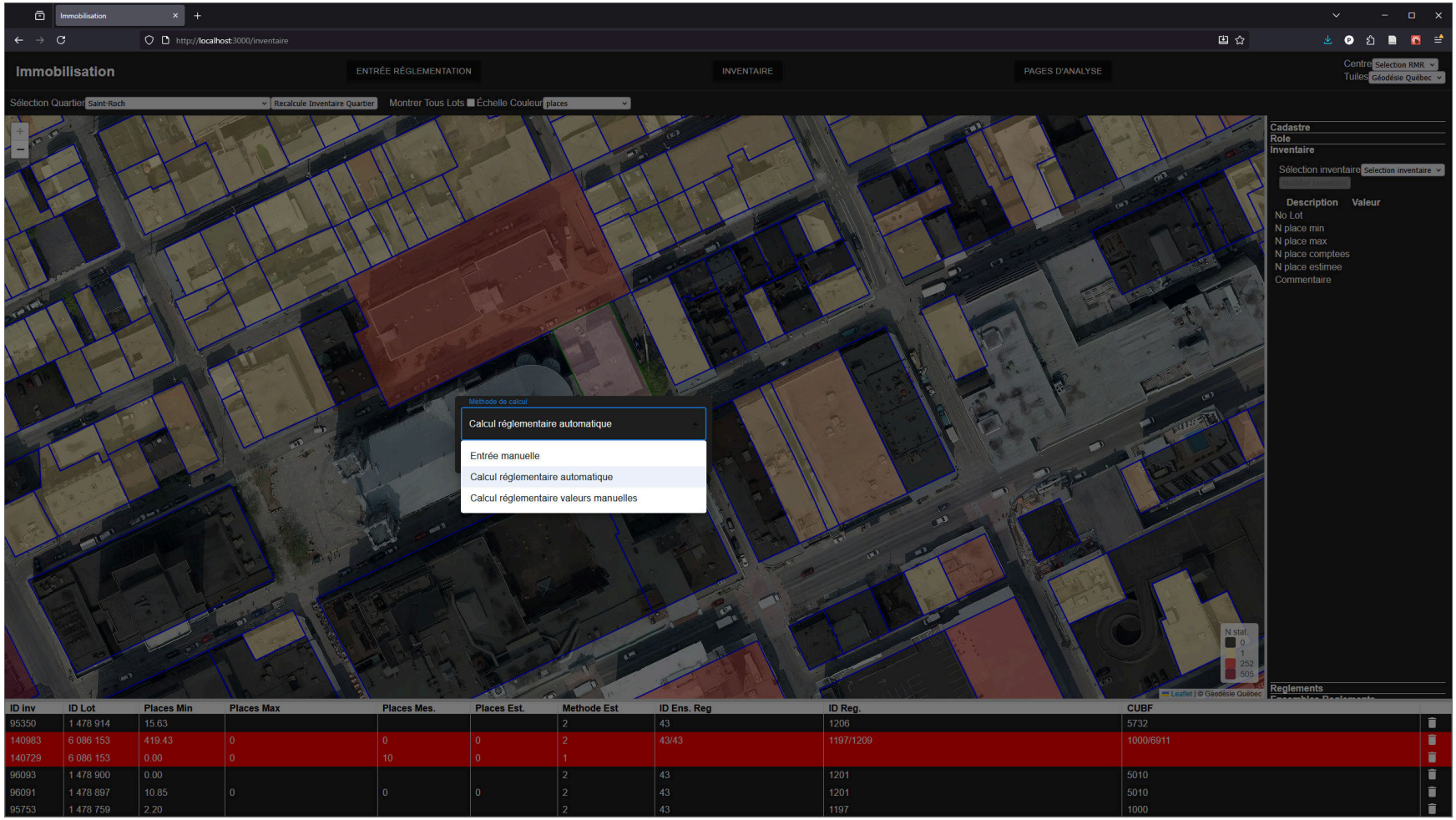
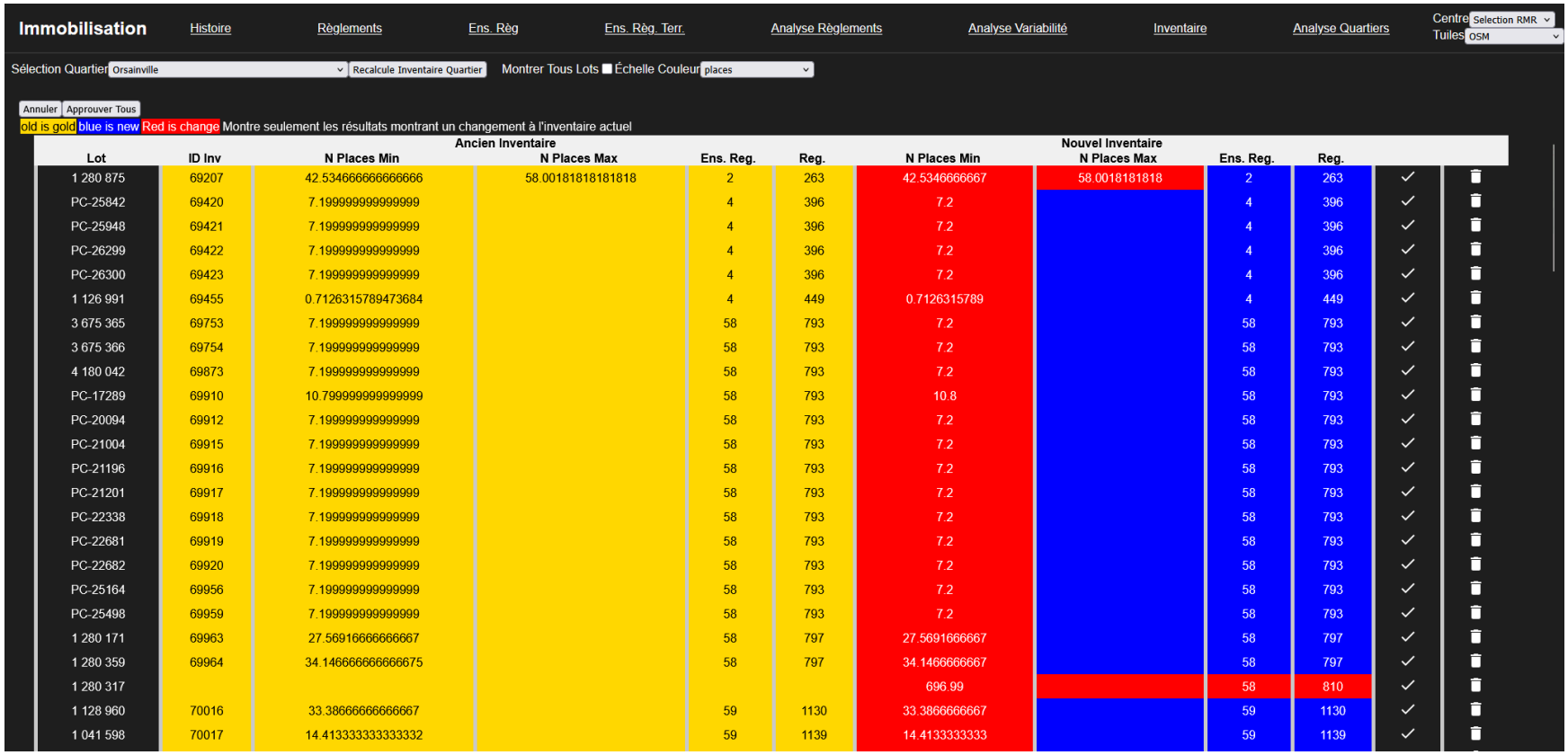


FIGURE 4.20 Panneau pour lancer les prédictions



	Ancien Inventaire					Nouvel Inventaire					
Lot	ID Inv	N Places Min	N Places Max	Ens. Reg.	Reg.	N Places Min	N Places Max	Ens. Reg.	Reg.		
1 280 875	69207	42.534666666666666	58.00181818181818	2	263	42.5346666667	58.0018181818	2	263	✓	
PC-25842	69420	7.199999999999999		4	396	7.2		4	396	✓	
PC-25948	69421	7.199999999999999		4	396	7.2		4	396	✓	
PC-26299	69422	7.199999999999999		4	396	7.2		4	396	✓	
PC-26300	69423	7.199999999999999		4	396	7.2		4	396	✓	
1 126 991	69455	0.7126315789473684		4	449	0.7126315789		4	449	✓	
3 675 365	69753	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
3 675 366	69754	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
4 180 042	69873	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-17289	69910	10.799999999999999		58	793	10.8		58	793	✓	
PC-20094	69912	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-21004	69915	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-21196	69916	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-21201	69917	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-22338	69918	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-22681	69919	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-22682	69920	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-25164	69956	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
PC-25498	69959	7.199999999999999		58	793	7.2		58	793	✓	
1 280 171	69963	27.56916666666667		58	797	27.5691666667		58	797	✓	
1 280 359	69964	34.146666666666675		58	797	34.1466666667		58	797	✓	
1 280 317						696.99		58	810	✓	
1 128 960	70016	33.38666666666667		59	1130	33.3866666667		59	1130	✓	
1 041 598	70017	14.413333333333332		59	1139	14.4133333333		59	1139	✓	

FIGURE 4.21 Page d'approbation des prédictions pour un quartier

Collecte des données d'évaluation

Une page de collecte de données et de paramétrage a été créée pour faciliter l'évaluation du modèle. En sélectionnant l'option d'évaluation dans le menu principal, l'utilisateur tombe sur la page montrée à la figure 4.22. L'icône d'engrenage en haut à gauche de la page ouvre l'onglet de définition de catégories. L'onglet est montré à la figure 4.23. Après avoir spécifié les catégories, l'utilisateur clique sur le bouton rouge pour régénérer l'échantillon puis retourne à la page de collecte des données. L'utilisateur peut alors cliquer sur la liste de lots qui constituent l'échantillon pour l'évaluation. En cliquant sur la liste, le tableau donnant les résultats de prédictions se remplit, et le graphique montrant la distribution des prédictions et des valeurs observées sont mis à jour. Les crayons à côté de la valeur estimée permettent de relancer le calcul pour le lot au besoin et l'utilisateur peut aussi entrer le nombre de places comptées. L'adresse du lot est donnée au cas où l'utilisateur veuille consulter de l'imagerie sur un autre site de cartographie. Pour visualiser les résultats de l'évaluation pour toutes les catégories, l'utilisateur peut alors aller à la page de sommaire d'évaluation.

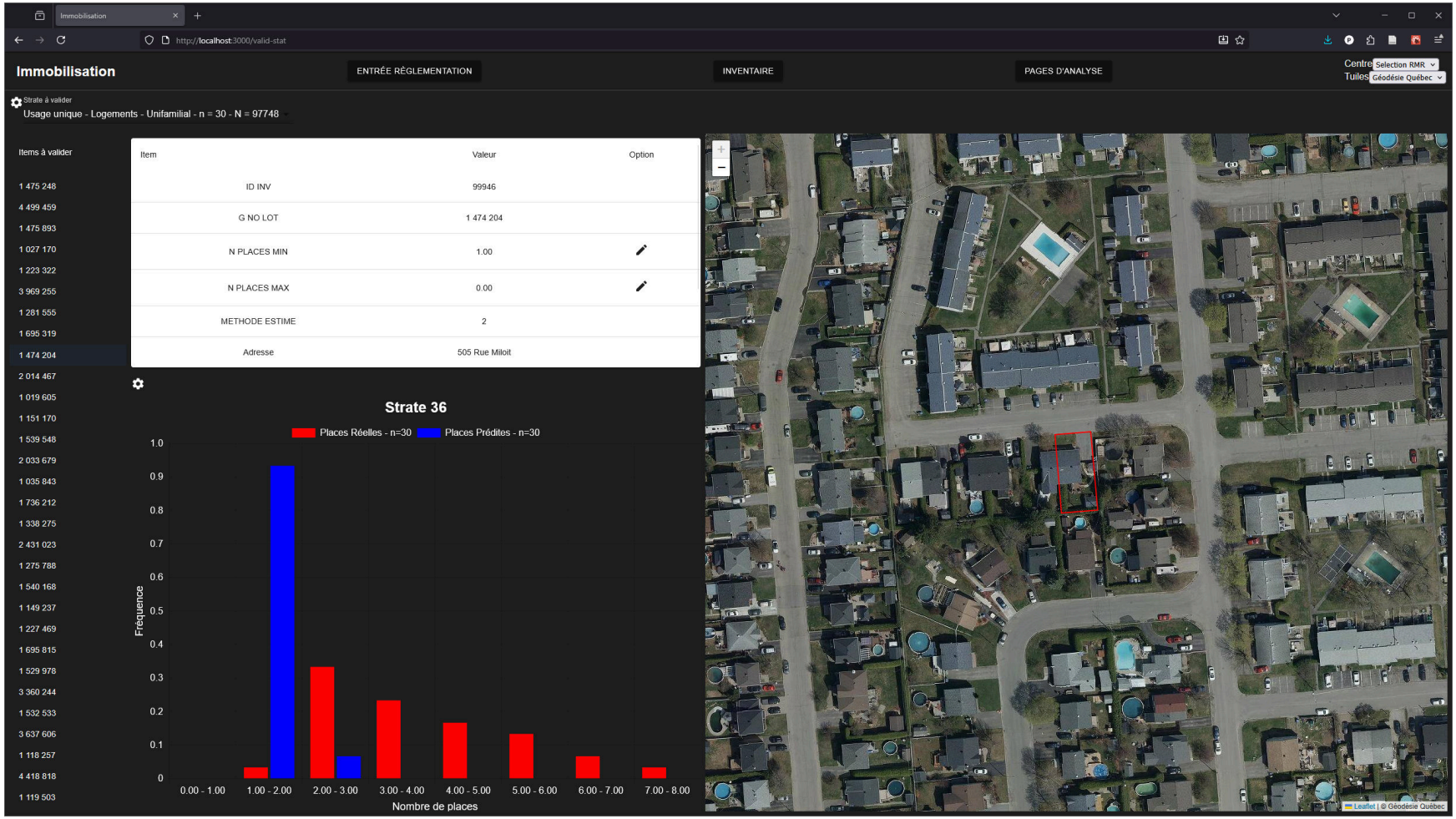


FIGURE 4.22 Page d'évaluation de prédictions automatique

s

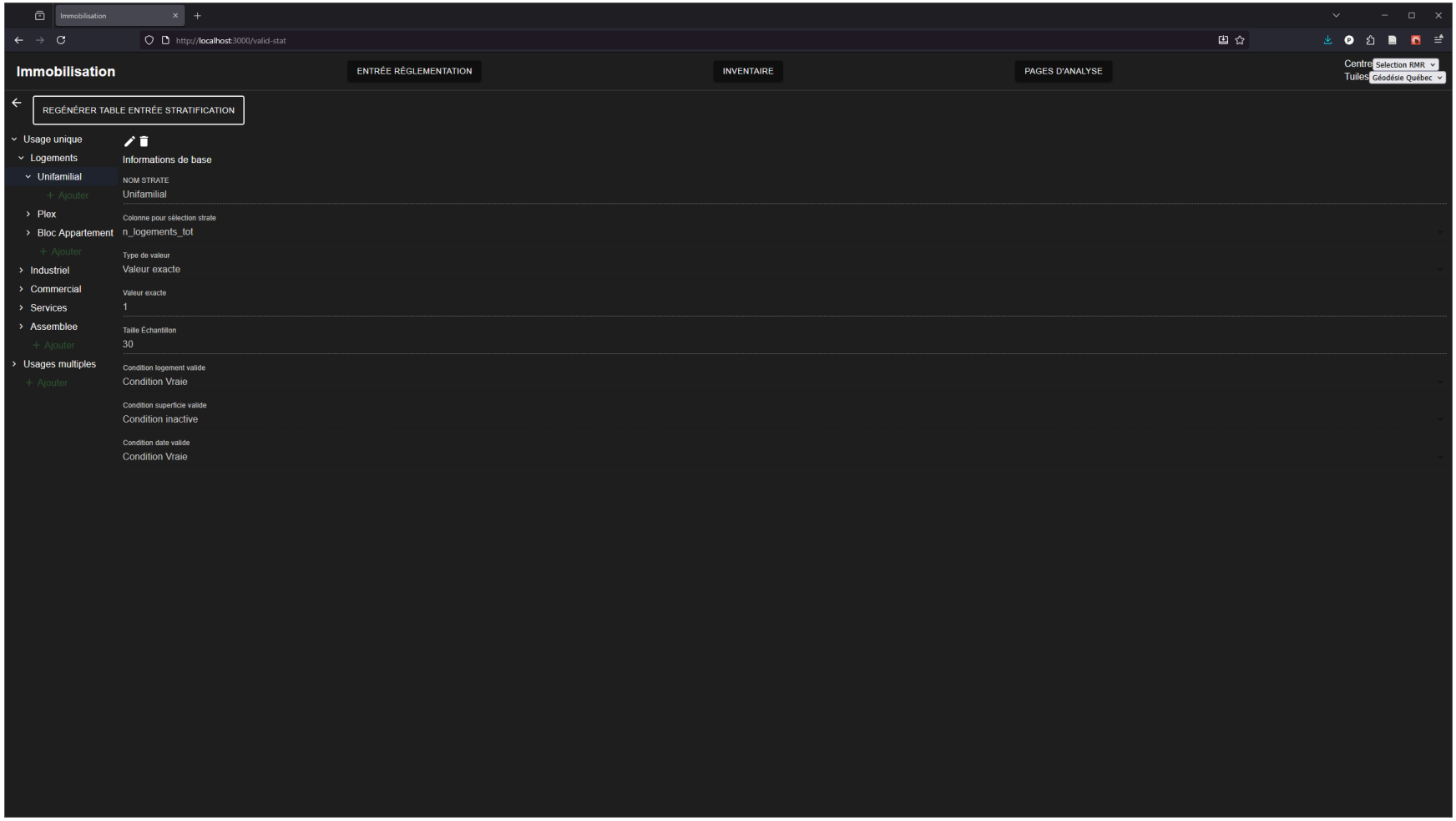


FIGURE 4.23 Création des catégories d'évaluation

Sommaire d'évaluation de modèle

Une page de sommaire d'évaluation a aussi été développée pour pouvoir faire graphiquement le sommaire des erreurs sur les différentes catégories de validation définies à l'évaluation. La figure 4.24 montre la page en question. L'utilisateur peut modifier le nombre de graphiques montrés sur la page, limiter l'échelle des x et choisir le type de graphique. Aucune des étapes d'évaluation mathématique discutées dans la section 3.6 n'a encore été implémentée dans l'interface web. Si l'utilisateur est satisfait de l'estimation, il peut maintenant procéder à l'analyse.



FIGURE 4.24 Sommaire d'évaluation de modèle

Page d'analyse agrégée

L'outil inclut aussi une page qui permet de graphiquement représenter les prédictions sous différentes formes. La figure 4.25 montre le point d'atterrissage. L'utilisateur peut alors sélectionner quatre types de représentations graphiques : une carte choroplèthe, un histogramme, un graphique XY ou un profil d'accumulation de véhicules.

Au-delà de la représentation graphique, d'autres options s'offrent à l'utilisateur. La première permet de sélectionner l'ordre de préférence des méthodes d'estimations enregistrées pour un même lot. Cet ordre est utilisé pour toutes les variables reliées au stationnement. D'autre part, deux boutons sont mis à disposition de l'utilisateur. Le premier met à jour les estimations de stationnement agrégées par quartier. Le second met à jour les autres indicateurs qui doivent être calculés à partir de données brutes comme la part modale, le nombre de permis et la population. Une fois la méthodologie sélectionnée, l'apparence de la page change. Les paragraphes suivants donneront des détails sur chacune des visualisations disponibles.

Cartographie Dans le cas où l'utilisateur visualise les données sous forme de carte, il doit ensuite sélectionner une variable à cartographier. Les variables disponibles sont listées dans la section 3.8.3. La figure 4.26 montre un exemple de ce type d'analyse. La couche de fond peut être modifiée à partir de la liste déroulante en haut à droite avec OSM, Géodésie Québec et une couche fournie par Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI) comme options. Ce choix de fond de carte est persistant entre les différentes pages.

Diagramme à barres Les variables listées à la section 3.8.3 peuvent être visualisées sous forme de diagramme à barres. La figure 4.27 montre un exemple de résultats.

Graphique XY Les variables listées à la section 3.8.3 peuvent être affichées sous forme de diagramme XY entre deux variables. La figure 4.28 montre un exemple de graphique dans l'outil.

Profils d'accumulation de véhicules Les profils d'accumulation de véhicules initialement développés par Morency et Trépanier (2008) et décrits à la section 3.8 peuvent être calculés et visualisés à partir de cette page. Initialement, la méthode était utilisée pour inférer une capacité théorique de stationnement requise pour accommoder tous les déplacements en automobile recensés. Avec une estimation de la capacité, il est possible de comparer la capacité théorique à la capacité estimée avec l'outil. La figure 4.29 montre l'interface.

Une autre analyse potentielle est l'analyse de variabilité qui sera discutée à la section suivante.

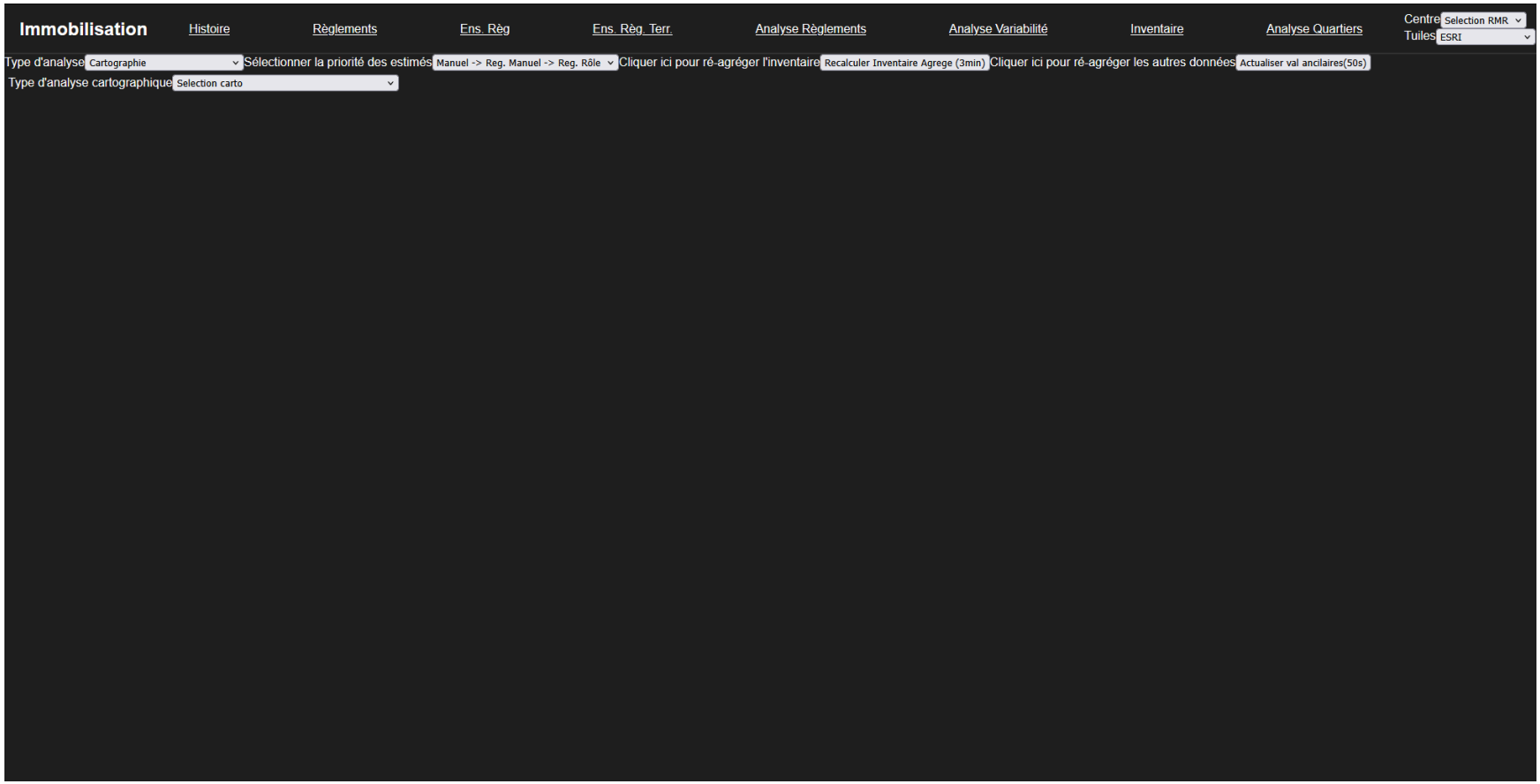


FIGURE 4.25 Page d'analyse de quartier

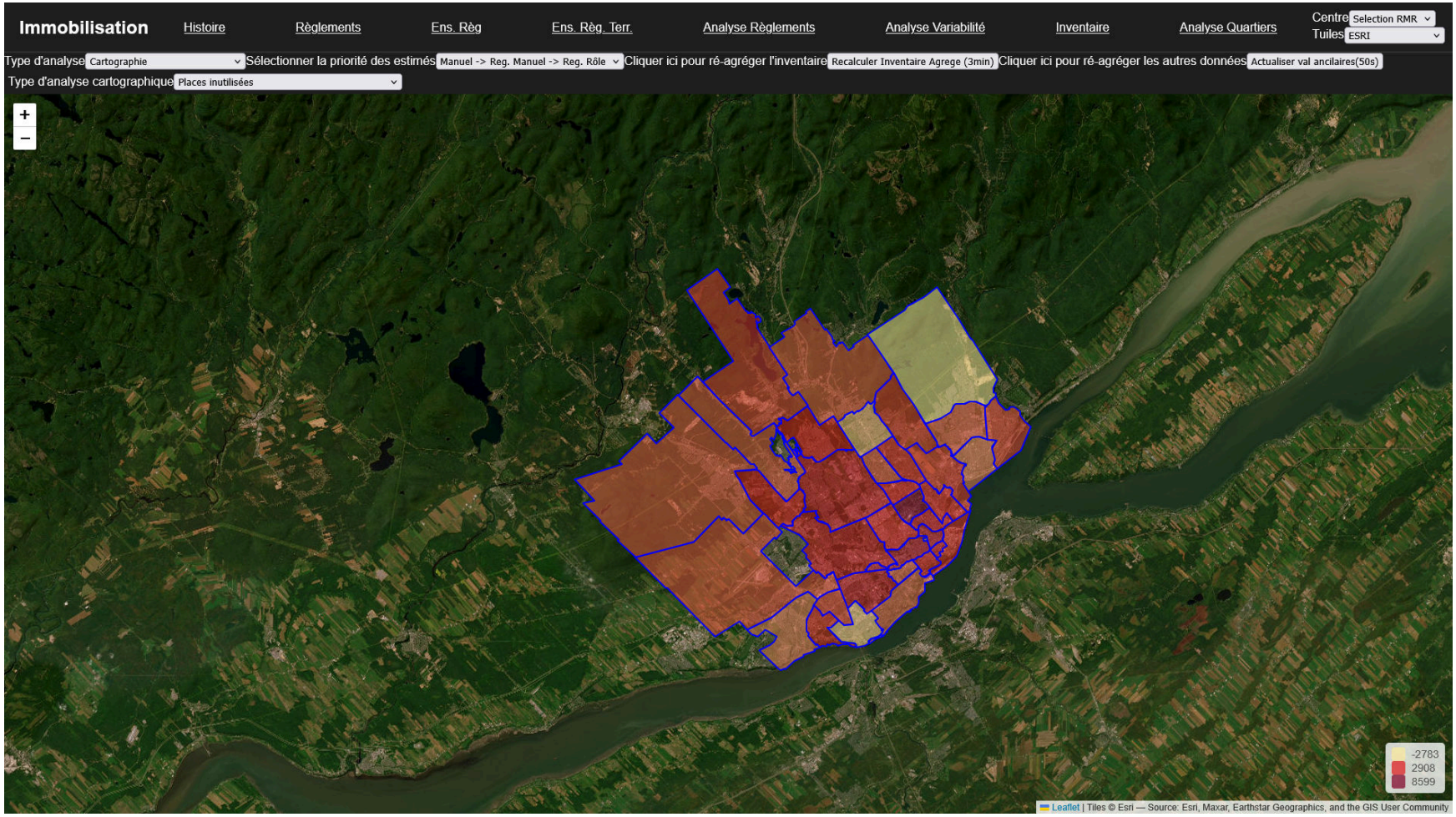


FIGURE 4.26 Analyse agrégée cartographique



FIGURE 4.27 Analyse agrégée par diagramme à barre

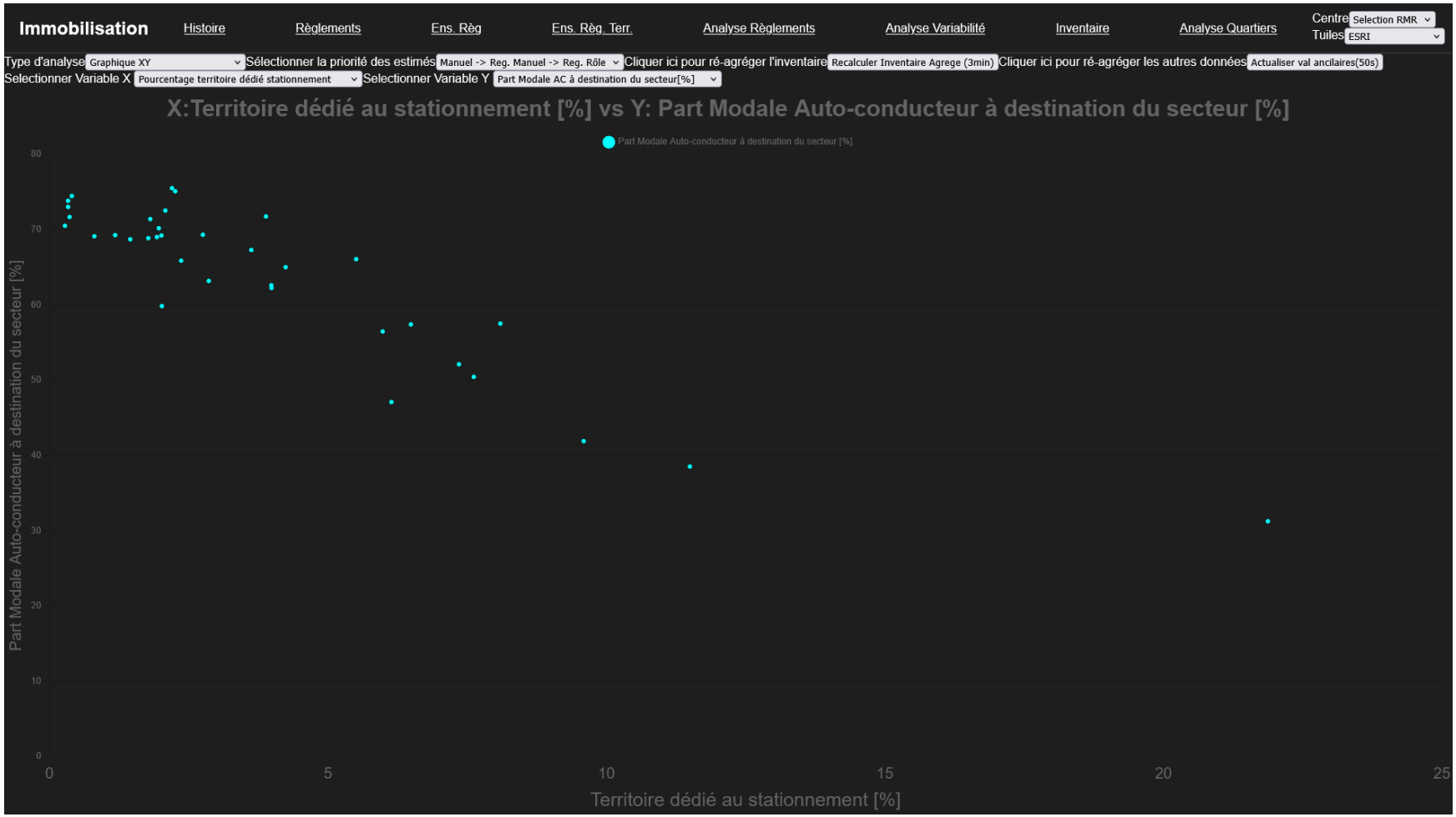


FIGURE 4.28 Analyse agrégée par diagramme XY

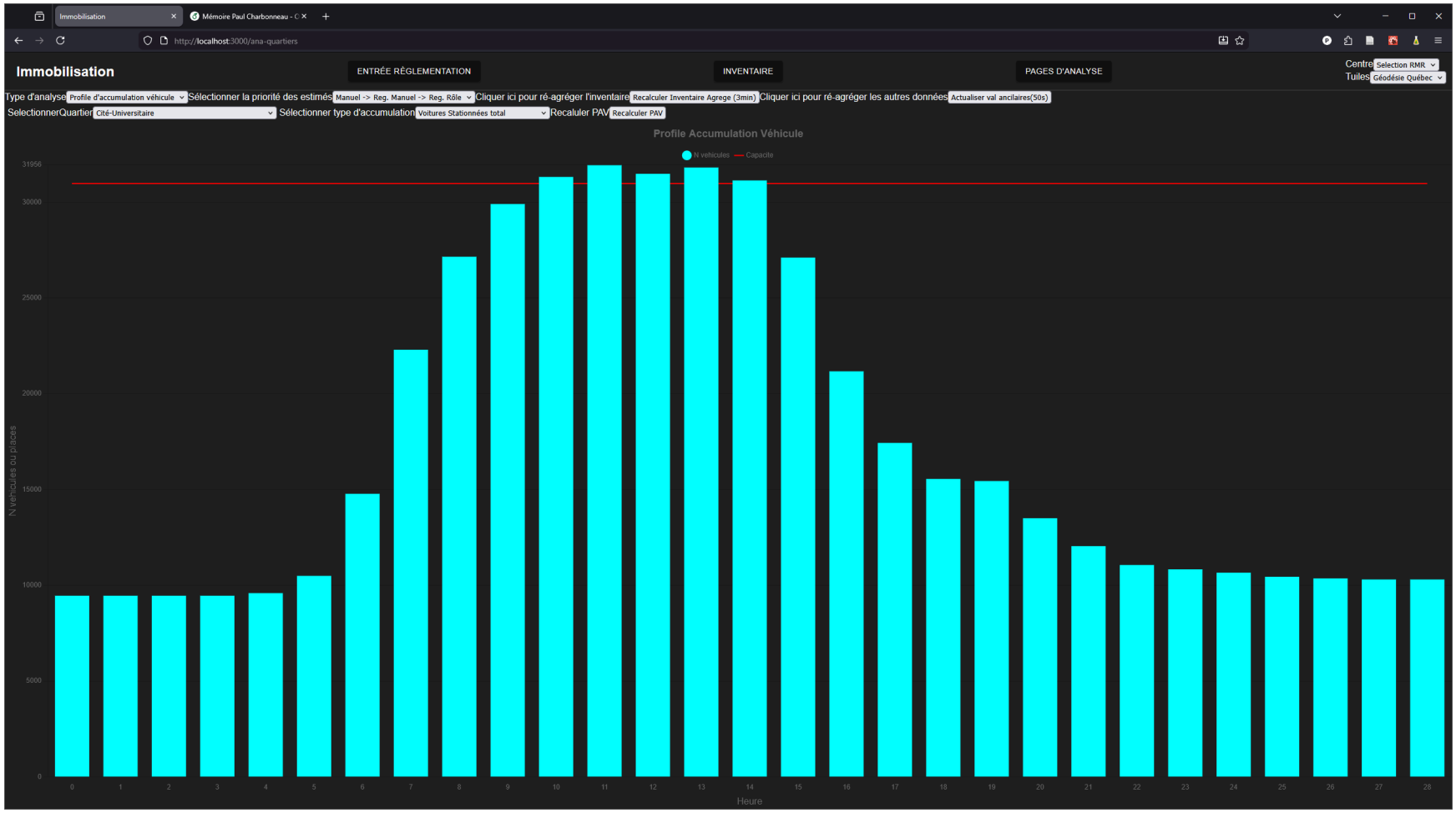


FIGURE 4.29 Profils d'accumulation Véhicules

Page d'analyse de variabilité

Une page a été mise en place pour piloter l'analyse de variabilité. L'utilisateur peut demander de recompiler l'estimation réglementaire ou relancer les calculs pour émettre des prédictions de tous les lots avec tous les ensembles de règlements. Ce processus est assez onéreux en matière de temps et la page est gelée pendant que ces calculs sont complétés. La figure 4.30 montre l'analyse de variabilité représentée à l'aide d'un diagramme à barres où chaque barre dénote un ensemble de règlements. Les diagrammes sont montrés pour la capacité de stationnement prédite agrégée par grande utilisation du sol. Le total de toutes les catégories est montré en bas à droite.

La deuxième visualisation à la figure 4.31 est un histogramme montrant la fréquence de prédiction d'un inventaire cumulé par utilisation du sol. L'histogramme peut avoir le nombre de places ou le ratio de l'estimation à l'inventaire actuel comme axe des x.

Finalement, la troisième visualisation est spécifiquement faite pour visualiser l'effet de facteurs de conversion d'unité sur l'estimation du total. L'analyse est répétée en mettant un facteur d'échelle de 0.75, 1 et 1.25 sur le facteur $p_{conv,i}$ s'il est différent de 1. Chaque boite représente un facteur d'échelle avec la position en y des points blancs dénotant une prédiction. Pour tous les graphiques, les ensembles de règlements d'intérêt peuvent être choisis par l'utilisateur. Cette section conclut la partie sur l'interface de l'outil développé. La section suivante donnera un aperçu des prédictions du modèle.



FIGURE 4.30 Analyse de variabilité - Visualisation de l'inventaire prédit pour chaque ensemble de règlements choisi



FIGURE 4.31 Analyse de variabilité - distribution des prédictions d'inventaire



FIGURE 4.32 Analyse de variabilité - diagramme à boite des prédictions d'inventaire

4.2 Résultats du calcul automatique

Une estimation réglementaire de stationnement a été calculée pour l'ensemble des propriétés dans les limites de la ville de Québec. Les graphiques présentés dans cette section ont été générés avec des scripts Python dédiés pour améliorer la lecture. La source est disponible dans un dépôt GitHub (Charbonneau, 2025c). Dans cette section, les prédictions seront présentées en utilisant les minimums calculés sauf indication contraire. Au total, la méthode réglementaire donne une estimation de 498 800 places de stationnement. La figure 4.33 montre la distribution des places de stationnement entre les différents usages du sol.

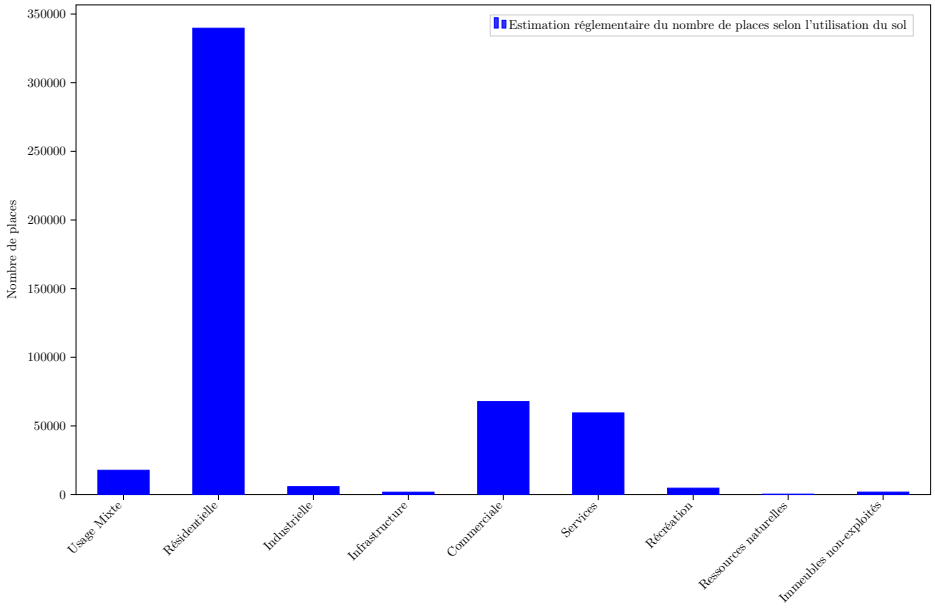
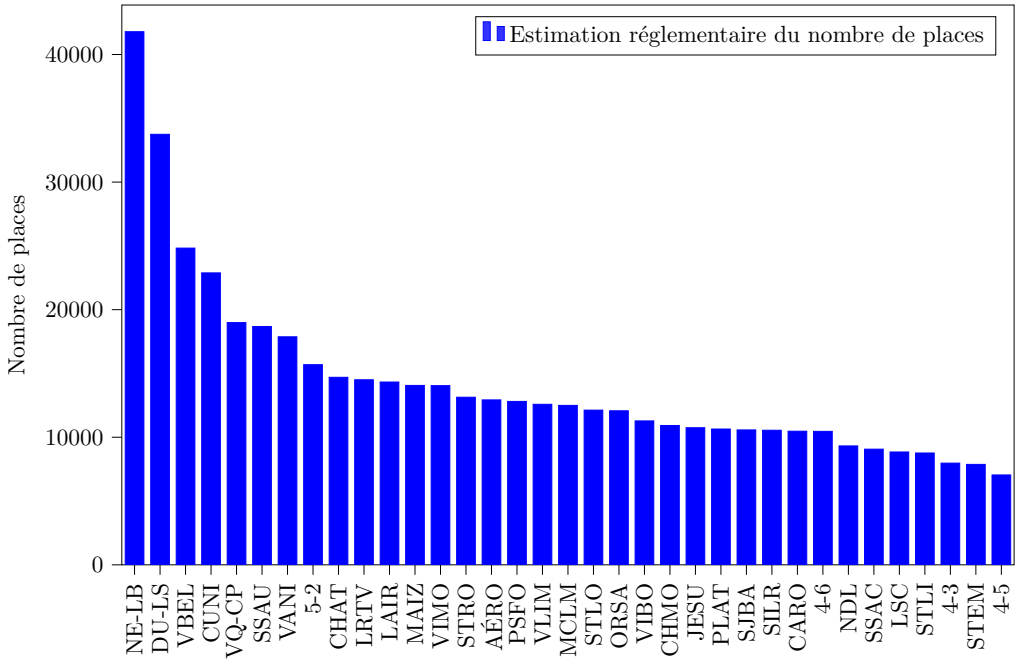


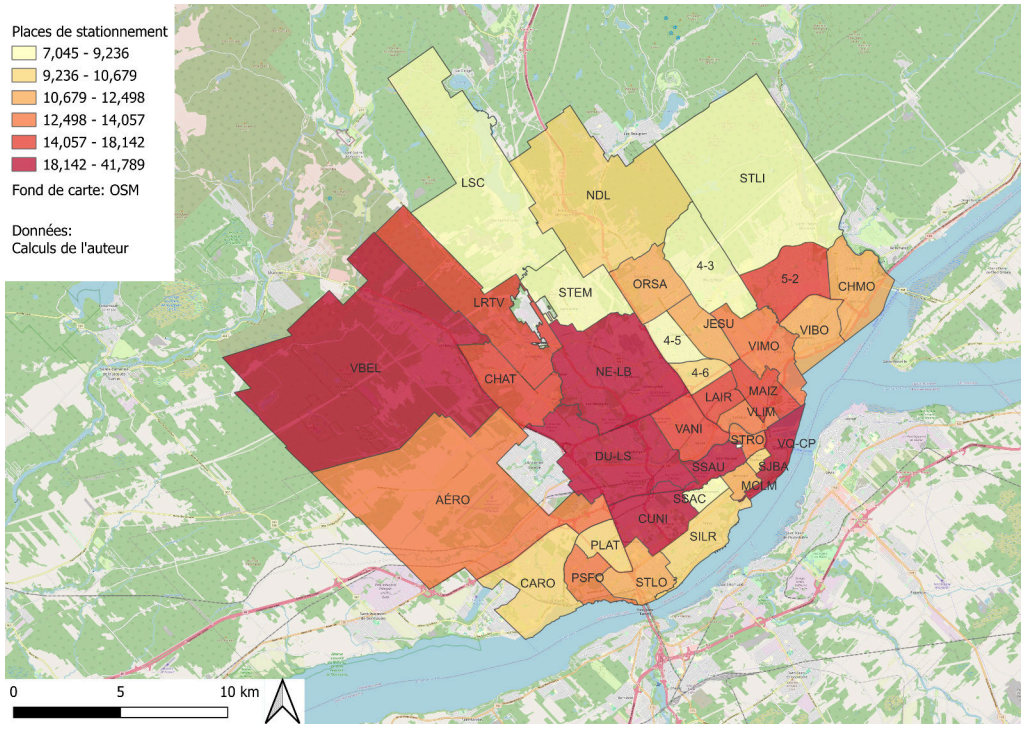
FIGURE 4.33 Distribution des places des stationnements par utilisation du sol

Le modèle prédit que les stationnements résidentiels (305 700 places) constituent 65% du parc de stationnement hors rue. Les propriétés commerciales (67 000 places de stationnement) et de services (58 800 places de stationnement) sont les deux autres grands contributeurs à la capacité prédite. Ce constat est émis sous réserve puisqu'une partie importante de la valeur foncière à ces deux postes n'a pas les données requises (cf. sec. 3.5.5) .

Ce parc de stationnement n'est pas uniformément réparti. Les figures 4.34a et 4.34b montrent la distribution spatiale du parc de stationnement dans la ville de Québec selon les quartiers administratifs. Le modèle prédit que les secteurs Duberger-Les Saules et Neufchatel-Est et la Cité Universitaire contiennent une grande partie du parc de stationnement hors rue. Les acronymes utilisés sont ceux donnés au tableau 3.5.



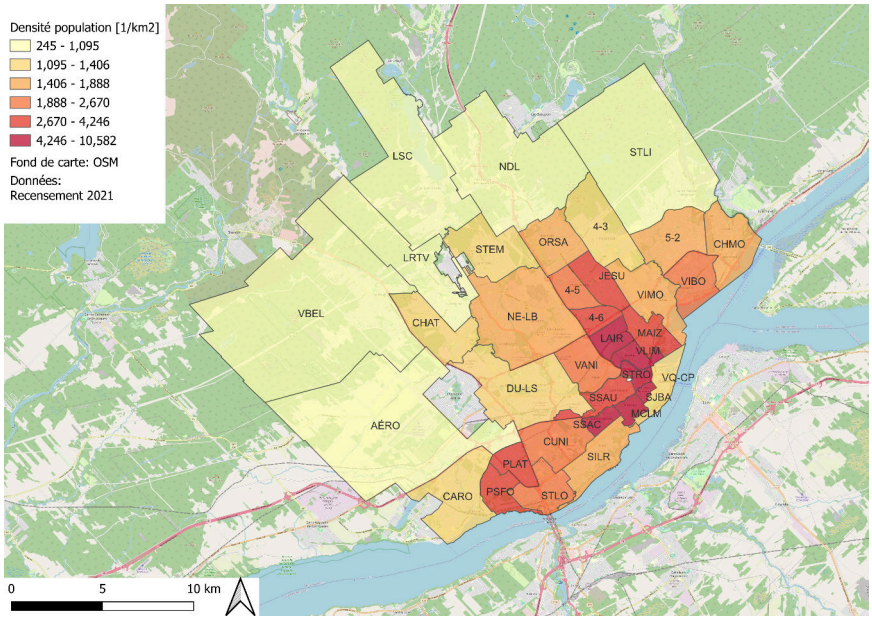
(a) Histogramme



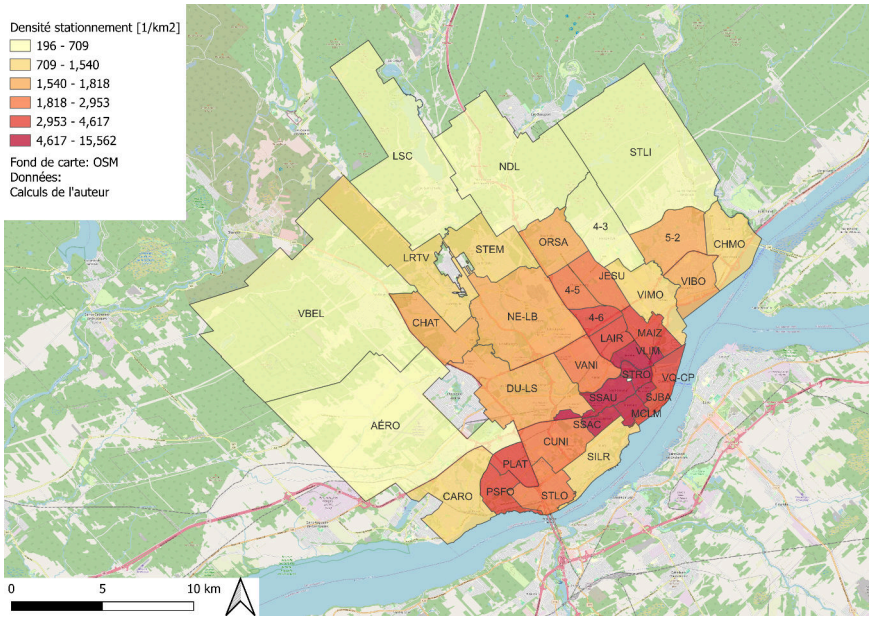
(b) Carte

FIGURE 4.34 Distribution des places de stationnement sur le territoire

La densité de stationnement suit essentiellement le même schéma que la densité de population comme le montrent les figures 4.35a et 4.35b. L'exception est la colline Parlementaire qui a un excédent de stationnements par rapport à sa population.



(a) Population



(b) Stationnement

FIGURE 4.35 Distribution de la densité de stationnement et de population sur le territoire

La distribution de la capacité de stationnement entre les différentes utilisations du sol n'est pas la même selon les quartiers comme le montre la figure 4.36.

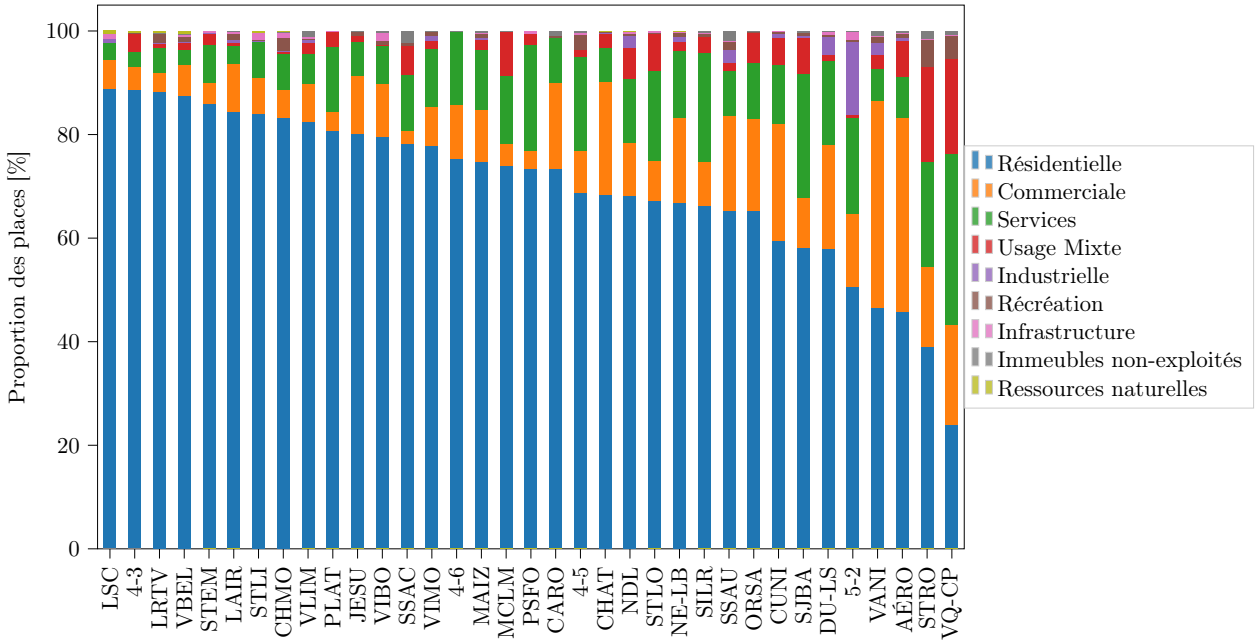


FIGURE 4.36 Distribution du nombre de places prédites par quartier et usage du sol

Maintenant qu'un bref portrait de la prédiction du parc de stationnement a été dressé. La section suivante fera l'évaluation de la performance du modèle de prédiction.

4.3 Évaluation du modèle de prédiction

Cette section fera des constats sur l'évaluation des prédictions sur un échantillon de lots. Une section sera dédiée à chaque catégorie et les conséquences des erreurs mesurées sur l'estimation totale seront discutées. Le tableau 4.2 montre le résultat des métriques de précision du modèle pour chacune des catégories. Des intervalles d'auto-amorçage ont été calculés pour l'erreur moyenne et l'erreur absolue moyenne pour comprendre la sensibilité des métriques à l'échantillon de validation. Ces derniers sous-estiment probablement la variable du fait de l'absence de prise en compte de l'autocorrélation spatiale. D'autre part, la colonne filtre indique le filtre appliqué. Les filtres ont seulement été appliqués si un critère a été identifié pour trouver les lots similaires à ceux qui ont de grandes différences entre la prédiction du modèle et la réalité terrain.

Tableau 4.2 Sommaire des métriques d'évaluation du modèle ($\alpha = 0.05$ pour les intervalles)

Métrique	Logement unifamilial	Logement Plex	Grands immeubles résidentiels	Commercial	Services	Industriel	Assemblée - Récréation	Usage multiple
N	97748	23621	2465	1552	1623	176	149	156
n_{choix}	30	30	30	30	30	30	30	30
n_{mes}	30	30	24	30	28	27	29	23
n_{filtre}	30	30	24	29	26	26	24	22
$\sum y_{pred}$	130100	88139	78783	67217	57803	5586	4529	7301
$\bar{y}_{obs}$	3.4	4.3	19.7	44.0	16.5	26.7	18.3	5.9
$\bar{y}_{pred}$	1.2	4.1	21.0	46.3	19.0	26.6	14.5	26.0
ME	[1.7,2.7]	[-1.0,1.5]	[-5.6,3.1]	[-9.9,4.8]	[-8.6,2.7]	[-8.6,7.2]	[-5.6,12.7]	[-28.1,-12.2]
MAE	[1.7,2.7]	[1.8,3.5]	[6.0,11.6]	[10.1,19.9]	[8.8,16.0]	[3.1,17.3]	[11.9,25.5]	[15.1,29.6]
RMSE	2.6	3.6	11.4	19.9	15.8	20.9	26.2	28.2
e_{max}	N/A	N/A	N/A	75	50	100	100	100

En plus des statistiques agrégées, la section suivante montrera neuf figures pour chaque catégorie, présentées dans le même ordre.

La première figure montre la relation entre la valeur prédite et la valeur observée (a) et la distribution des prédictions pour l'échantillon d'évaluation comparé à l'ensemble des prédictions (b) (figs. 4.37, 4.46, 4.55, 4.65, 4.75, 4.85, 4.96, 4.106). La deuxième montre les erreurs (a) et les erreurs au carré (b) en fonction de la valeur prédite (figs. 4.38, 4.47, 4.56, 4.66, 4.76, 4.86, 4.97, 4.107). La troisième figure montre la distribution des erreurs (b) et un diagramme QQ (a) comparant la distribution d'erreur à une distribution normale (figs. 4.39, 4.48, 4.57, 4.67, 4.77, 4.87, 4.98, 4.108). La quatrième montre la distribution de l'erreur moyenne (a) et l'erreur absolue moyenne (b) lorsque l'on applique une méthode d'autoamorçage pour donner un aperçu de la dispersion des métriques d'erreur si un échantillon légèrement différent était sélectionné (figs. 4.40, 4.49, 4.58, 4.68, 4.78, 4.88, 4.88, 4.99, 4.109). Ces quatre figures sont filtrées si un critère a été trouvé.

Les graphiques cinq à neuf montrent les erreurs en fonction de différentes variables pour essayer de trouver les facteurs explicatifs de l'imprécision du modèle. Ces graphiques seront potentiellement répliqués si un filtrage doit être appliqué pour éliminer des données aberrantes qui rendent invisible le reste des données. D'autre part, lorsque le nombre de places de stationnement est bas, du bruit aléatoire est parfois ajouté à certains graphiques XY pour mieux communiquer la distribution des points. Les statistiques d'intervalles de prédictions et de valeurs moyennes sont calculées à l'aide des valeurs non bruitées. D'autre part, la distance au parlement à vol d'oiseau a été calculée pour donner une mesure de dispersion géographique pour l'analyse des résidus.

La cinquième figure montre les erreurs en fonction de la superficie d'étage(a) et le nombre de logements(b) (figs. 4.41, 4.50, 4.59, 4.69, 4.79, 4.90, 4.100, 4.110). La sixième montre l'erreur en fonction de l'année de construction (a) et de la distance au parlement(b) (figs. 4.42, 4.51, 4.60, 4.70, 4.80, 4.91, 4.101, 4.111). La septième montre l'erreur de prédiction en fonction de l'utilisation d'unités converties(a) et de la valeur prédite(b) (figs. 4.43, 4.52, 4.61, 4.71, 4.81, 4.92, 4.102, 4.112). La huitième montre l'erreur en fonction de la superficie du lot(a) et de la valeur au rôle(b) (figs. 4.44, 4.53, 4.62, 4.72, 4.82, 4.93, 4.103, 4.113). La dernière figure montre l'erreur en fonction à la densité foncière (graphique (a), eq. 3.24) et son rapport au stationnement prédit (graphique (b), eq. 3.25) (figs. 4.45, 4.54, 4.63, 4.73, 4.83, 4.94, 4.104, 4.114).

Pour le comptage manuel, une approche normative a été prise en l'absence de marquage au sol. La distance linéaire a été mesurée où l'auteur pensait que les voitures étaient stationnées pour inférer une capacité. La longueur est issue des guides d'aménagements de la ville et est fixée

à 2.6m (Ville de Québec, 2024a, 2025a). Une amélioration future devrait être d'inclure des annotations avec l'échantillonnage pour documenter les hypothèses de la valeur enregistrée.

La section révélera que le modèle a de la difficulté à prédire le nombre de places de stationnement. Dans la catégorie résidentielle unifamiliale, le modèle sous-estime systématiquement le nombre de places construites. Pour les multiplex, l'erreur varie avec l'excentricité du lot par rapport au centre-ville, l'intensité de développement, la date de construction et la superficie du lot. Le modèle surestime le stationnement dans les quartiers centraux et le sous-estime à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville. Les utilisations du sol commerciales et de service se comportent relativement bien, mais requièrent l'identification de points erronés et illustrent certains enjeux entourant l'adéquation entre le règlement et le CUBF lors de la définition des ensembles de règlements. La catégorie d'assemblée souffre d'une mauvaise calibration du facteur de conversion entre les sièges et la superficie qui devra être corrigée et l'usage mixte est très présent dans les quartiers centraux construits avant l'automobile menant à d'importantes erreurs. De plus, l'échantillon d'usage mixte a une plus grande proportion de règlements qui requièrent des conversions d'unité accentuant les erreurs.

Cette étape n'a pas encore été incluse dans l'outil et le code source est disponible sur un dépôt GitHub séparé de l'outil principal (Charbonneau, 2025b).

4.3.1 Résidentiel - logement unique

Trente lots d'usage résidentiel unifamilial ont été observés. Le nombre de places a été récolté en vérifiant les images aériennes et des images Google Street View. Une approche normative a été prise lorsque les places ne sont pas démarquées.

Dans le cas du logement unifamilial, le modèle sous-estime systématiquement le nombre de places de stationnement offertes. En moyenne, les propriétés sondées ont 3.4 places de stationnement en moyenne contre 1.2 place prédite. La superficie du lot semble être la variable la plus prometteuse comme outil de correction ou d'identification de sous-estimation. Une inspection des résidus indique une relation entre l'erreur et la superficie du lot (fig. 4.44a), la valeur construite par mètre carré de terrain (fig. 4.45a) et la distance au parlement (fig. 4.42b). Du bruit aléatoire variant entre $[-0.3, 0.3]$ a été ajouté pour dissocier des points avec la même valeur.

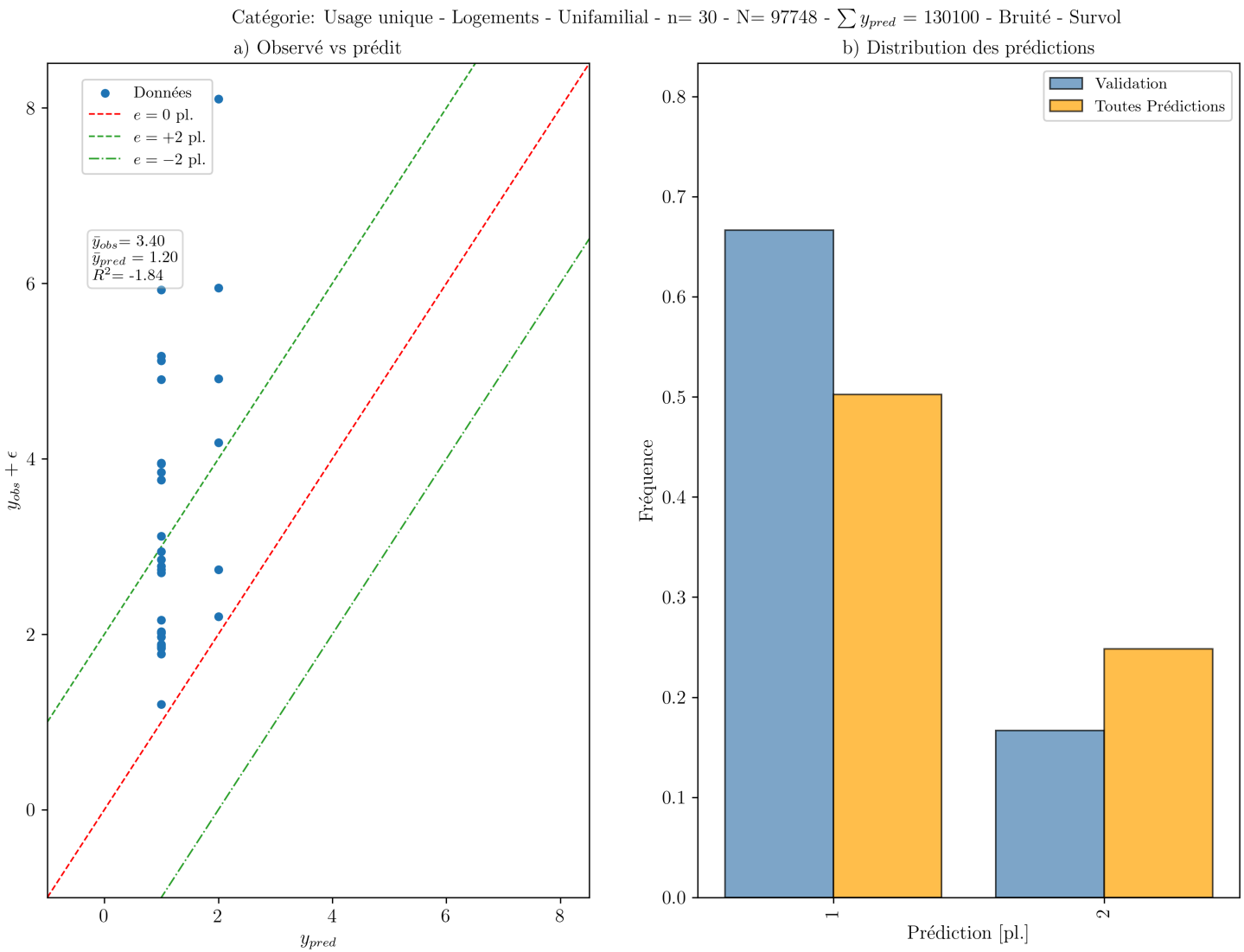


FIGURE 4.37 Distribution des prédictions pour le logement unifamilial

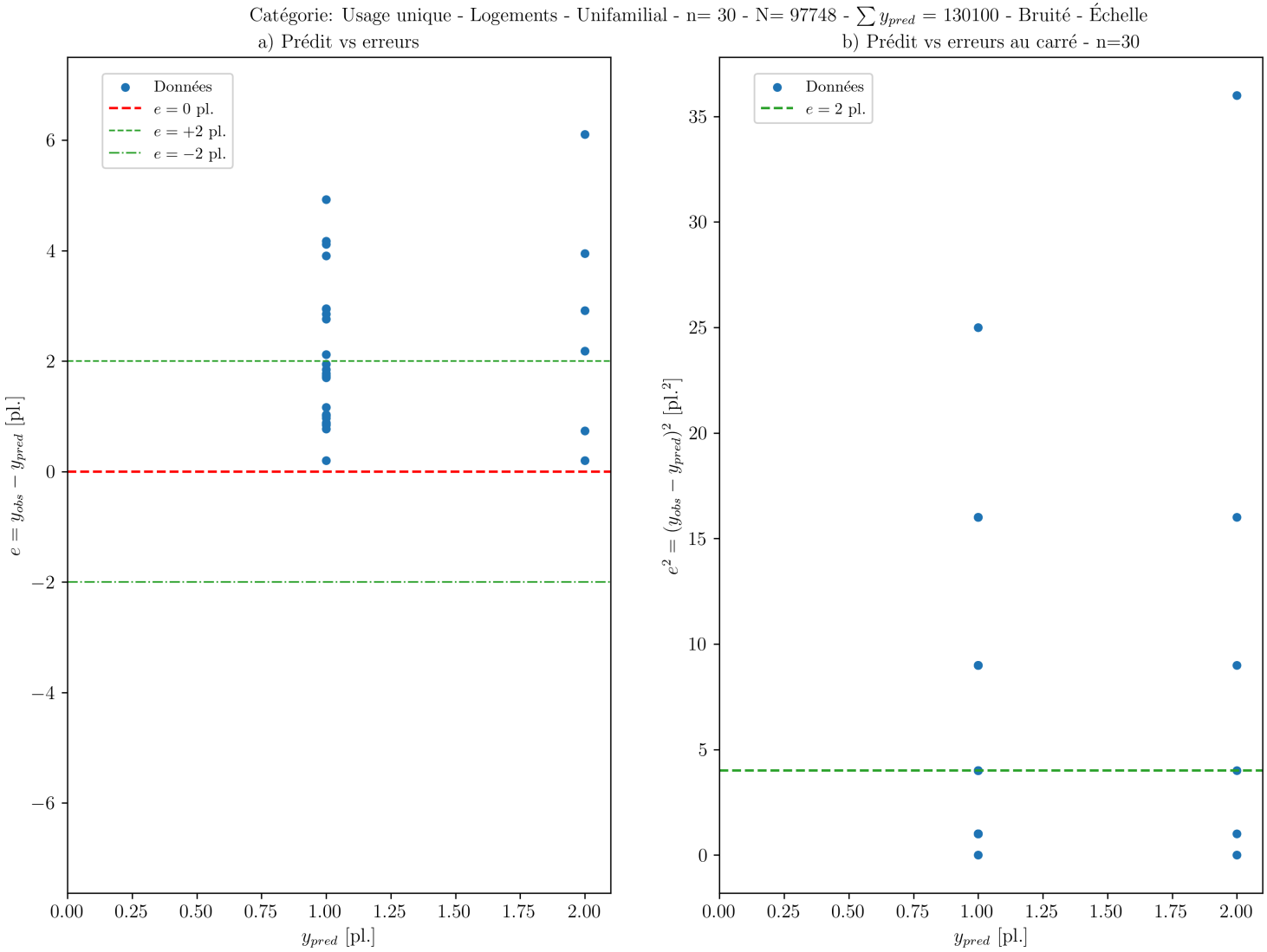


FIGURE 4.38 Erreur en fonction des prédictions pour le logement unifamilial

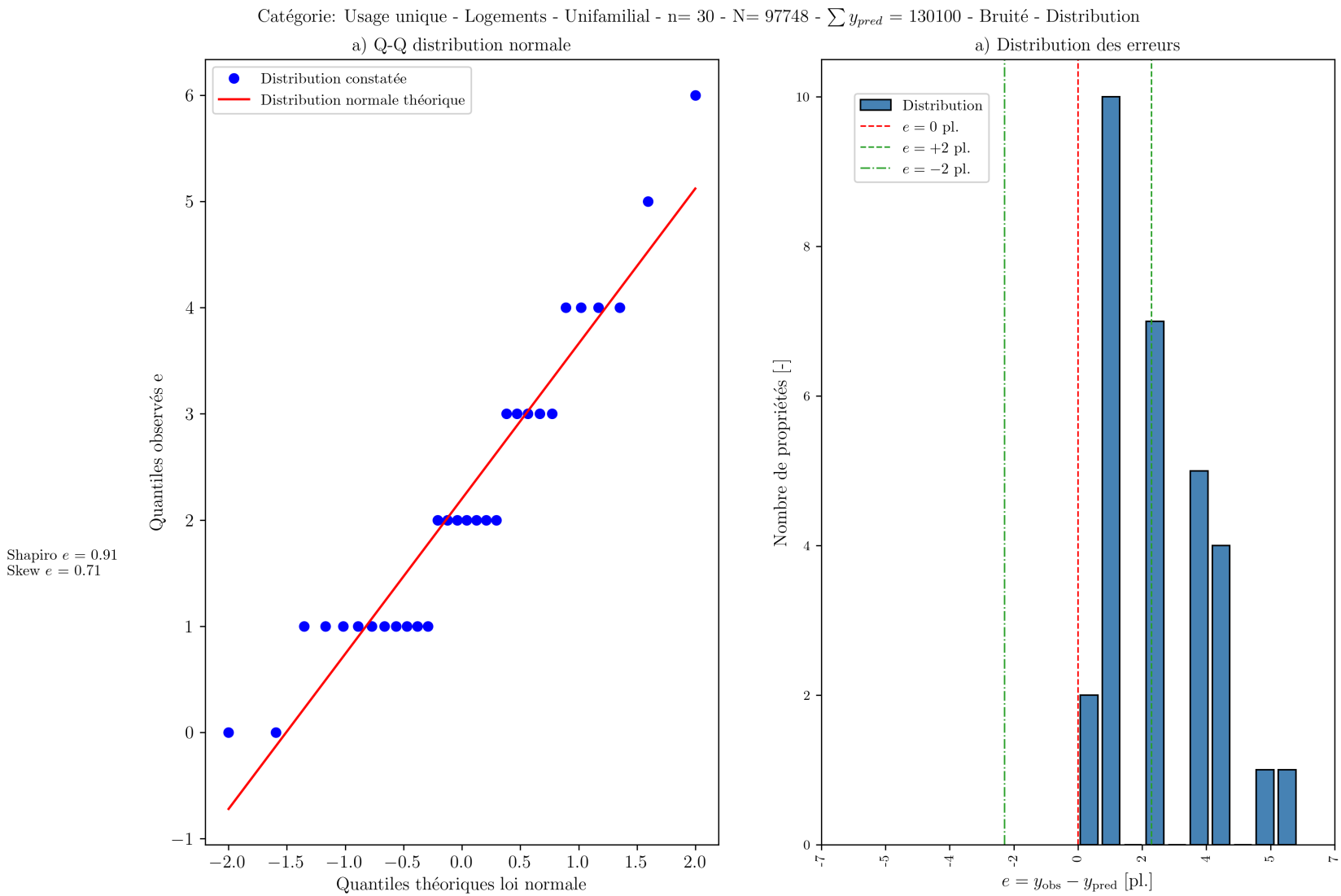


FIGURE 4.39 Distribution et normalité des erreurs pour le logement unifamilial

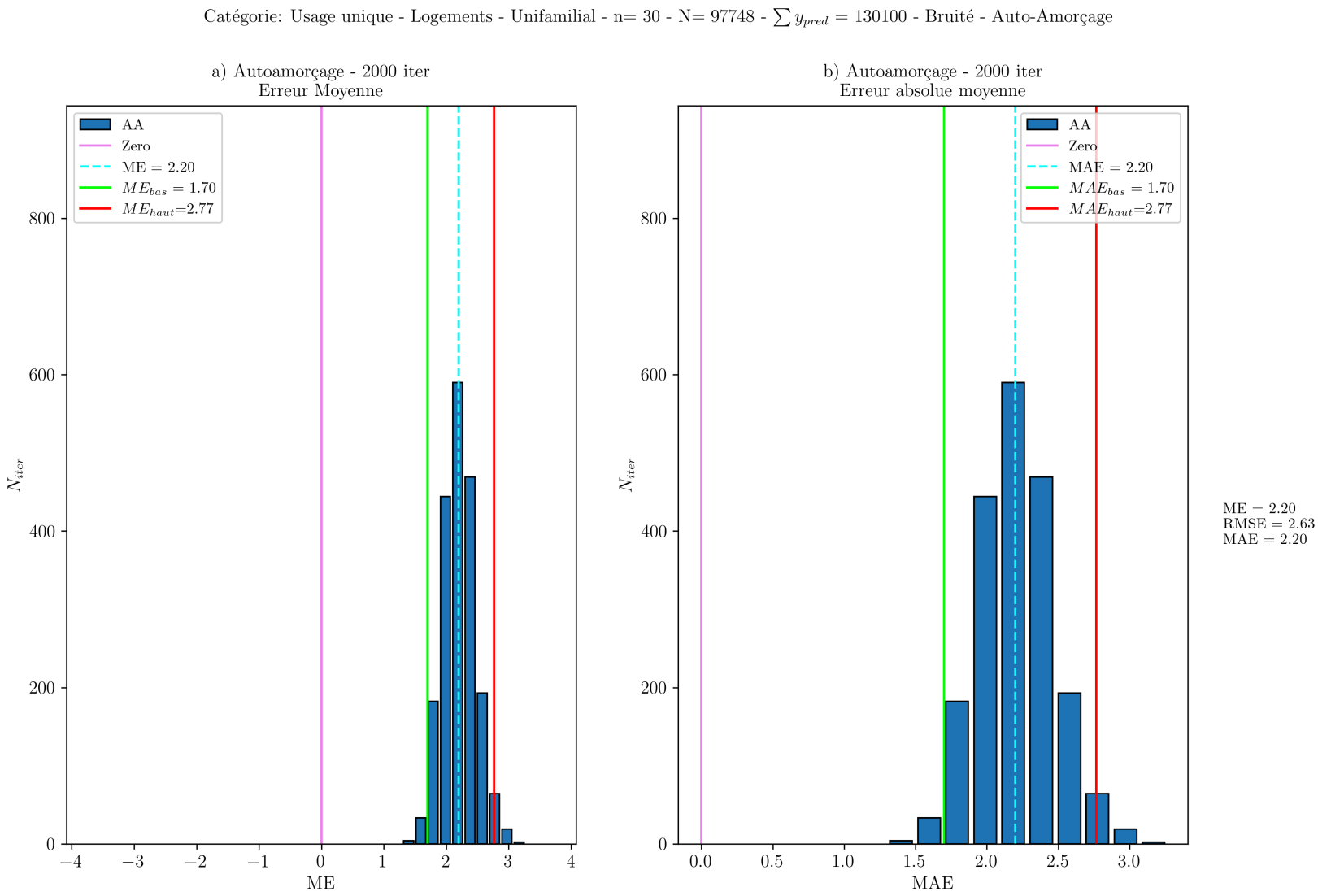


FIGURE 4.40 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour le logement unifamilial

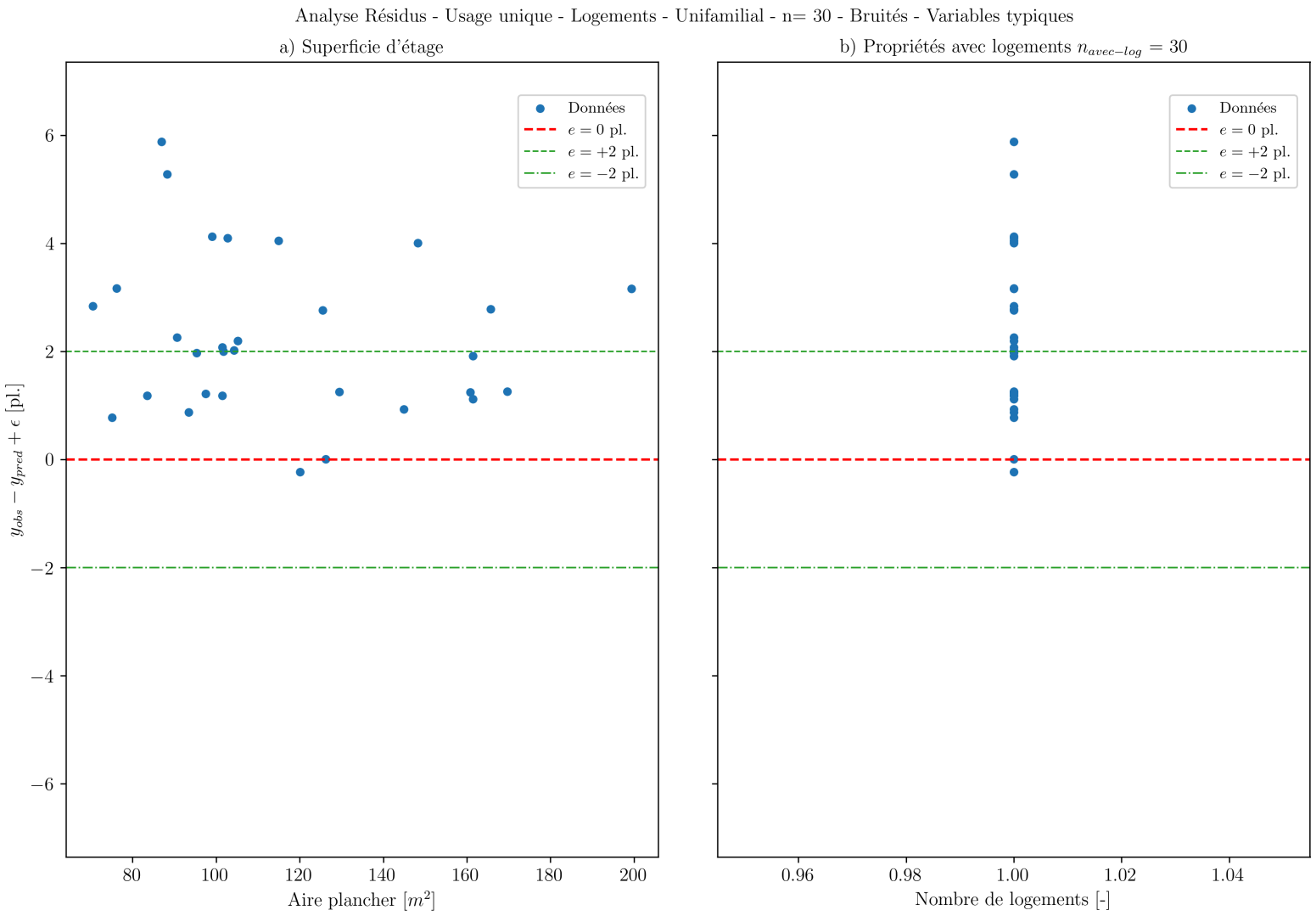


FIGURE 4.41 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction du logement unifamilial

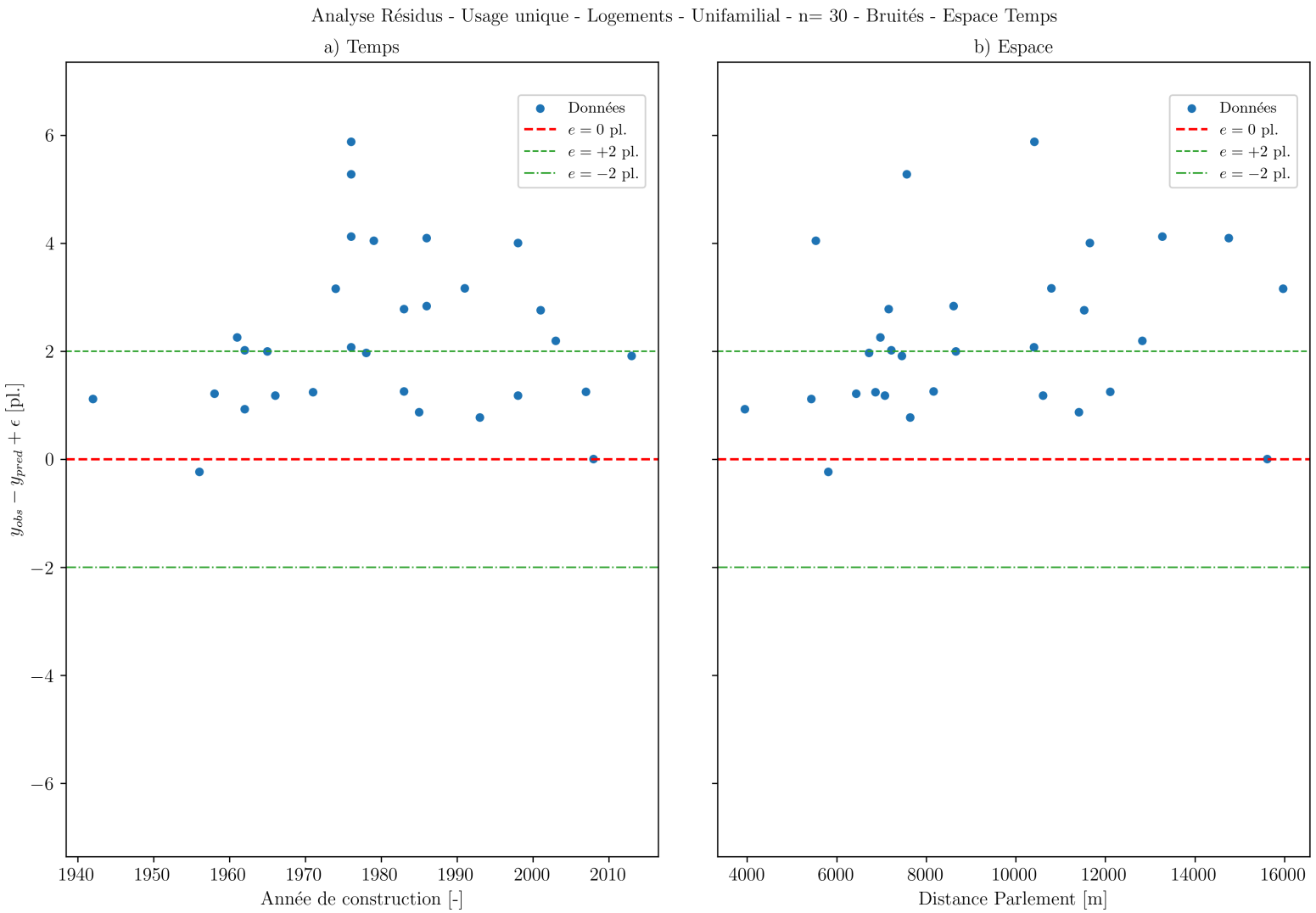


FIGURE 4.42 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour le logement unifamilial

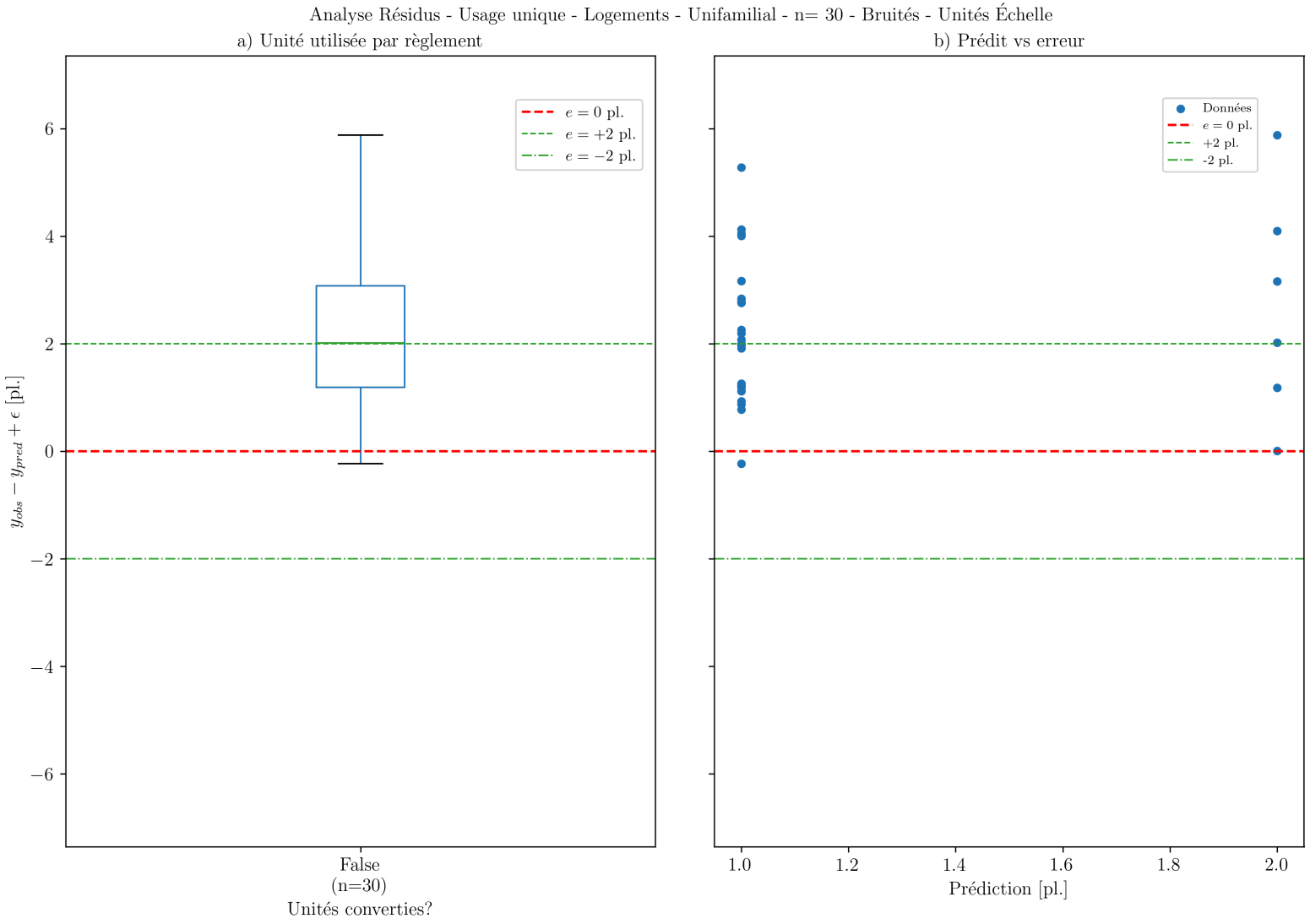


FIGURE 4.43 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour le logement unifamilial

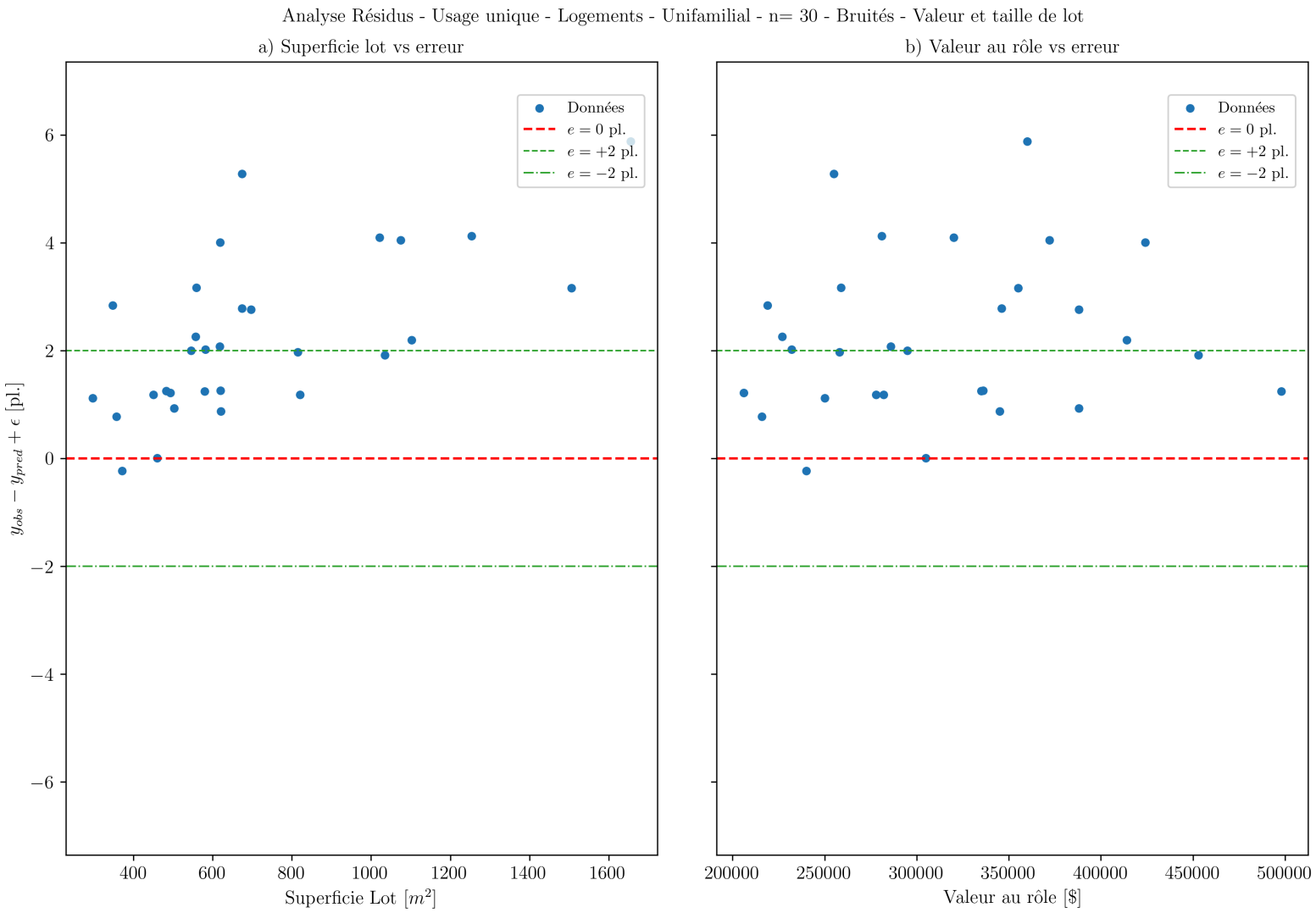


FIGURE 4.44 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour le logement unifamilial

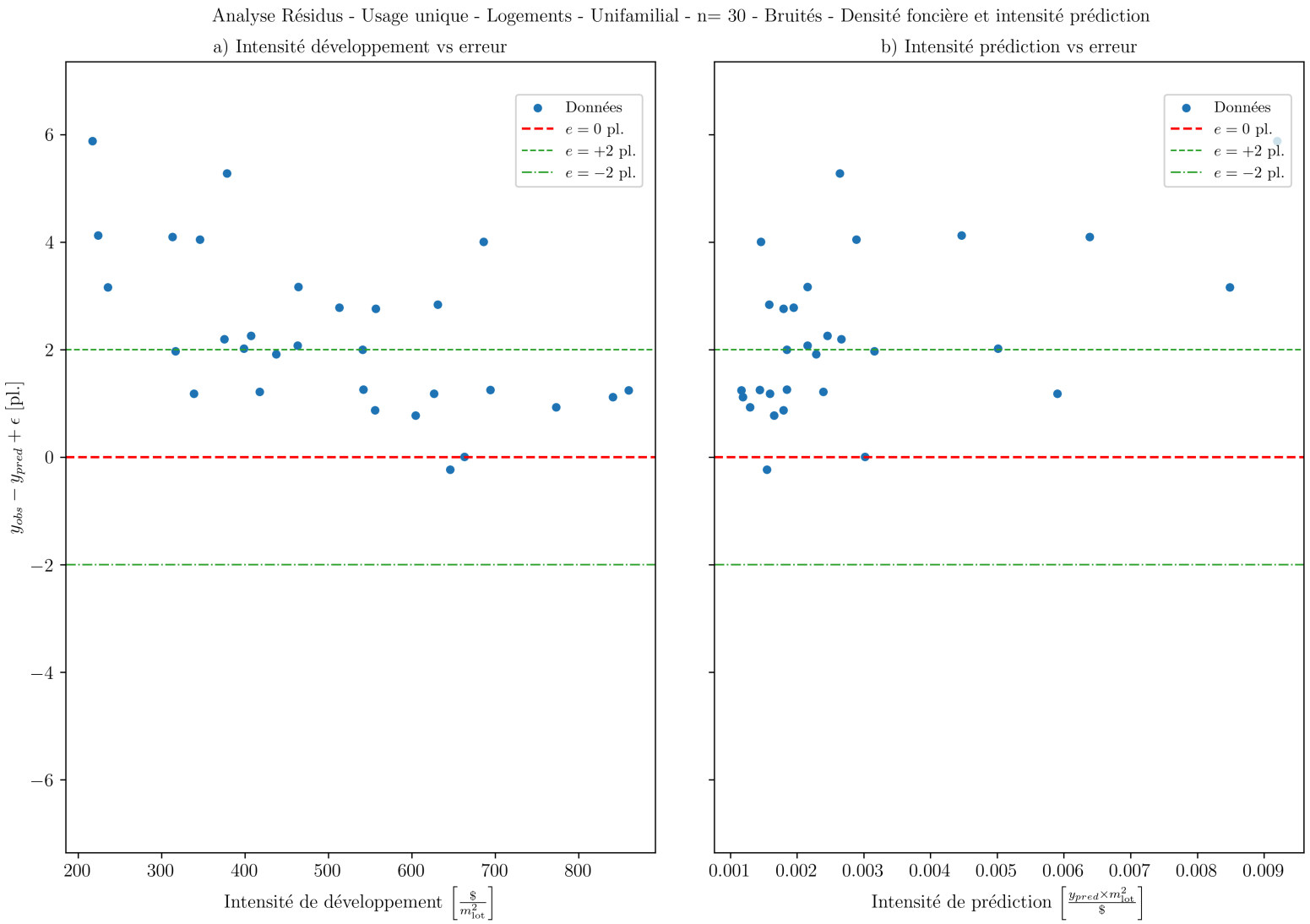


FIGURE 4.45 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour le logement unifamilial

4.3.2 Résidentiel - 2 à 8 logements

Trente lots contenant entre 2 et 8 logements ont été échantillonnés et comparés aux prédictions du modèle. Encore une fois, les données sont légèrement bruitées sur un intervalle $[-0.3, 0.3]$ pour distinguer les points dans les graphiques XY. On constate dans ce cas-ci qu'il y a moins de biais systématiques puisque les moyennes des prédictions et des observations sont sensiblement les mêmes ($\bar{y}_{obs} = 4.33$ vs $\bar{y}_{pred} = 4.13$). Cependant, il existe encore une forte dispersion autour de la prédiction.

Une inspection visuelle de l'analyse des résidus indique que l'erreur varie avec la distance au parlement (fig.4.51b), la valeur au rôle par superficie du lot (fig. 4.54a) et potentiellement la date de construction (fig.4.51a). Les trois variables sont probablement corrélées entre elles. Généralement, plus l'échantillon est central, plus la valeur construite par superficie de lot est élevée, plus le modèle tend à surestimer la quantité de stationnements.

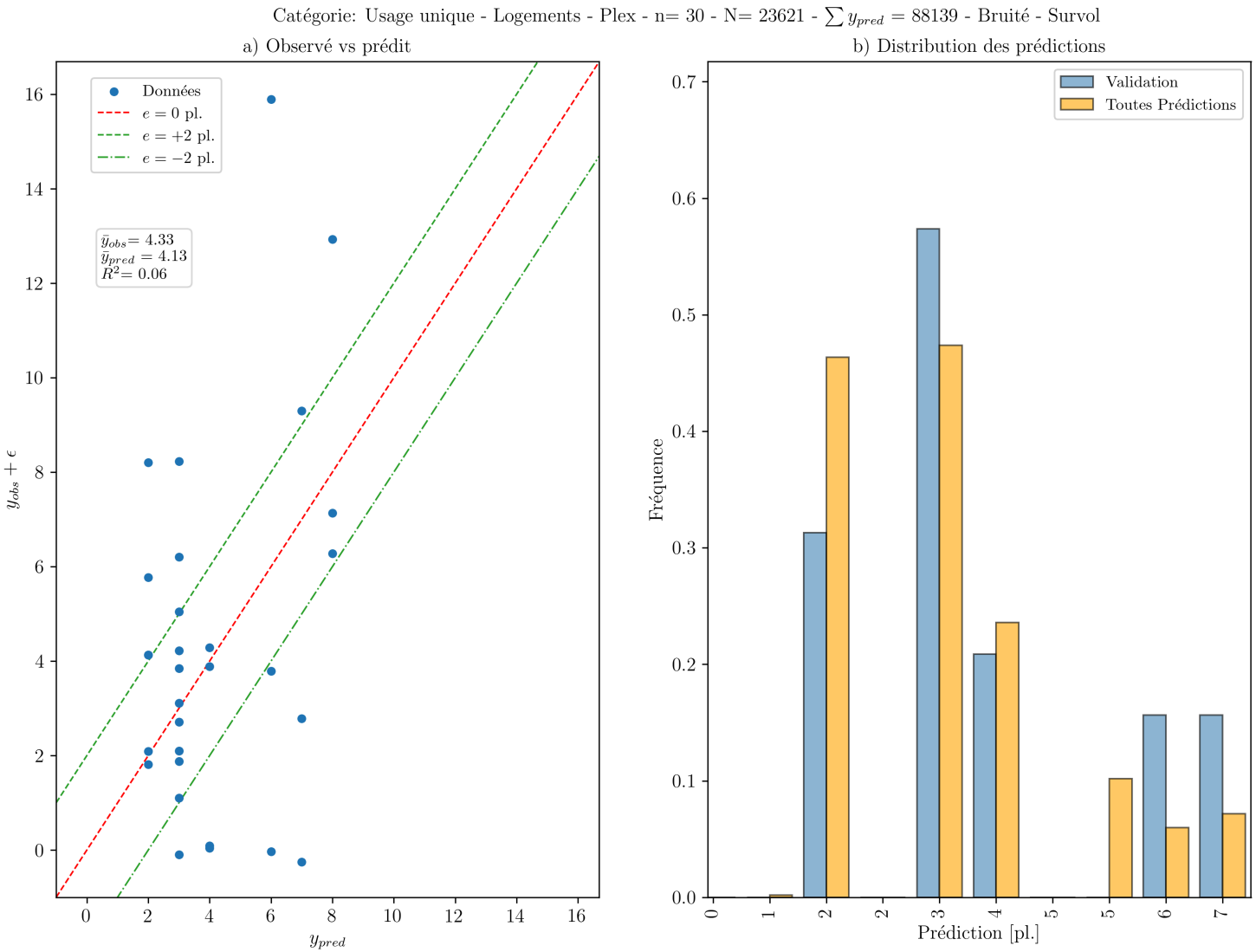


FIGURE 4.46 Distribution des prédictions pour les lots avec 2 à 8 logements

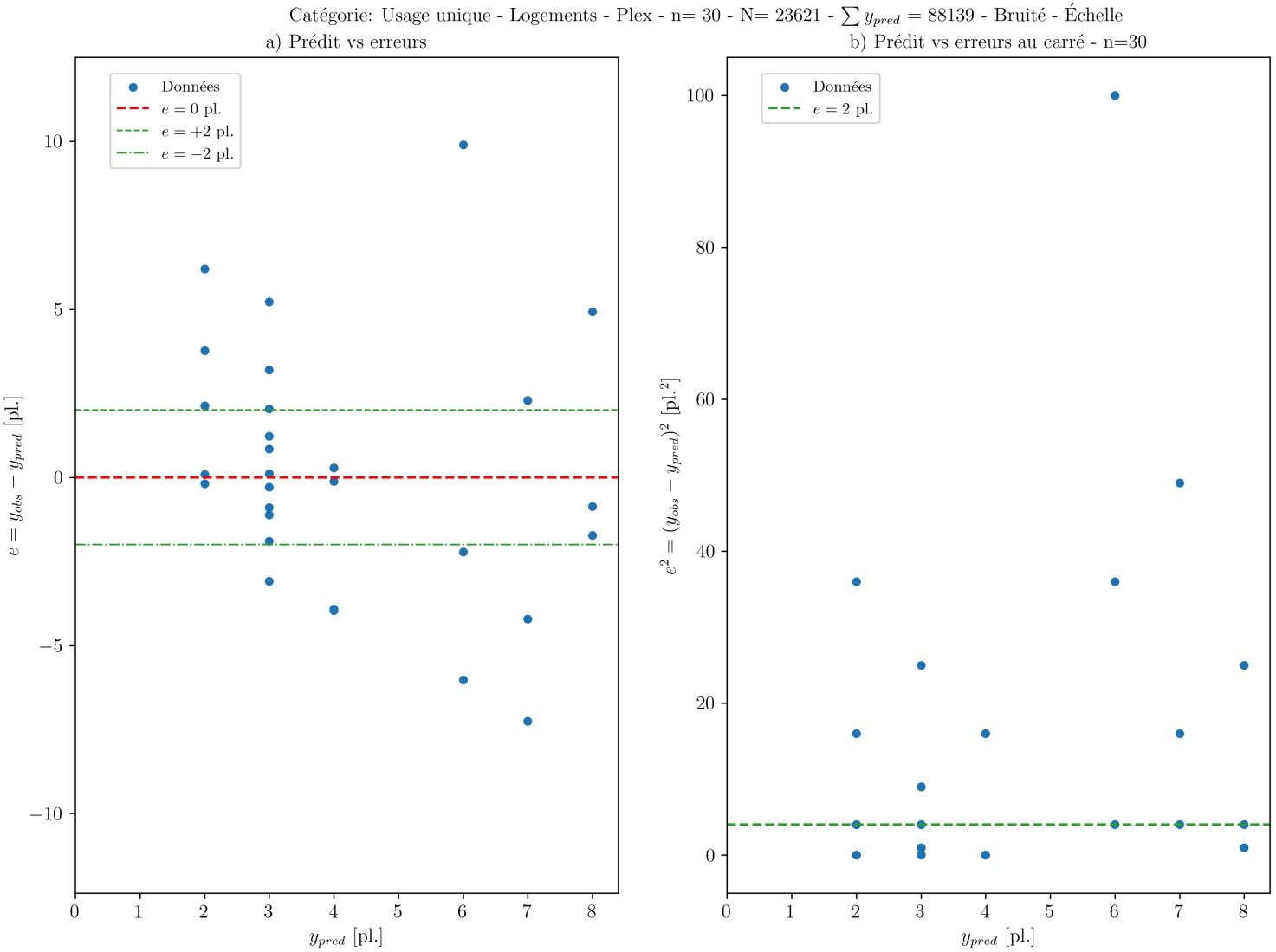


FIGURE 4.47 Erreur en fonction des prédictions pour les lots avec 2 à 8 logements

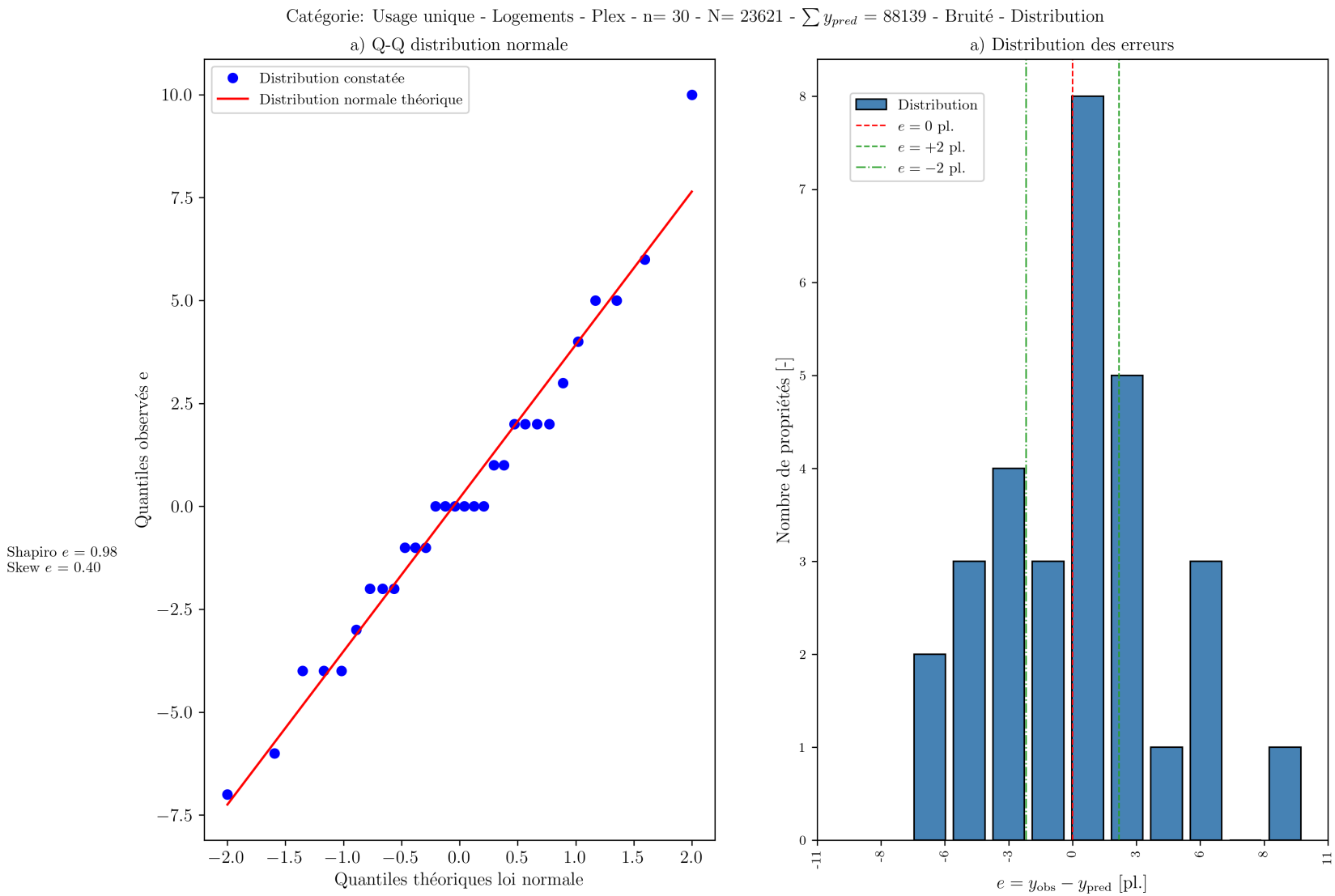


FIGURE 4.48 Distribution et normalité des erreurs pour les lots avec 2 à 8 logements

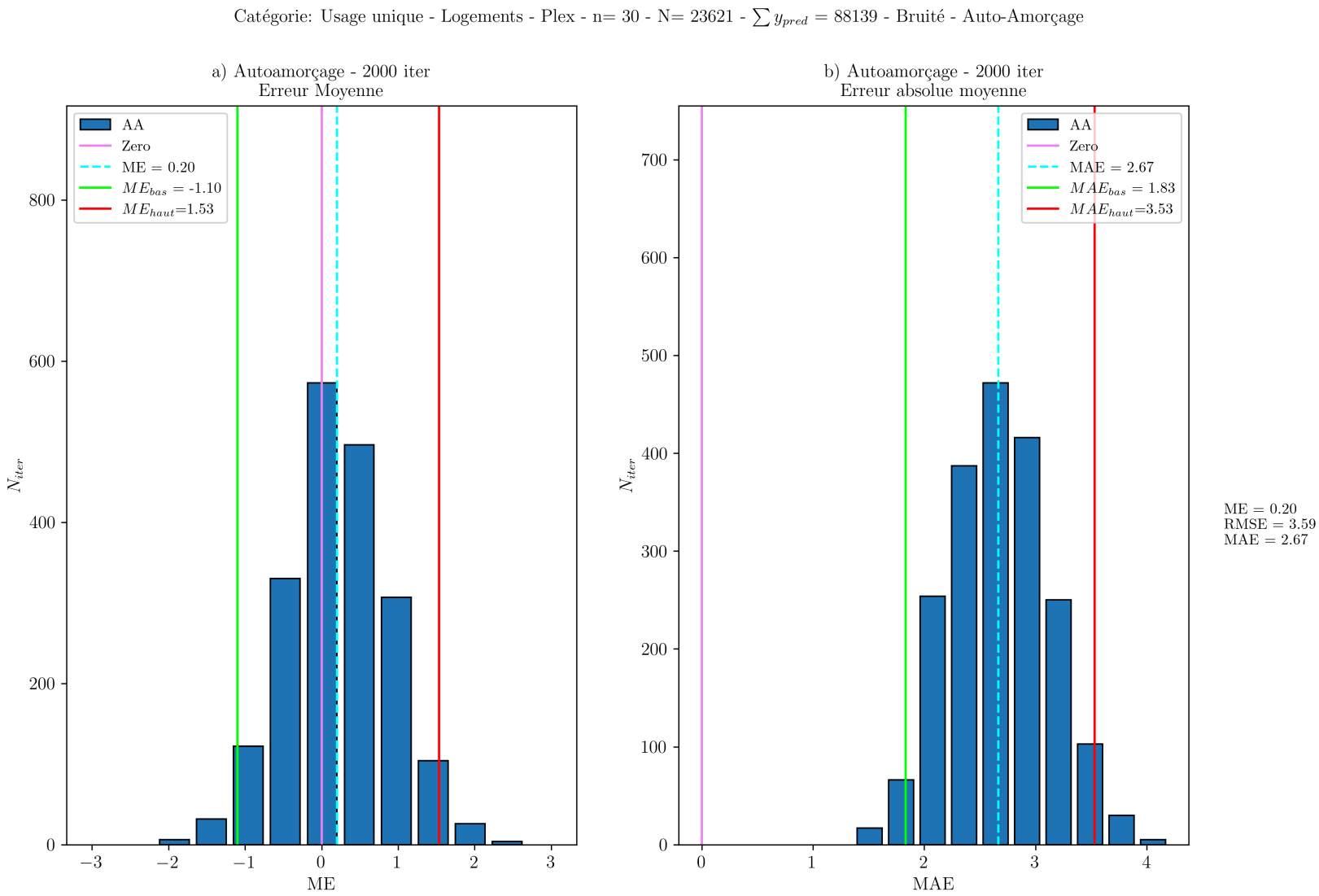


FIGURE 4.49 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots avec 2 à 8 logements

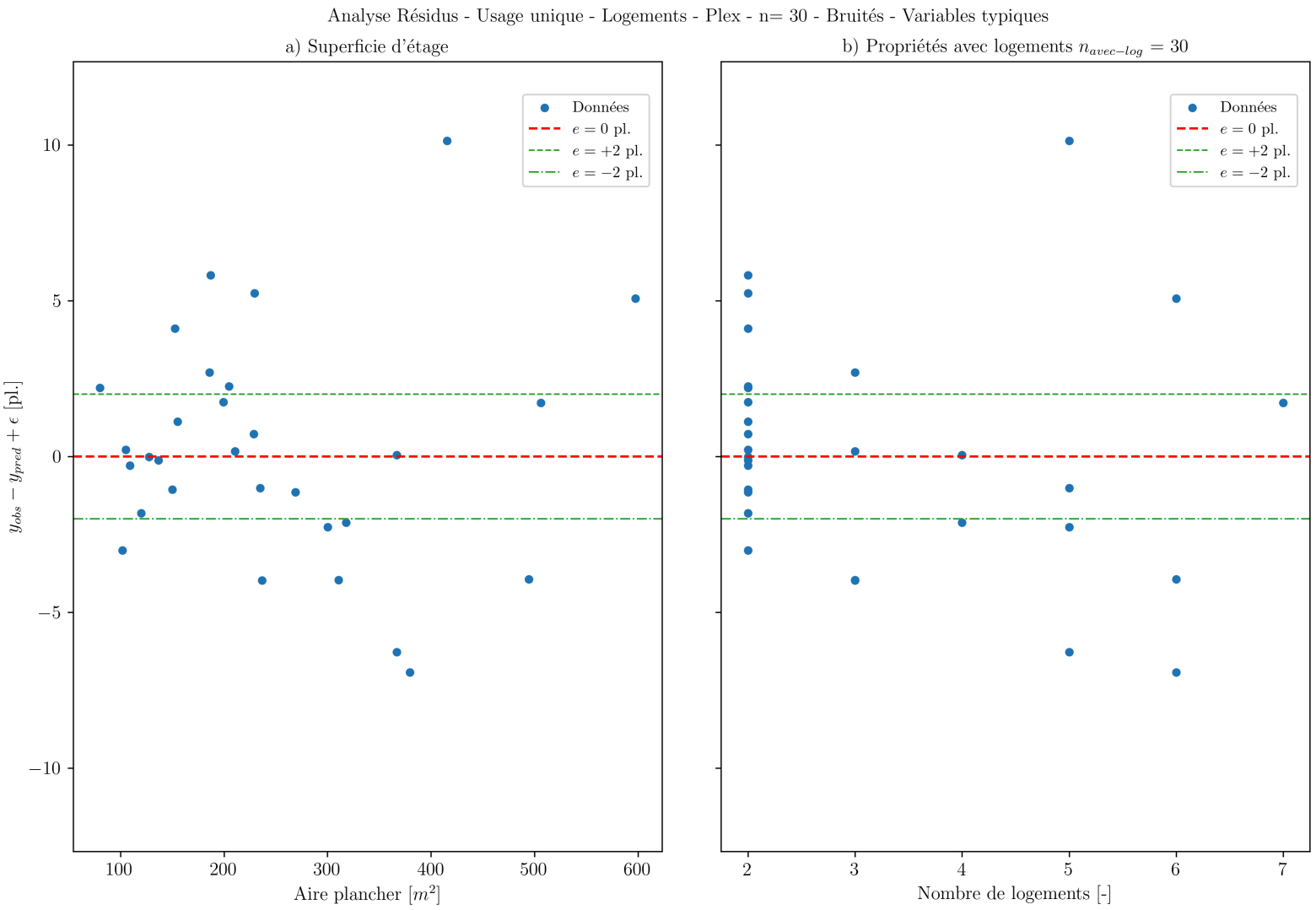


FIGURE 4.50 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots avec 2 à 8 logements

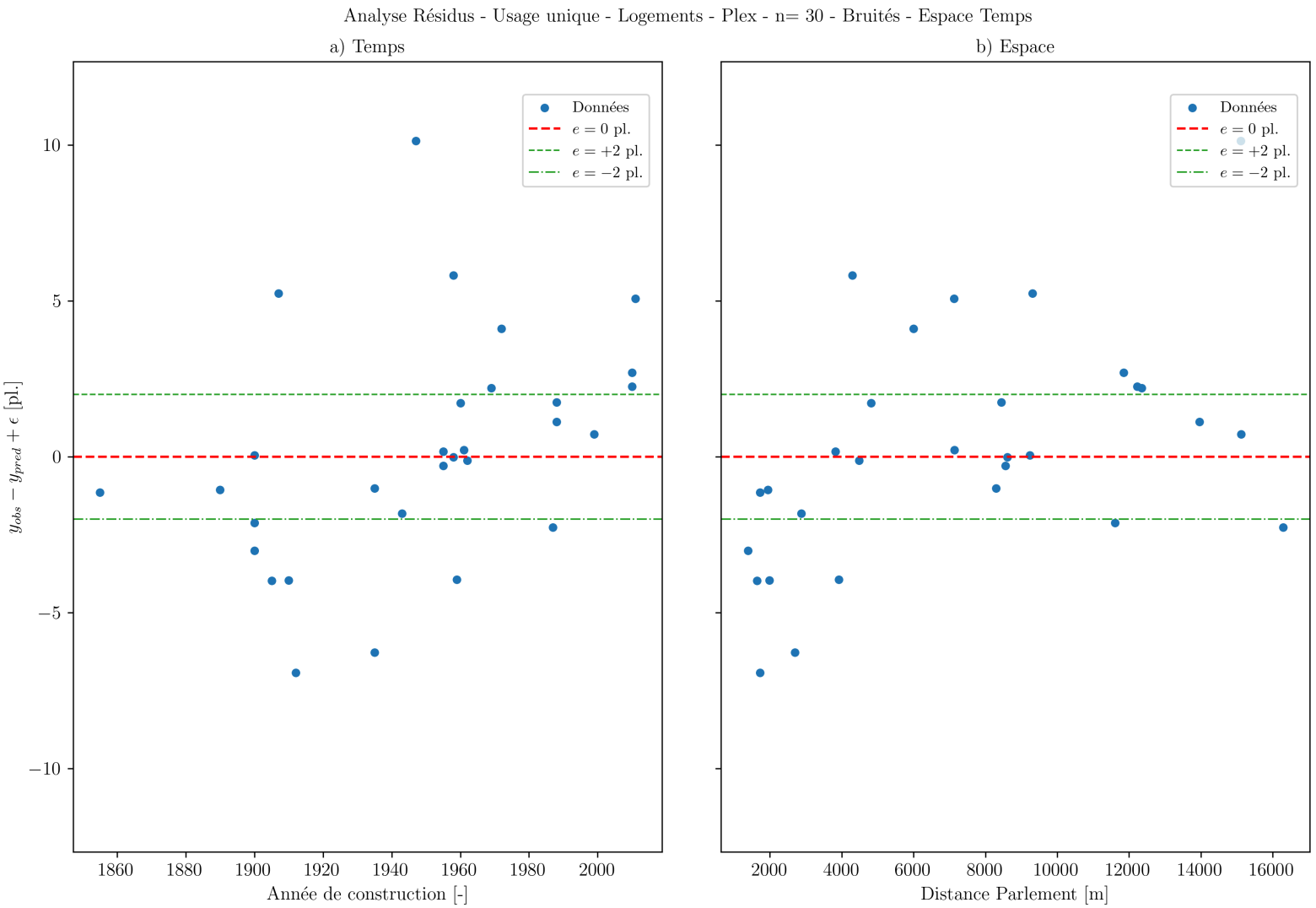


FIGURE 4.51 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'année de construction pour les lots avec 2 à 8 logements

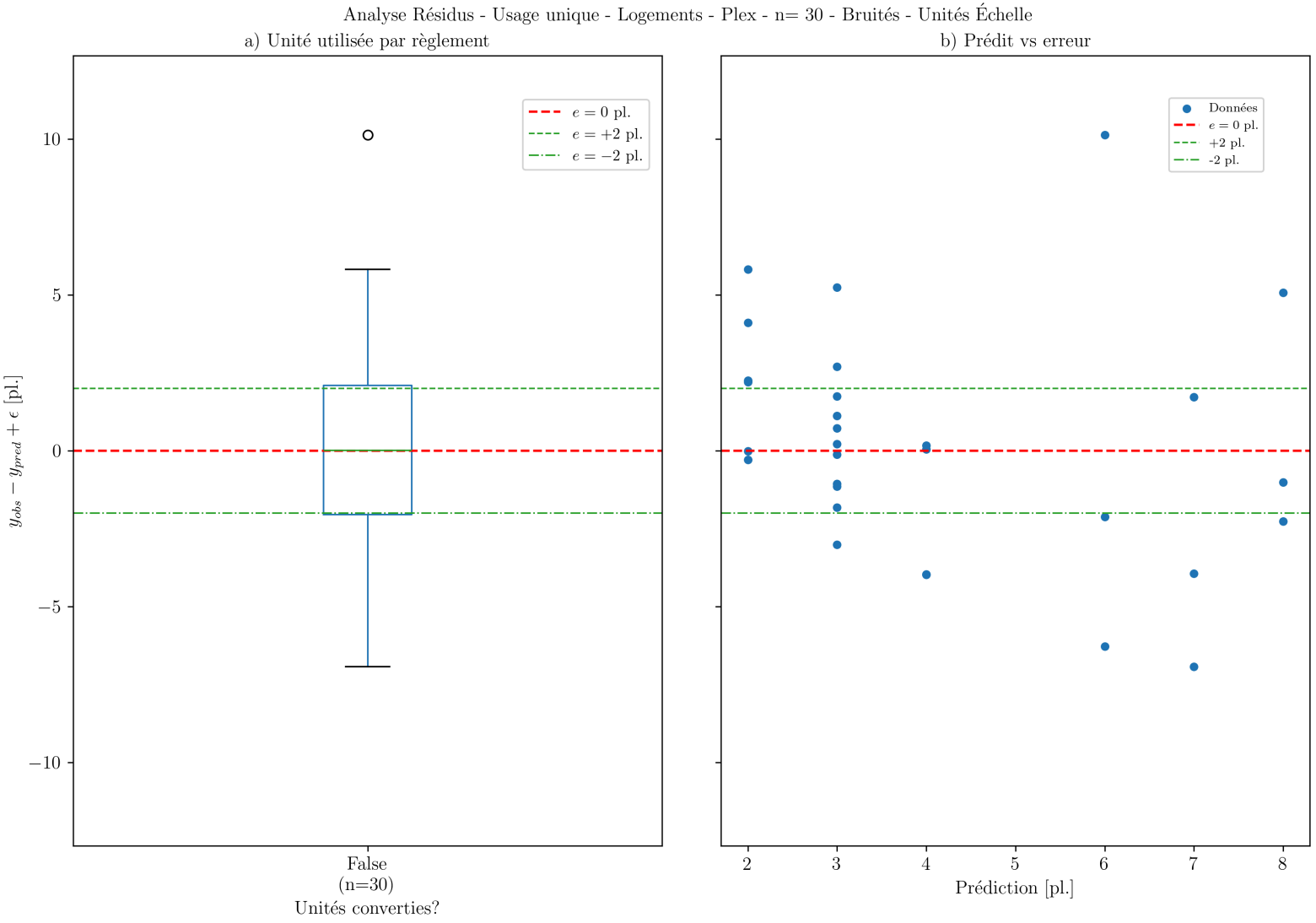


FIGURE 4.52 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots avec 2 à 8 logements

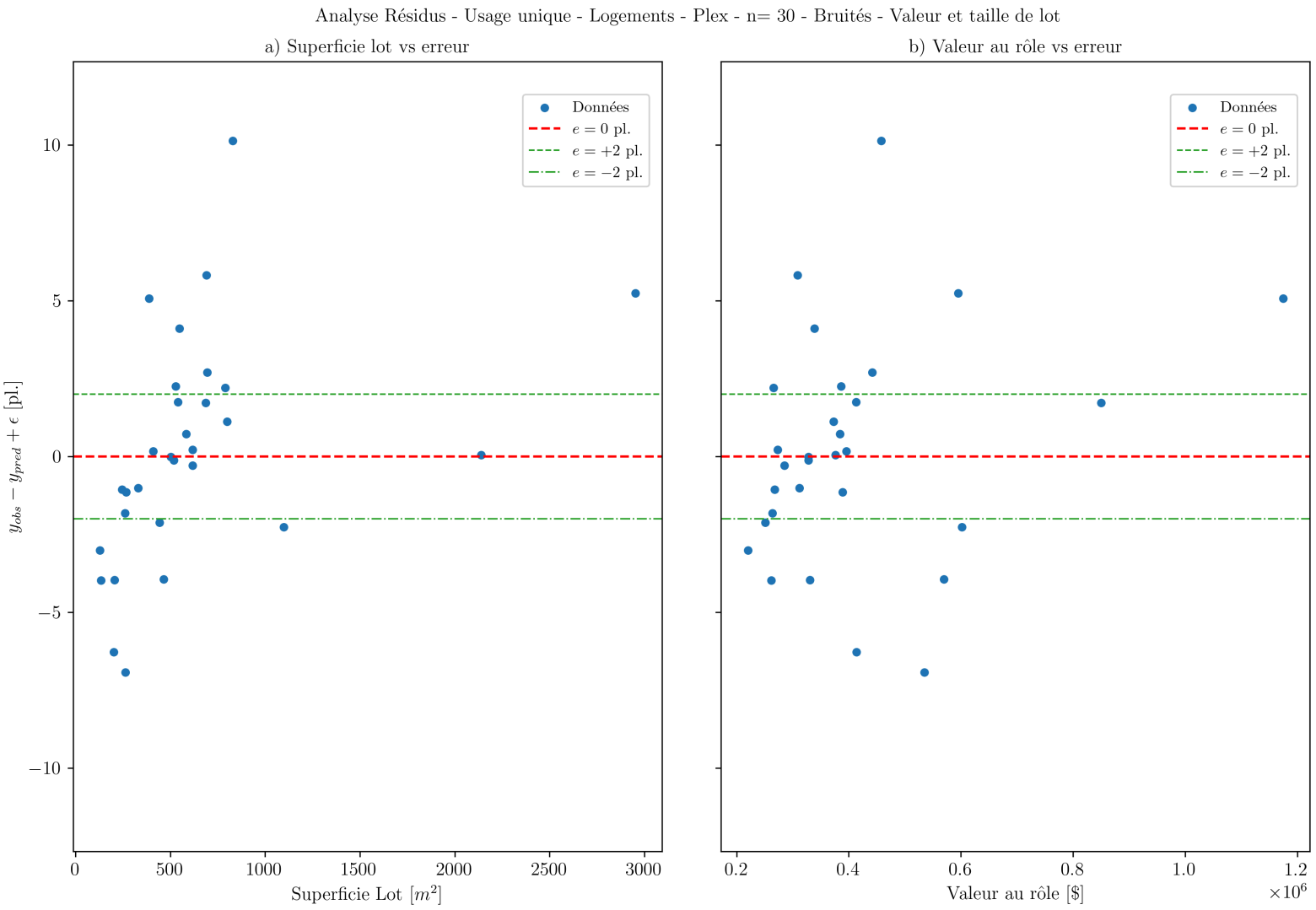


FIGURE 4.53 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots avec 2 à 8 logements

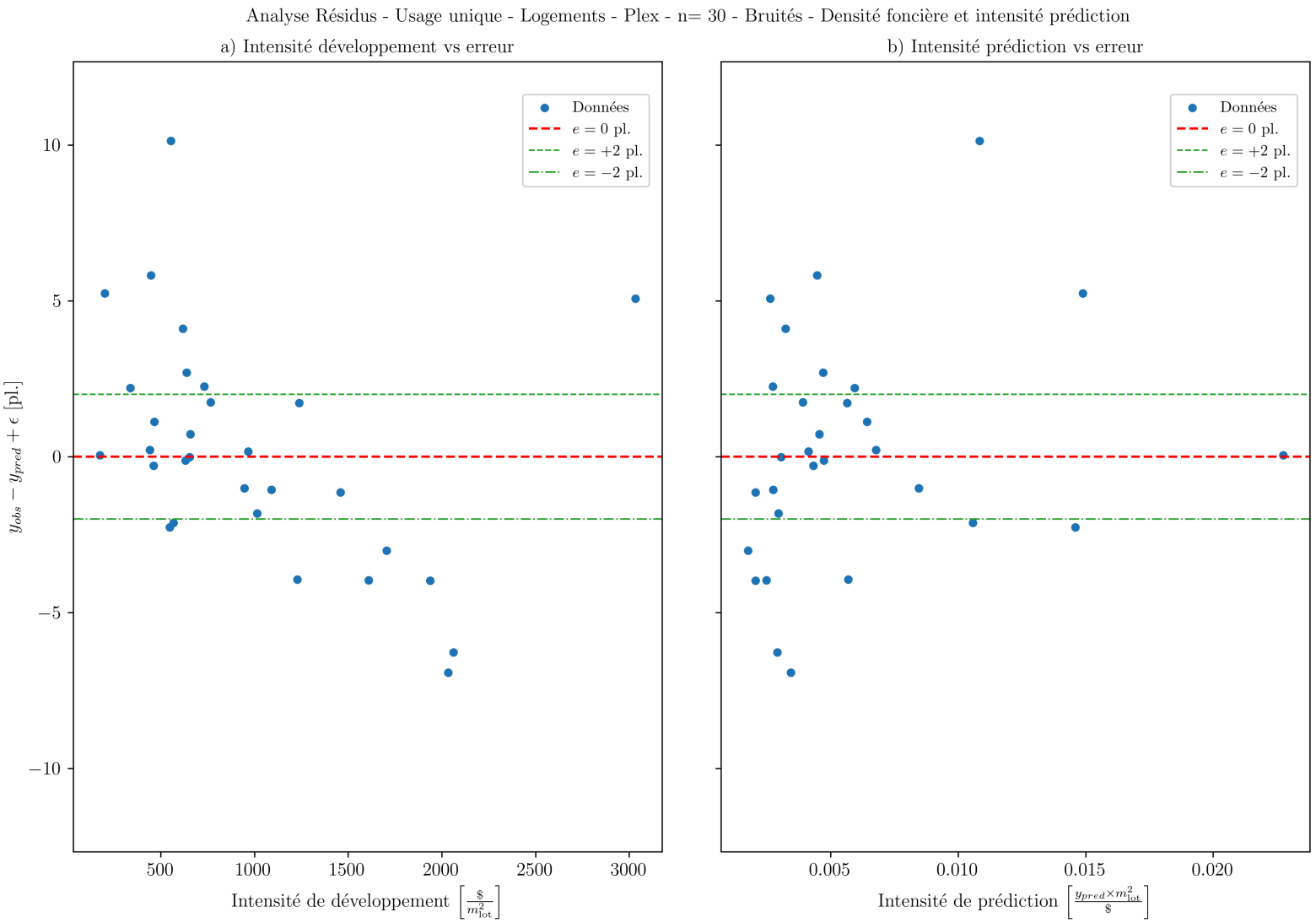


FIGURE 4.54 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots avec 2 à 8 logements

4.3.3 Résidentiel - Grands immeubles résidentiels

Vingt-quatre immeubles résidentiels de plus de 8 logements ont été échantillonnés pour comparer la valeur observée à la valeur prédite. L'étendue des valeurs prédites est assez élevée que le bruit aléatoire n'est plus requis. Le modèle semble bien représenter la tendance centrale, mais il existe encore une forte dispersion autour de cette dernière. Le nombre moyen de places prédites $\bar{y}_{pred}$ est de 21.0 contre 19.7 pour les places observées $\bar{y}_{obs}$. 6 échantillons sélectionnés n'ont pas pu être observés du fait de la présence de stationnement souterrain. Aucune métrique ne permet de trouver les valeurs aberrantes. Aucune tendance claire n'émerge sur les mesures pouvant corriger l'erreur.

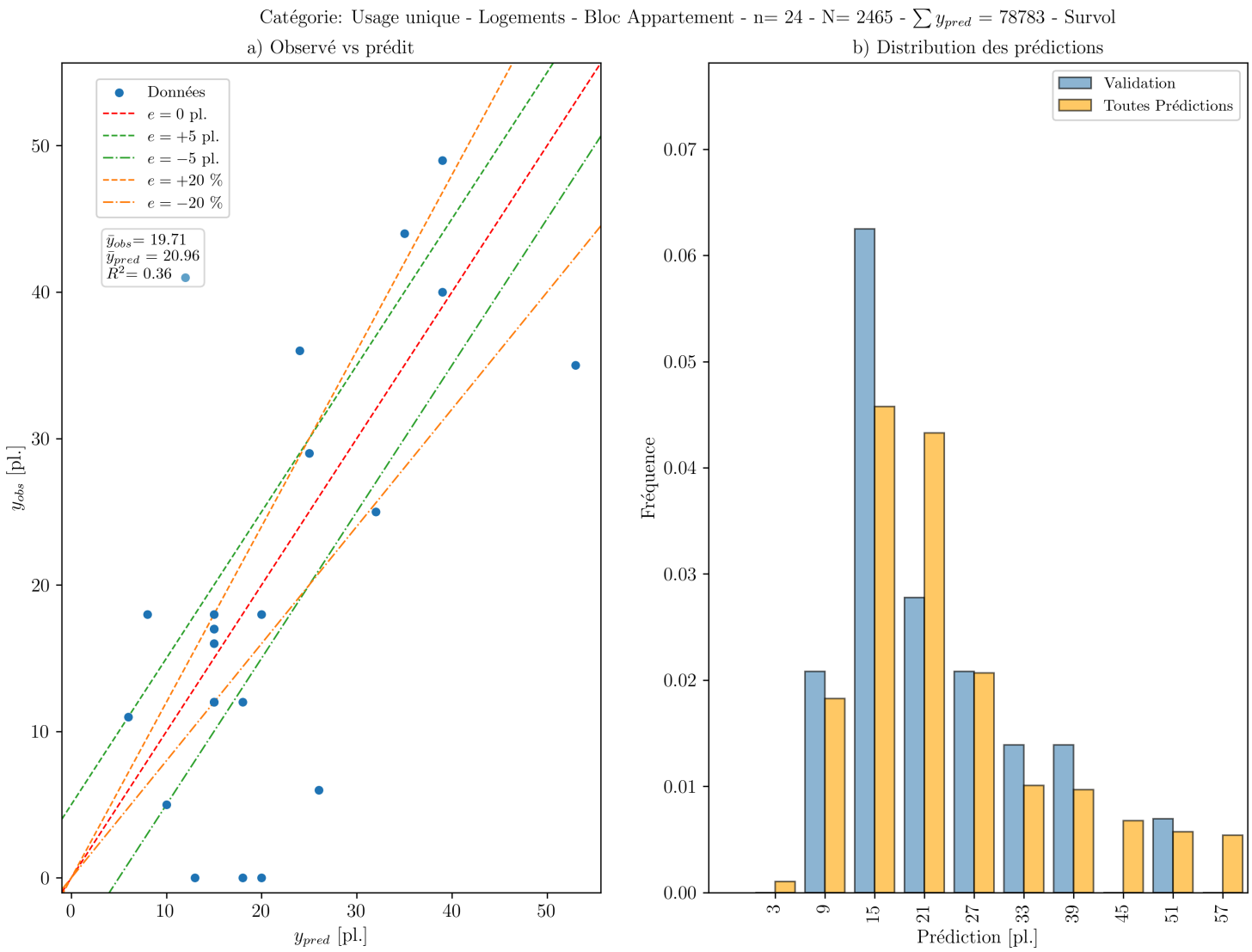


FIGURE 4.55 Distribution des prédictions pour les grands immeubles résidentiels

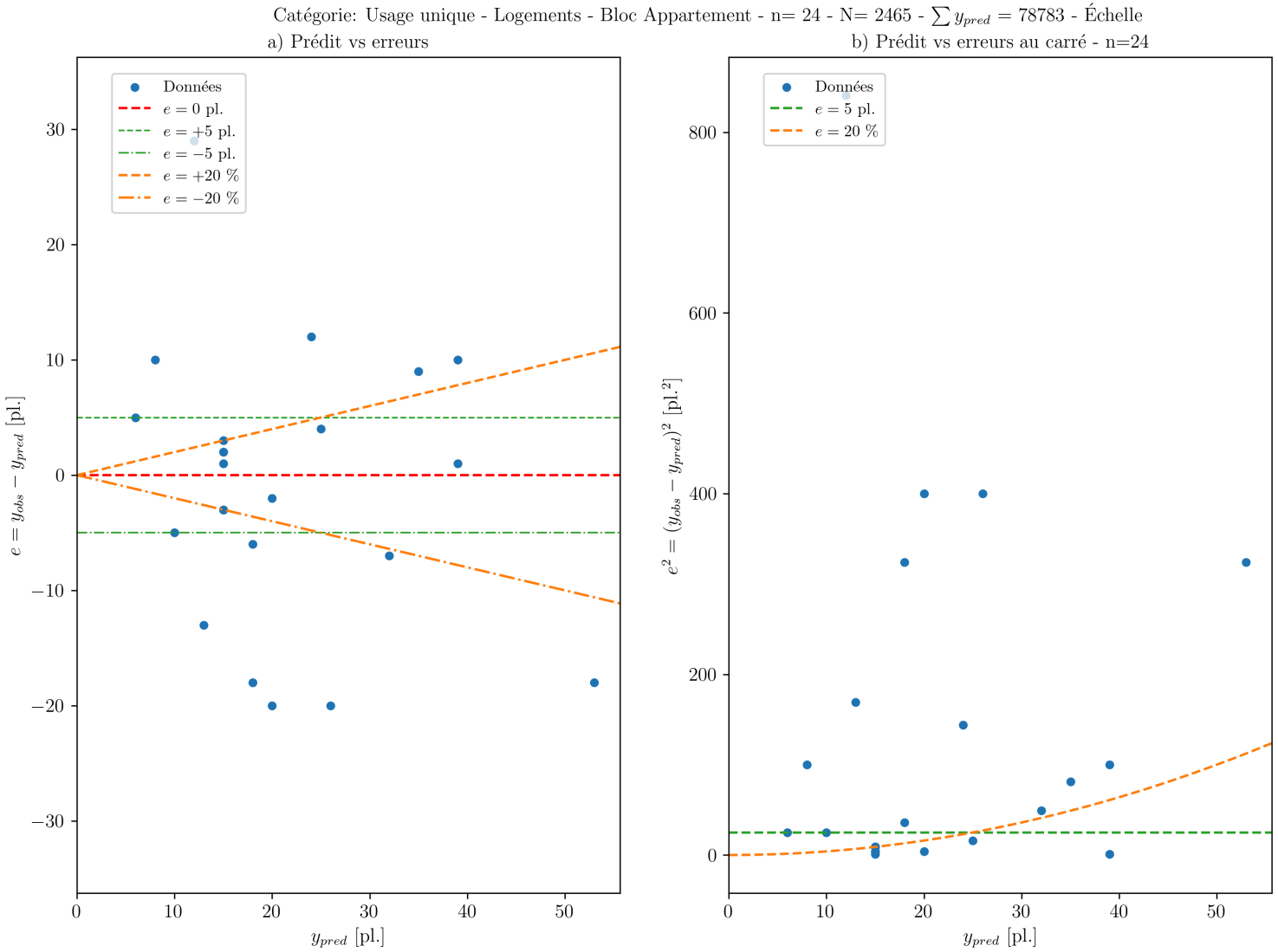


FIGURE 4.56 Erreur en fonction des prédictions pour les grands immeubles résidentiels

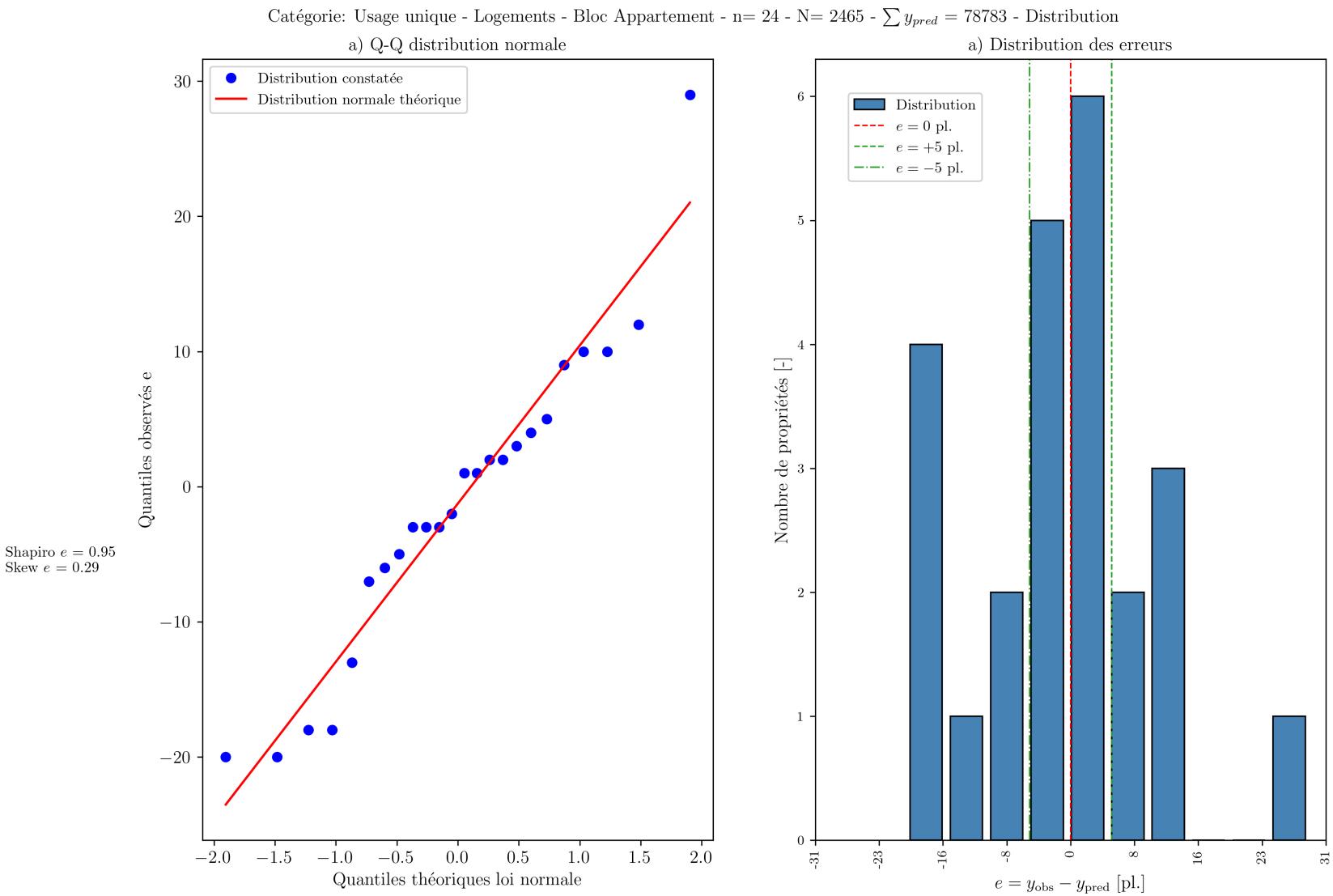


FIGURE 4.57 Distribution et normalité des erreurs pour les grands immeubles résidentiels

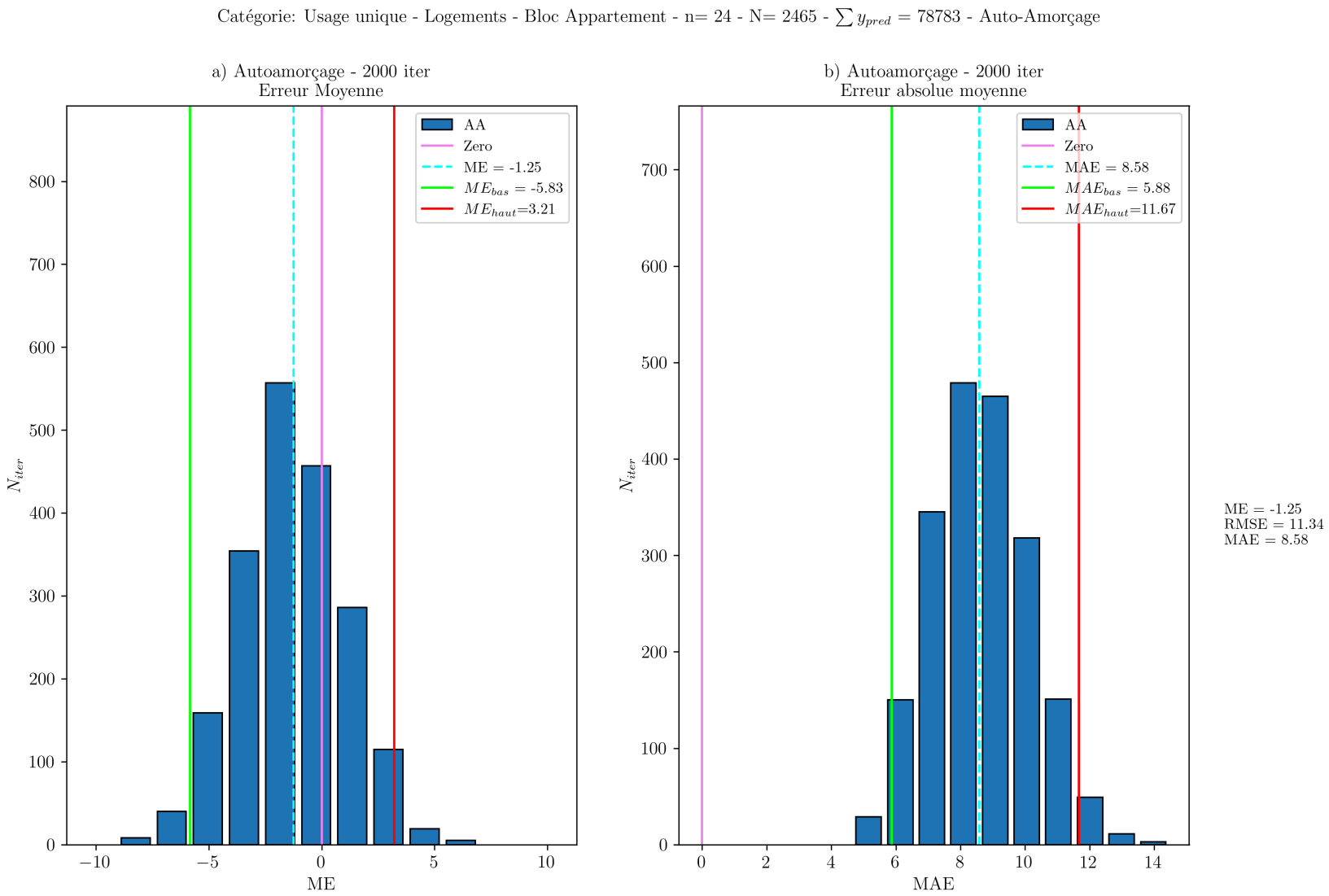


FIGURE 4.58 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les grands immeubles résidentiels

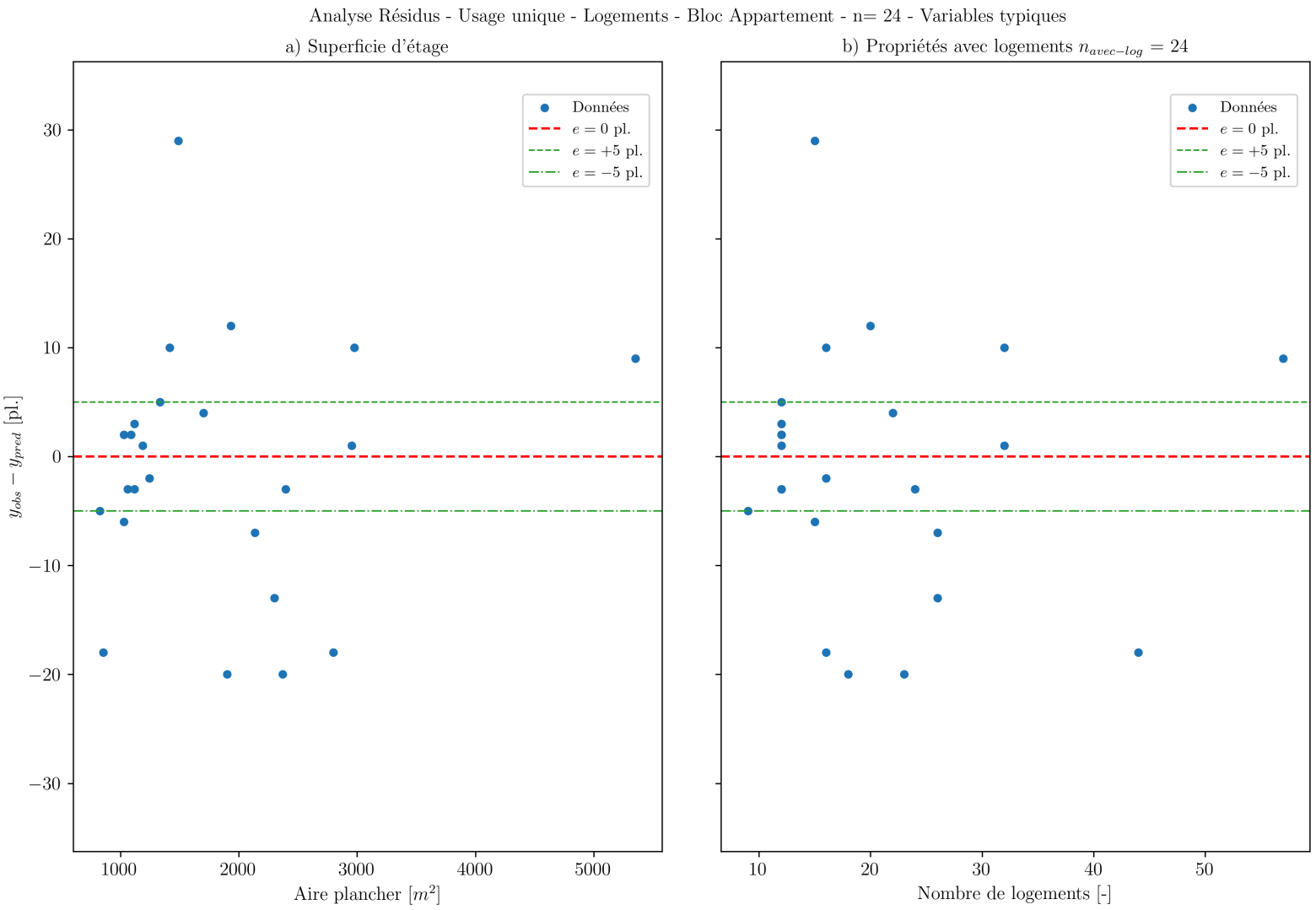


FIGURE 4.59 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les grands immeubles résidentiels

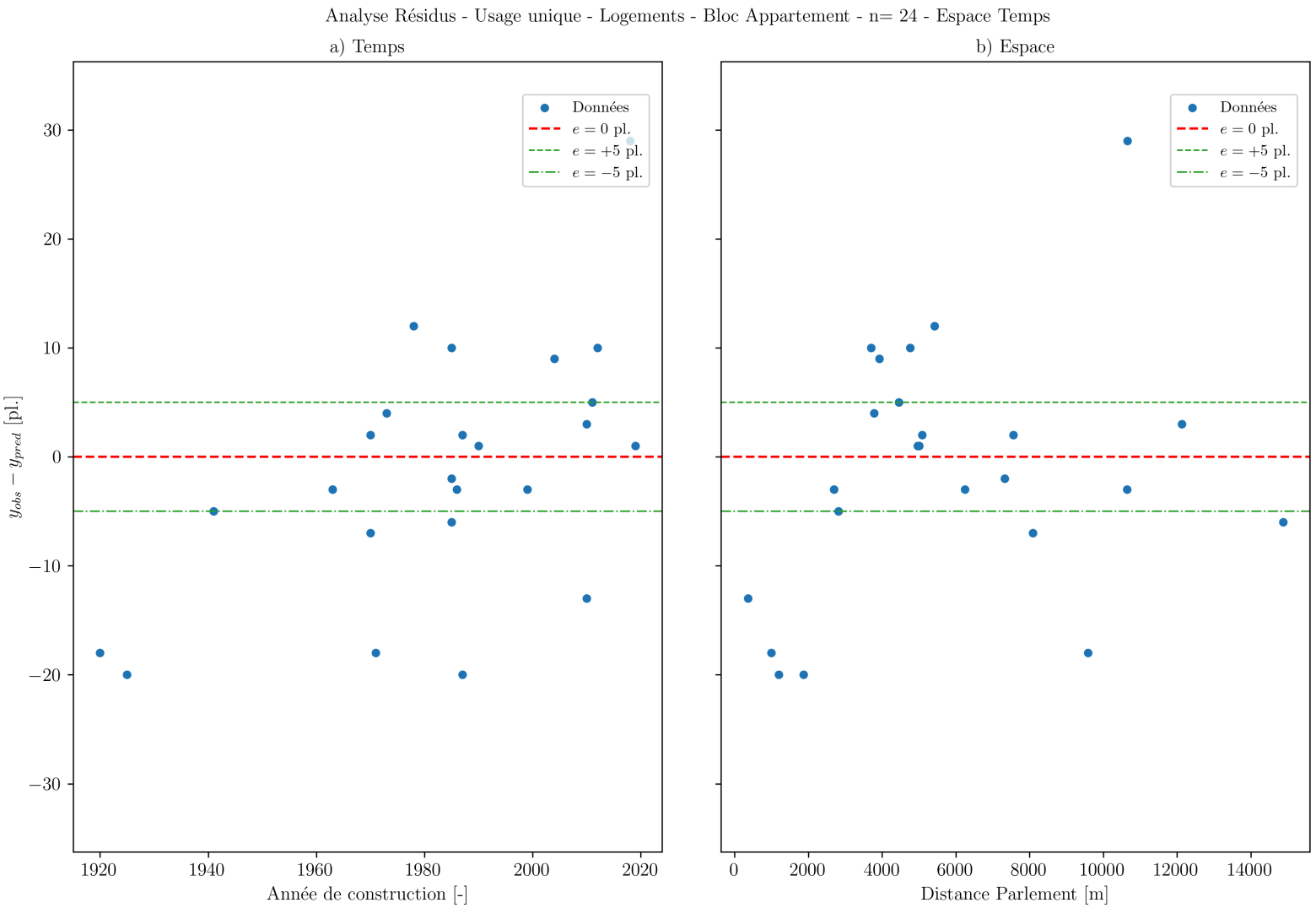


FIGURE 4.60 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les grands immeubles résidentiels

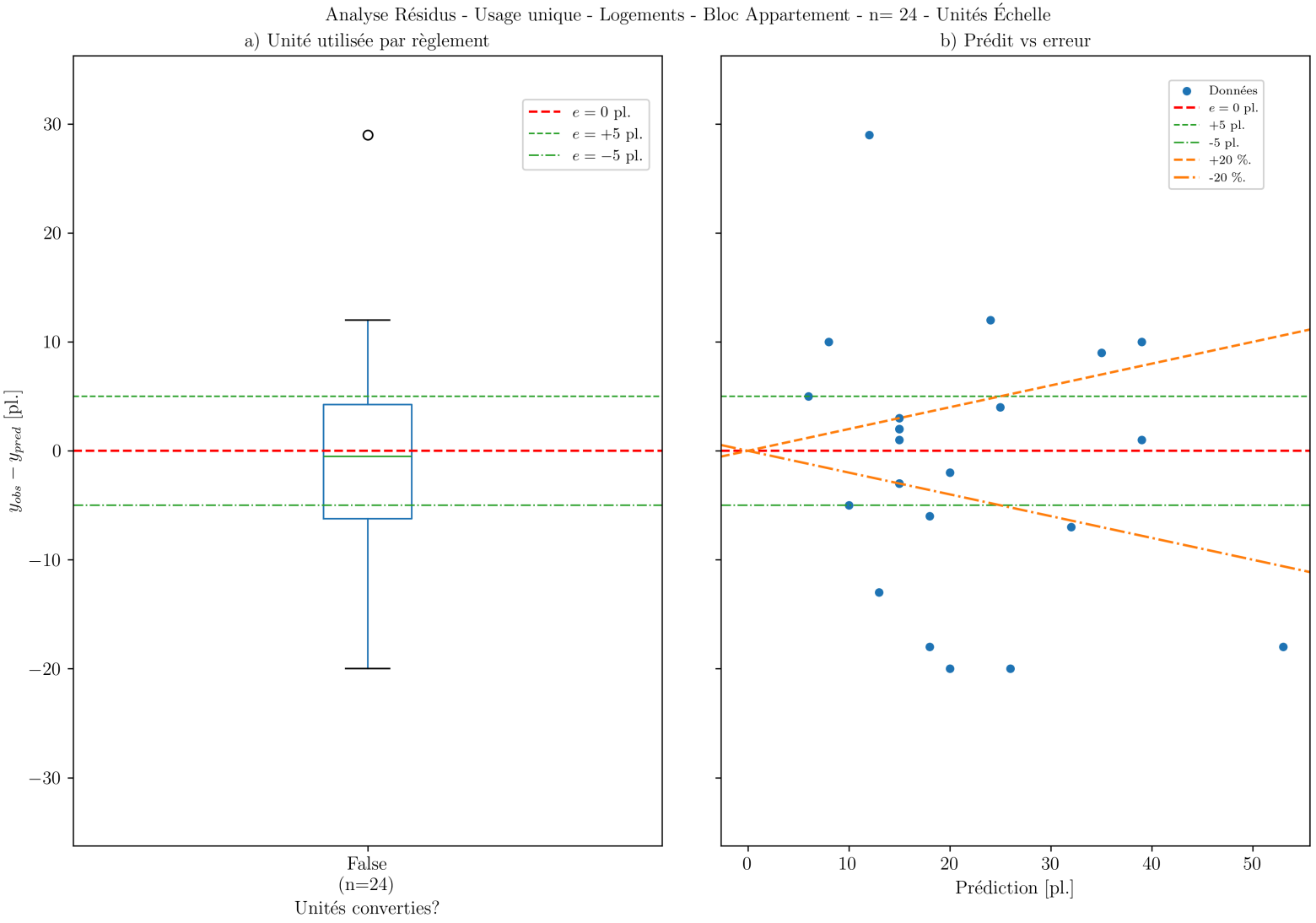


FIGURE 4.61 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les grands immeubles résidentiels

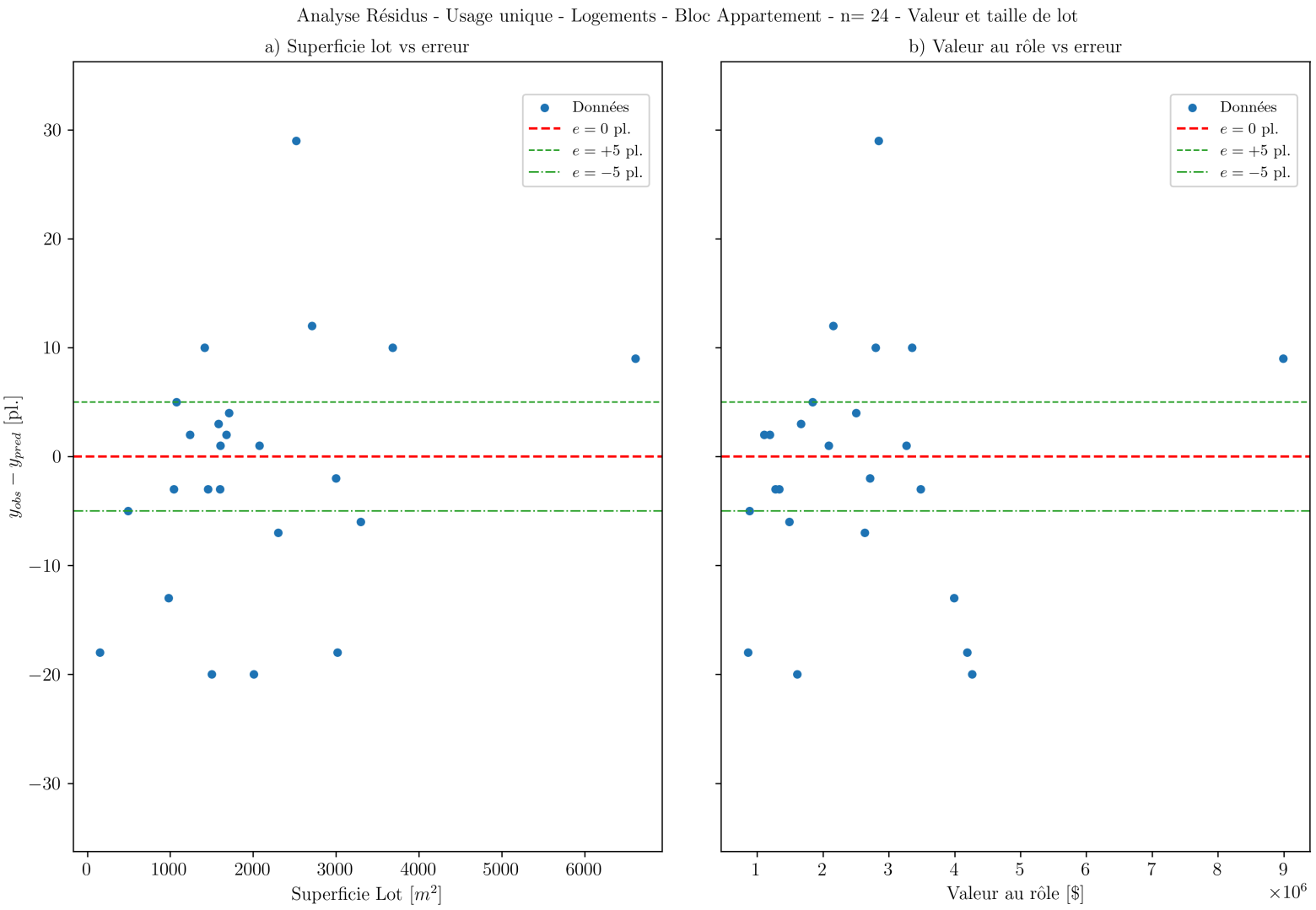


FIGURE 4.62 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les grands immeubles résidentiels

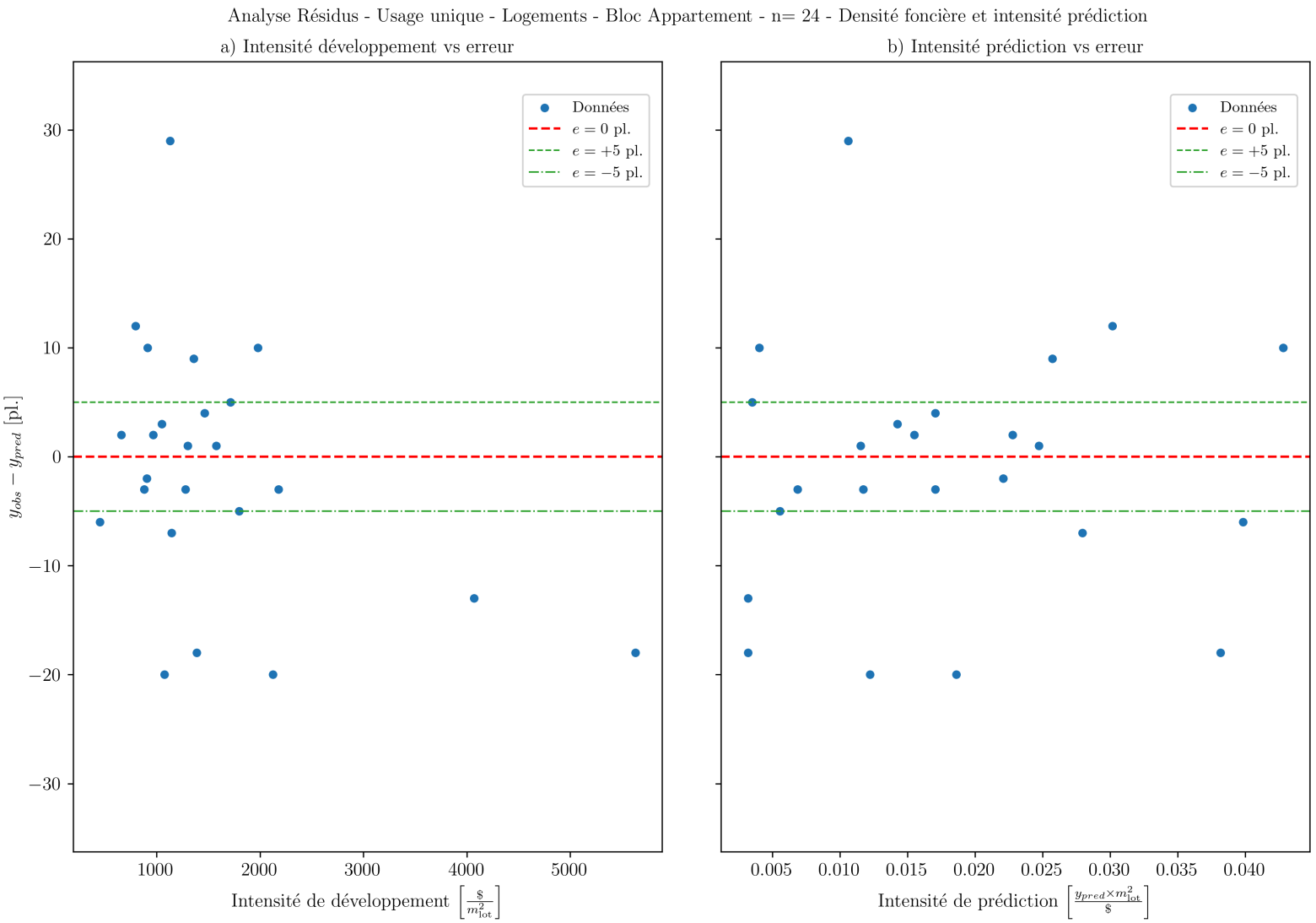


FIGURE 4.63 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les grands immeubles résidentiels

4.3.4 Commercial

Trente lots commerciaux ont été échantillonnés pour valider la performance du modèle. Une propriété dont l'utilisation est commerciale a une erreur de plus de 300 places. Cette propriété est un immeuble commercial construit dans les années 1970 et se trouve dans la zone industrielle de la Cité-Universitaire. Un filtre pour les erreurs de plus de 75 places a été appliqué pour l'enlever pour le calcul des statistiques. Ce filtrage change la moyenne de la catégorie de $\bar{y}_{pred} = 55.6$ à $\bar{y}_{pred} = 46.3$. La valeur moyenne observée $\bar{y}_{obs}$ est 44.0.

La figure 4.73b montre une variable d'intensité (eq. 3.25) qui semble être un bon indicateur pour identifier les valeurs aberrantes. Deux requêtes SQL ont été lancées à des seuils de 0.25 et 0.5. 61 et 10 lots respectivement ont été trouvés qui auraient un enjeu potentiel. Au premier niveau de seuil, 18 des 61 propriétés étaient affectées au même règlement que la valeur aberrante. Il s'agit d'un des 5 règlements reliés au commerce de détail avec des niveaux variants de .025 places par mètre carré à 0.1 place par mètre carré pour la municipalité concernée. Une requête pour extraire la liste de propriétés potentiellement affectées de la base de données est donnée en annexe D.15.

La figure 4.64 montre l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement. On constate que les prédictions faites avec une étape de conversion ont un biais moyen introduit. C'est particulièrement le cas pour les commerces liés à l'automobile. L'annexe D.14 donne un exemple de requête pour extraire les propriétés par l'unité de formulation du règlement.

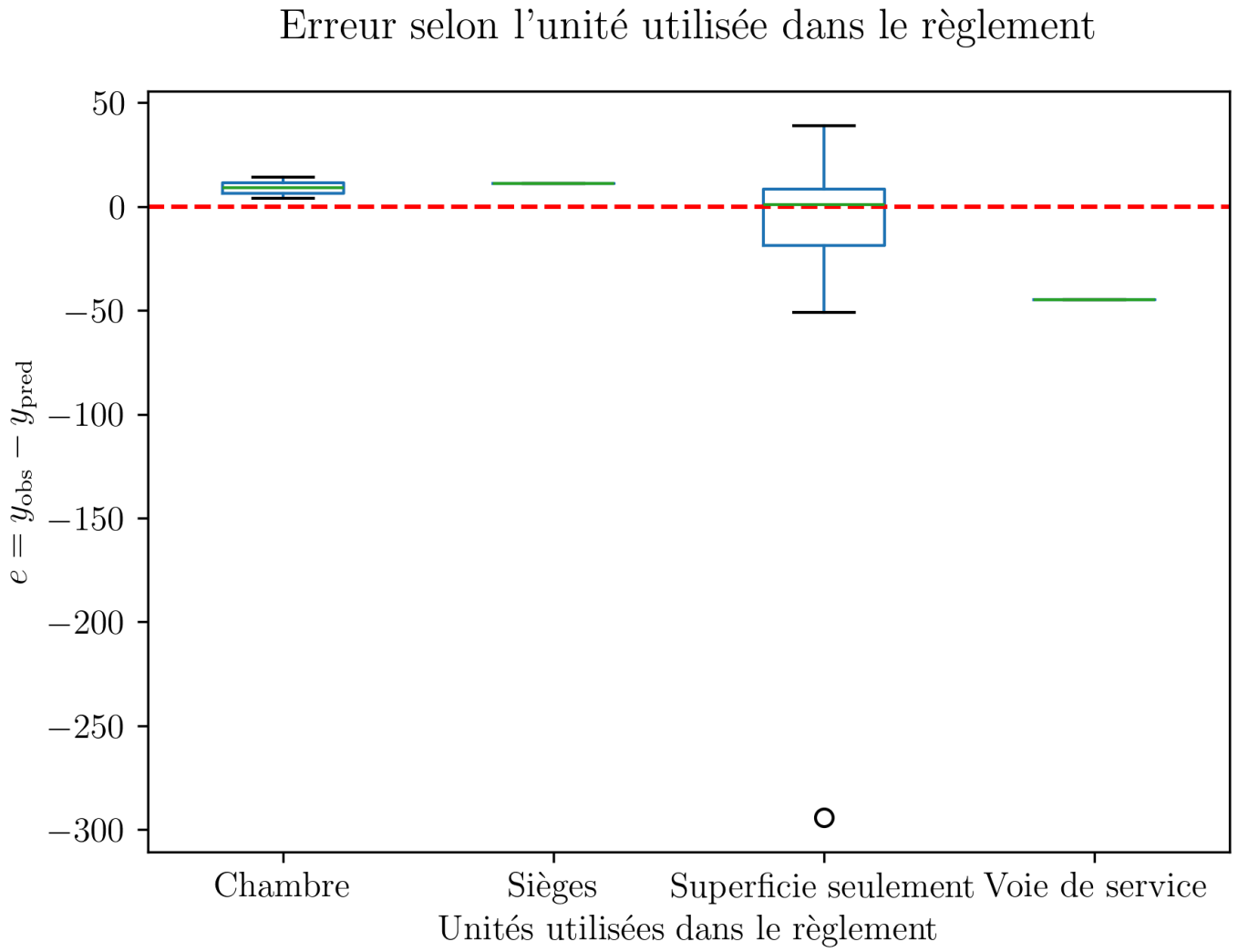


FIGURE 4.64 Diagramme à boîte de l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement pour les propriétés commerciales

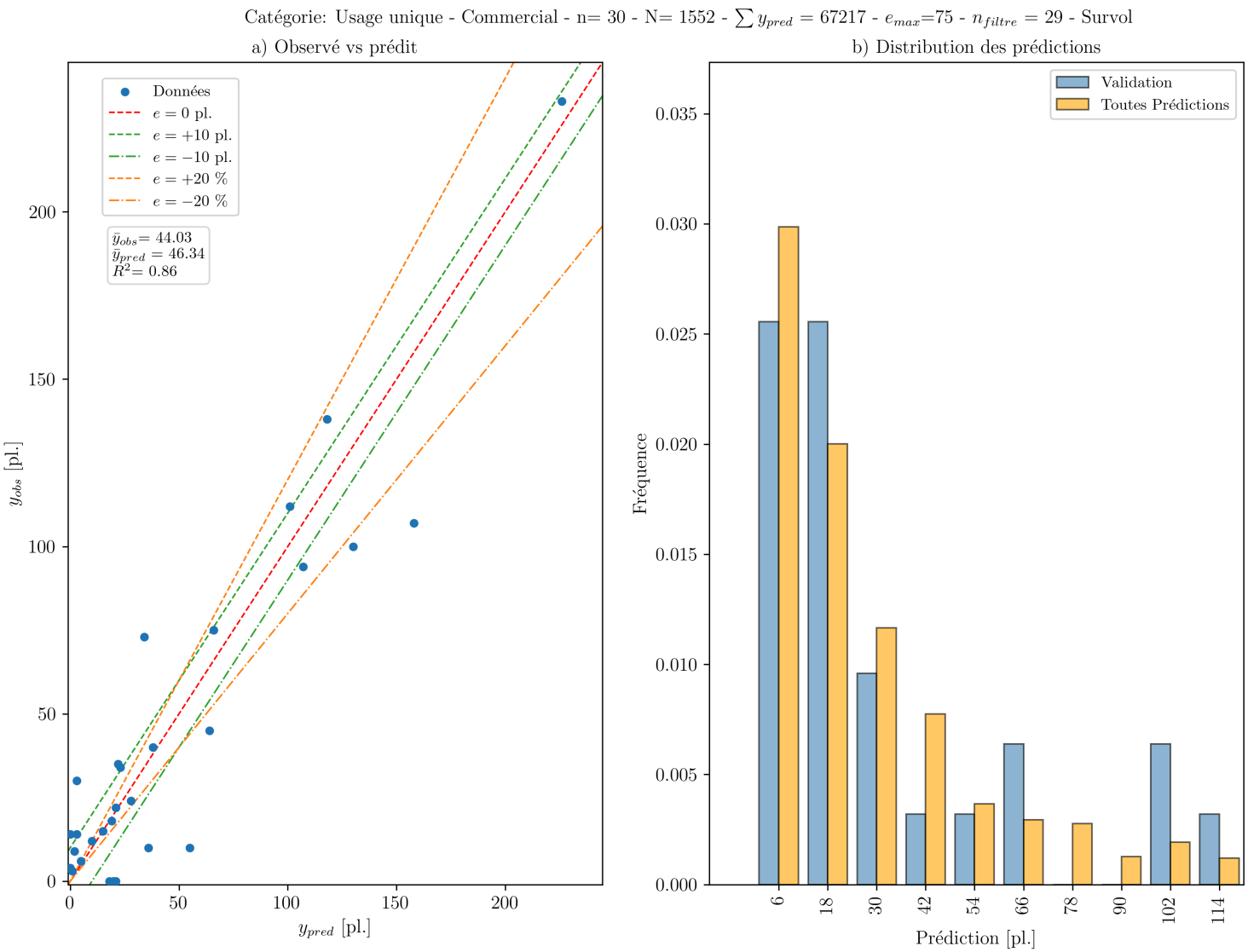


FIGURE 4.65 Distribution des prédictions pour les lots commerciaux

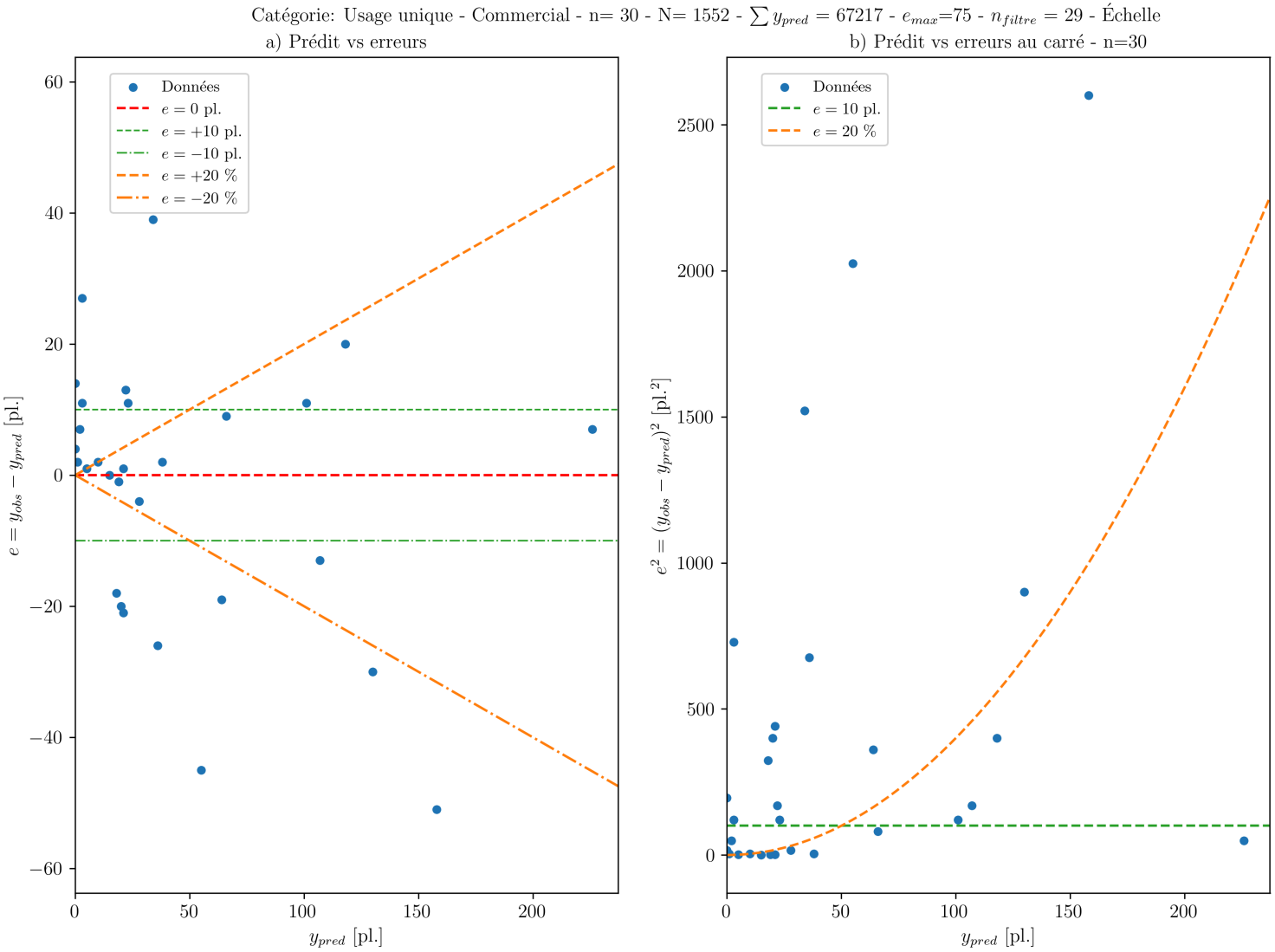


FIGURE 4.66 Erreur en fonction des prédictions pour les lots commerciaux

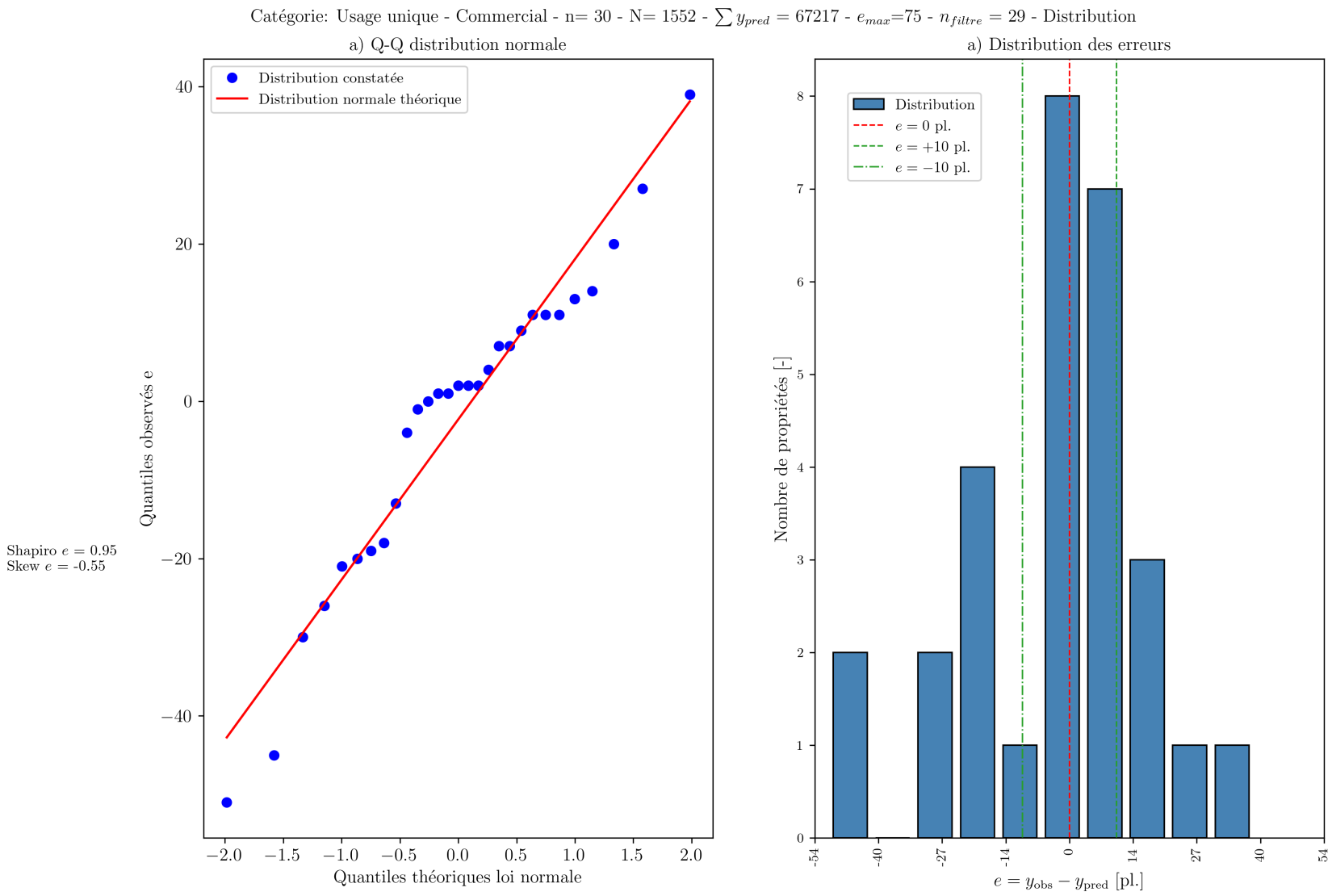


FIGURE 4.67 Distribution et normalité des erreurs pour les lots commerciaux

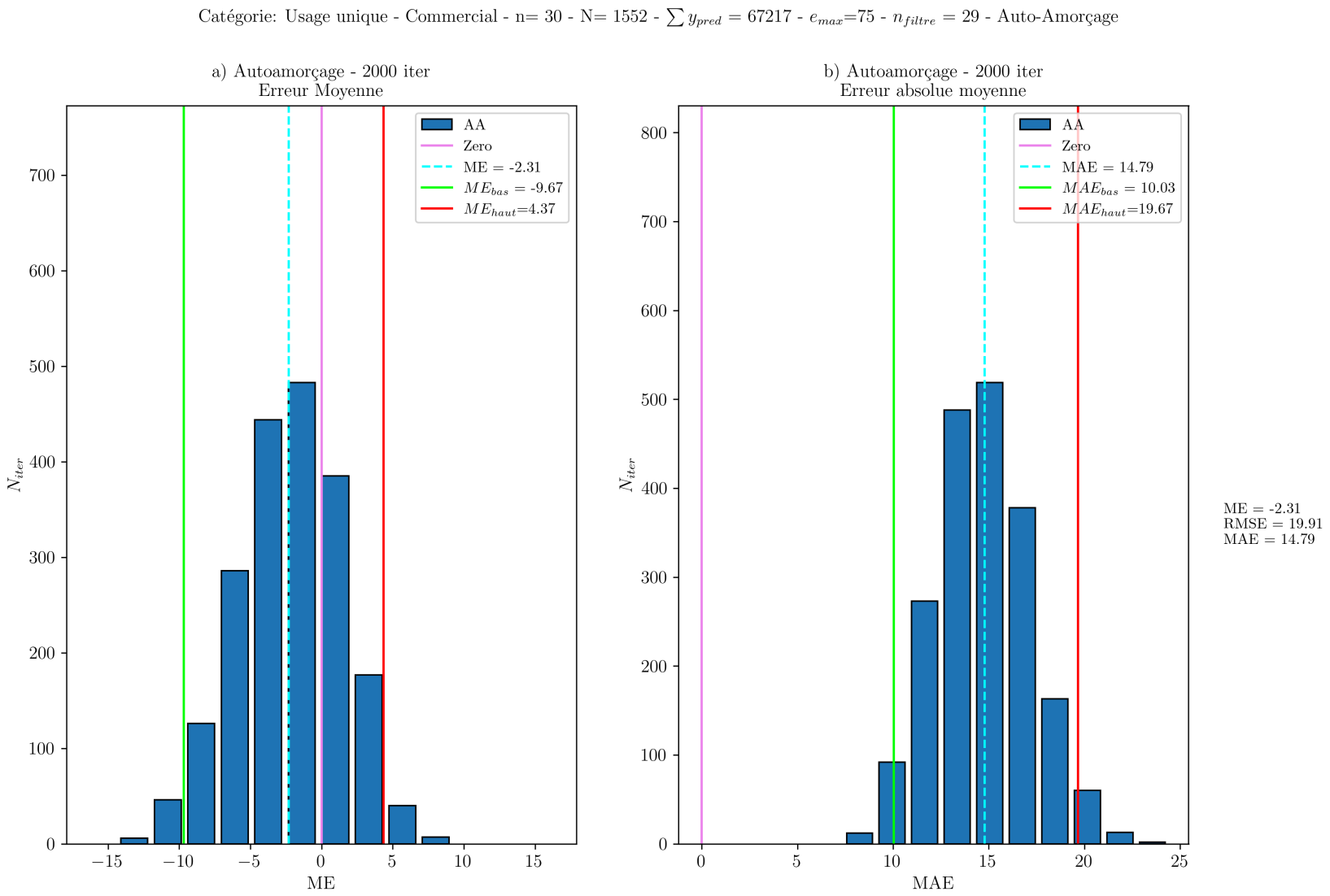


FIGURE 4.68 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots commerciaux

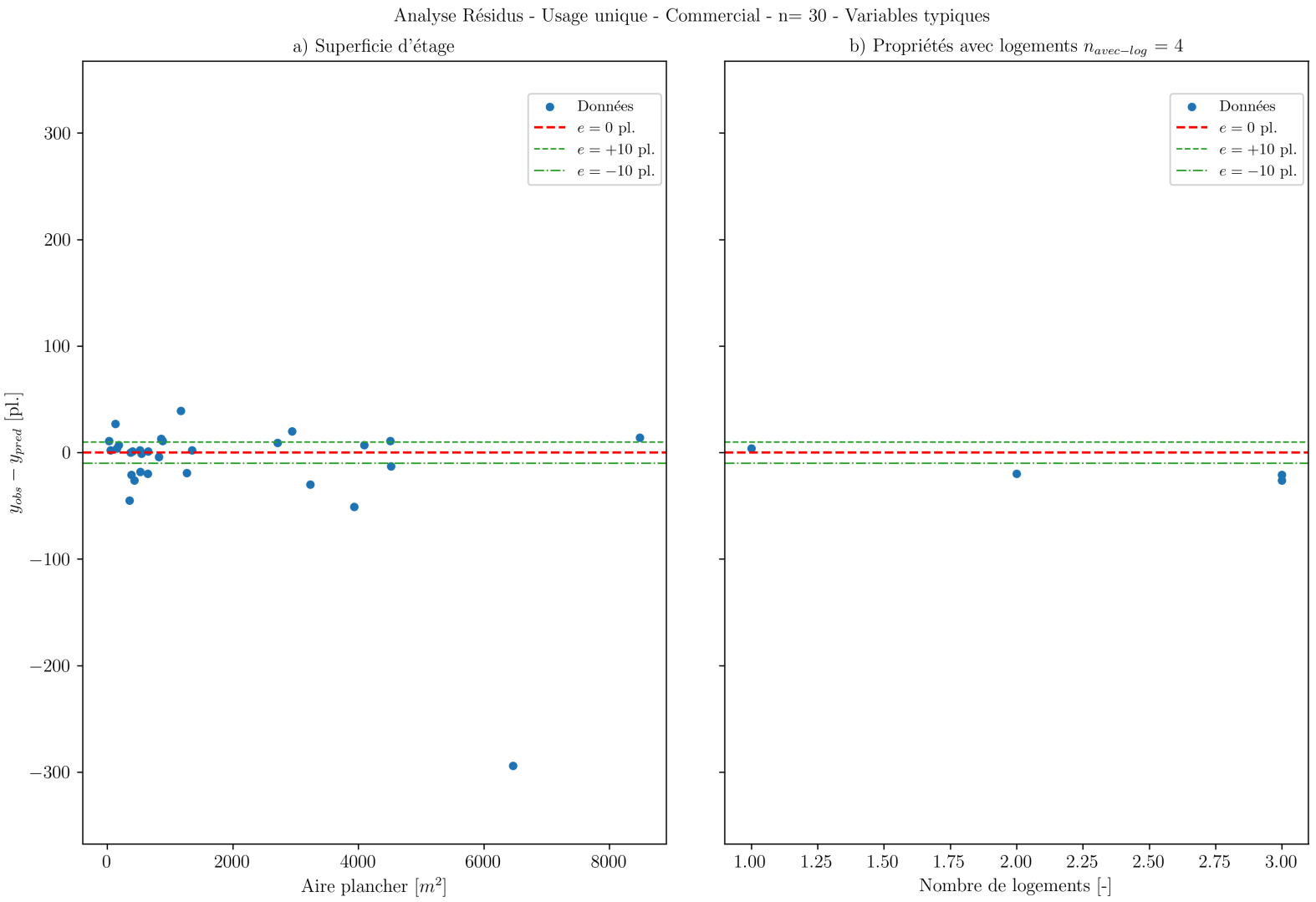


FIGURE 4.69 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots commerciaux

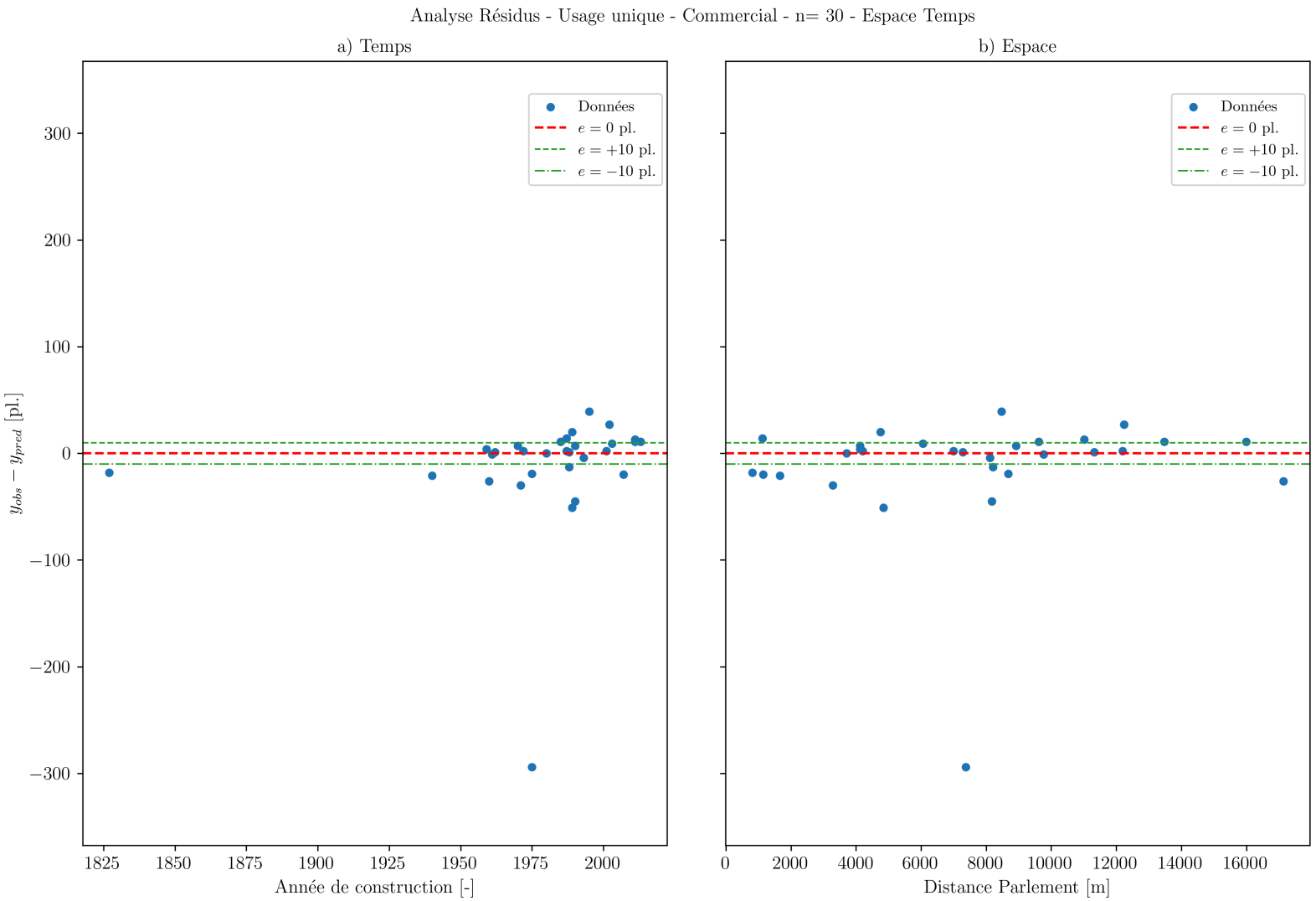


FIGURE 4.70 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots commerciaux

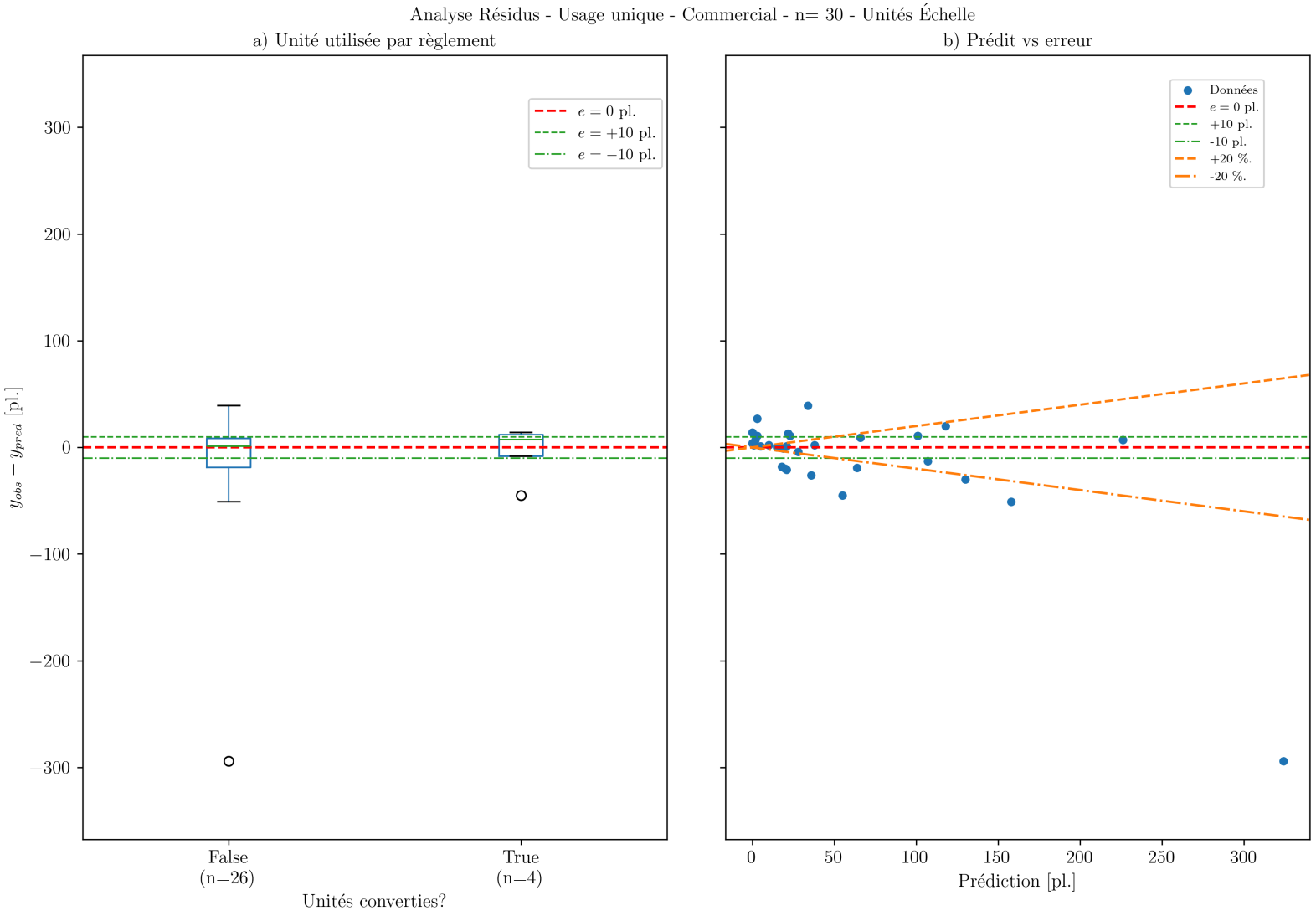


FIGURE 4.71 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots commerciaux

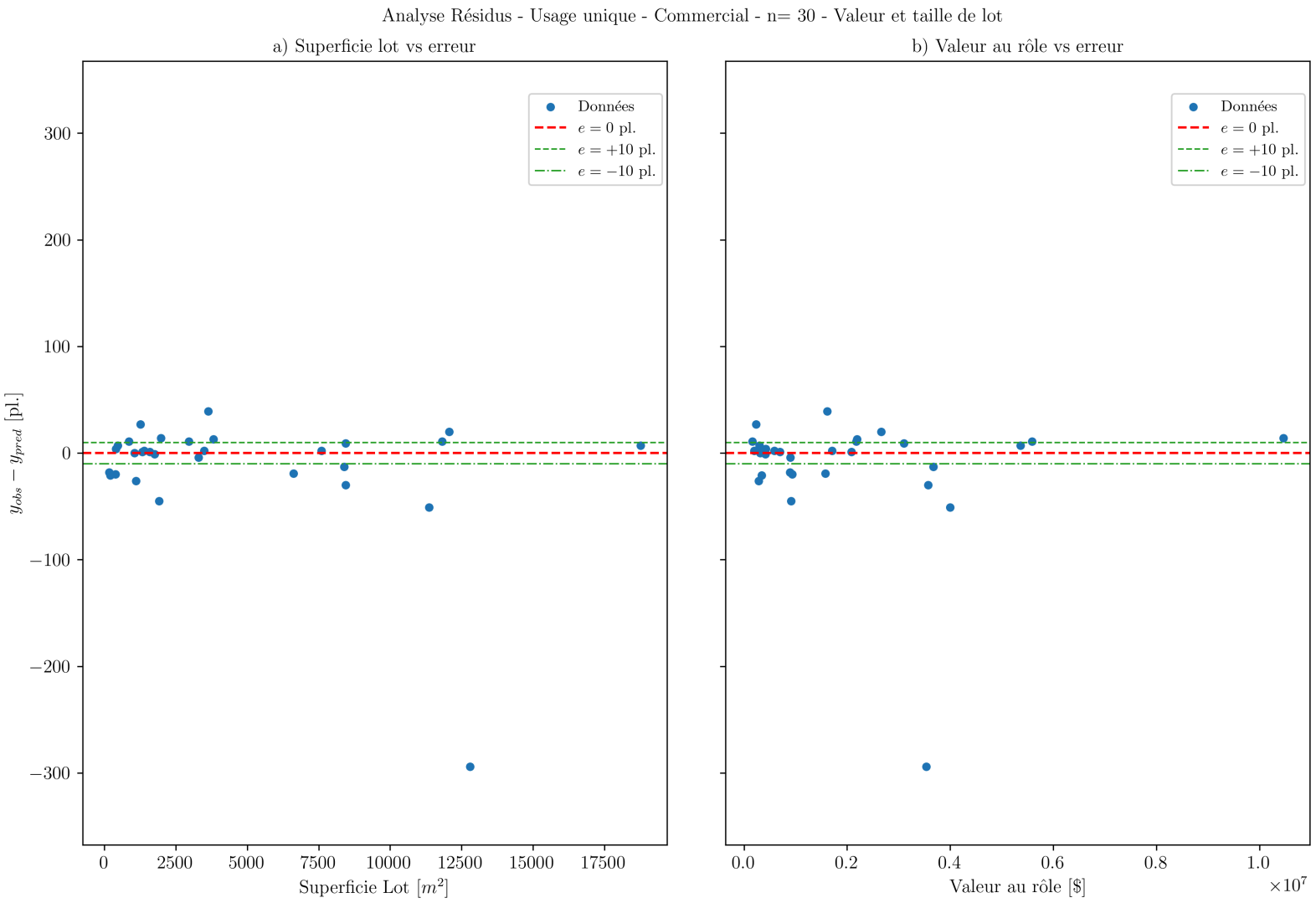


FIGURE 4.72 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots commerciaux

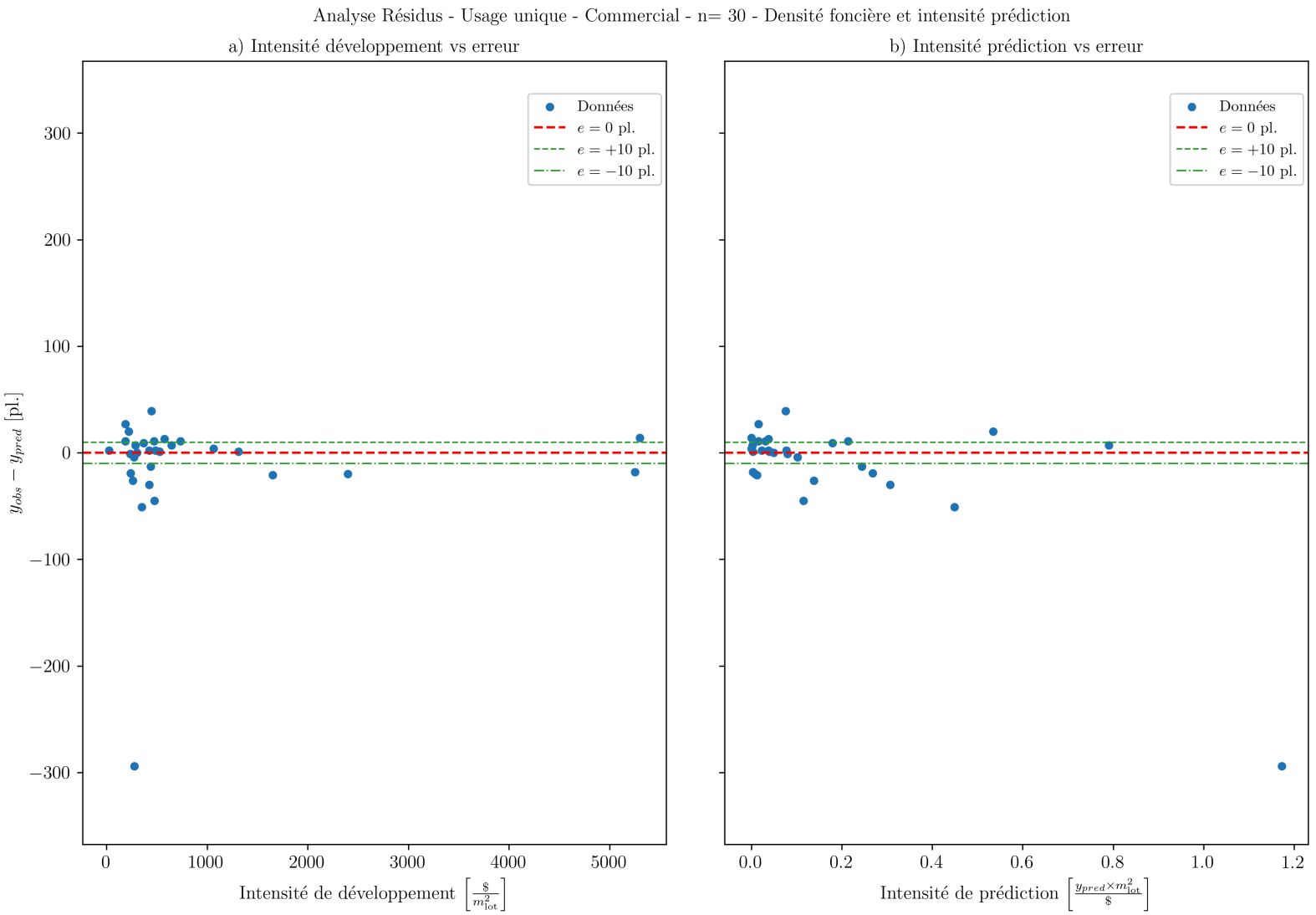


FIGURE 4.73 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots commerciaux

4.3.5 Services

Trente propriétés de services ont été échantillonnées sur le territoire. Trois lots avec des erreurs supérieurs à 50 ont été éliminés pour les calculs des métriques. Ils peuvent être identifiés à l'aide de la même métrique d'intensité de prédiction montrée à la figure 4.83b. En fixant la métrique d'intensité à 0.1 et 0.15, on peut identifier respectivement 90 et 48 lots avec des surestimations potentielles du nombre de places de stationnement. Les lots tombent dans trois grandes catégories : les immeubles à bureaux multiétagés, des écoles et des centres de tri postal. Une fois les grandes erreurs filtrées, le modèle surestime encore le stationnement ($\bar{y}_{obs} = 16.5$ vs $\bar{y}_{pred} = 19.0$). La figure 4.81a montre que l'erreur croît avec la prédiction. Aucune tendance structurelle n'est identifiée sur les variables physiques des bâtiments, outre la métrique d'intensité de prédiction.

Finalement, la figure 4.74 montre que les unités requérant une conversion sont aussi un moyen d'identifier les propriétés avec d'importantes erreurs. La conversion de salles utilisées pour les écoles ou les services de santé sont particulièrement problématiques. L'annexe D.14 donne un exemple de requête SQL pour trouver de telles propriétés.

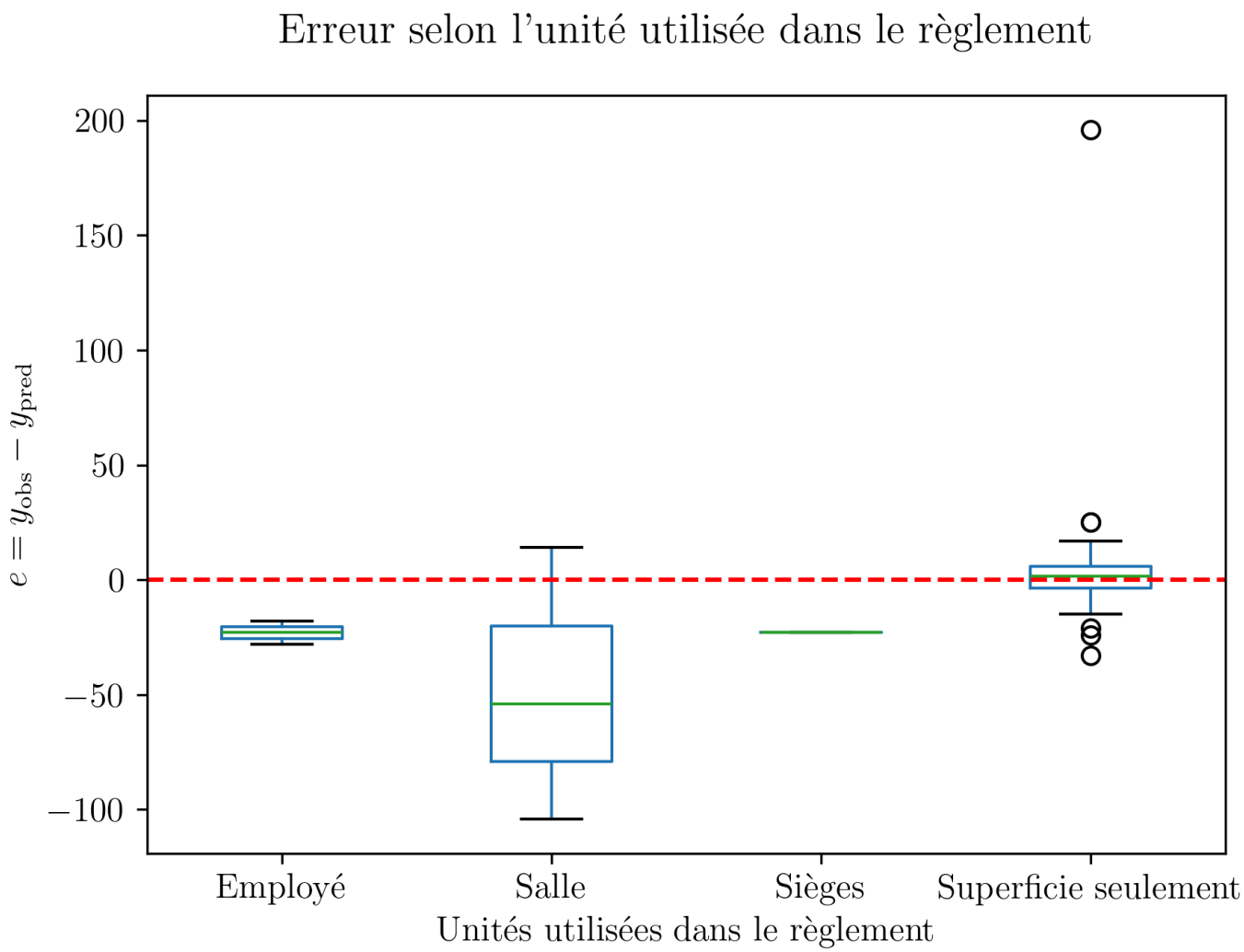


FIGURE 4.74 Diagramme à boîte de l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement pour les services

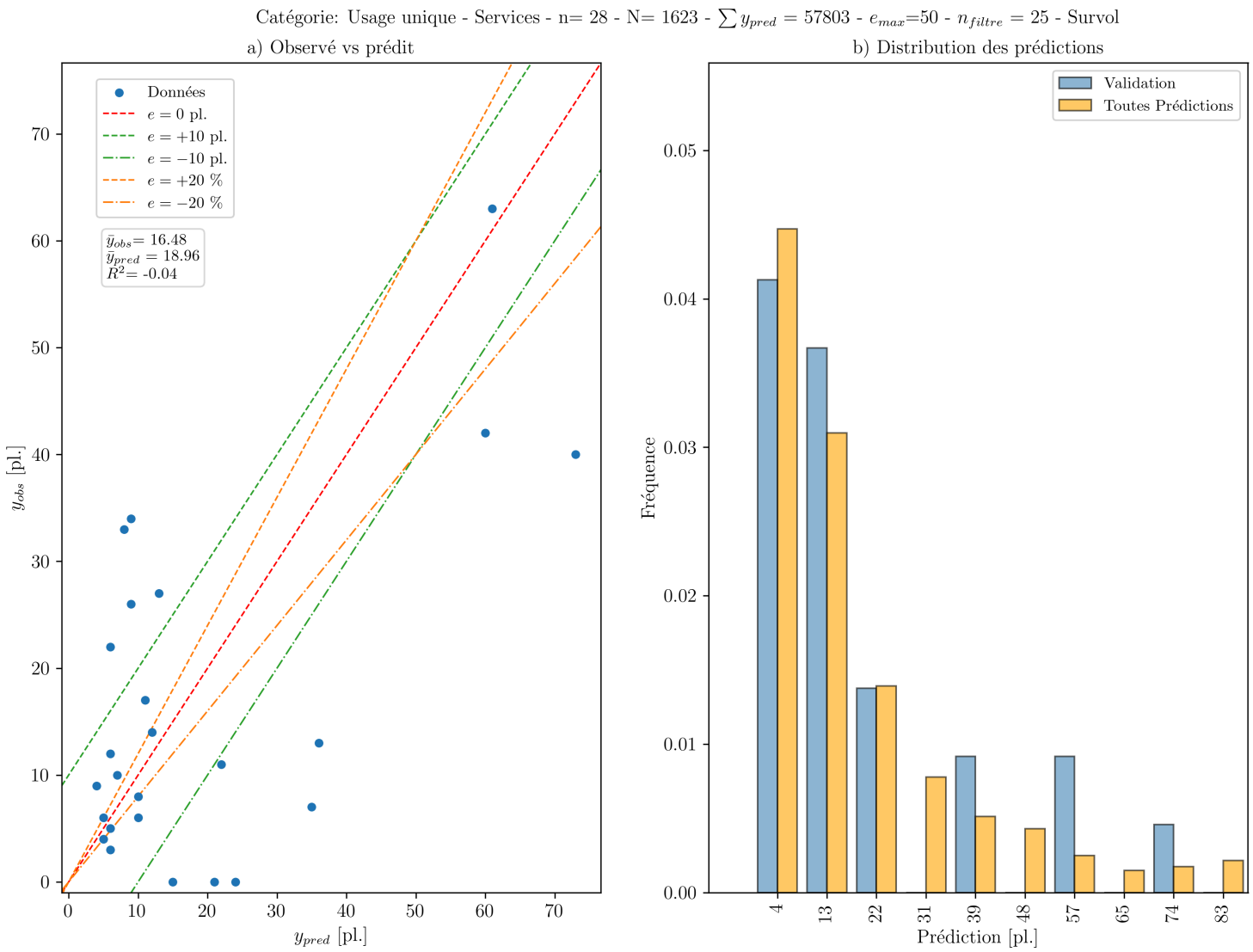


FIGURE 4.75 Distribution des prédictions pour les lots de services

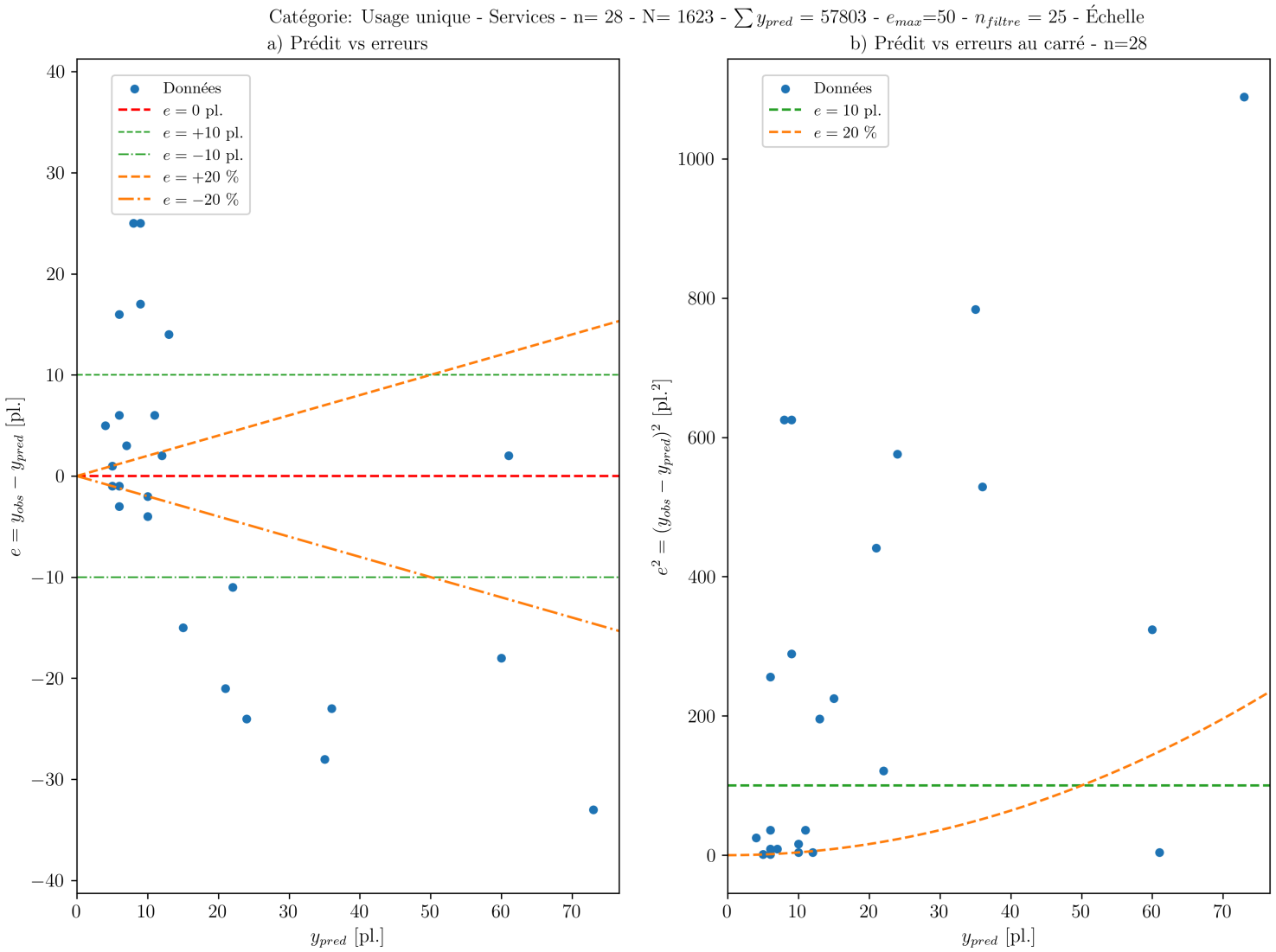


FIGURE 4.76 Erreur en fonction des prédictions pour les lots de services

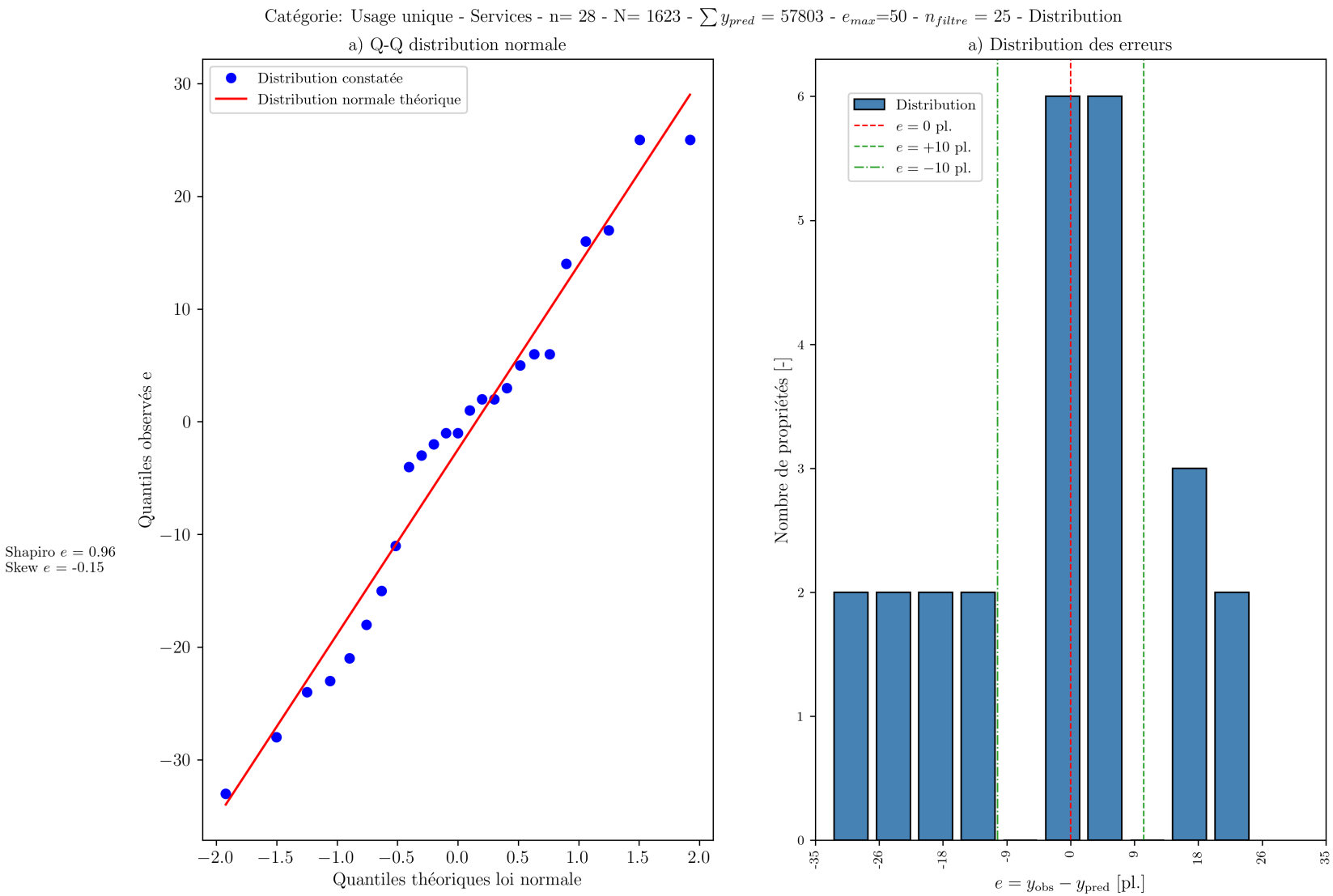


FIGURE 4.77 Distribution et normalité des erreurs pour les lots de services

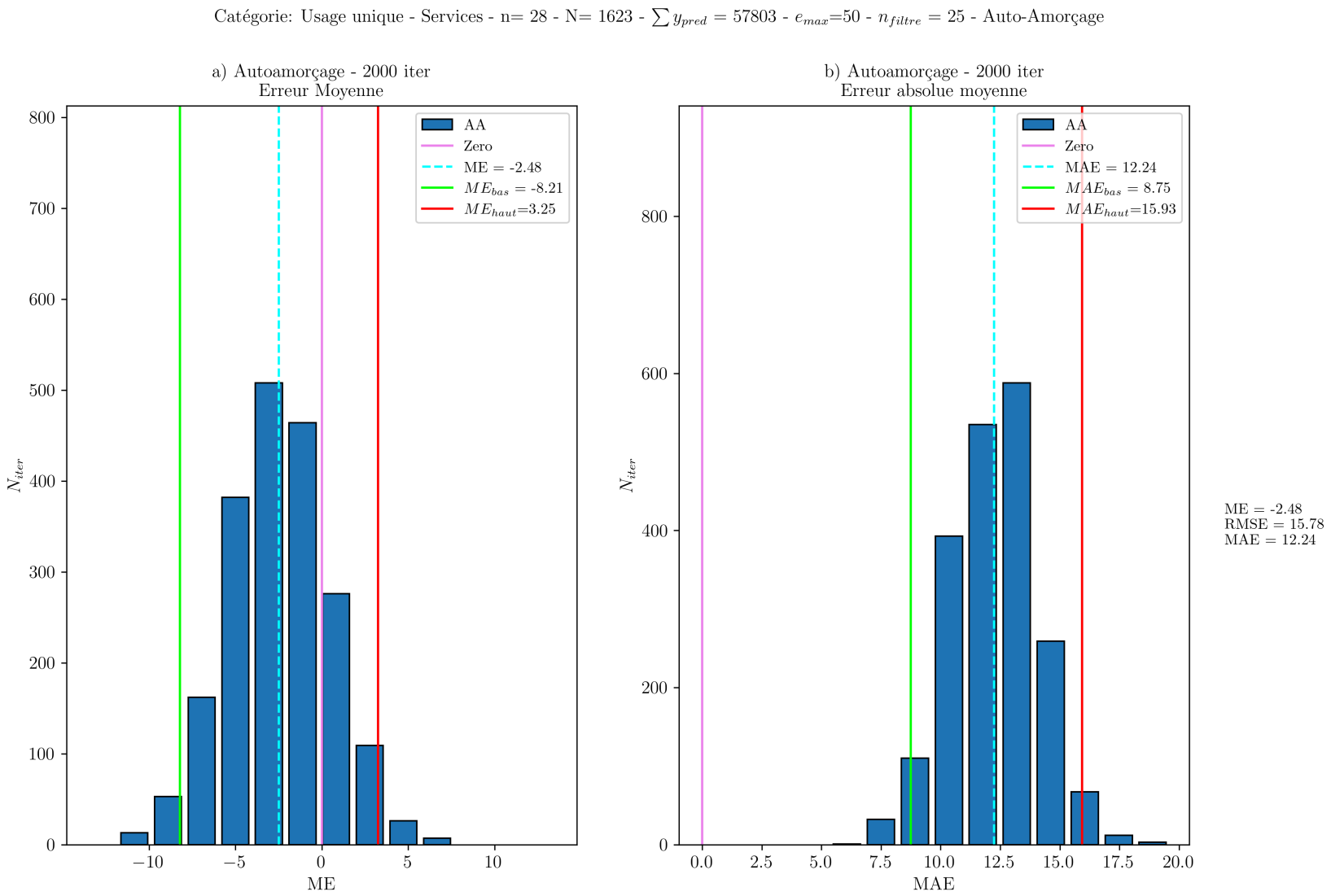


FIGURE 4.78 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots de services

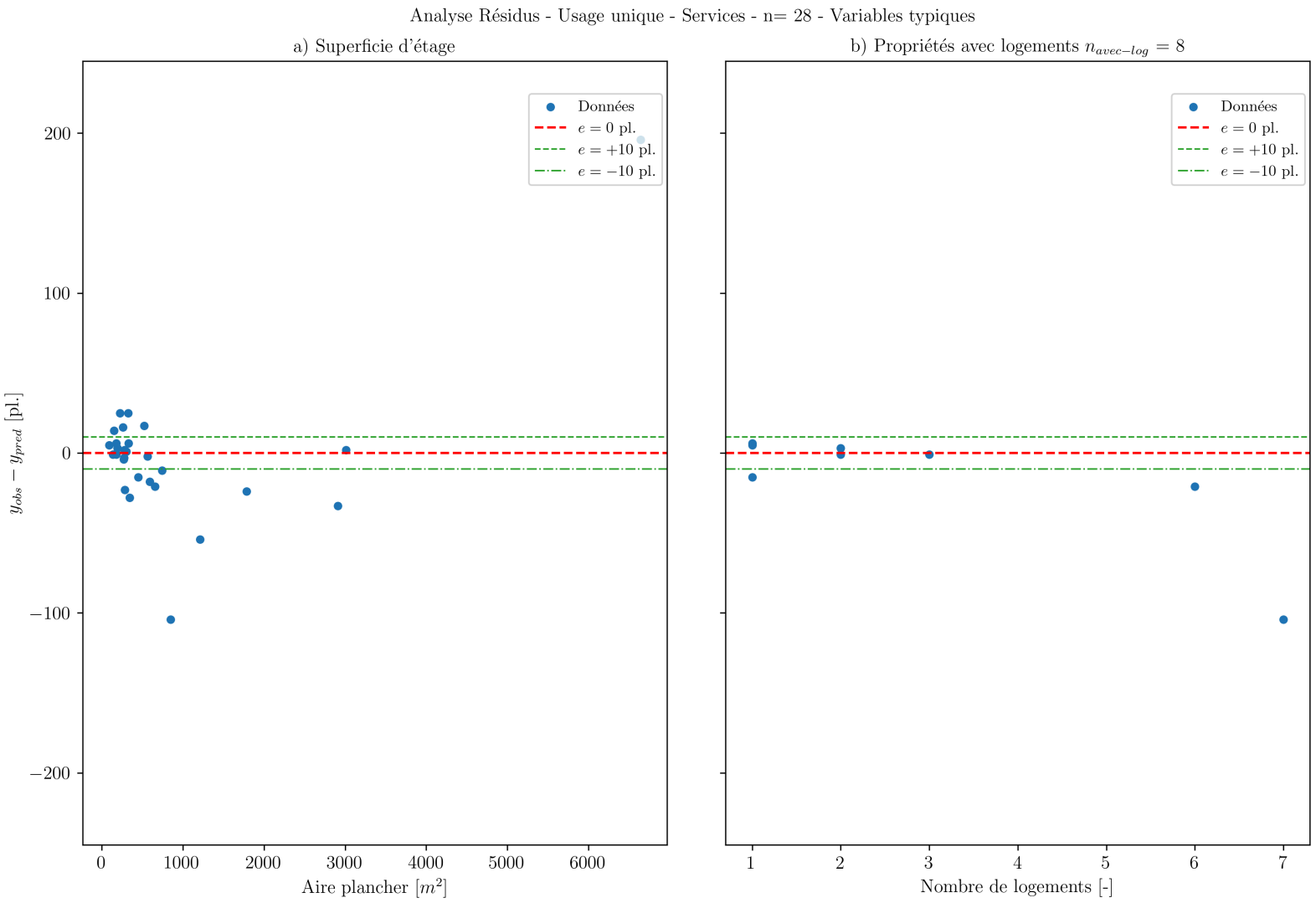


FIGURE 4.79 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots de services

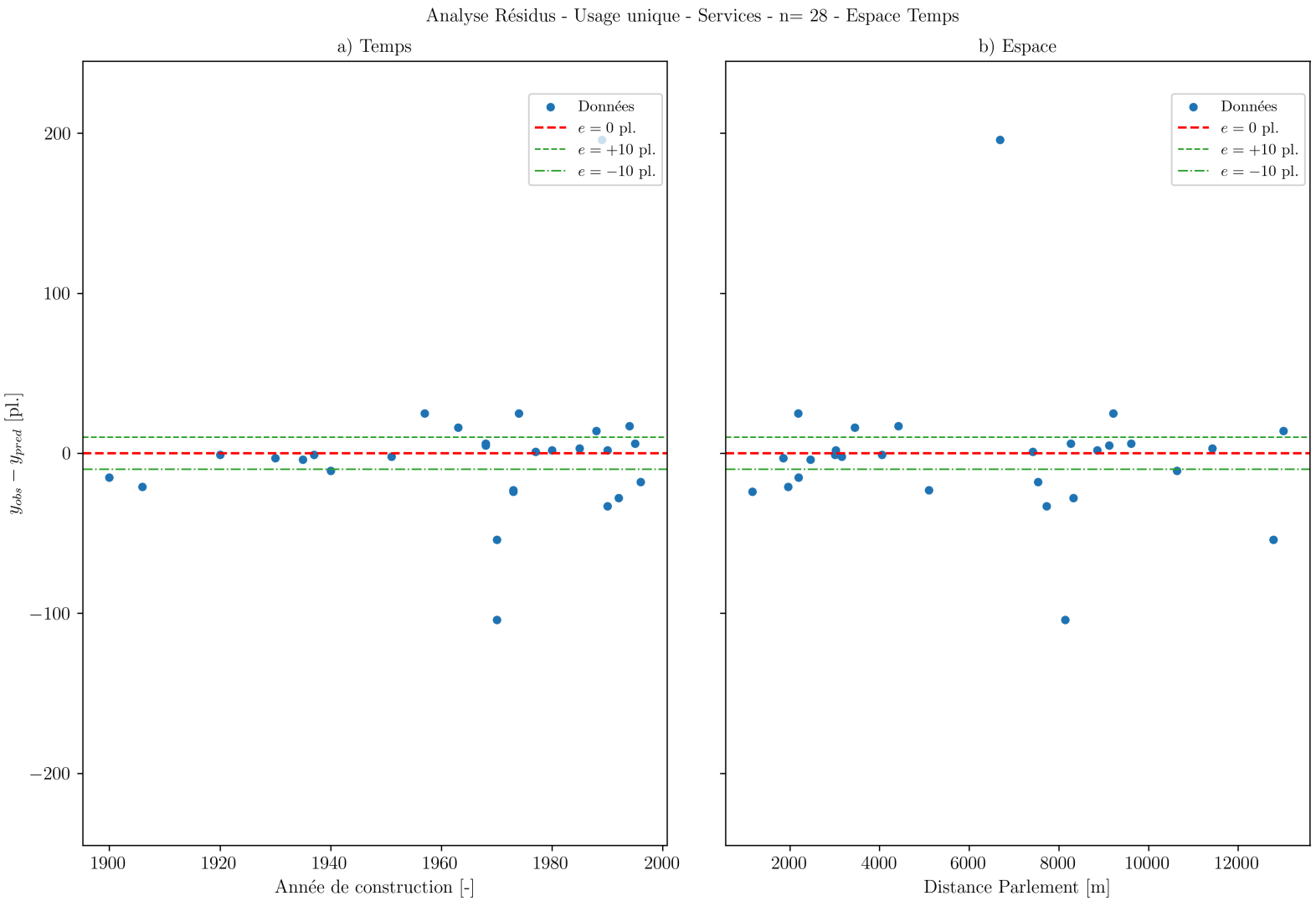


FIGURE 4.80 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots de services

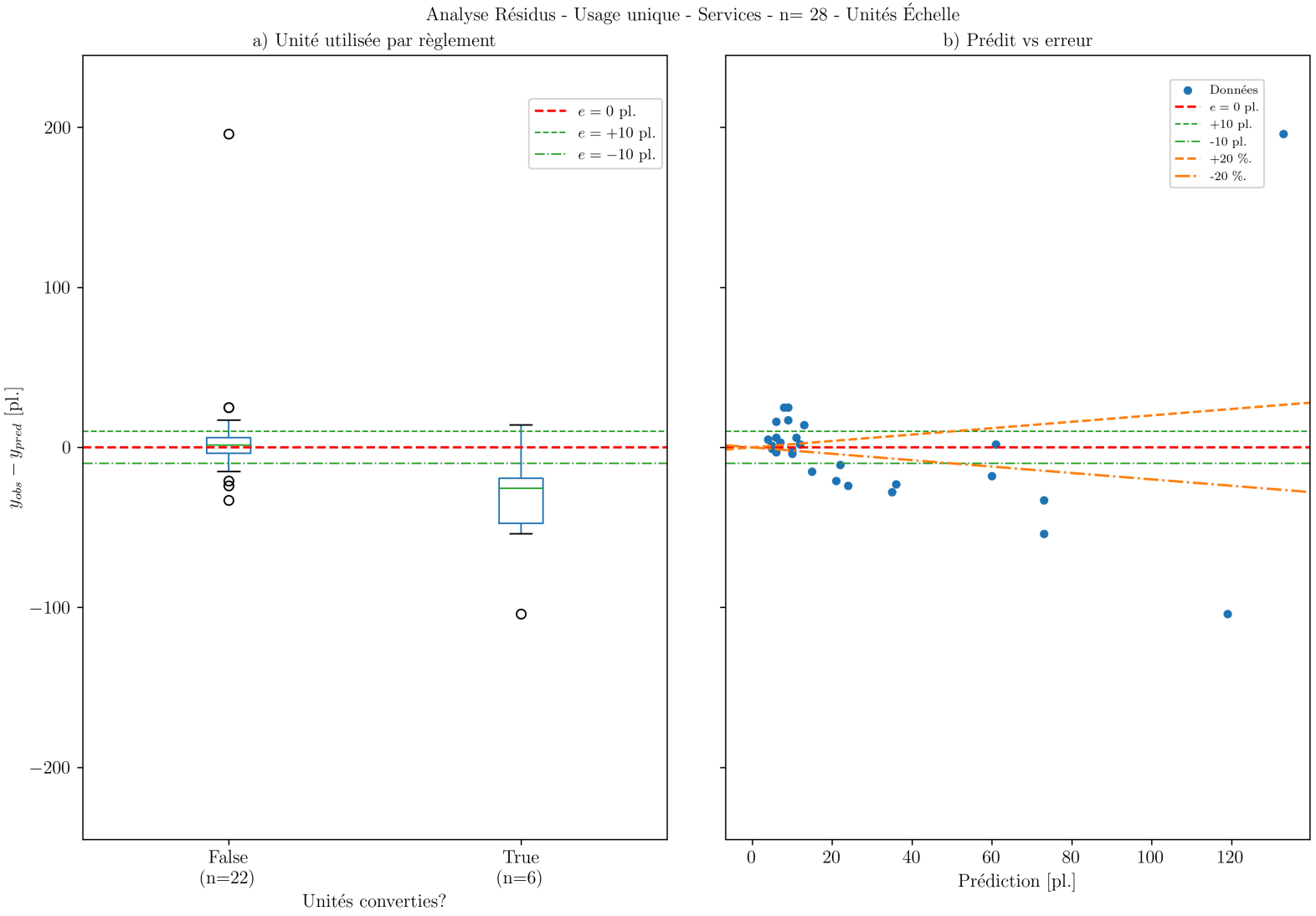


FIGURE 4.81 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots de services

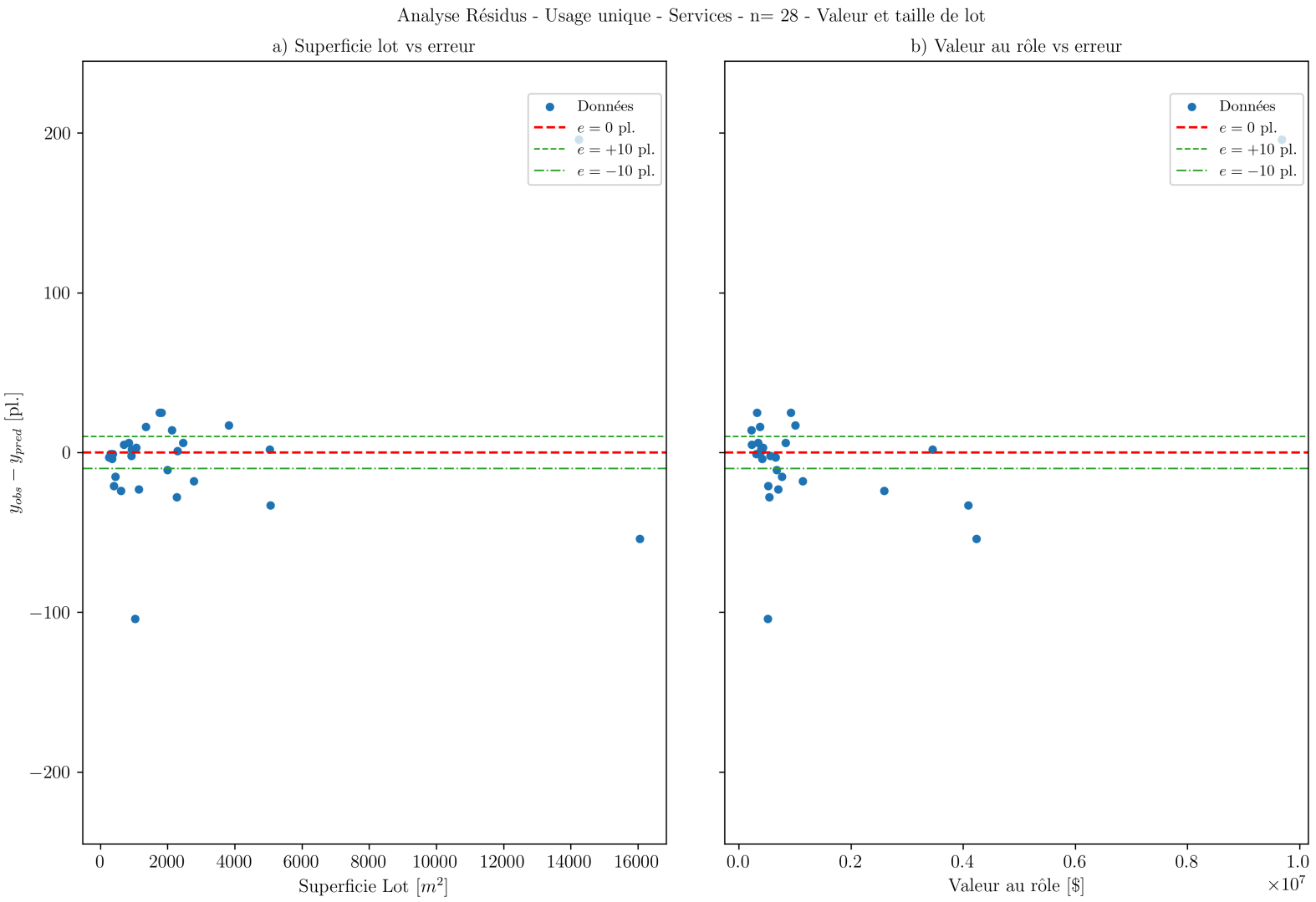


FIGURE 4.82 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots de services

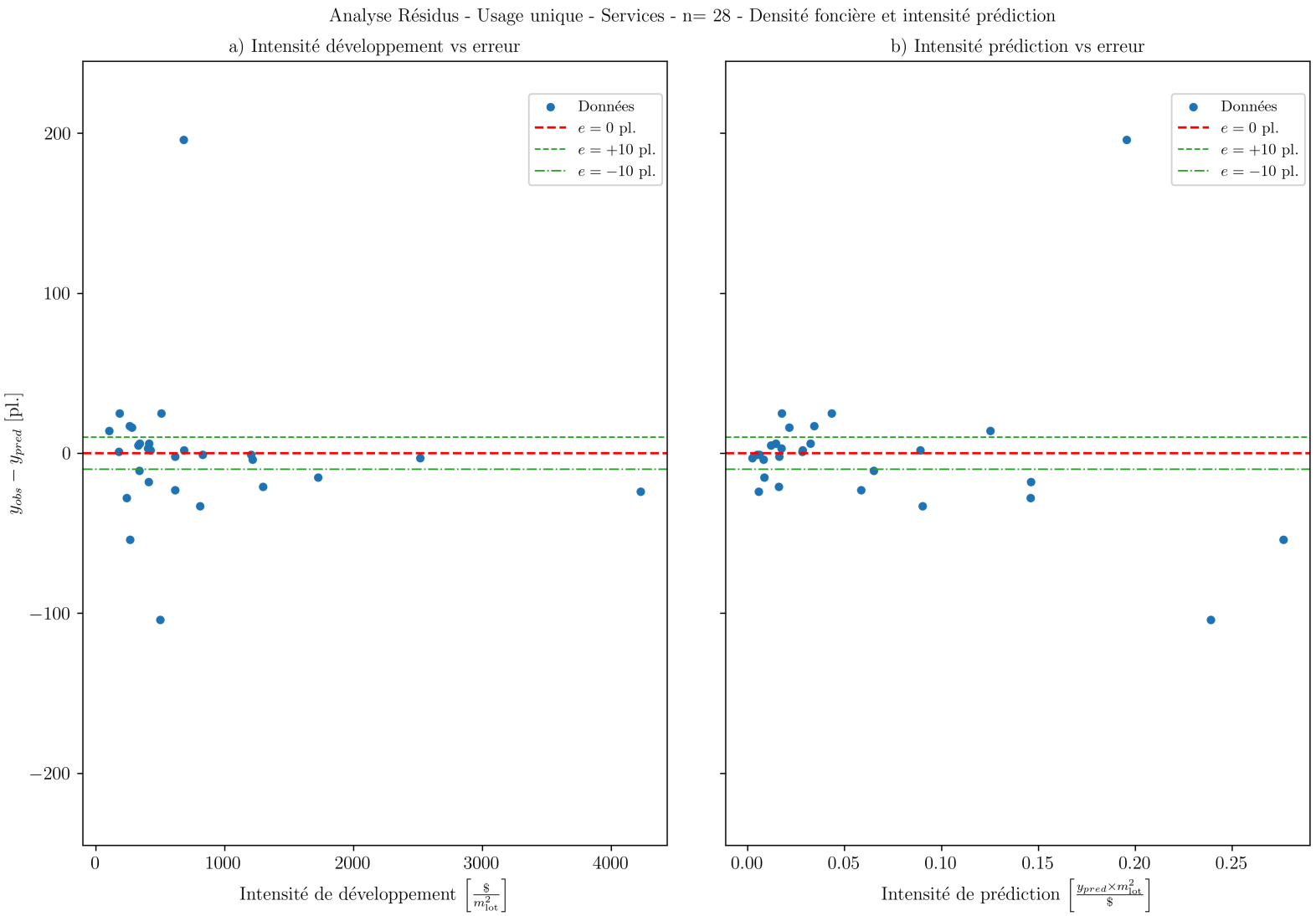


FIGURE 4.83 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots de services

4.3.6 Industriel

Vingt-sept lots industriels ont été échantillonnés. Une très grande usine ($a_l = 63000m^2$) avait une prédiction pour plus de 1170 places. Le règlement utilisé ici est formulé comme 1 place par employé ou 1 place par $95m^2$ au plus contraignant en combinaison avec le facteur de conversion fixé à 1 employé par $10m^2$ mène à cette surestimation. En utilisant seulement la formulation en mètres carrés, on obtient une prédiction de 124 places contre les 334 places constatées sur la propriété.

Contrairement aux autres catégories, le diagramme d'analyse des résidus sera présenté sans filtre et avec un filtre d'erreur maximale égal à 100 pour la rendre plus visible. Un filtre à une erreur de 75 places a été mis en place pour le calcul des métriques. Le modèle sous-estime systématiquement le nombre de places de stationnement après filtrage ($\bar{y}_{obs} = 26.76$ contre $\bar{y}_{pred} = 23.16$).

Le critère d'intensité de prédiction a de nouveau été utilisé à différents seuils pour trouver les lots qui ont potentiellement de fortes erreurs. À des niveaux de seuil de 0.05, 0.1 et 0.15, on trouve 25, 10 et 7 propriétés avec le potentiel d'avoir de fortes erreurs. Aucune tendance structurelle ne semble avoir de l'influence sur l'erreur des prédictions.

Comme pour les autres catégories, l'unité de formulation du règlement a un impact sur la précision des prédictions. La figure 4.84 montre l'erreur selon le type d'unité utilisée dans la formulation du règlement et on constate encore que les conversions d'unité sont une importante source d'erreur.



FIGURE 4.84 Diagramme à boîte de l'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement pour l'industrie

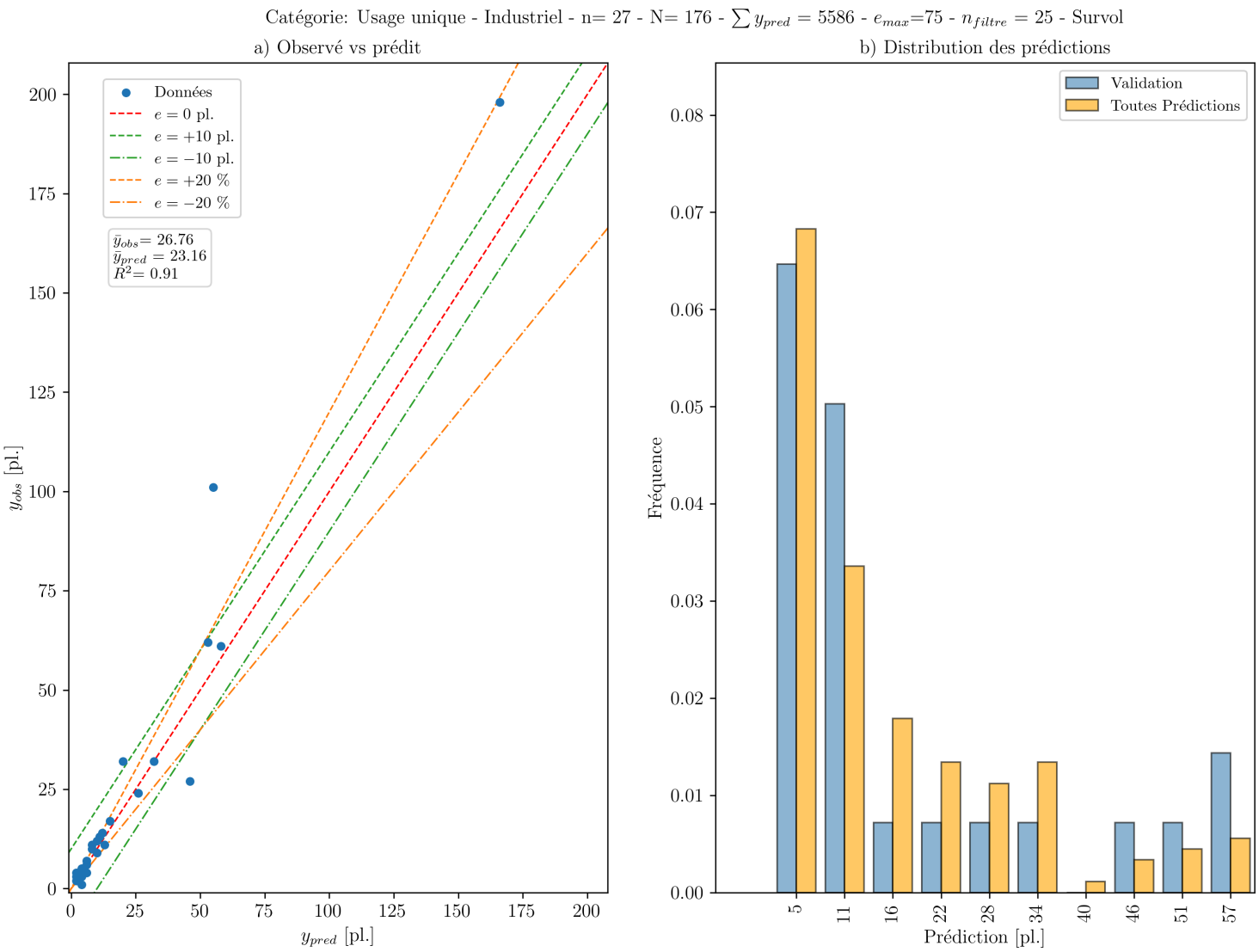


FIGURE 4.85 Distribution des prédictions pour les lots industriels

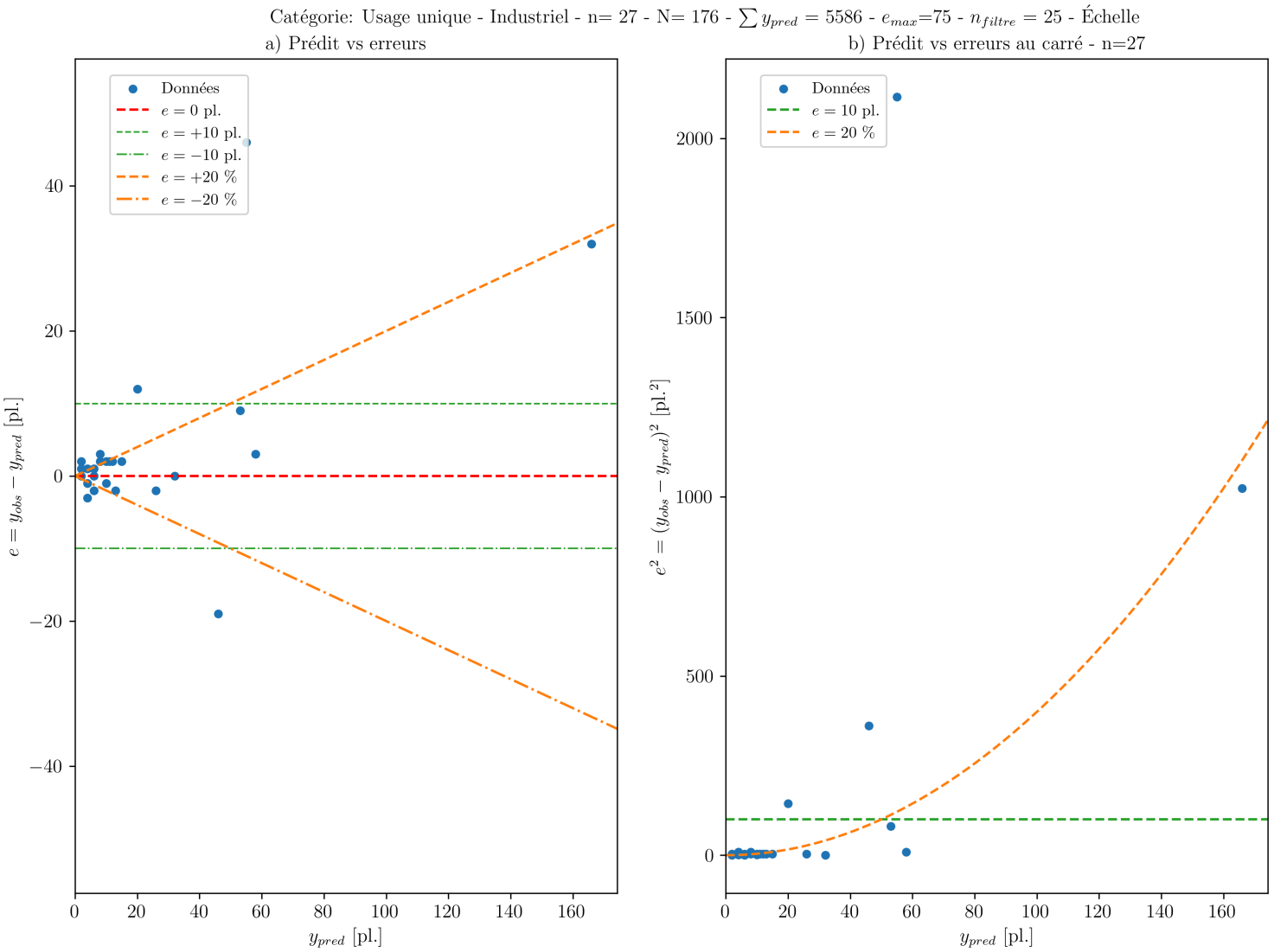


FIGURE 4.86 Erreur en fonction des prédictions pour les lots industriels

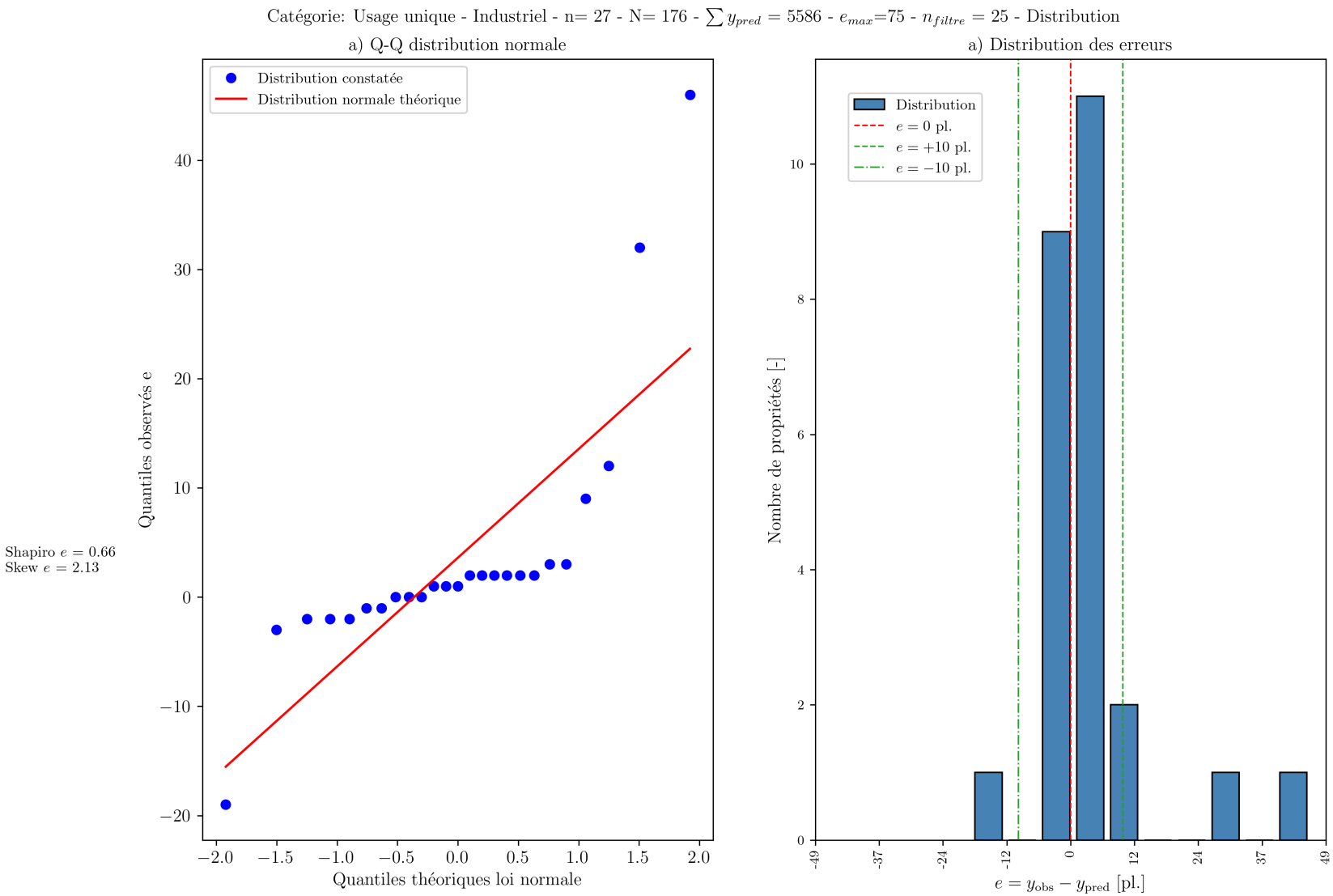


FIGURE 4.87 Distribution et normalité des erreurs pour les lots industriels

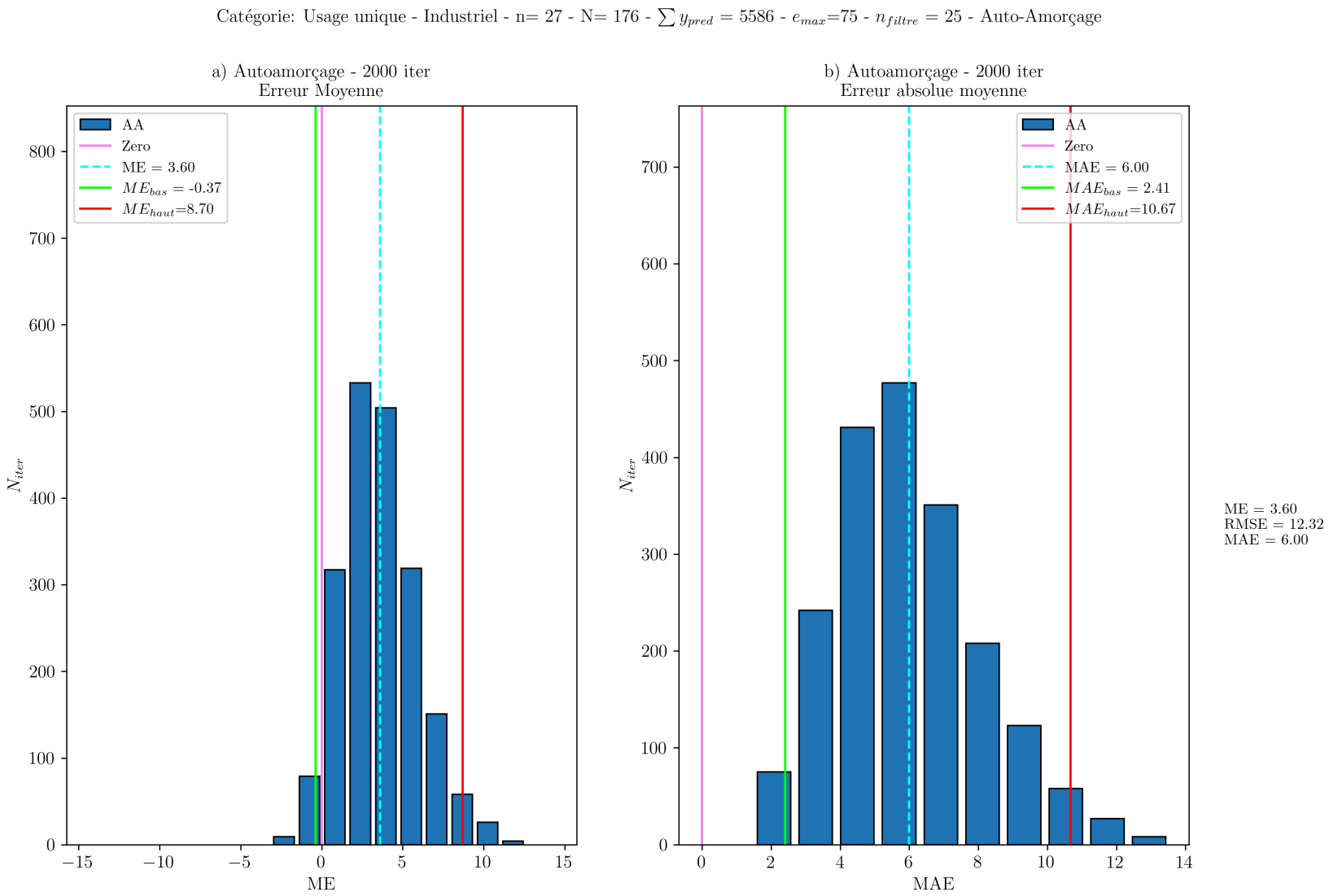


FIGURE 4.88 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots industriels

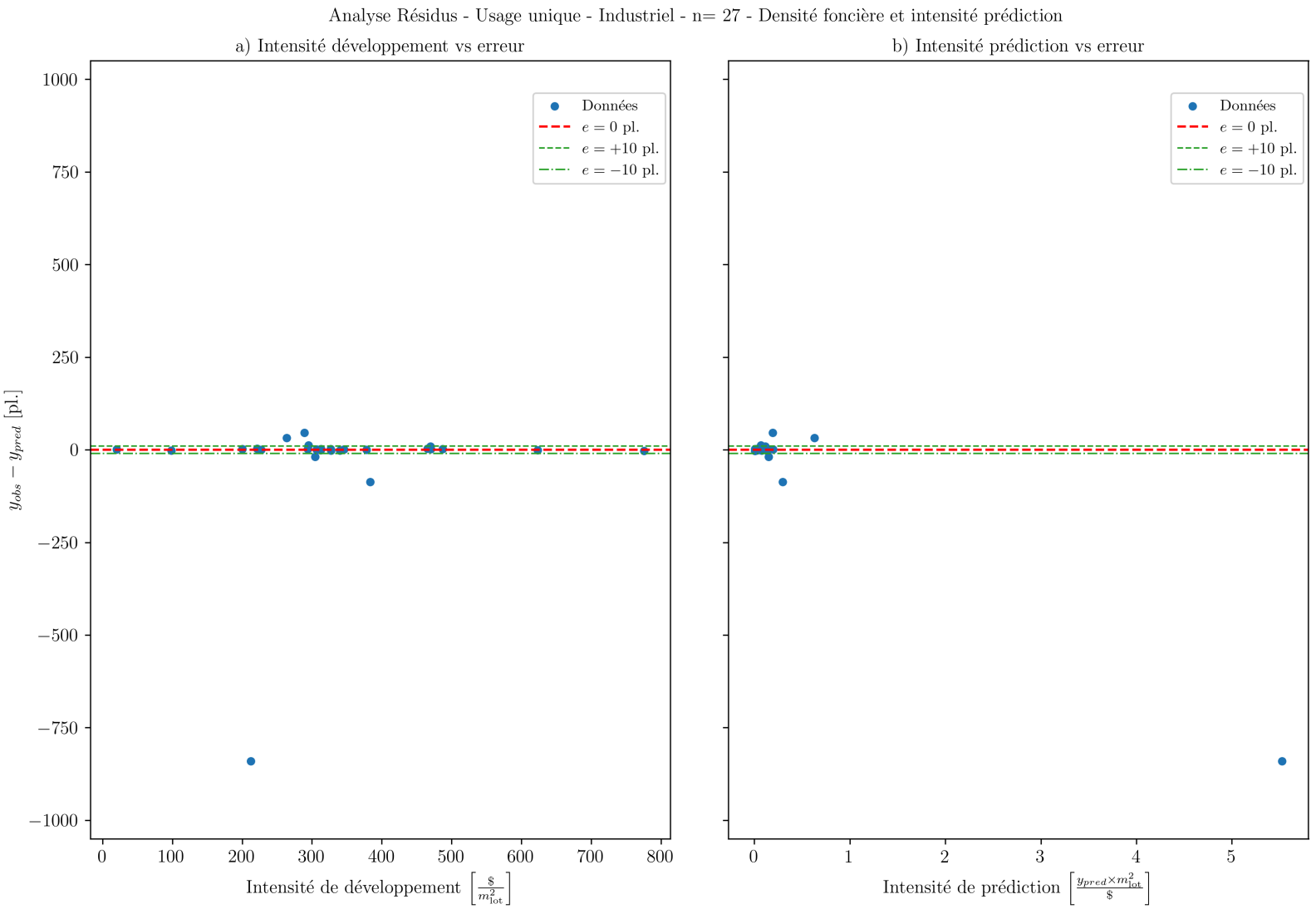


FIGURE 4.89 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots industriels sans filtre

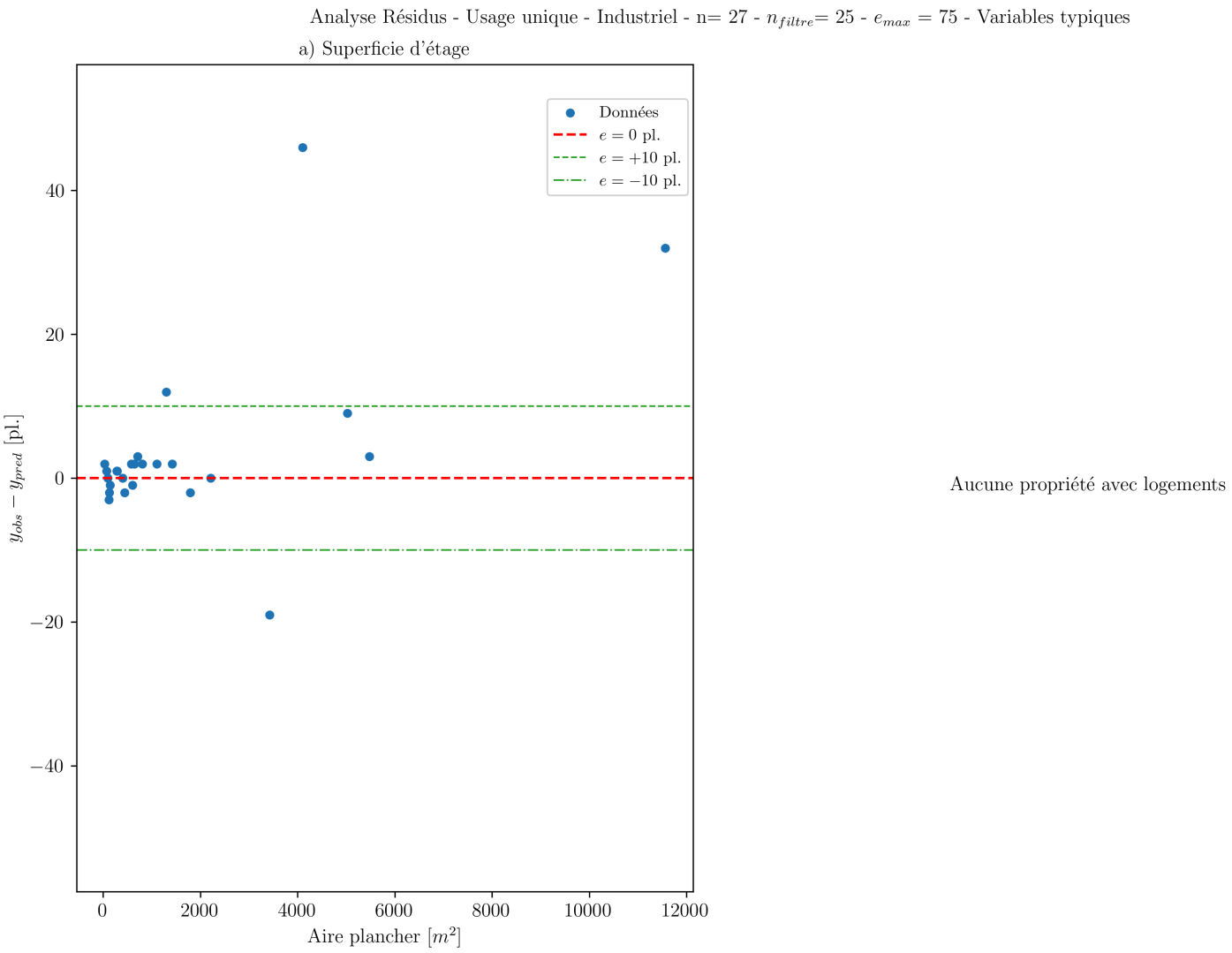


FIGURE 4.90 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots industriels

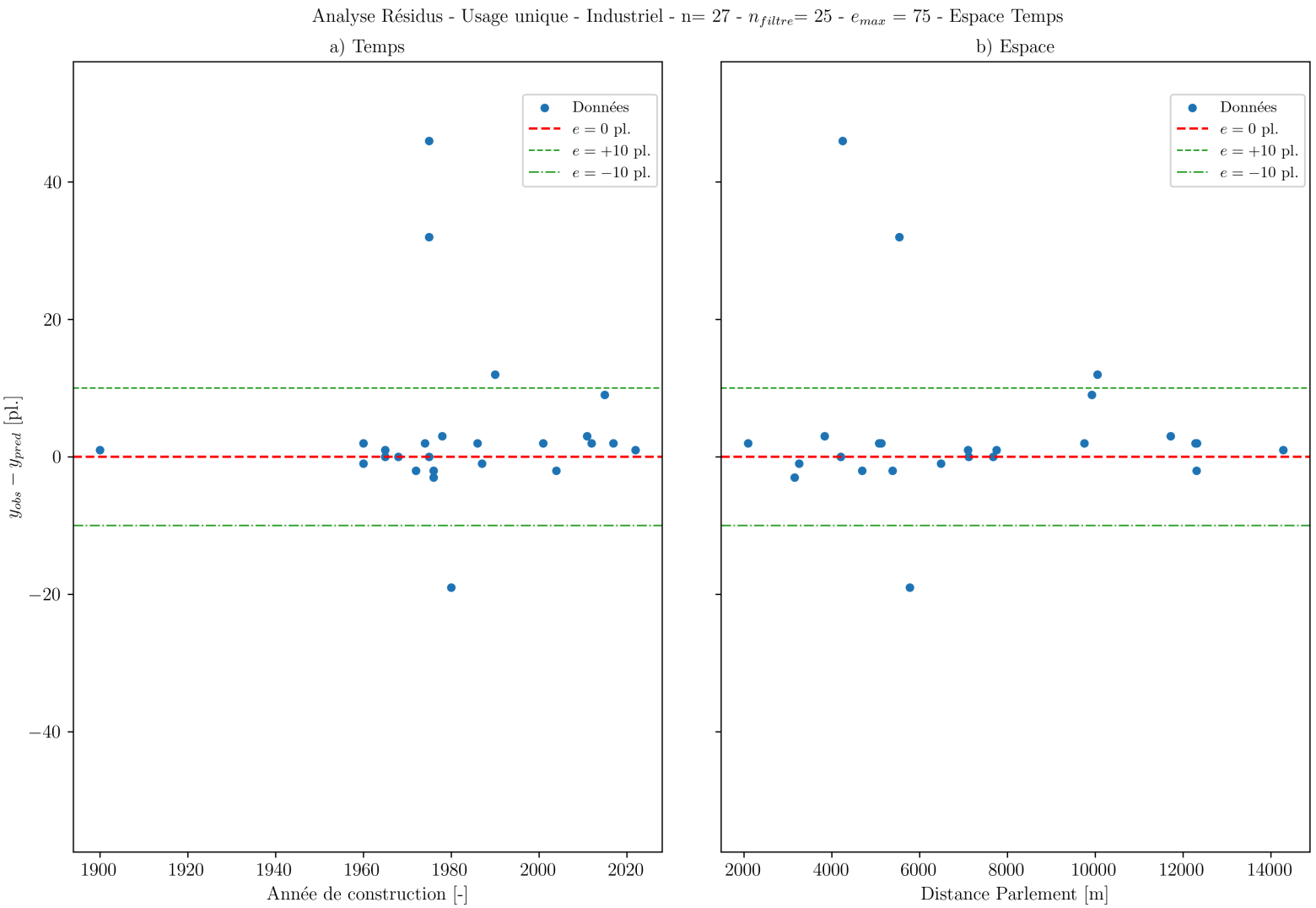


FIGURE 4.91 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots industriels

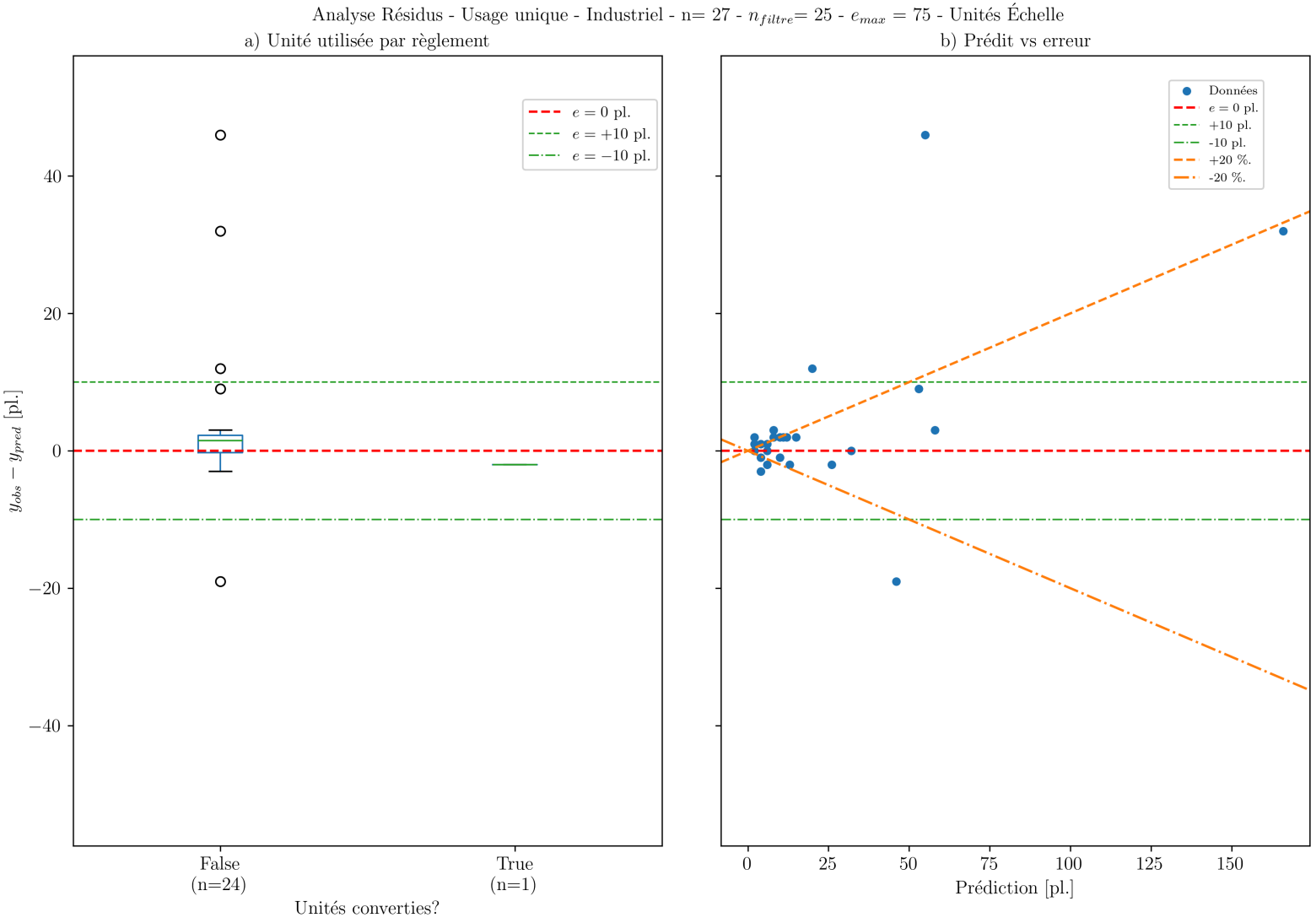


FIGURE 4.92 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots industriels

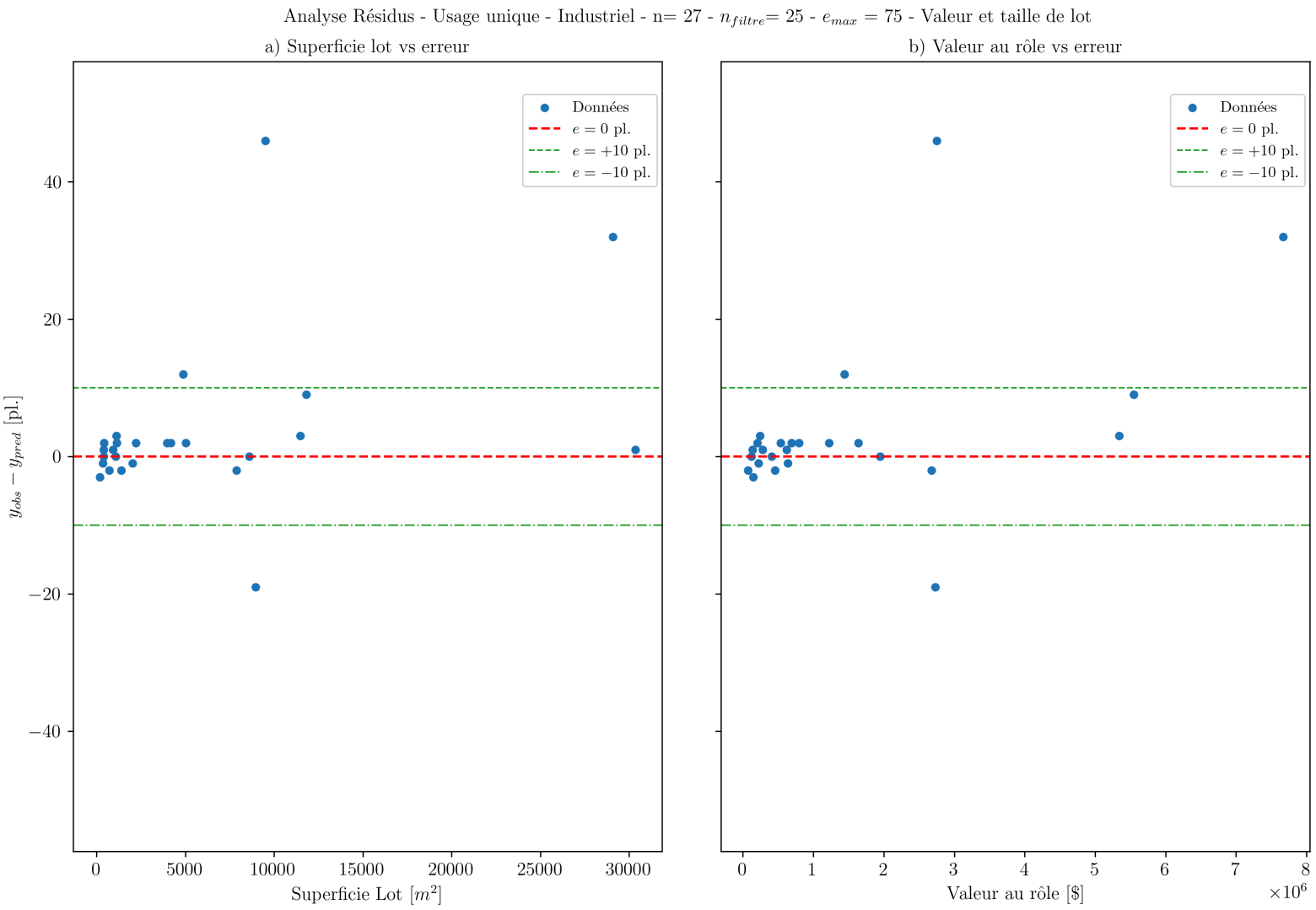


FIGURE 4.93 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots industriels

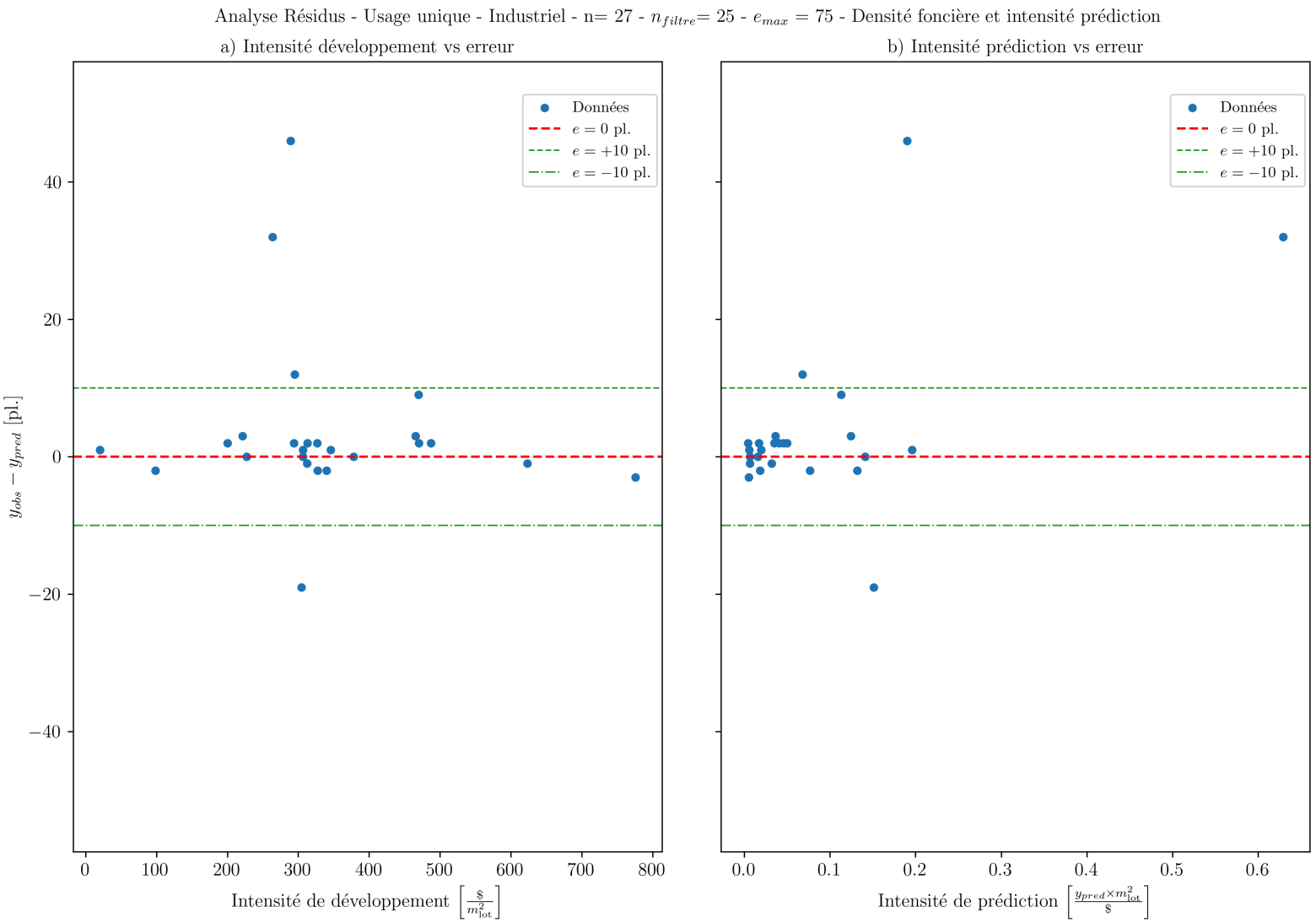


FIGURE 4.94 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots industriels

4.3.7 Assemblée et récréation

Trente lots de type assemblée et récréation ont été échantillonnés. L'enjeu principal est que cette catégorie regroupe des types de propriétés hétérogènes qui incluent des musées, mais aussi des terrains de jeu et des parcs qui ne se prêtent pas particulièrement bien à être regroupés. Le principal prédicteur d'erreur dans cette catégorie est l'utilisation d'unités qui nécessitent une conversion. L'erreur en fonction de l'unité de formulation du règlement est montrée à la figure 4.95. Un exemple de requête pour trouver les lots requis est donné à l'annexe D.14. Le nombre de sièges est utilisé pour prédire le nombre de places sur 23 lots dans la ville.

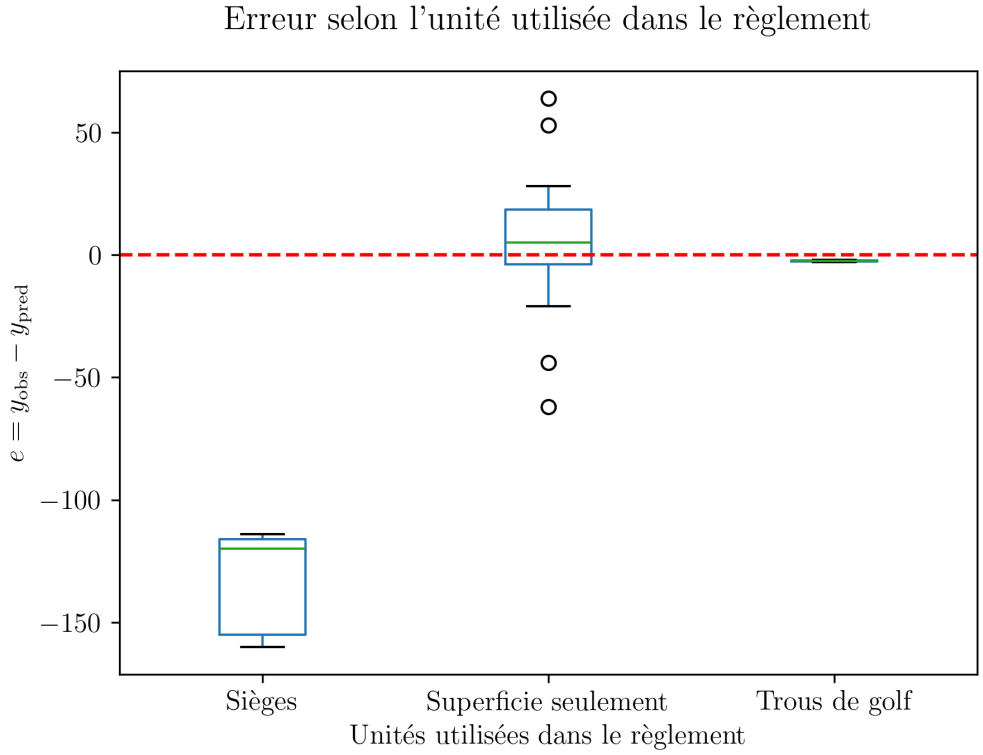


FIGURE 4.95 Erreur de la catégorie assemblée selon l'unité de formulation du règlement

Les lots dont la valeur est inférieure à 100$ ont été filtrés pour la figure 4.104, car un des lots de validation avait une valeur au rôle de 2$ menant à des enjeux de lisibilité pour le graphique.

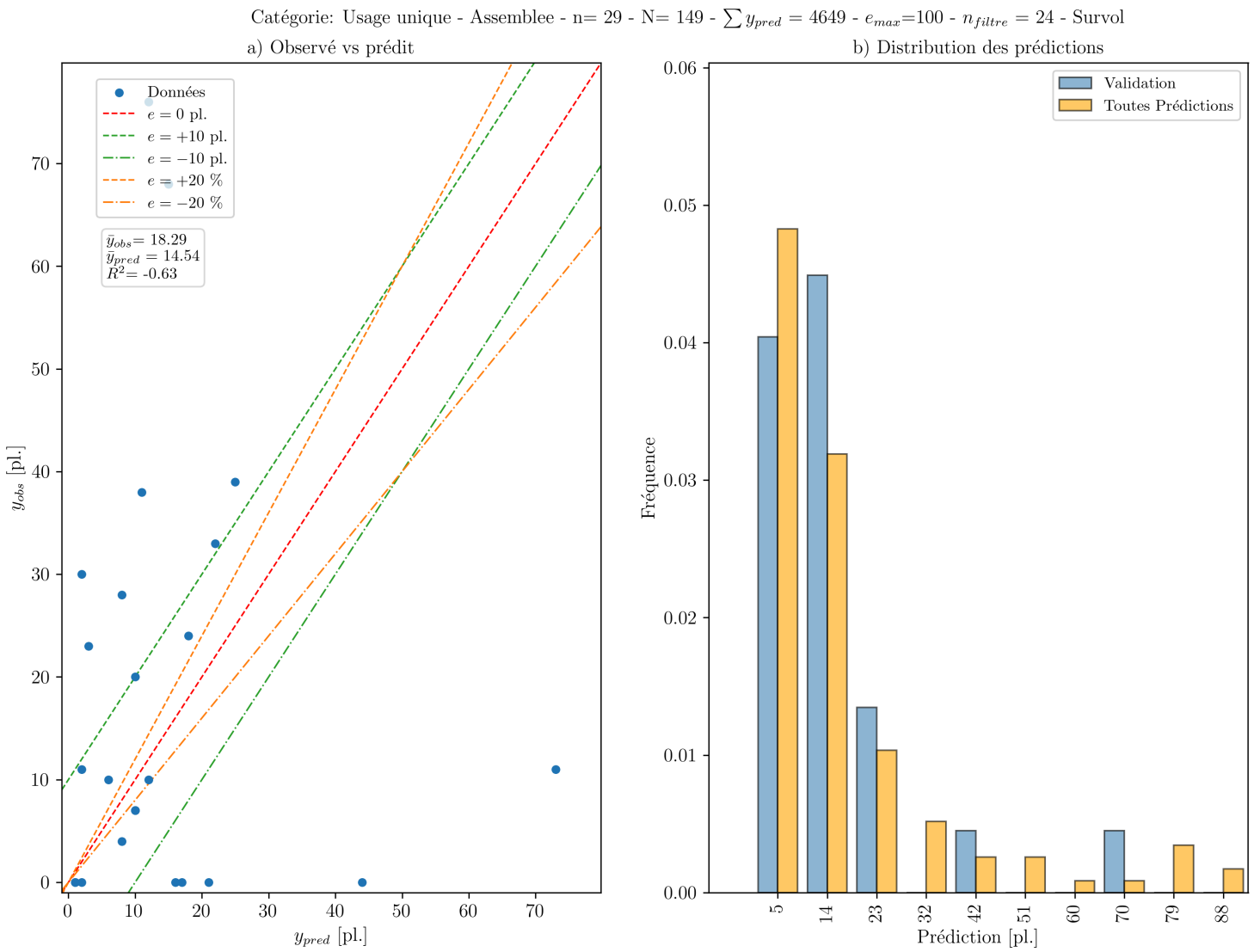


FIGURE 4.96 Distribution des prédictions pour les lots d'assemblée

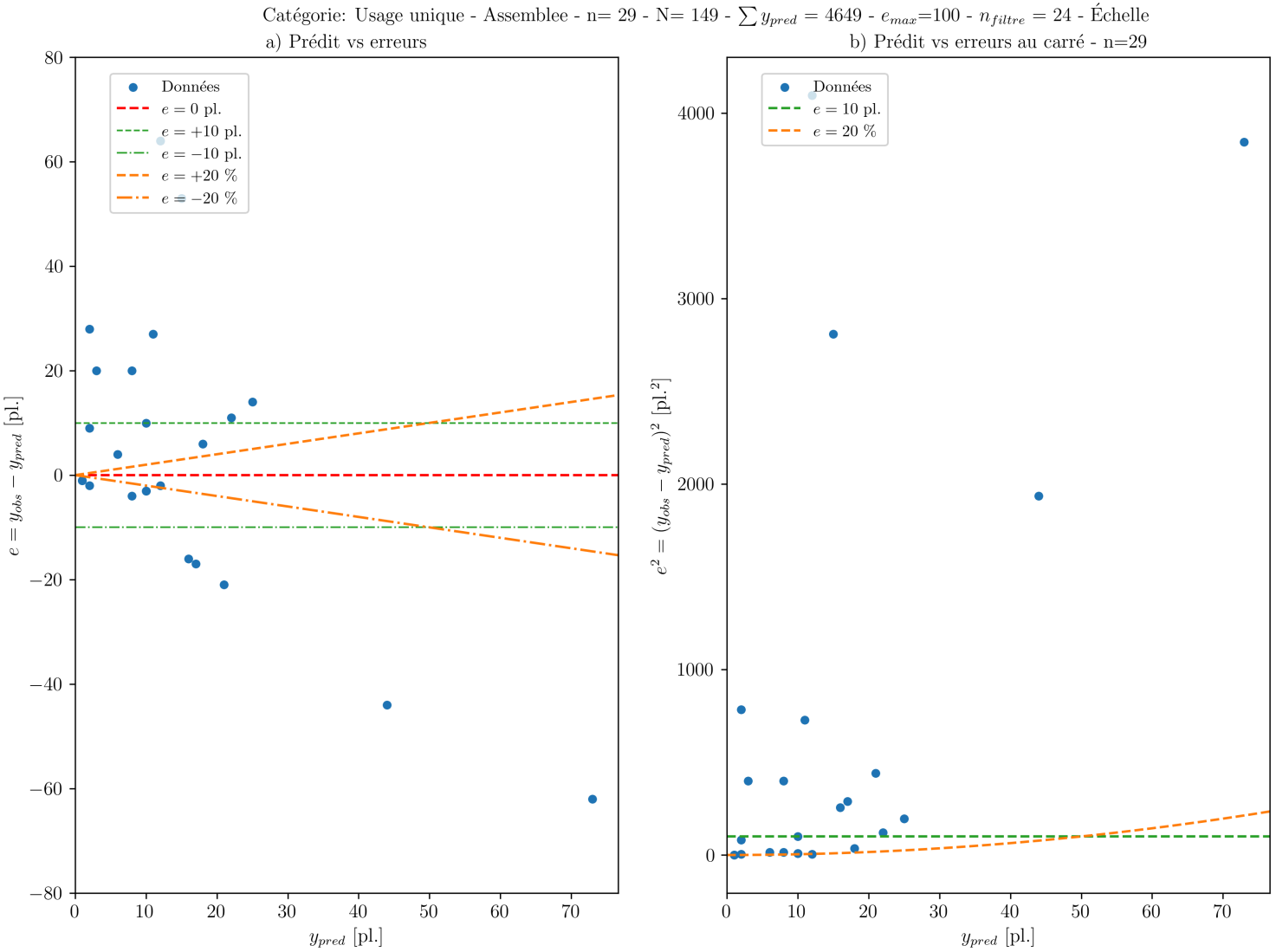


FIGURE 4.97 Erreur en fonction des prédictions pour les lots d'assemblée

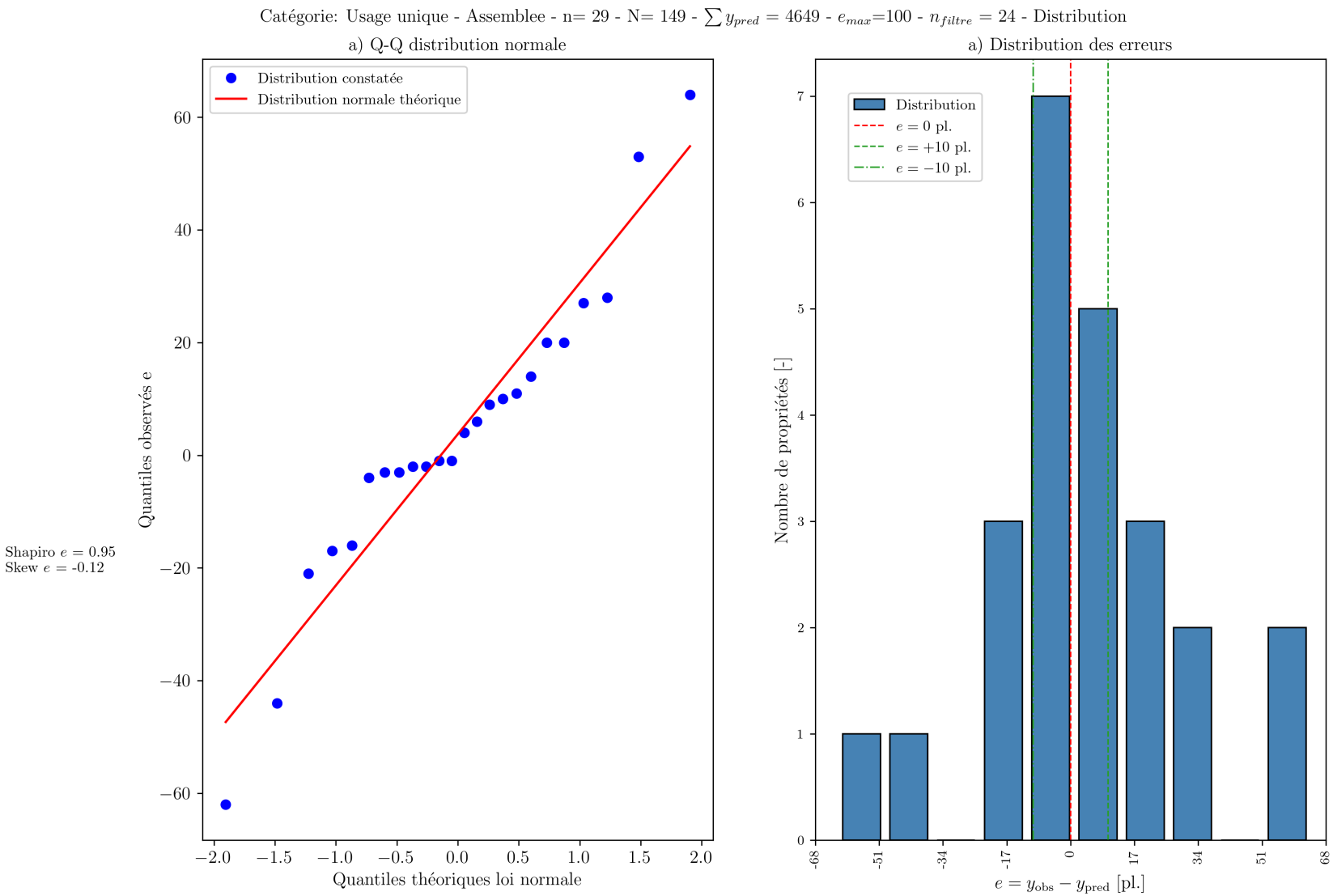


FIGURE 4.98 Distribution et normalité des erreurs pour les lots d'assemblée

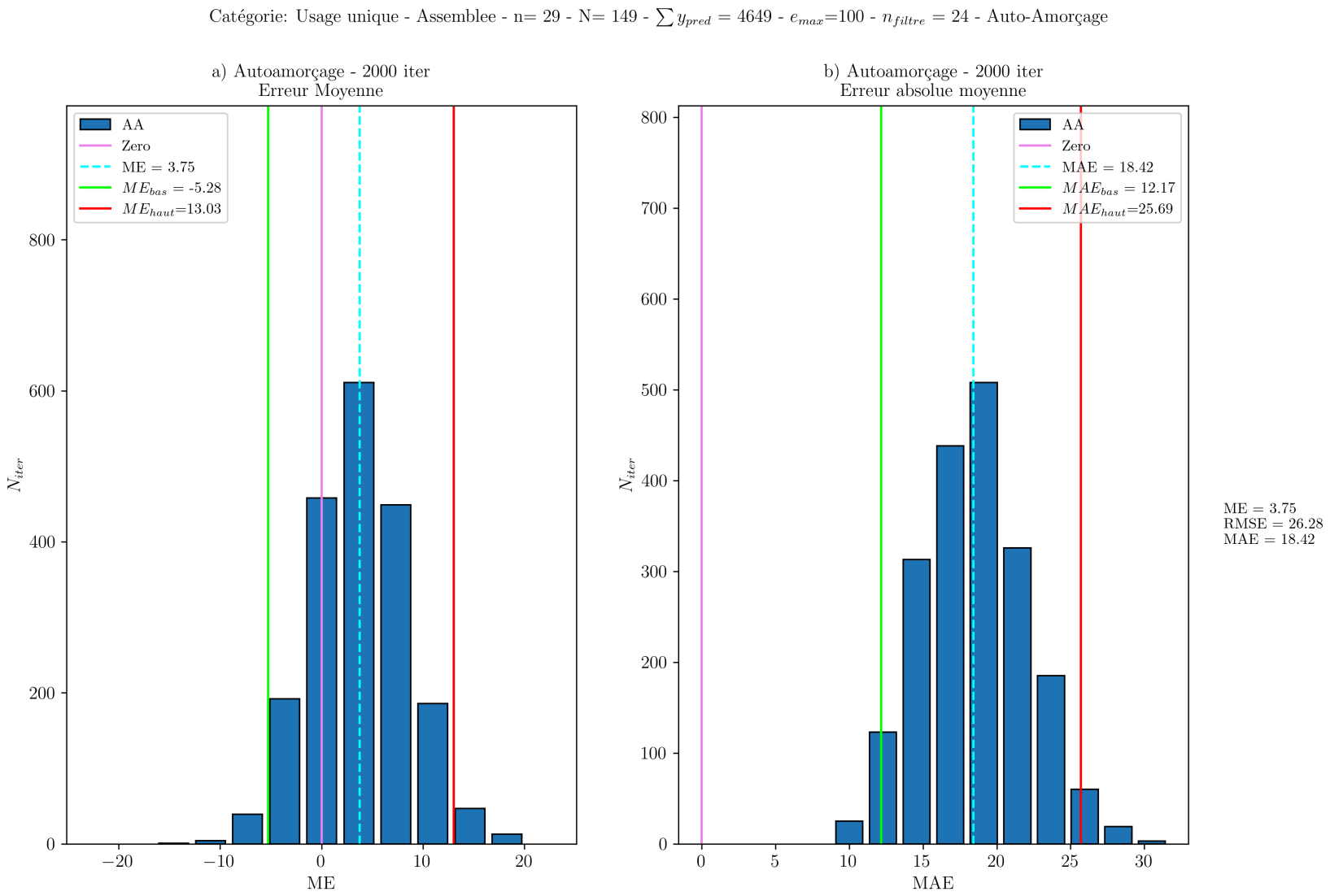


FIGURE 4.99 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots d'assemblée

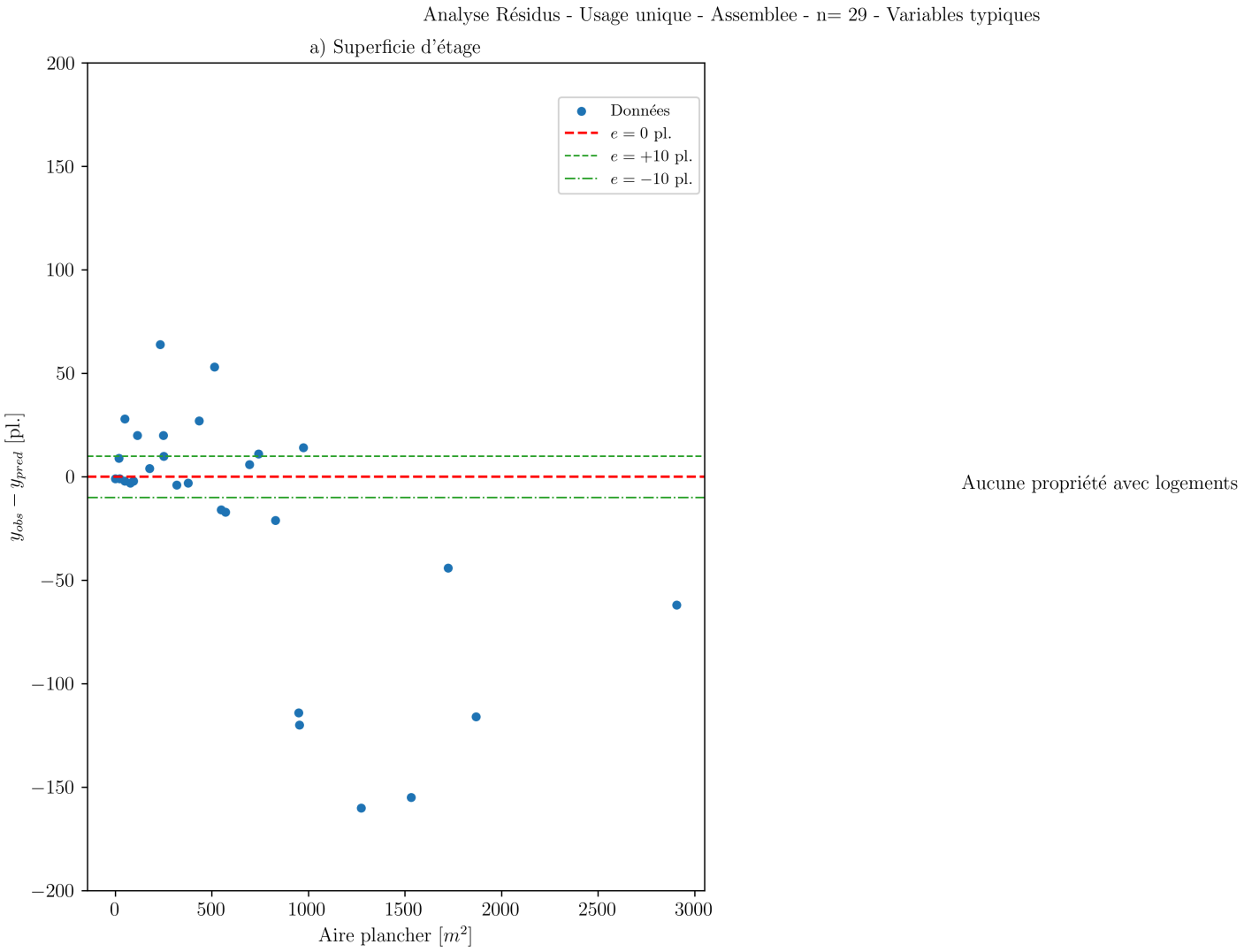


FIGURE 4.100 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots d'assemblée

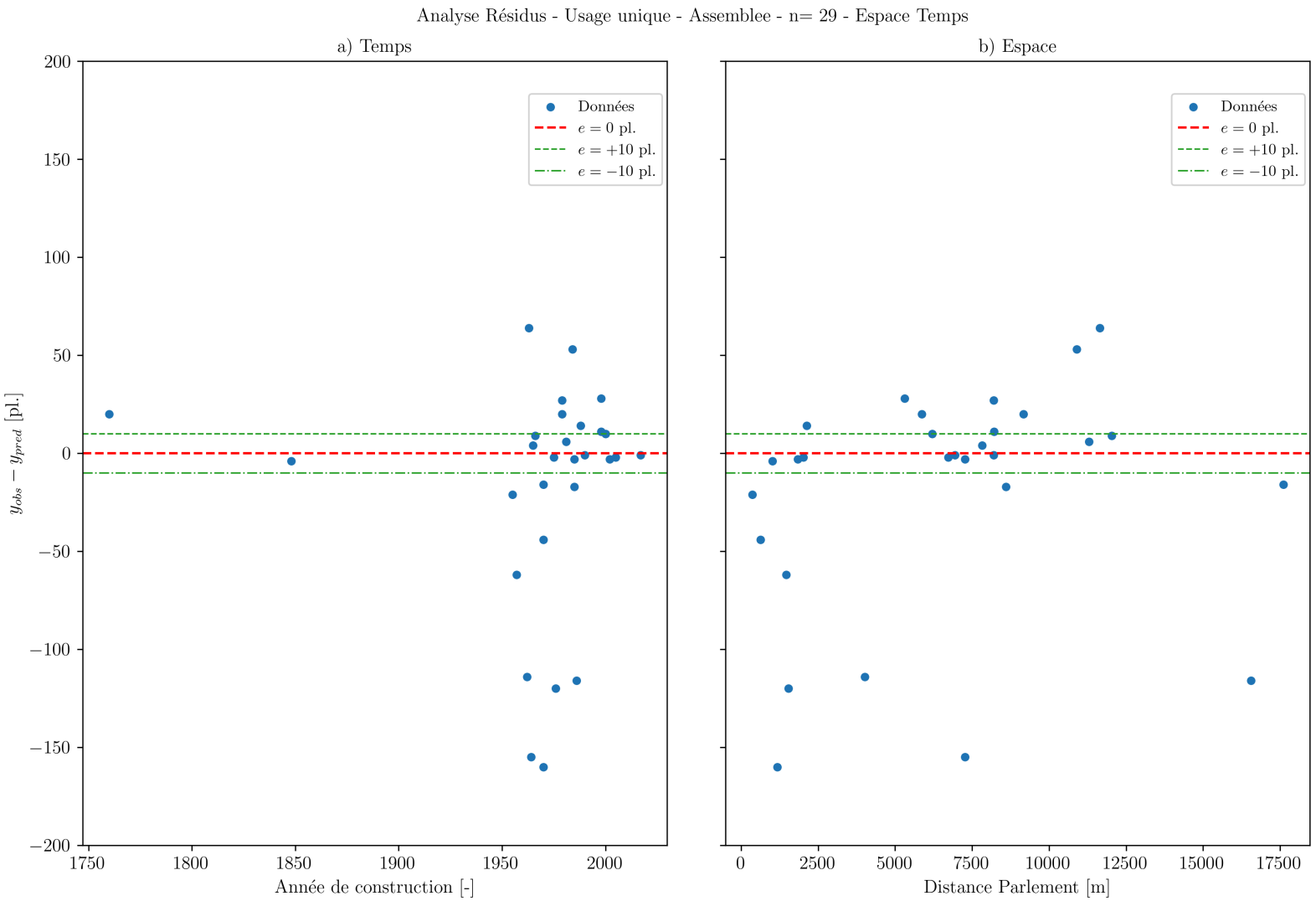


FIGURE 4.101 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots d'assemblée

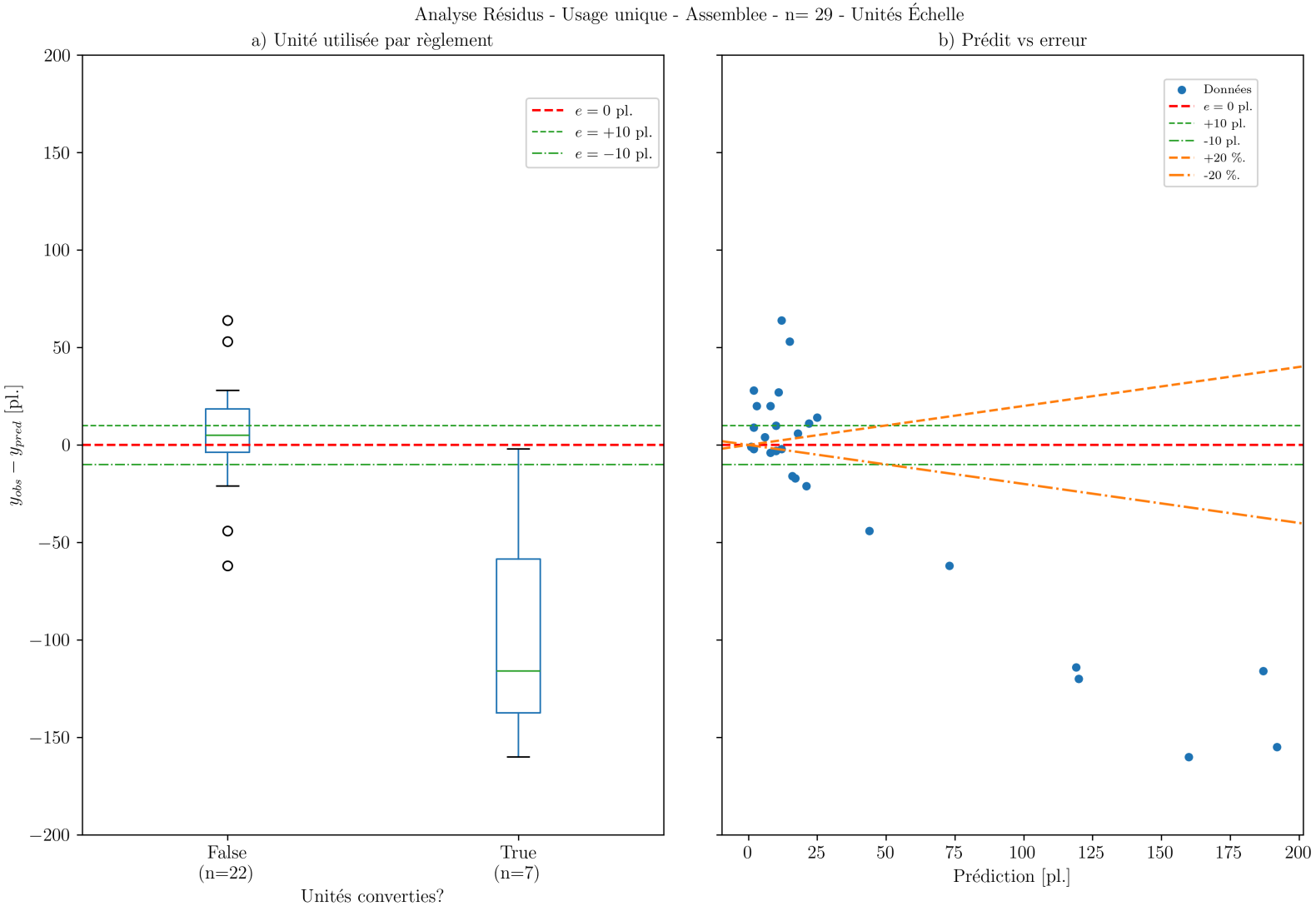


FIGURE 4.102 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots d'assemblée

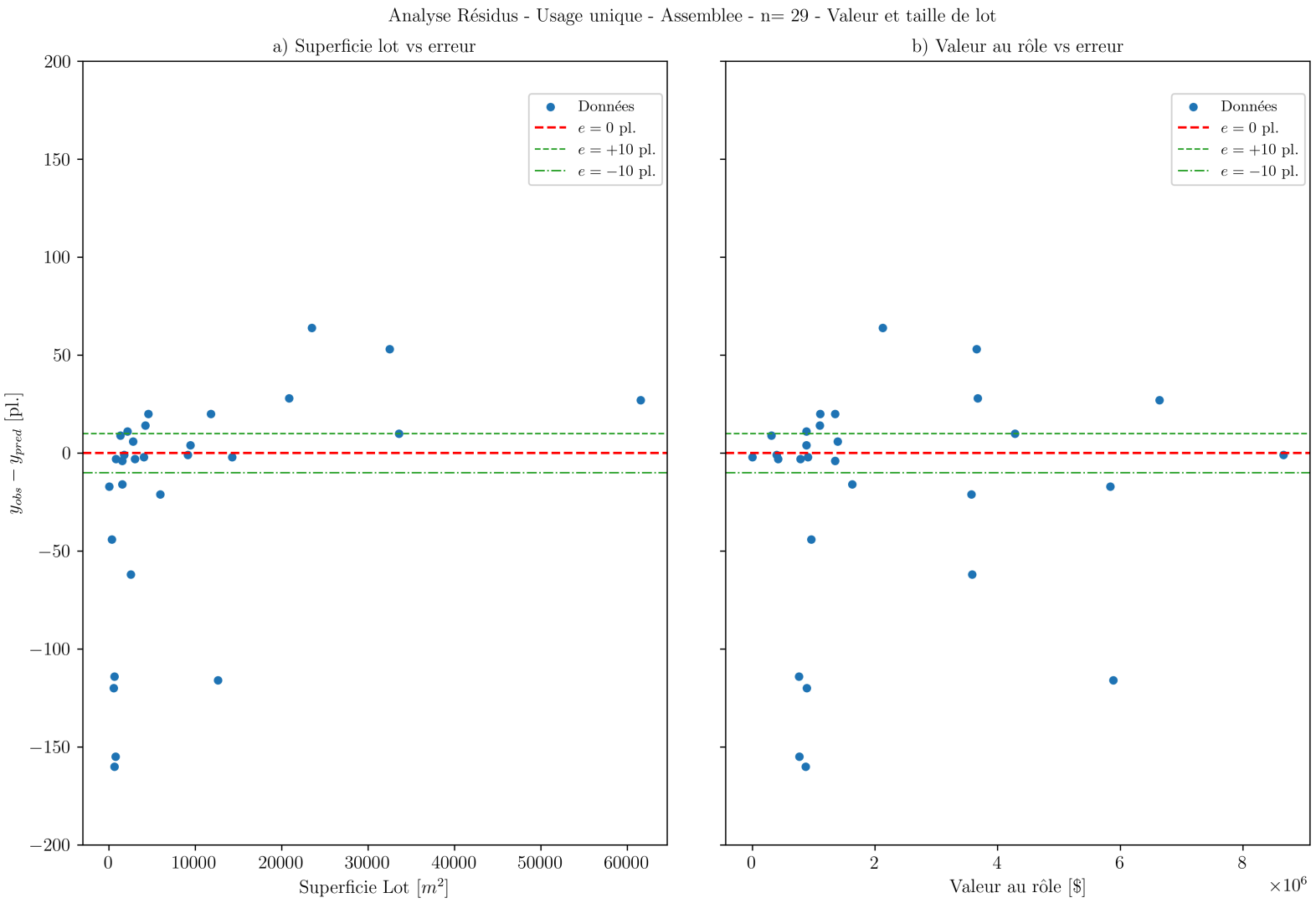


FIGURE 4.103 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots d'assemblée

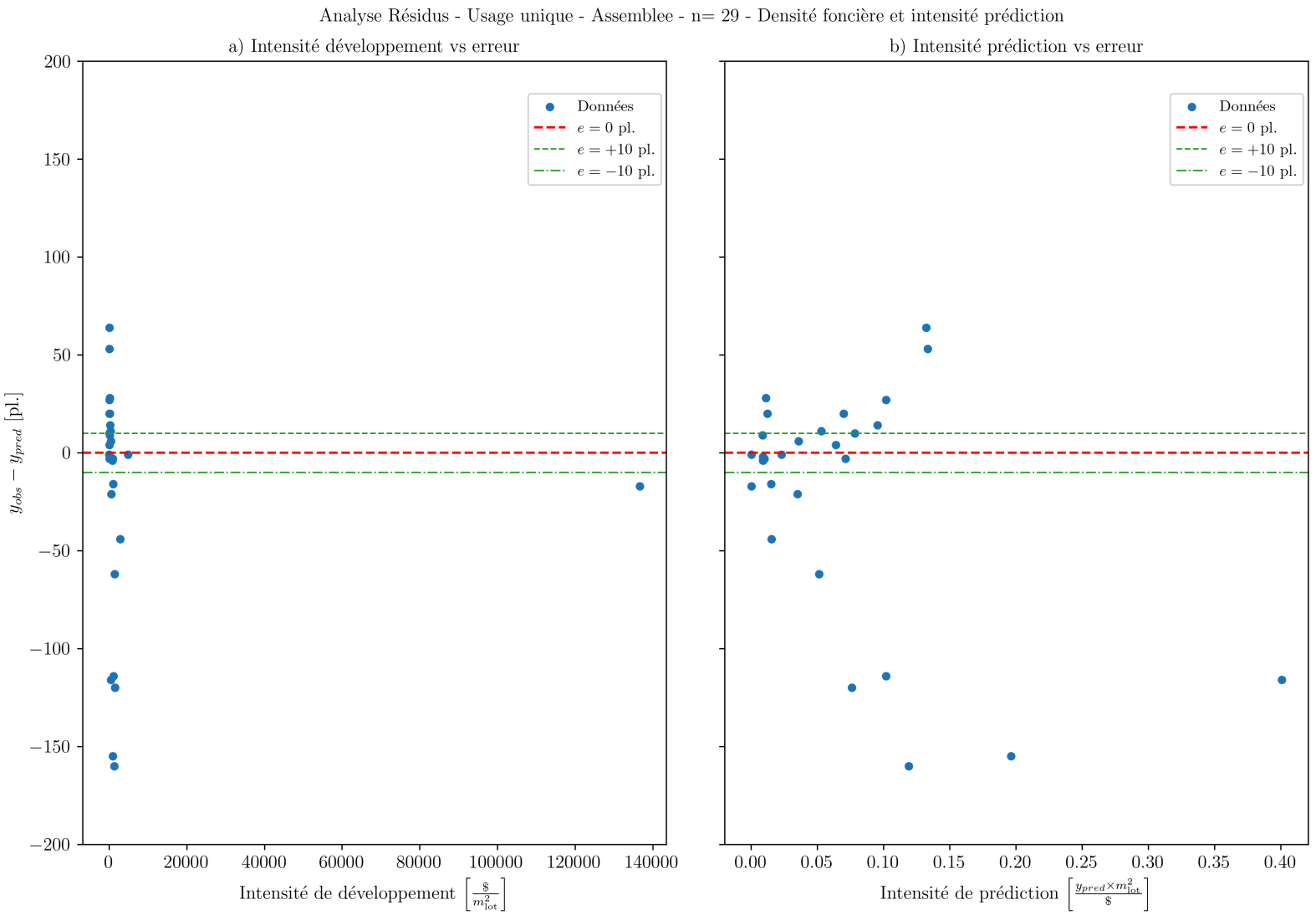


FIGURE 4.104 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots d'assemblée

4.3.8 Usage mixte

L'usage mixte est une autre catégorie de propriétés où le modèle a de la difficulté. Cependant, cet effet est en partie dû au fait que les propriétés à usage mixte sont plus concentrées dans les quartiers centraux, où l'offre de stationnement sur un lot est potentiellement nulle. L'apparence de ligne droite du graphique de la figure 4.112a, visible aussi avec la rangée de valeur observée à zéro place à la figure 4.106a. Cette tendance fait en sorte que la moyenne du stationnement prédit est très supérieure à la valeur observée.

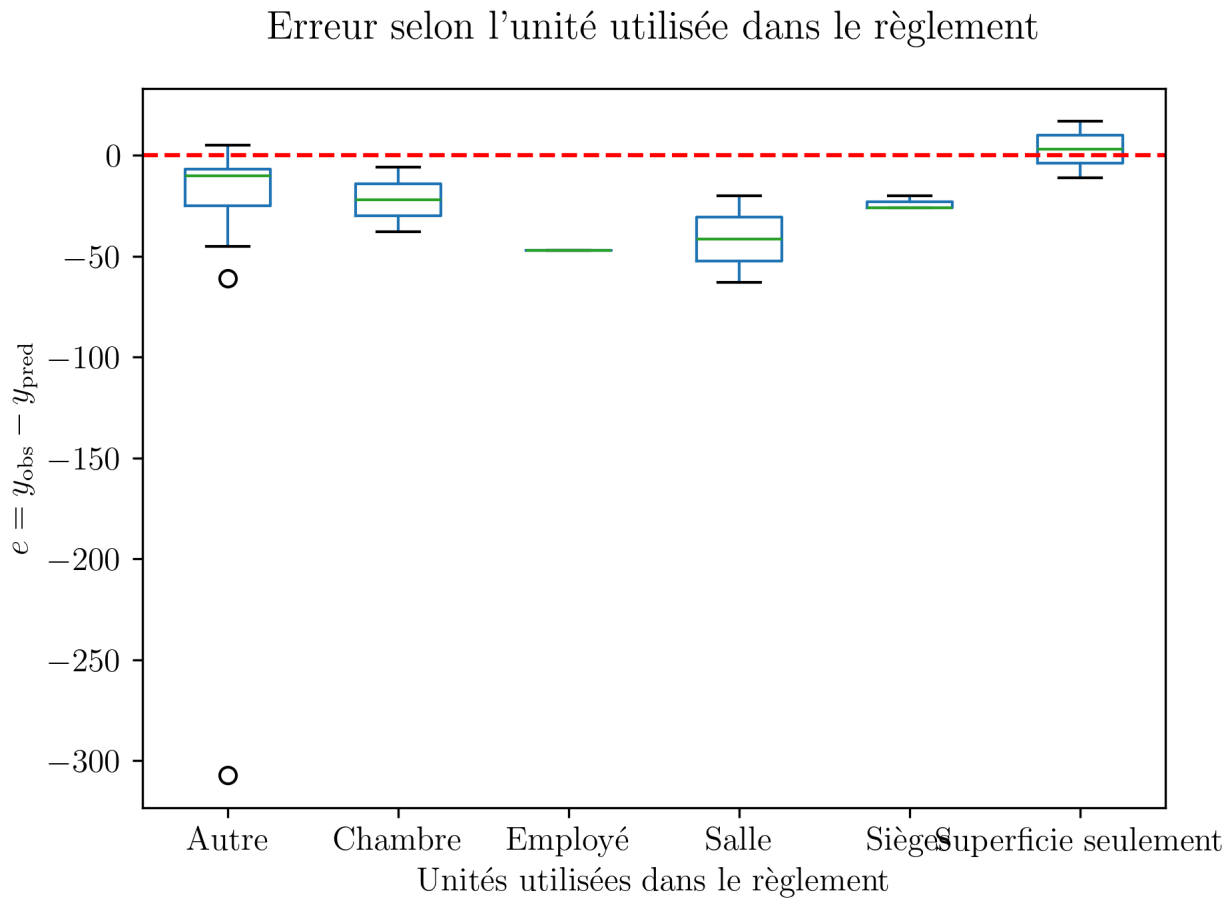


FIGURE 4.105 Erreur de la catégorie usage mixte selon l'unité de formulation du règlement

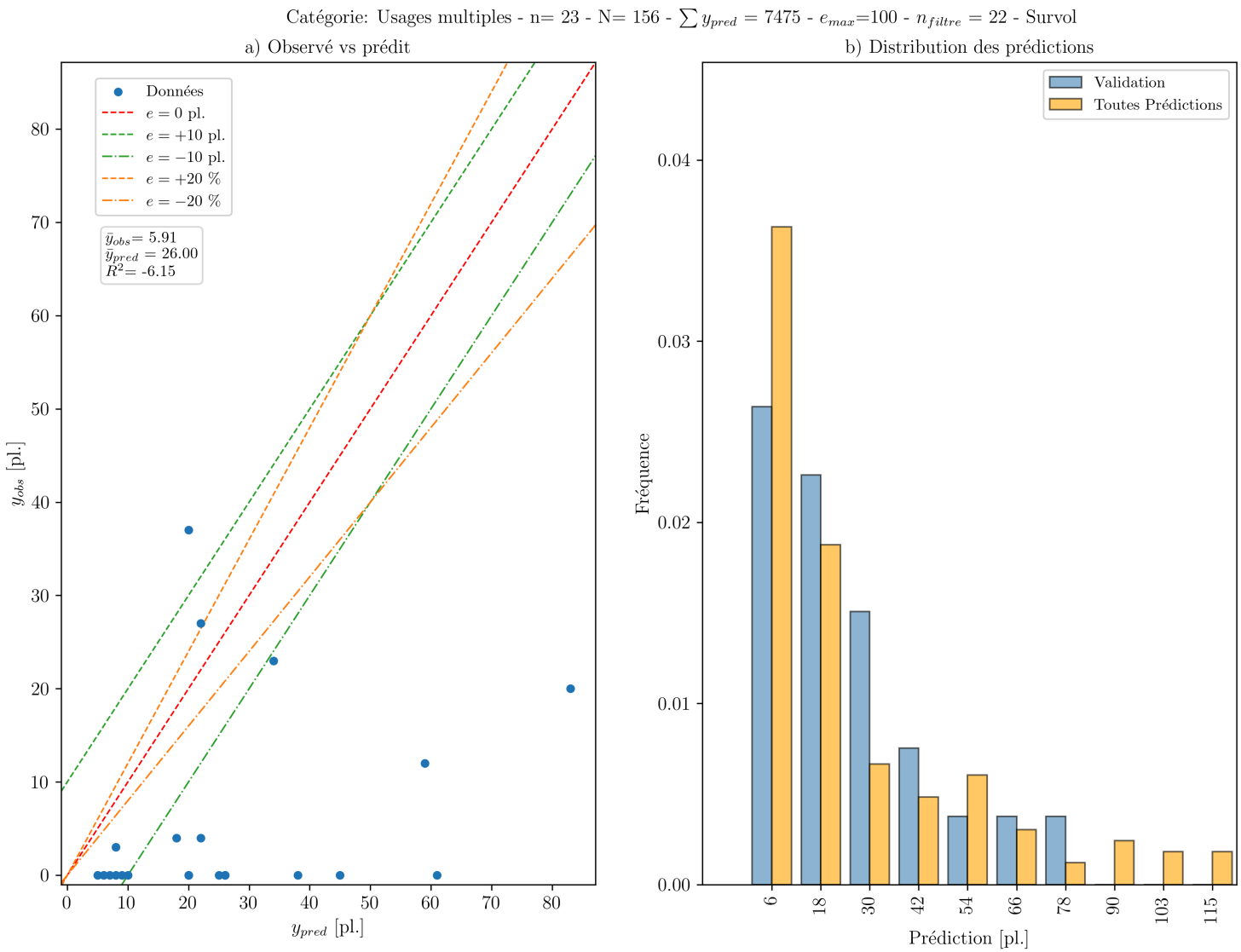


FIGURE 4.106 Distribution des prédictions pour les lots d'usage mixte

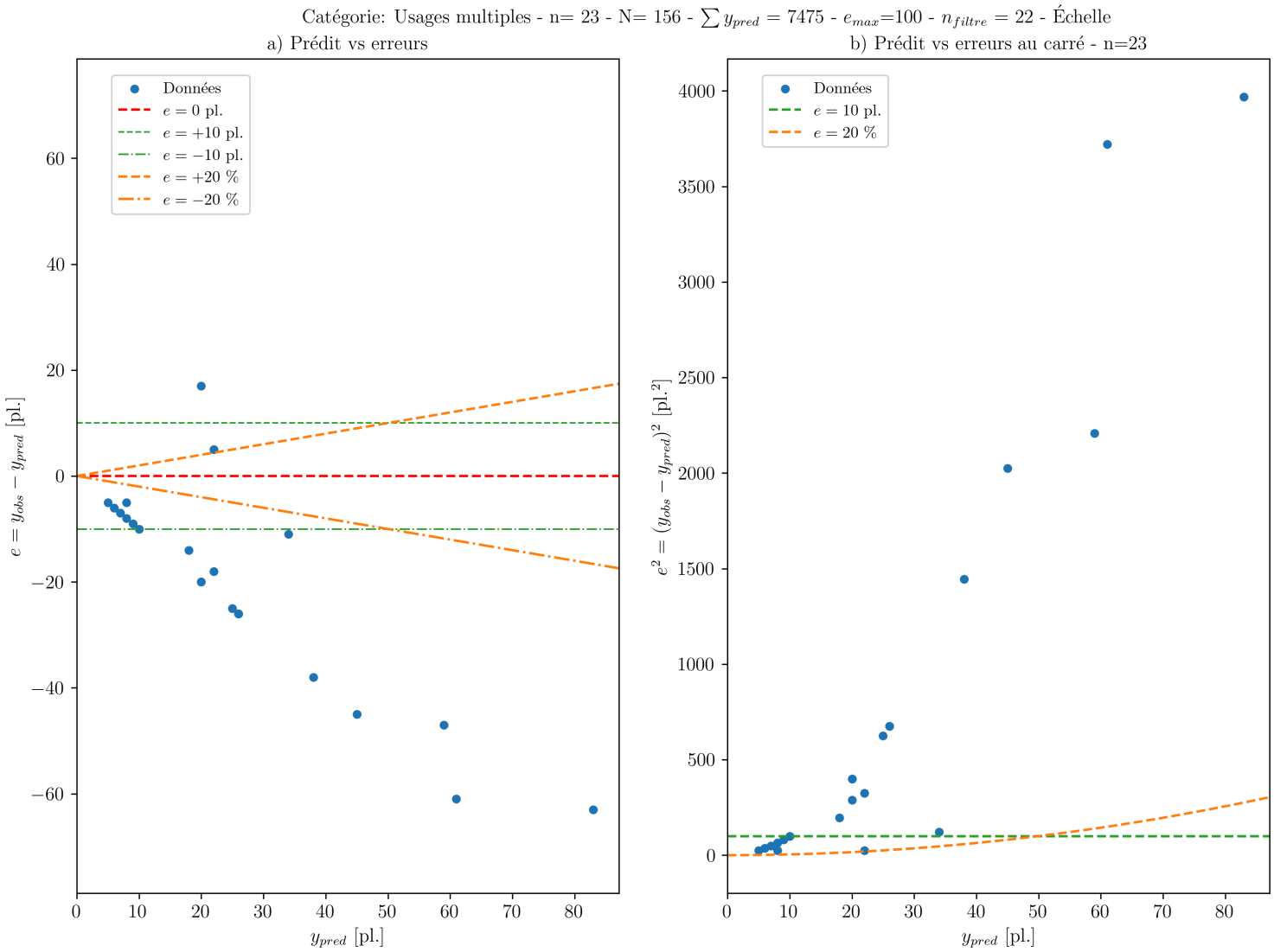


FIGURE 4.107 Erreur en fonction des prédictions pour les lots d'usage mixte

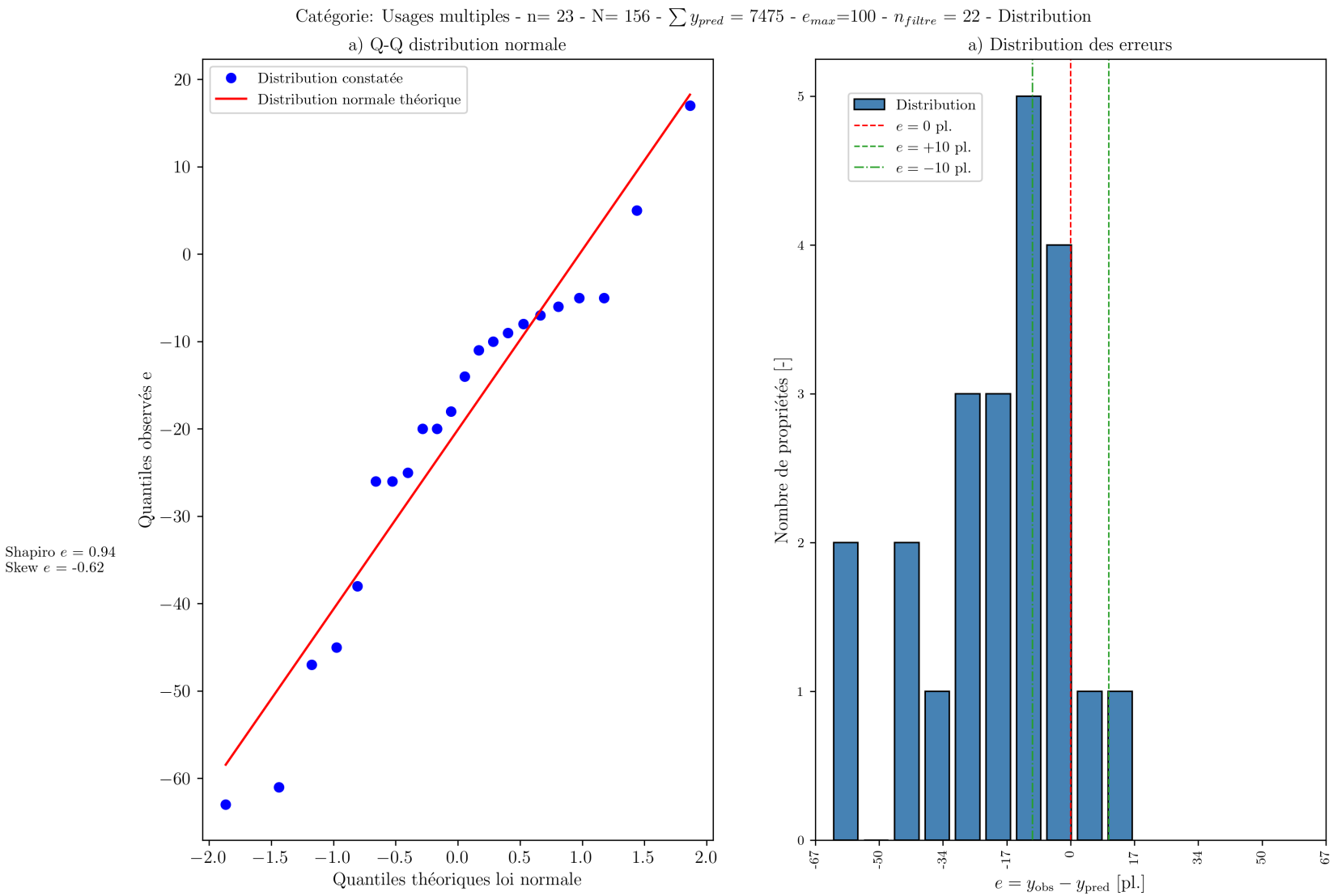


FIGURE 4.108 Distribution et normalité des erreurs pour les lots d'usage mixte

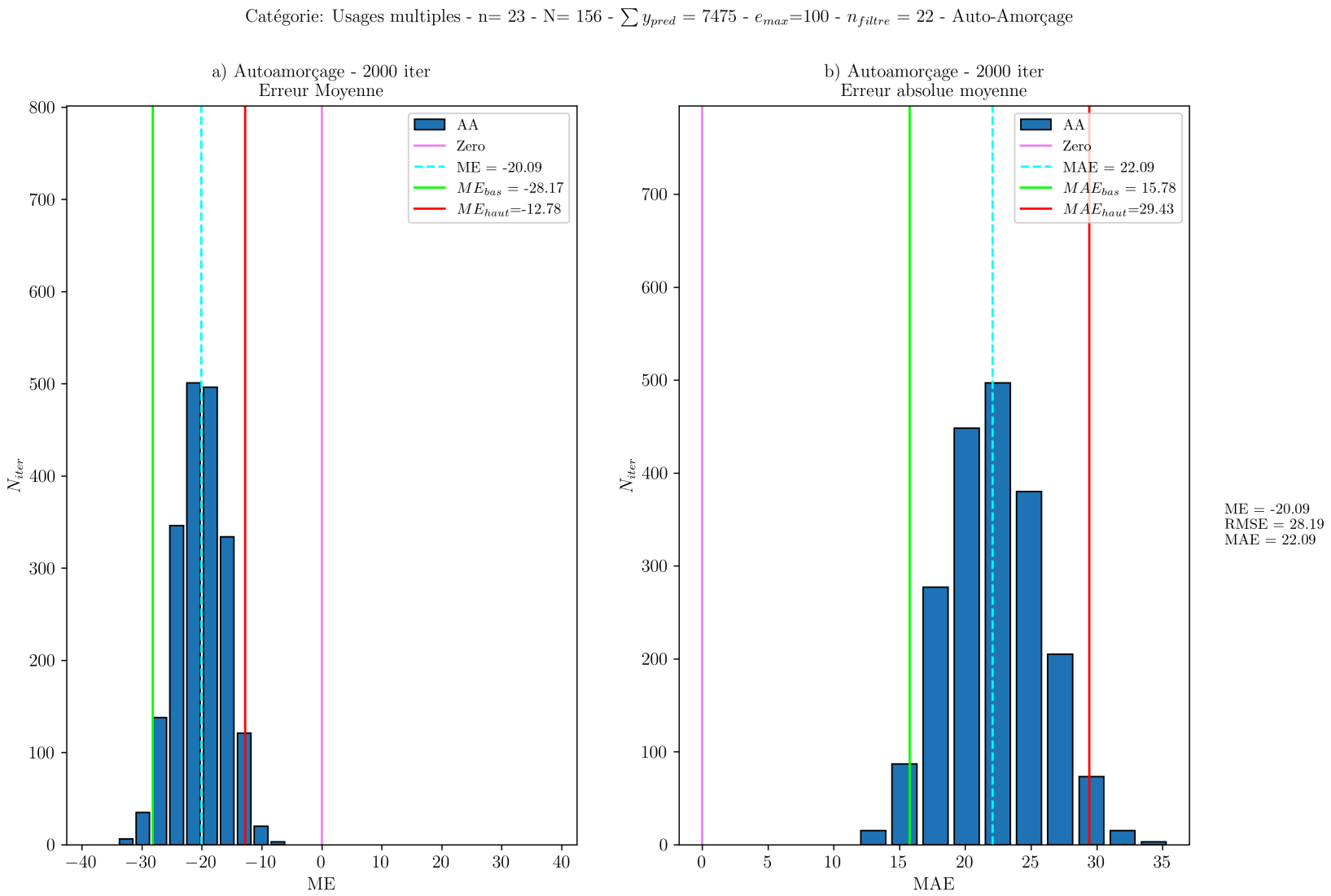


FIGURE 4.109 Distribution des métriques d'erreur après auto-amorçage pour les lots d'usage mixte

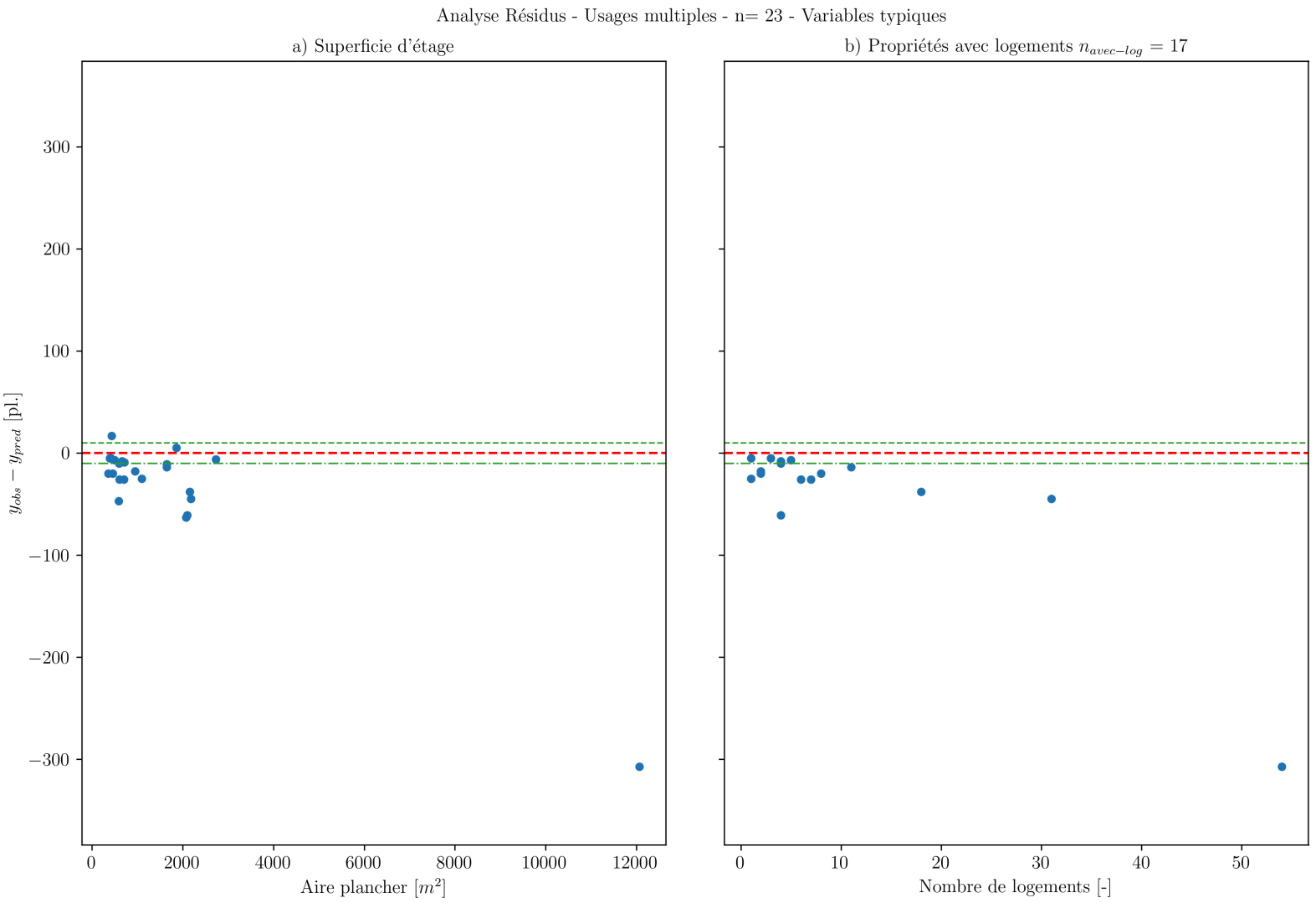


FIGURE 4.110 Analyse des résidus en fonction des propriétés de construction pour les lots d'usage mixte

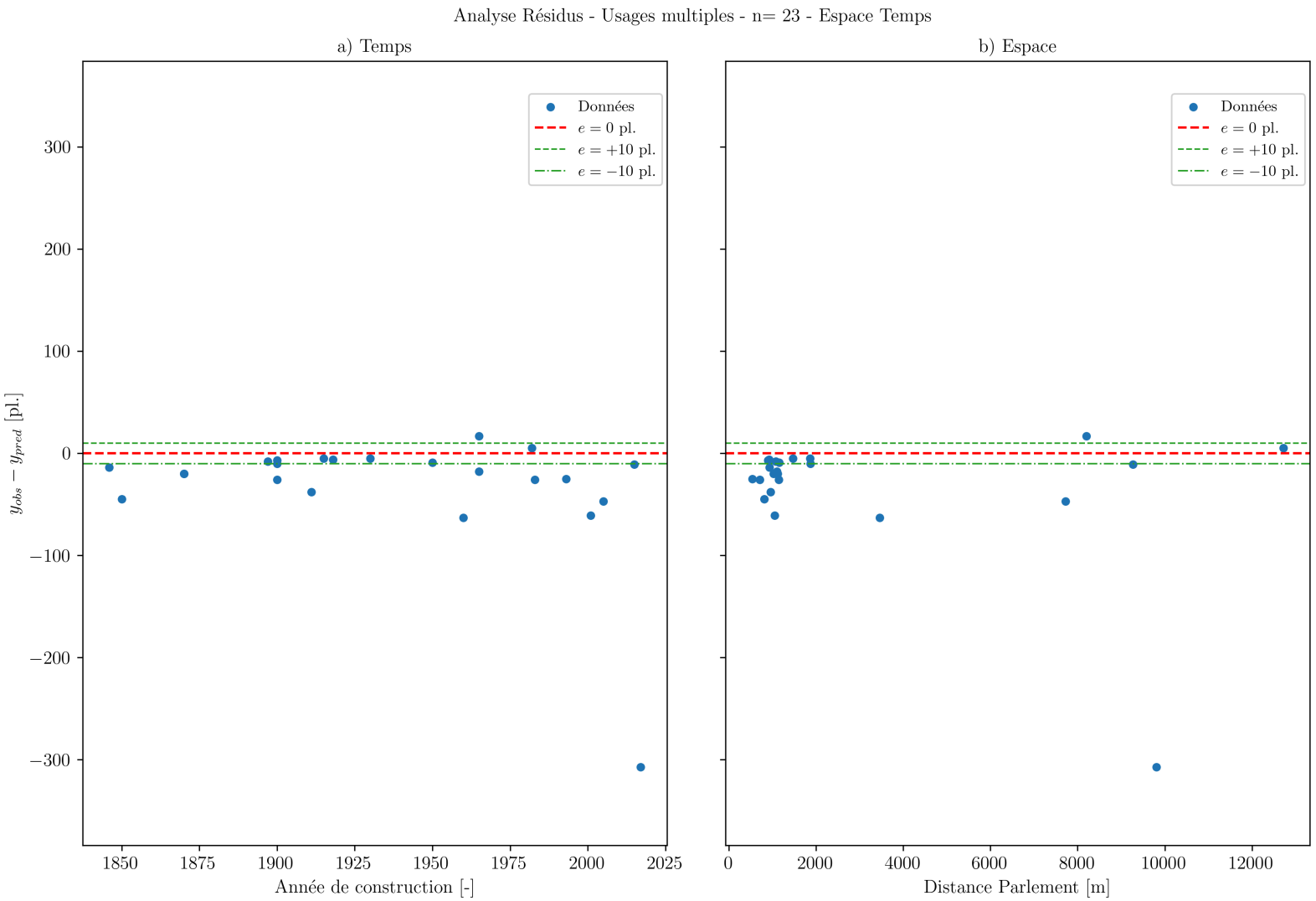


FIGURE 4.111 Analyse des résidus en fonction de l'espace et de l'époque de construction pour les lots d'usage mixte

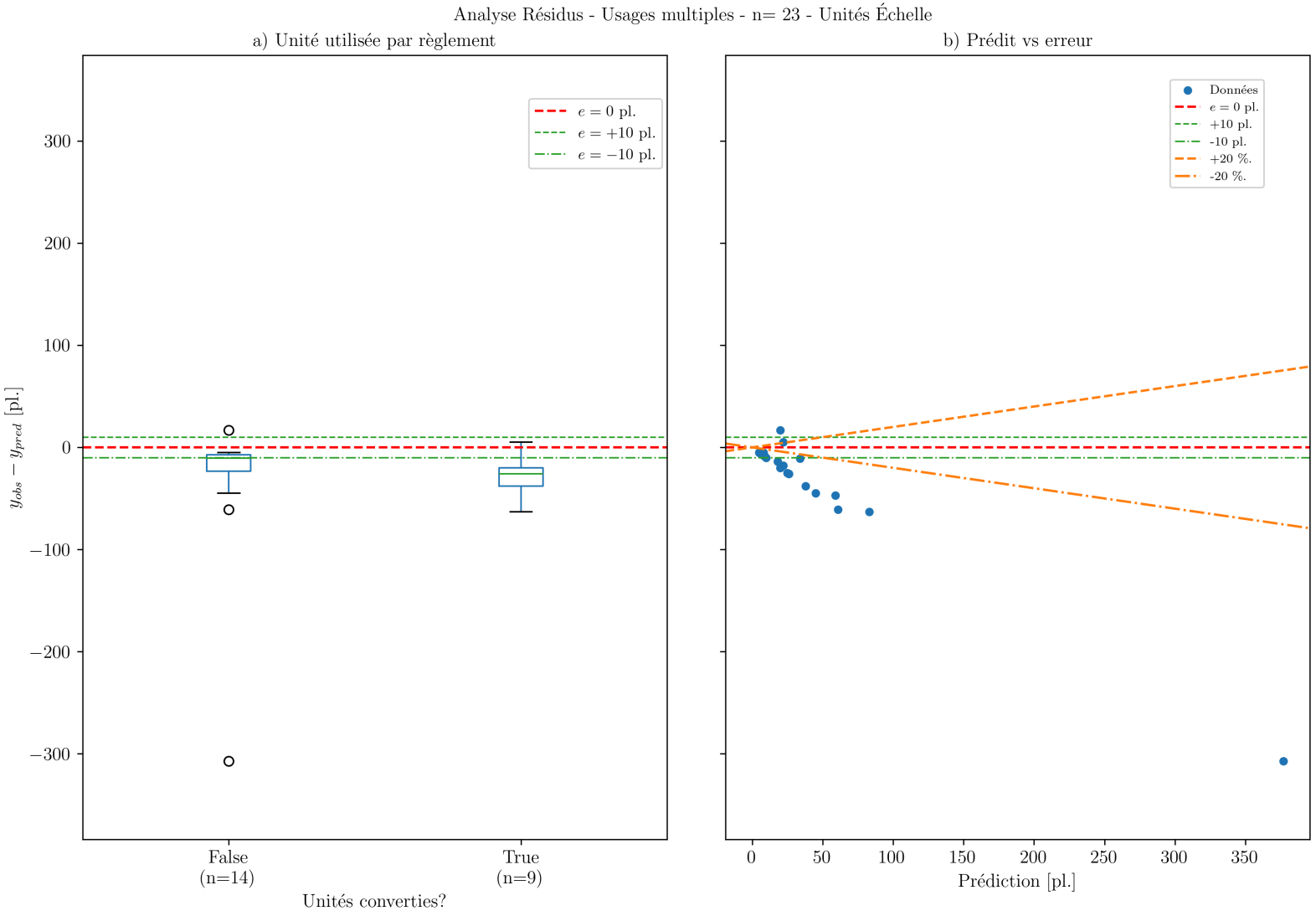


FIGURE 4.112 Analyse des résidus en fonction de la prédiction et des unités de formulation pour les lots d'usage mixte

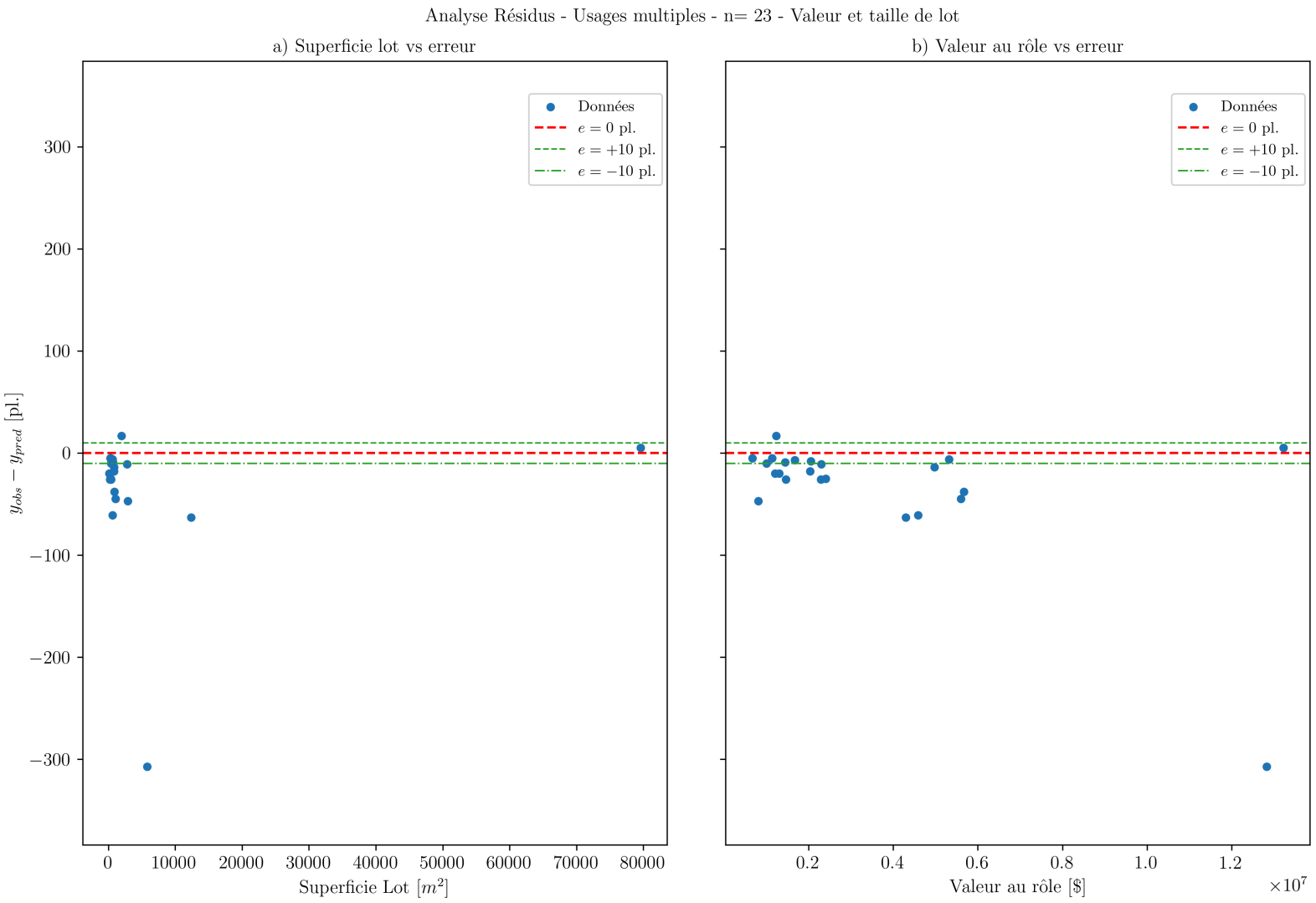


FIGURE 4.113 Analyse des résidus en fonction de la superficie du lot et de la valeur pour les lots d'usage mixte

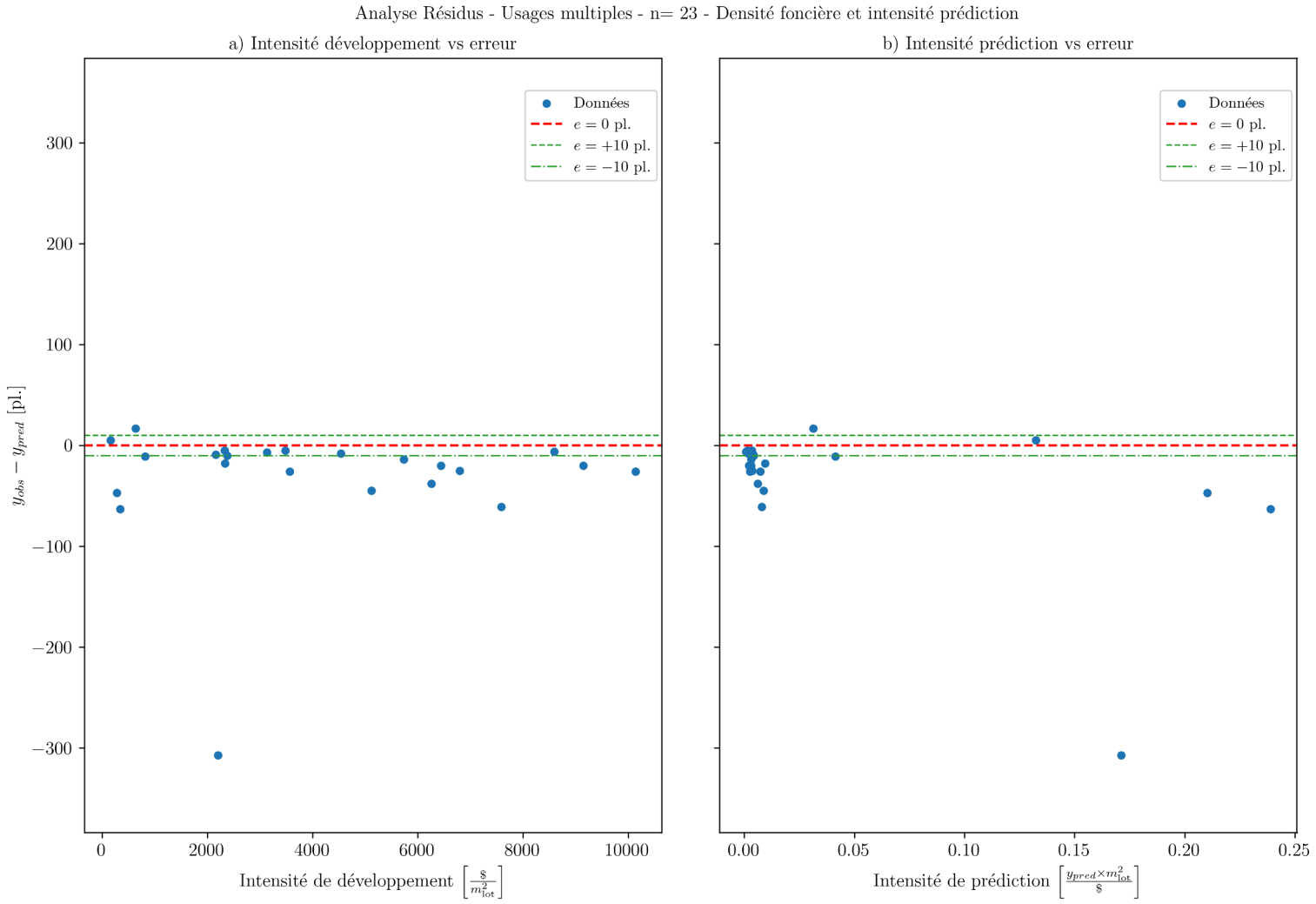


FIGURE 4.114 Analyse des résidus en fonction de l'intensité de développement et l'intensité de prédiction pour les lots d'usage mixte

Ceci conclut la section sur la validation du modèle de prédiction. D'importants enjeux demeurent sur la précision des prédictions ; les enjeux entourant les conversions d'unités sont principalement reliés à un modèle trop peu flexible pour accommoder la formulation des définitions, ainsi qu'une absence de processus de calibration formel. D'autres enjeux demeurent en dehors de la précision des hypothèses. Les données manquantes illustrées à la figure 3.9 demeurent un frein majeur à l'émission de prédictions sur l'ensemble du territoire. La dernière section de ce chapitre discutera rapidement des relevés manuels et de prédictions semi-automatiques qui ont été complétées puis illustrera la manière dont les données pourraient être utilisées.

4.4 Correctifs apportés à l'estimation réglementaire

Des correctifs ont été apportés à l'inventaire de manière sporadique. Ça a été particulièrement le cas lorsqu'un gros générateur de déplacement n'avait pas d'estimation de stationnement ou qu'elle semblait surestimée. L'approche ici était purement opportuniste et une méthode plus systématique d'estimation pour affecter des estimations à ces propriétés devrait être développée. La figure montre le delta entre l'inventaire réglementaire et un inventaire agrégé où la valeur manuelle est prise en priorité, puis la valeur semi-automatique, où l'auteur a spécifié les valeurs à utiliser, et finalement, l'inventaire réglementaire était choisi pour chaque lot s'il n'y avait pas d'autre estimation. De manière descriptive, les ajustements de la Cité-Universitaire sont liés au campus universitaire, au CÉGEP et à plusieurs centres commerciaux, l'ajustement dans Lairet est pour le Colisée, et l'ajustement dans le Vieux Limoilou était pour l'hôpital et le CÉGEP. L'ajustement dans Saint-Sacrement est pour l'hôpital Jeffrey Hale. Dans le cas de Val-Bélair, plusieurs ajustements manuels ont été complétés sur des centres commerciaux. Les estimations revues à la baisse sont souvent pour des écoles ou des places d'assemblée où les conversions d'unités étaient problématiques.

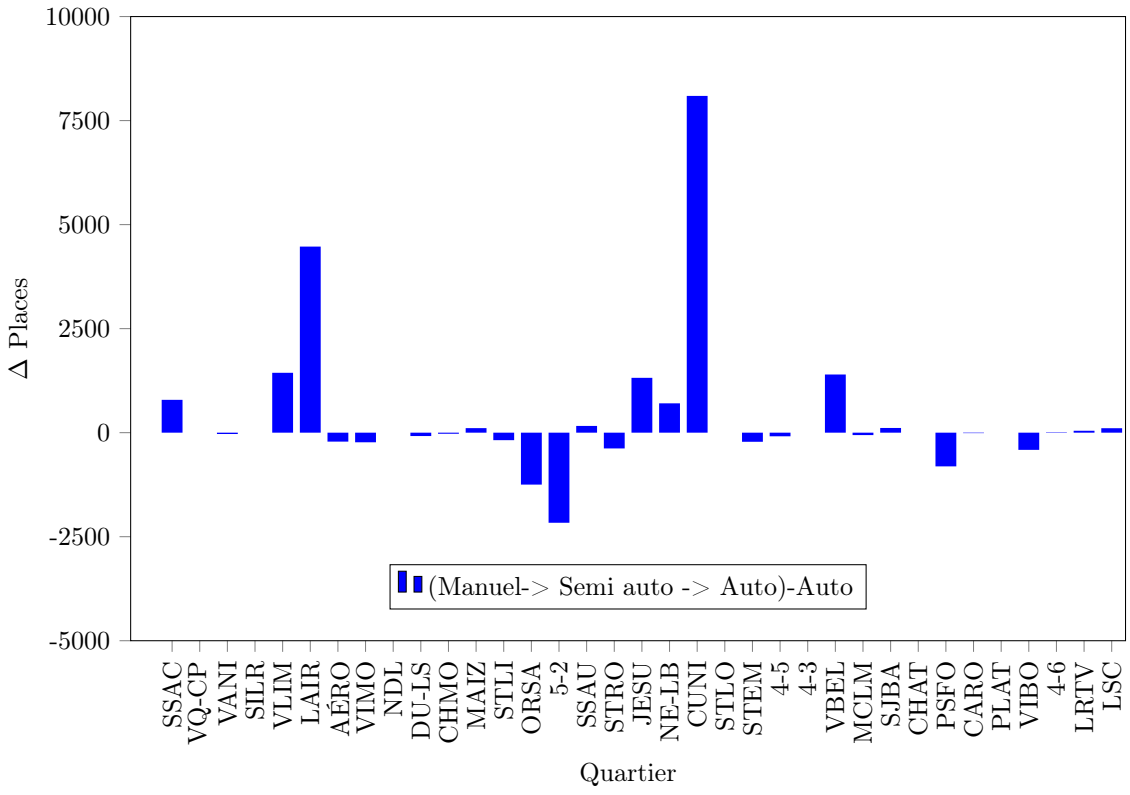


FIGURE 4.115 Différence entre l'inventaire corrigé et l'inventaire automatique

4.5 Exemples d'analyse

Cette section montre comment les données pourraient être utilisées pour bonifier la compréhension du stationnement. Les résultats sont purement prospectifs et le fort taux d'absence de données crée des distorsions dans la disponibilité du parc de stationnement. La contribution du stationnement sur rue est complètement évacuée de l'analyse, ajoutant un biais supplémentaire. Un important processus d'évaluation des données et de correction est requis pour rendre les constats de cette section valide sur les métriques liées au stationnement. Cela étant dit, la section vise à illustrer un potentiel.

La motorisation a été estimée ainsi que les profils d'accumulation véhicule à partir des données de l'enquête OD. Elle est montrée à la figure 4.116 à titre indicatif pour donner un contexte au reste de l'analyse. On peut ensuite commencer à interroger la mesure dans la-

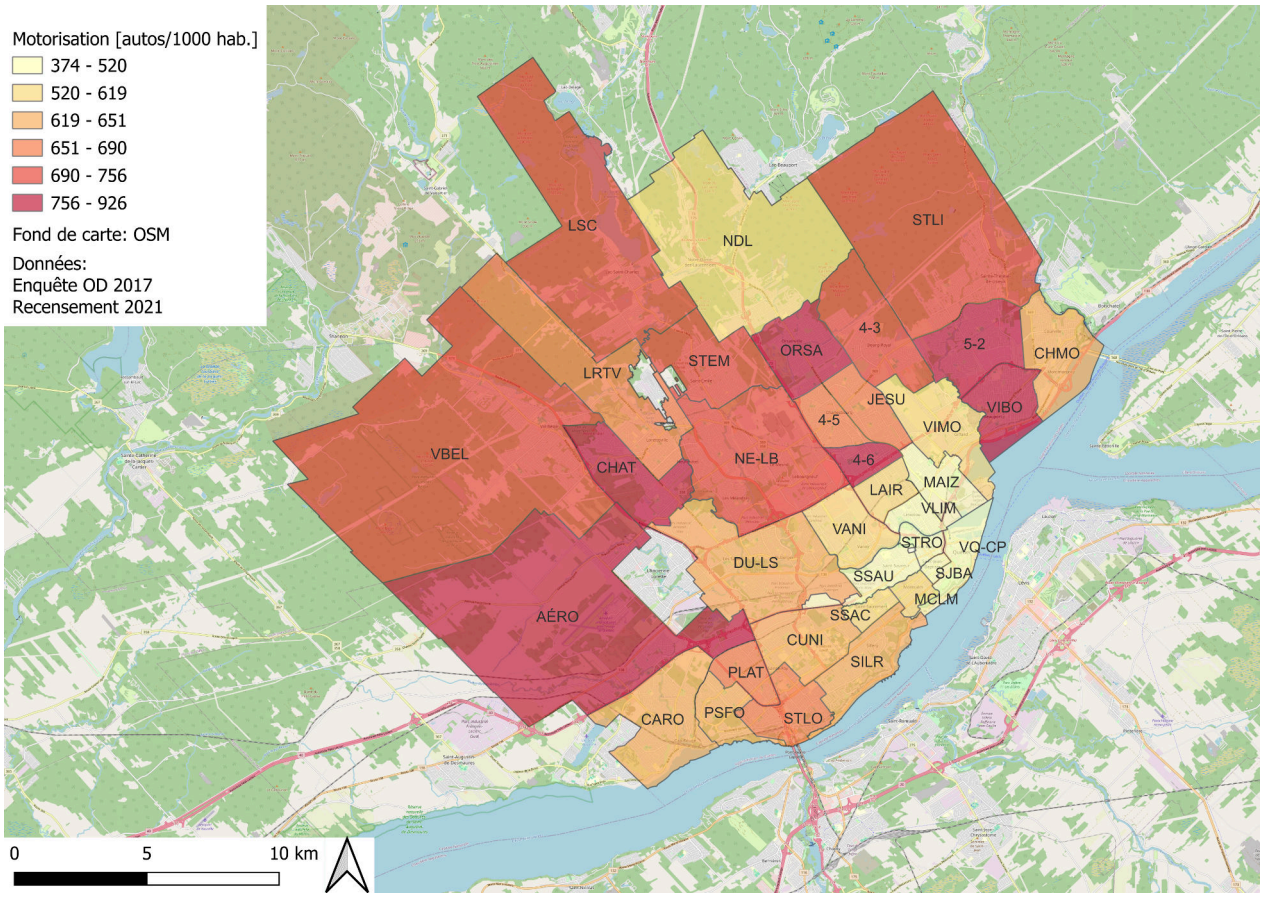
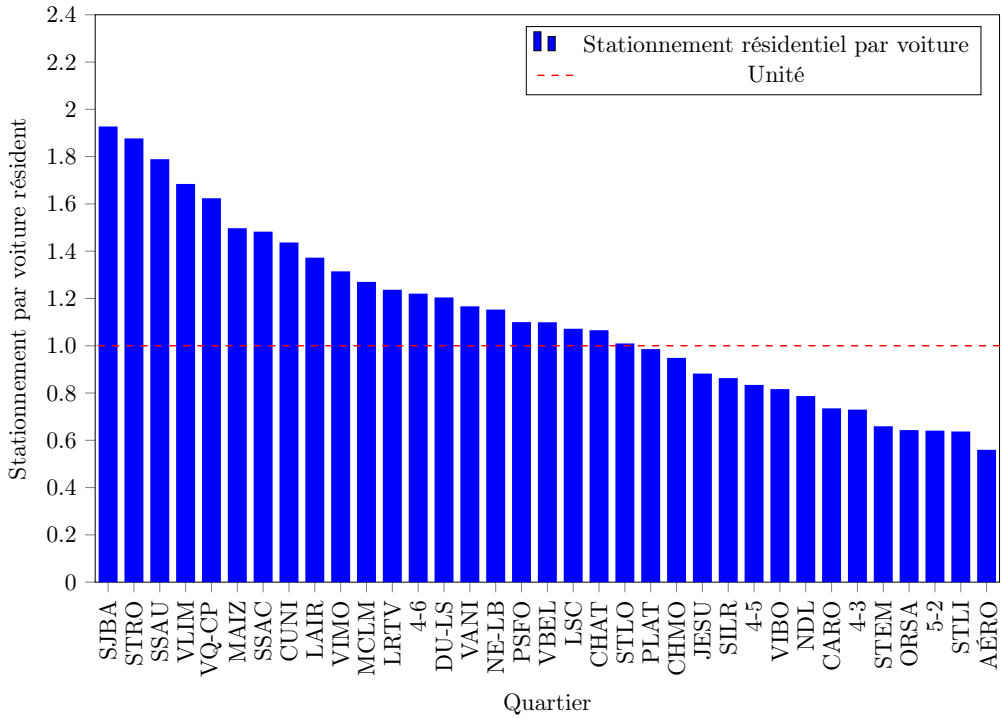


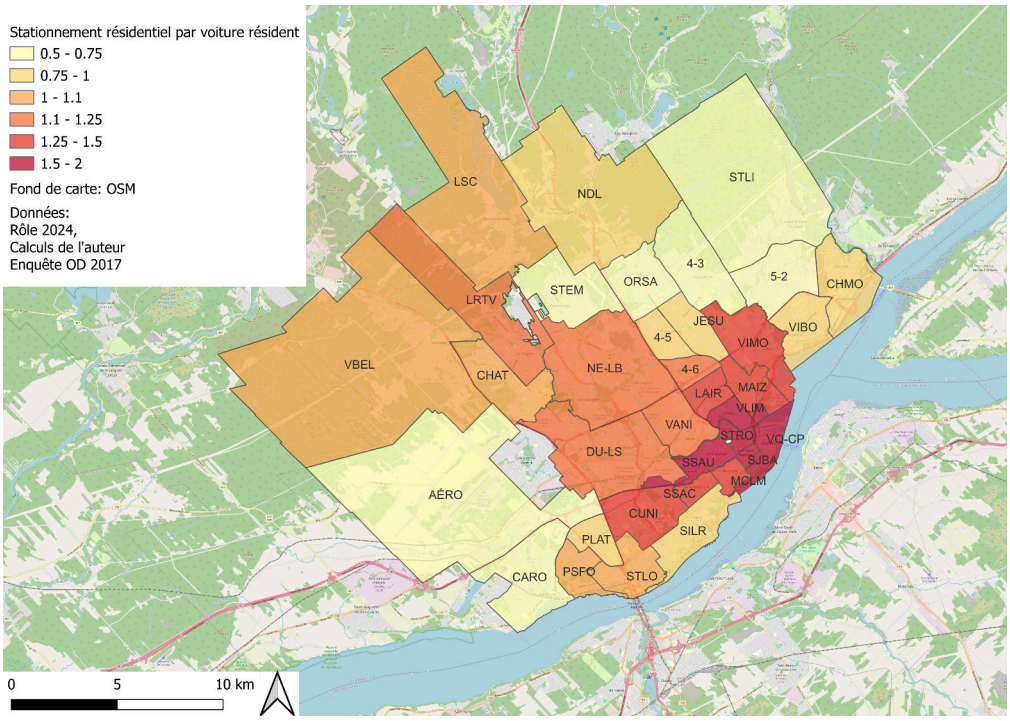
FIGURE 4.116 Motorisation selon les quartiers

quelle le stationnement est saturé. Les figures 4.117a et 4.117b montrent le nombre de places résidentielles hors rue par voiture des résidents. Les résultats montrent qu'il y a plus de

places de stationnement par voiture dans les quartiers centraux, ce qui n'est pas conforme aux attentes puisque les quartiers centraux sont typiquement là où l'on trouve des enjeux de stationnement. L'évaluation du modèle indique que le stationnement résidentiel est sous-estimé dans les lots unifamiliaux qui dominent les quartiers périphériques. L'implémentation d'une méthode d'estimation plus précise pour les maisons unifamiliales permettrait de donner un portrait plus juste de l'enjeu.



(a) Histogramme



(b) Carte

FIGURE 4.117 Nombre de places résidentielles par voiture des résidents

Cependant, même en regardant le nombre de places de stationnement par logement, on constate des tendances contre-intuitives, puisque les quartiers centraux paraissent mieux lotis que certains quartiers périurbains comme le montre la figure 4.118. Encore une fois, l'évaluation du modèle montre que ceci est probablement dû au biais du modèle pour les propriétés unifamiliales particulièrement lorsqu'on s'éloigne du centre où ce type de logement constitue une plus grande partie du parc de stationnement.

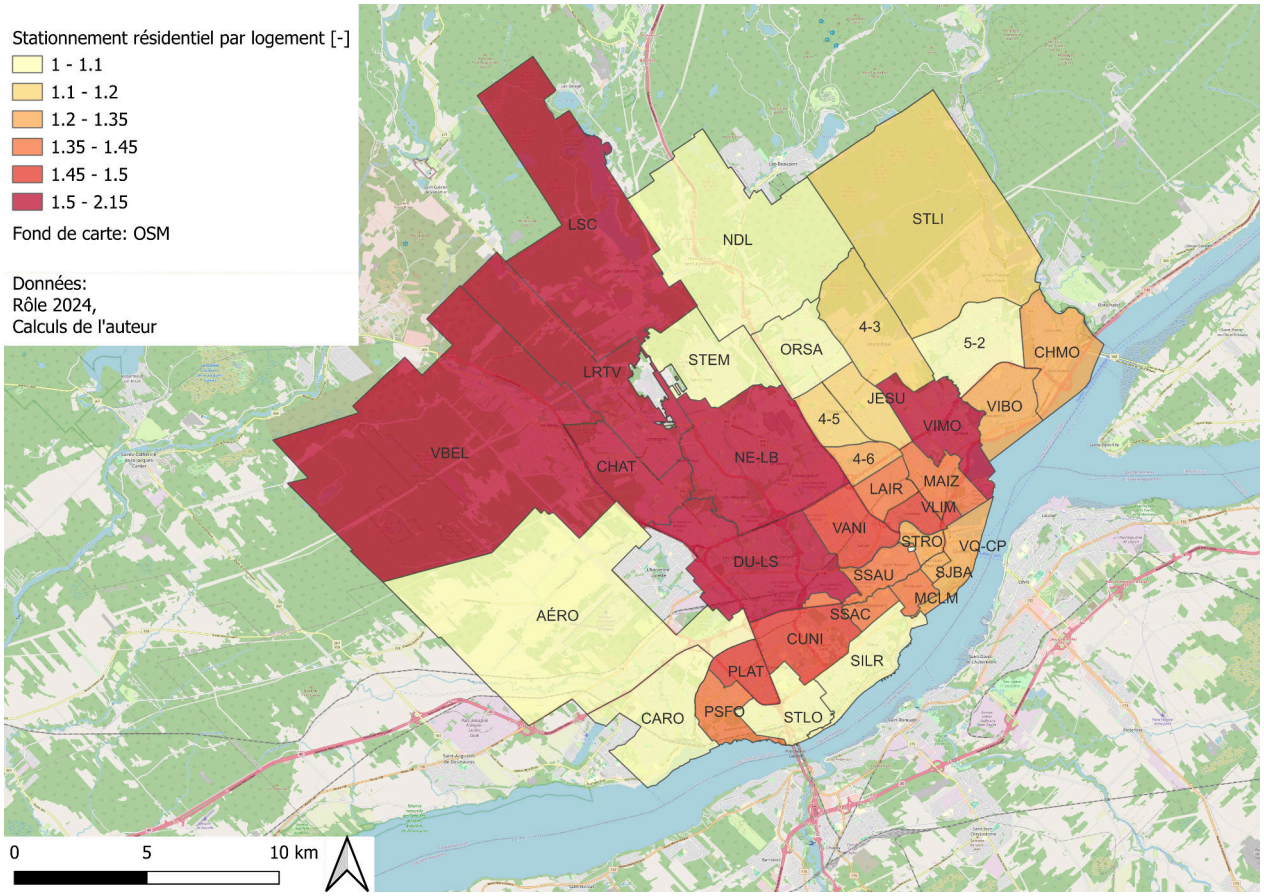


FIGURE 4.118 Stationnement résidentiel par logement

Les profils d'accumulation de véhicules peuvent aussi donner une idée de l'utilisation de la capacité. Le parc total de stationnement complet peut être comparé à la population ou la capacité publique (c'est-à-dire autre que résidentielle) peut être comparée aux voitures hors des résidences, donnant potentiellement un meilleur portrait de la compétition aux destinations. La figure 4.119 montre le profil d'accumulation pour la Cité-Universitaire. Les lignes de capacité montrent la capacité réglementaire et une capacité ajustée. La capacité ajustée inclut les stationnements de la place Laurier et de certains stationnements du campus de l'université où les données manquaient.

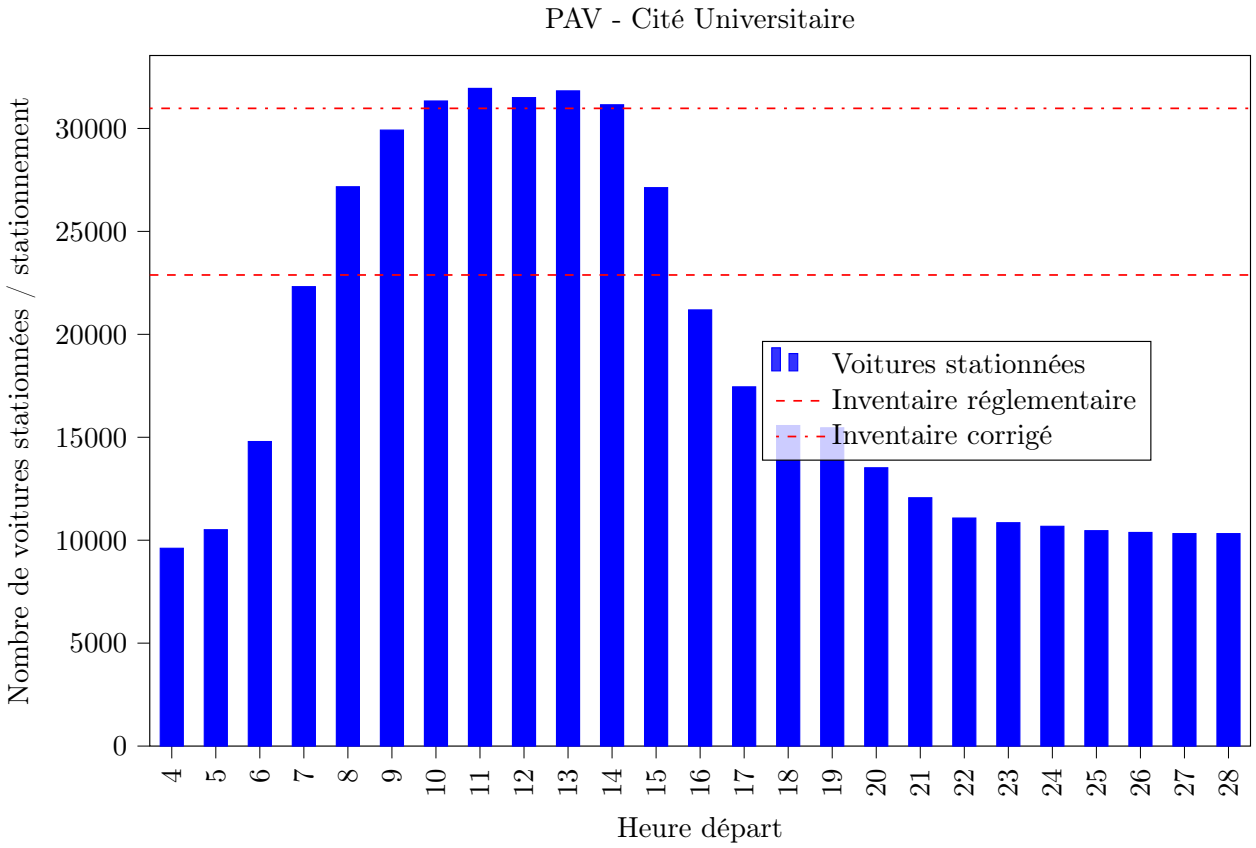
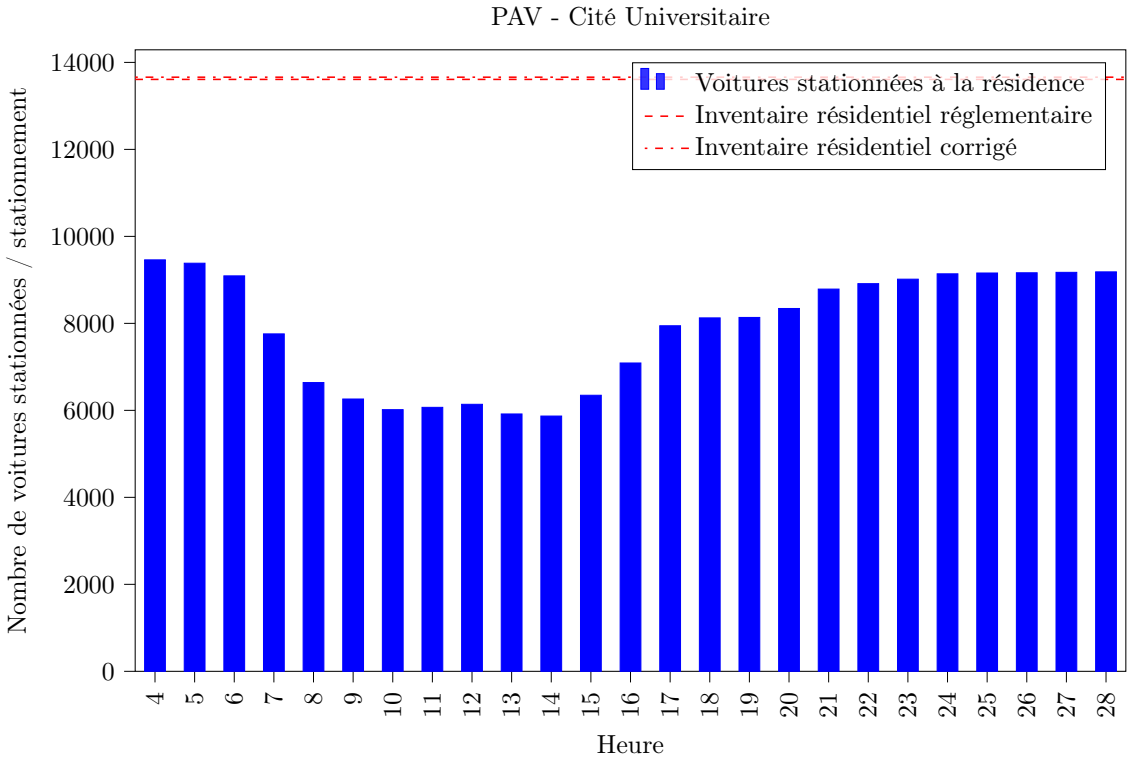
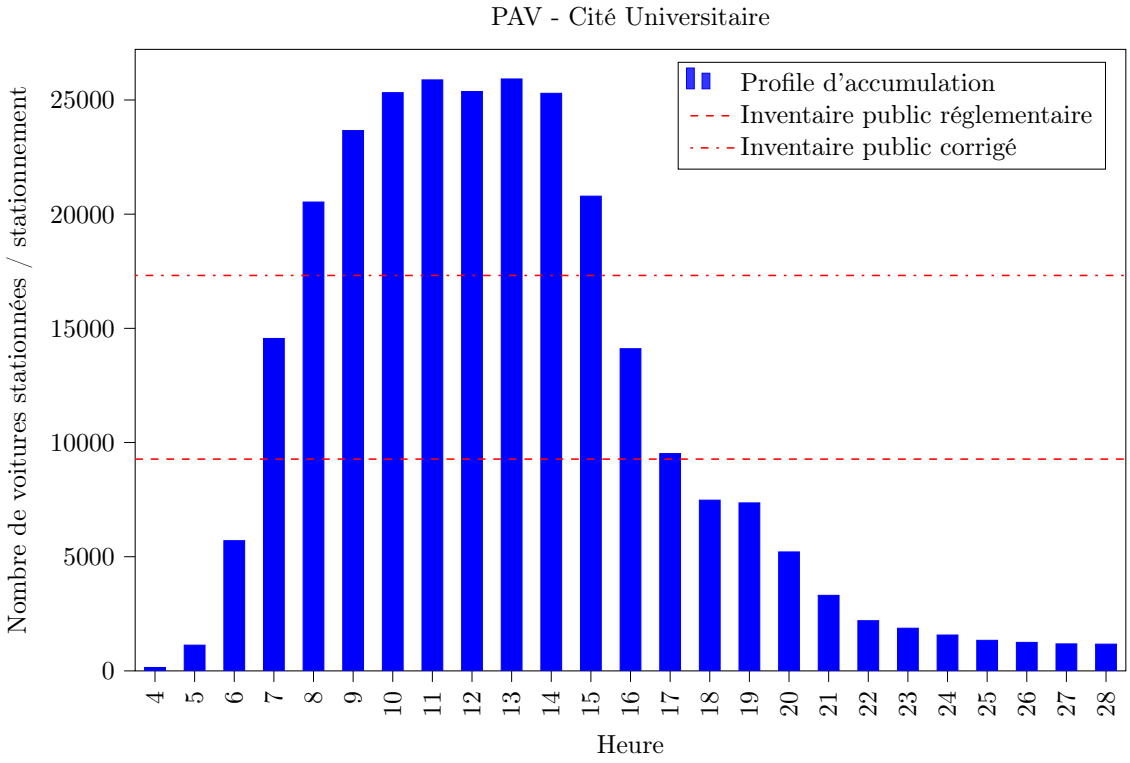


FIGURE 4.119 Profil d'accumulation de véhicules de la Cité-Universitaire

Ce même exercice peut aussi être fait en isolant les voitures stationnées à la résidence ou dans un stationnement public. Les figures 4.120a et 4.120b montrent l'accumulation de véhicules à la résidence contre la capacité résidentielle, et la même pour chose pour les places publiquement accessibles (autres que résidentielles).



(a) Résidentiel



(b) Destination

FIGURE 4.120 Profils d'accumulation de véhicules par clientèle

On constate qu'il y a un grand manque à gagner dans les places de stationnement public. Des enjeux demeurent quant à la précision de l'inventaire et le fait de ne pas inclure le stationnement sur rue limite les possibilités d'interprétation.

La création de profils d'accumulation de personnes et de permis peut aussi être complétée pour la même zone et permet d'inférer la consommation d'espace supplémentaire si chaque personne venait en automobile. La différentiation entre personnes et permis est mise en place pour comprendre quelles sont les personnes qui peuvent conduire qui ne viennent pas dans le quartier en voiture. Les figures 4.122b et 4.122a montrent à quel point le secteur est attractif.

La dynamique montrée pour la Cité-Universitaire n'est cependant pas la même que pour des quartiers plus excentrés qui sont plus des communautés-dortoirs. La figure 4.121 montre le profilé d'accumulation de base pour le quartier d'Orsainville qui se vide pendant la journée et où le stationnement résidentiel constitue 65% de l'inventaire réglementaire (7882 places). Encore une fois, on constate que le stationnement prédit ne permet pas d'entreposer l'ensemble de la demande, menant à des questions sur la disponibilité du stationnement sur rue et la fiabilité de l'inventaire.

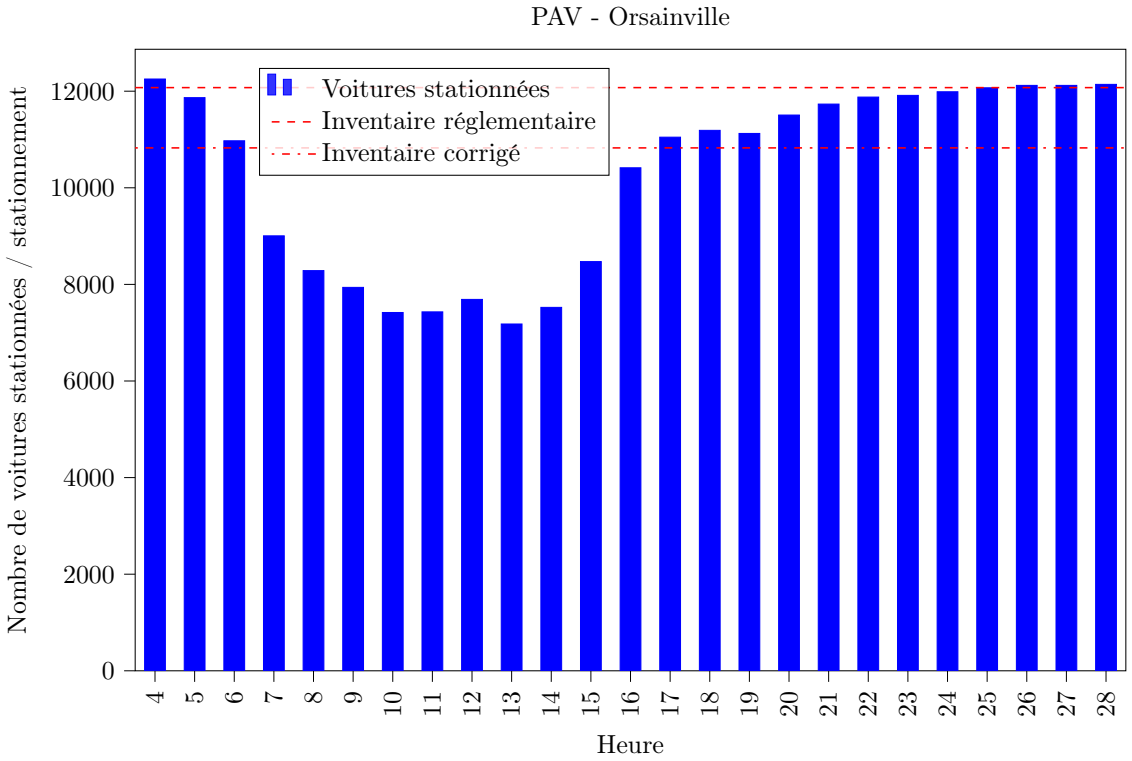
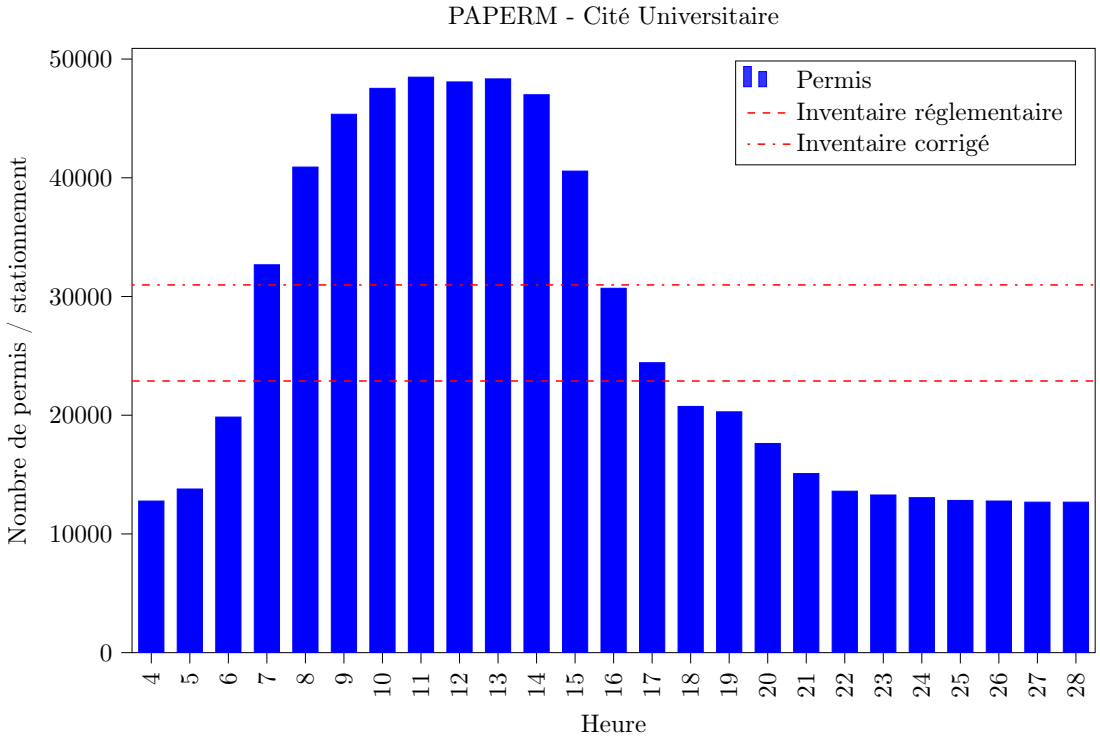
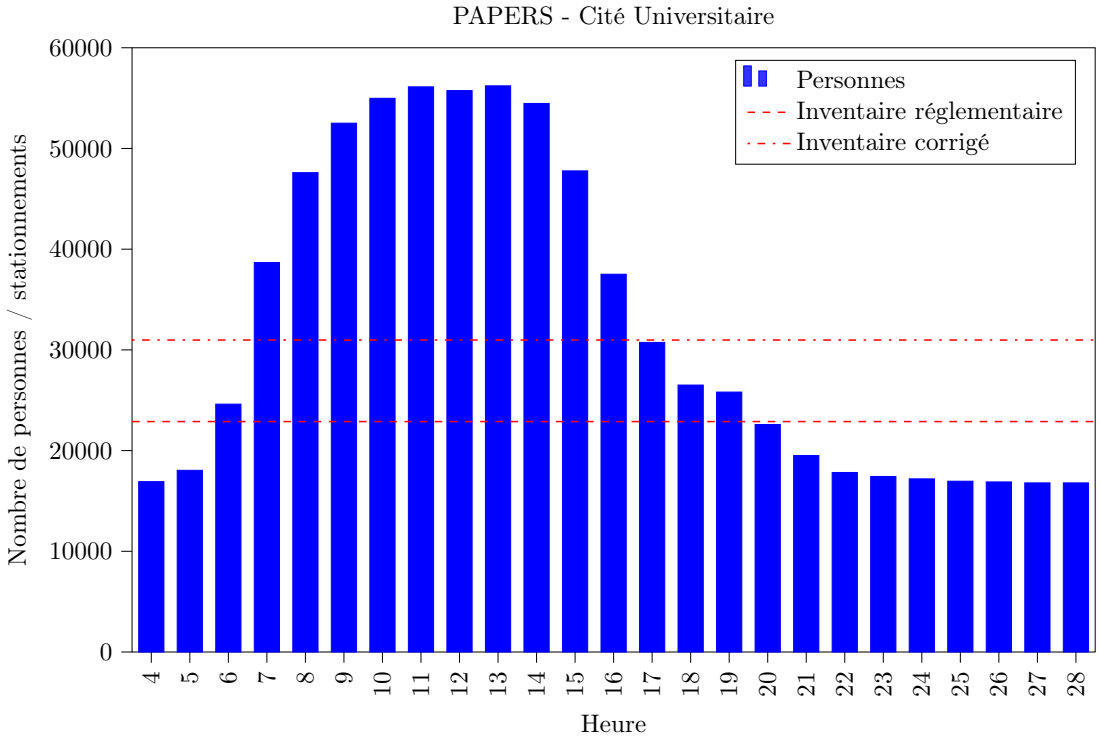


FIGURE 4.121 Profil d'accumulation d'Orsainville



(a) Permis



(b) Personnes

FIGURE 4.122 Profils d'accumulation de personnes et permis pour la Cité-Universitaire

La figure 4.123 montre un graphique créé dans Python en faisant l'appel d'API pour obtenir les données. On constate une forte variabilité entre les différentes juridictions.

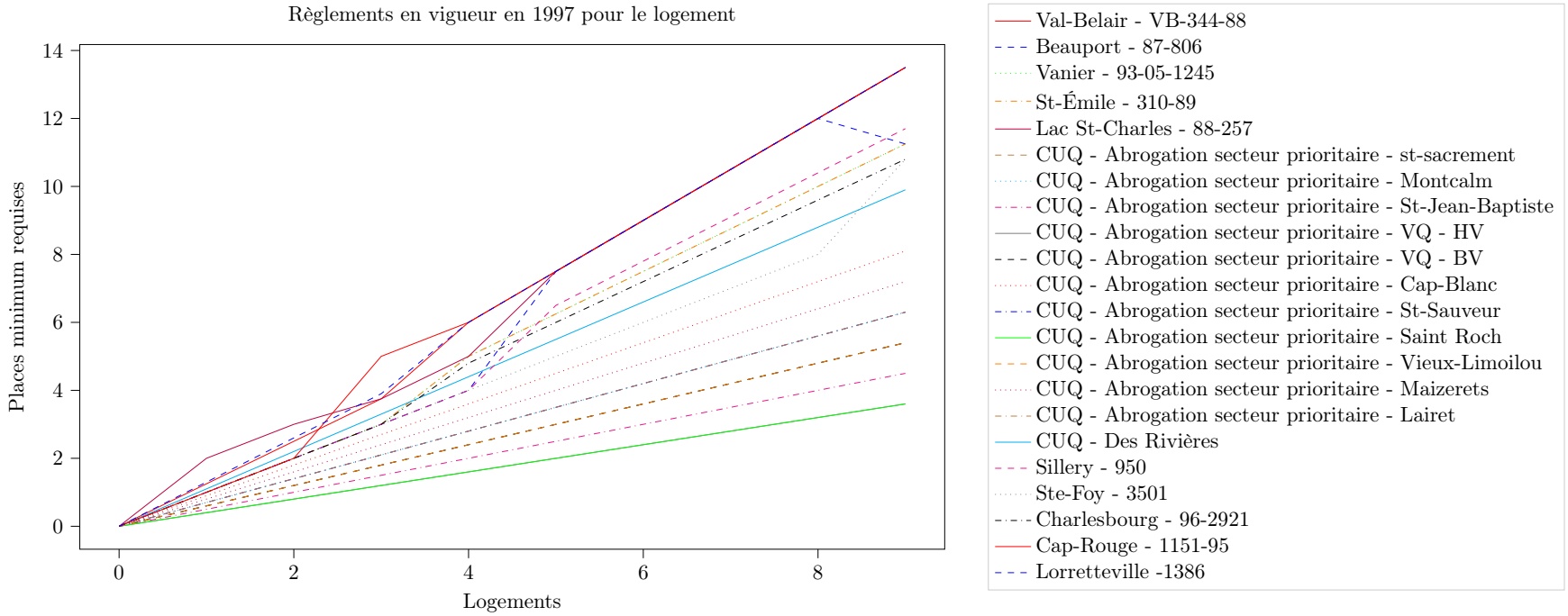


FIGURE 4.123 Comparaison des règlements de stationnement en vigueur en 1997 pour le logement

L'analyse de variabilité peut servir à comprendre comment les politiques de stationnement auraient pu affecter la production de stationnement. Ici, tous les ensembles de règlements sont appliqués à toutes les entrées du rôle et seulement le total est comparé. L'approche permet cependant de montrer à quel point les minimums peuvent avoir de l'influence s'ils sont contraignants pour les promoteurs immobiliers comme l'indique la littérature. (Cutter & Franco, 2012 ; F. Li & Guo, 2014 ; Smith et al., 1964)

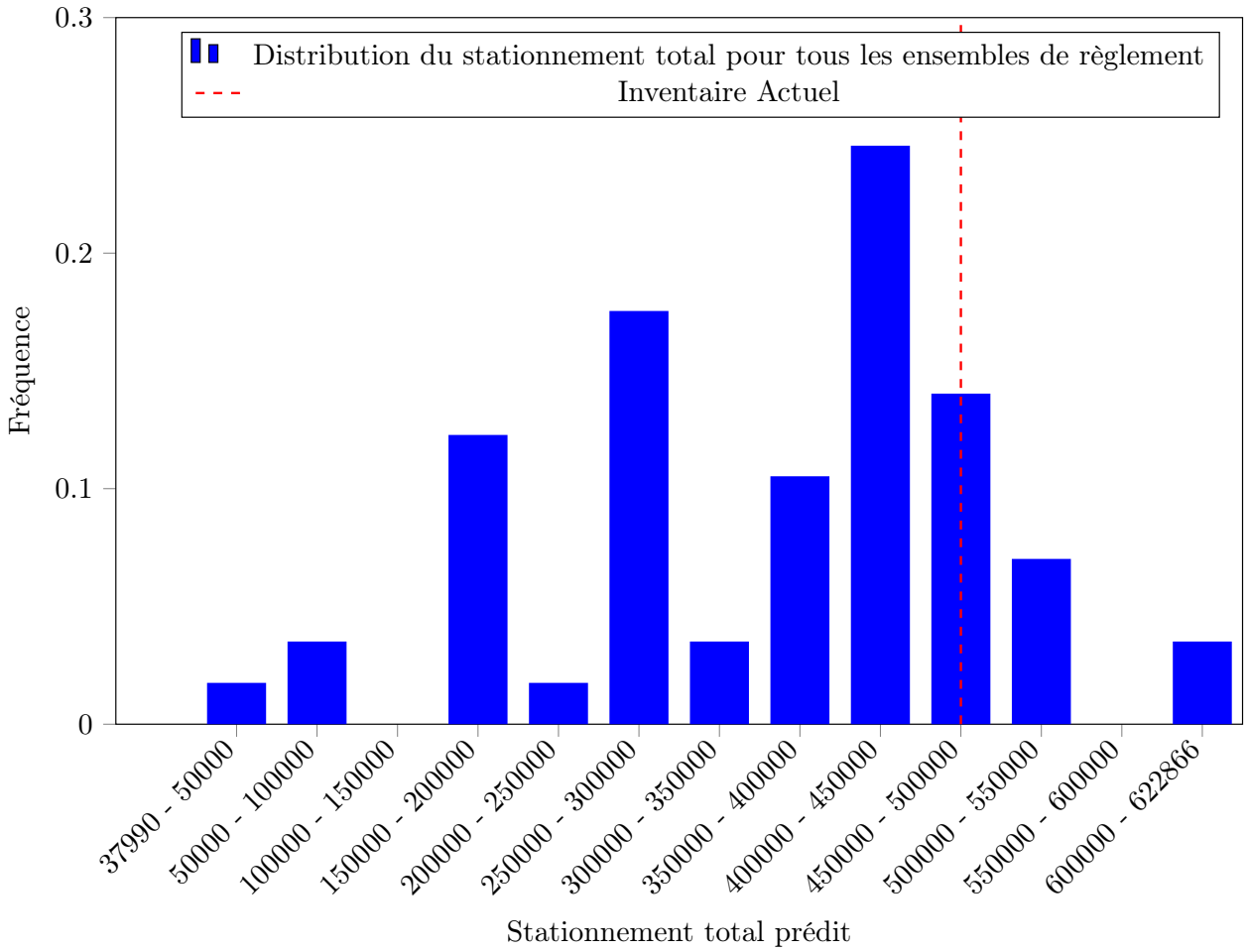
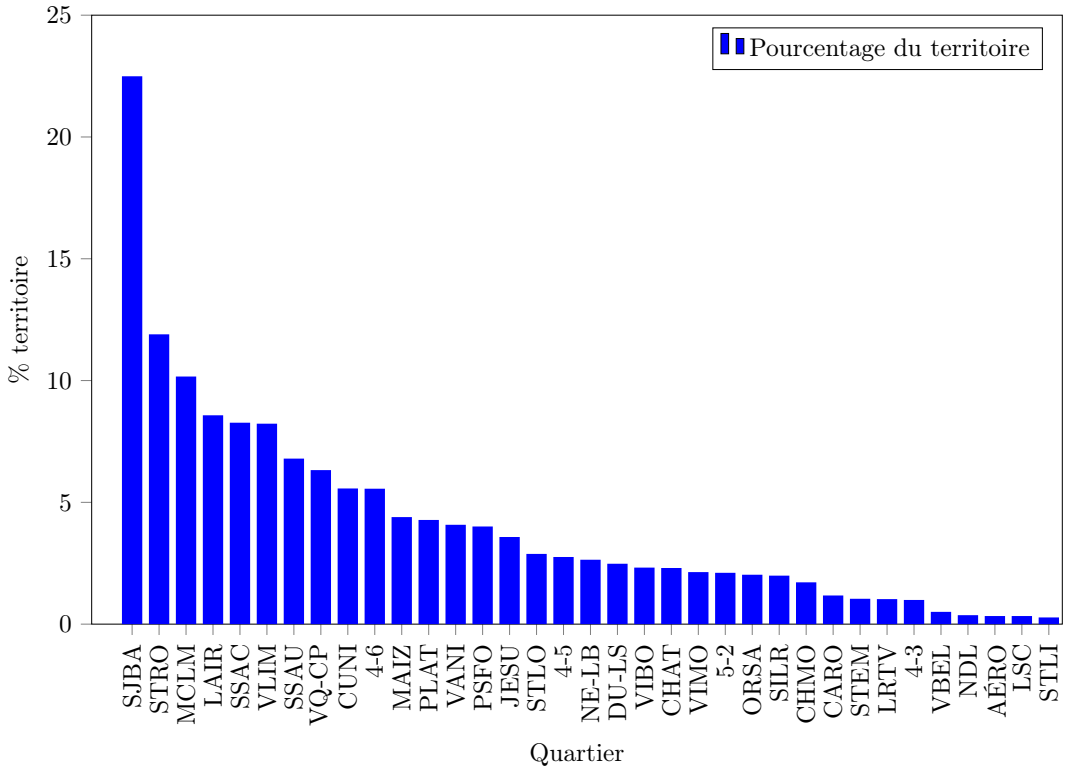
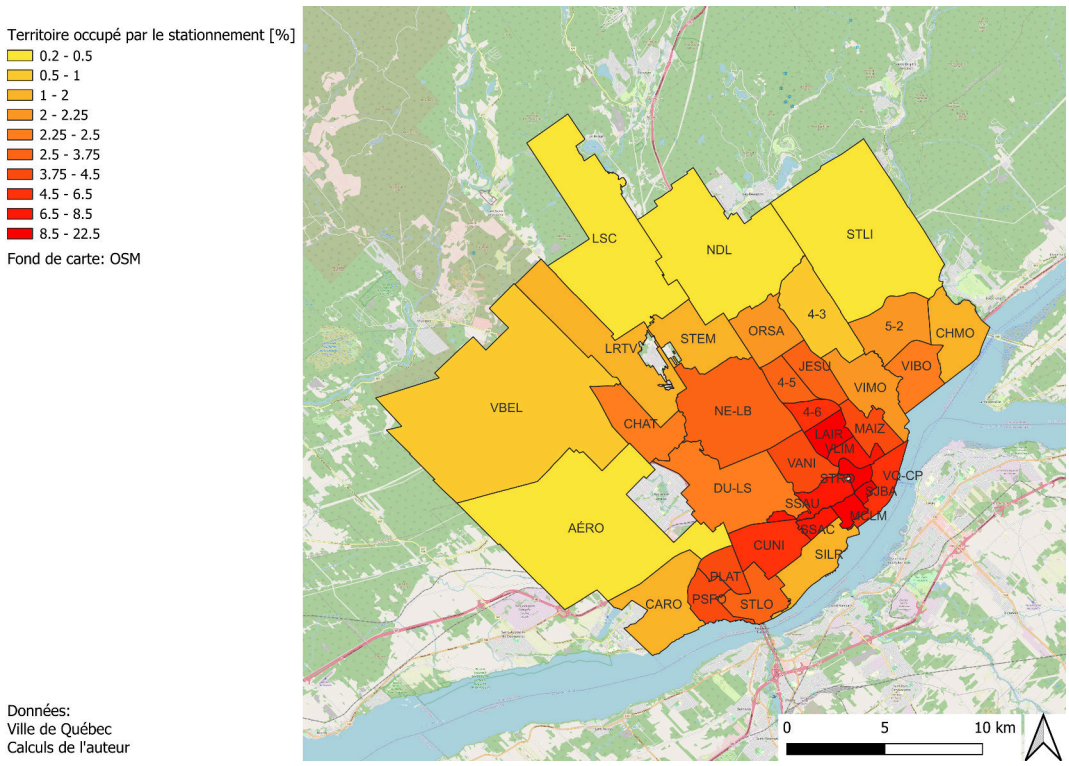


FIGURE 4.124 Exemple d'analyse de variation utilisant tous les ensembles de règlements

Les prédictions peuvent aussi être utilisées pour estimer le pourcentage du territoire dédié au stationnement. Les quartiers centraux voient une part plus grande de leur territoire dédié au stationnement.



(a) Barres



(b) Carte

FIGURE 4.125 Pourcentage du territoire dédié au stationnement par quartier

Plusieurs facteurs contribuent à ce résultat. Tout d'abord, l'utilisation du sol varie selon les quartiers. D'autre part, la métrique donne une mesure brute sans compenser pour le stationnement souterrain ou en structure étagée. Finalement, l'absence de compensation pour les données absentes rend les constats difficiles à interpréter.

On peut aussi déduire des taux d'occupation théoriques des quartiers à partir des profils d'accumulation de véhicules. En prenant la valeur maximale du profil d'accumulation et en la comparant au parc de stationnement prédit, il est possible de dresser un portrait de l'utilisation de la capacité. Ce portrait peut être dressé par catégorie. On peut déduire un taux d'occupation total maximal ou le différencier pour le parc public (usages autres que résidentiels) ou pour le parc résidentiel. Évidemment, les maximums d'occupation n'ont pas nécessairement lieu en même temps. La figure 4.126 montre le taux d'occupation pour le parc total. Les valeurs excèdent très largement 100%.

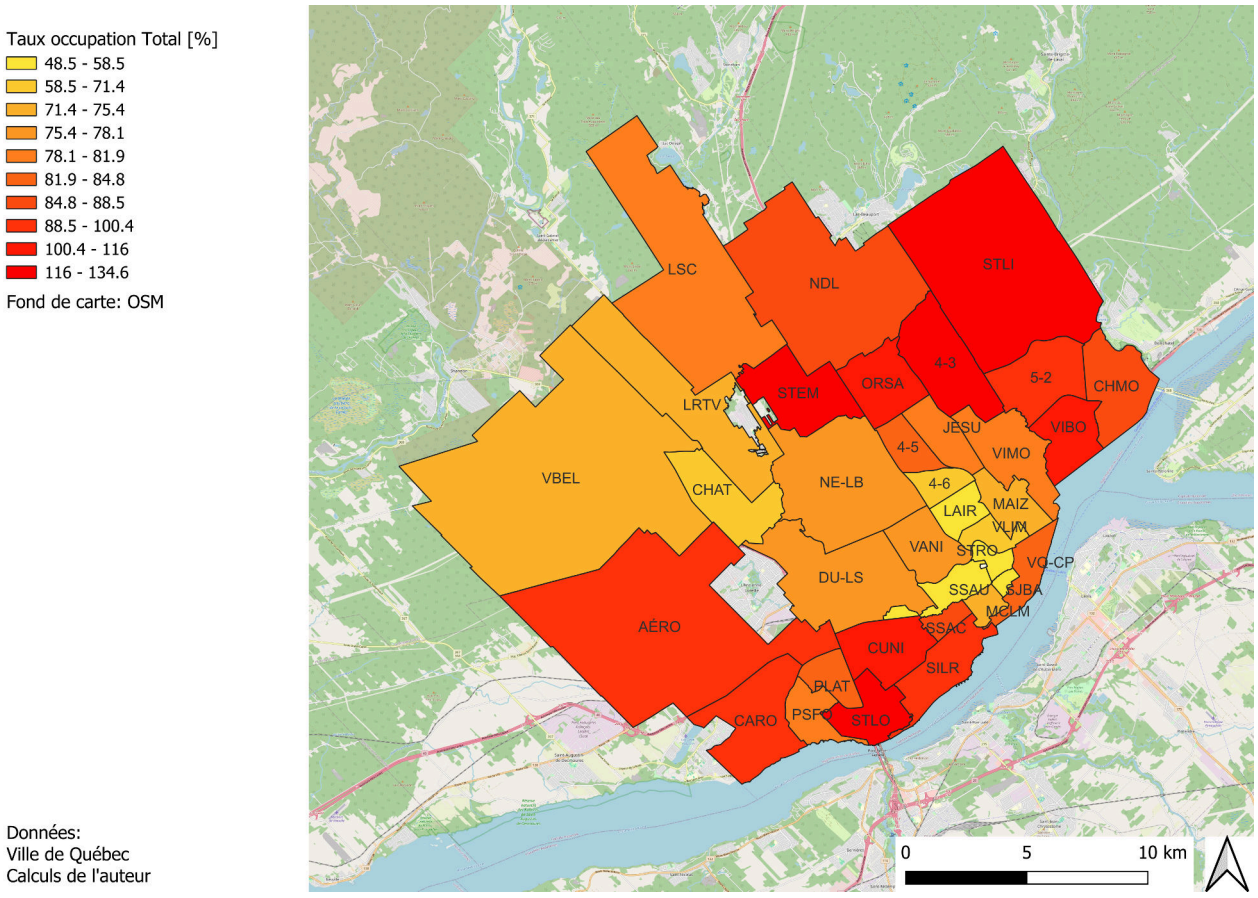


FIGURE 4.126 Taux d'occupation total maximal prédit

Une carte similaire peut être créée pour le parc de stationnement public

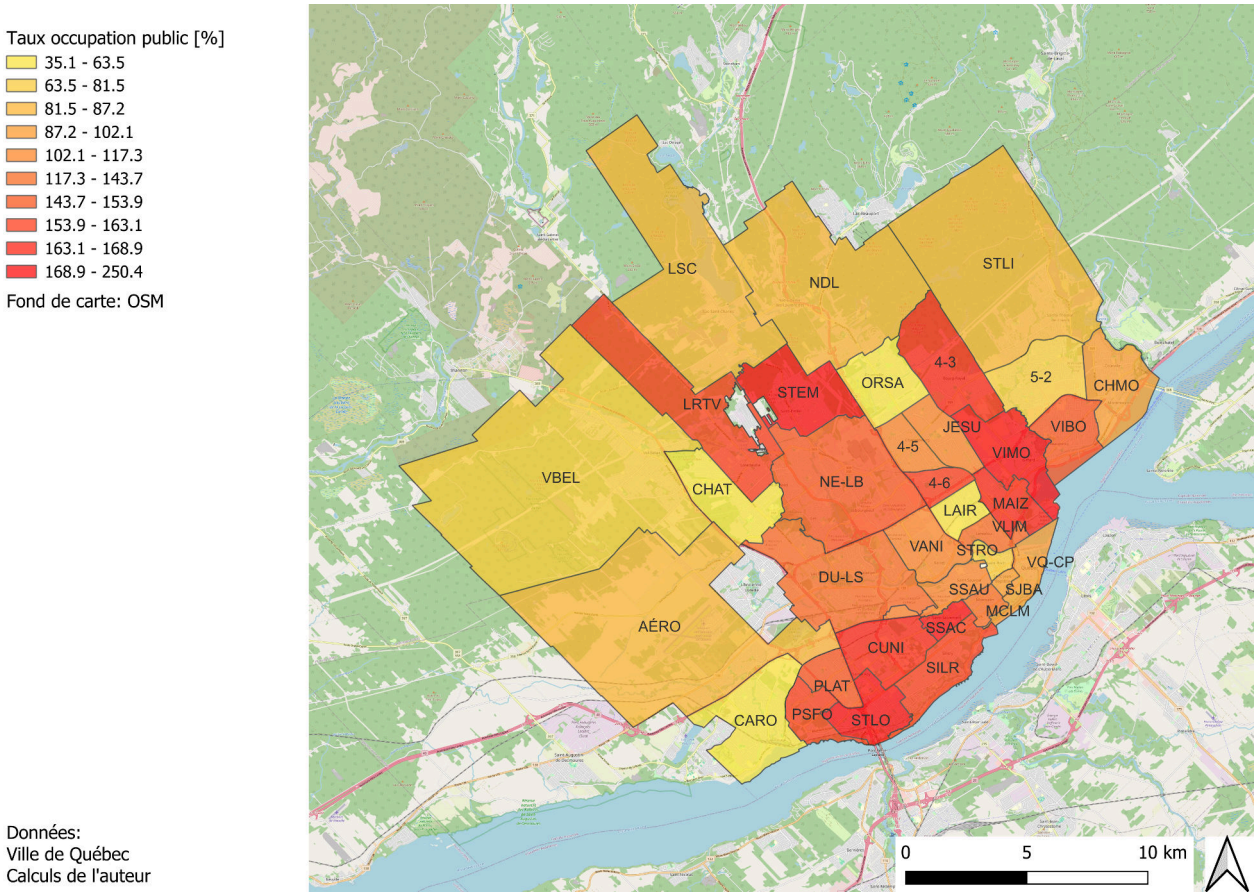


FIGURE 4.127 Taux d'occupation public maximal prédit

Finalement, la figure 4.128 montre le taux d'occupation maximal résidentiel calculé de manière similaire.

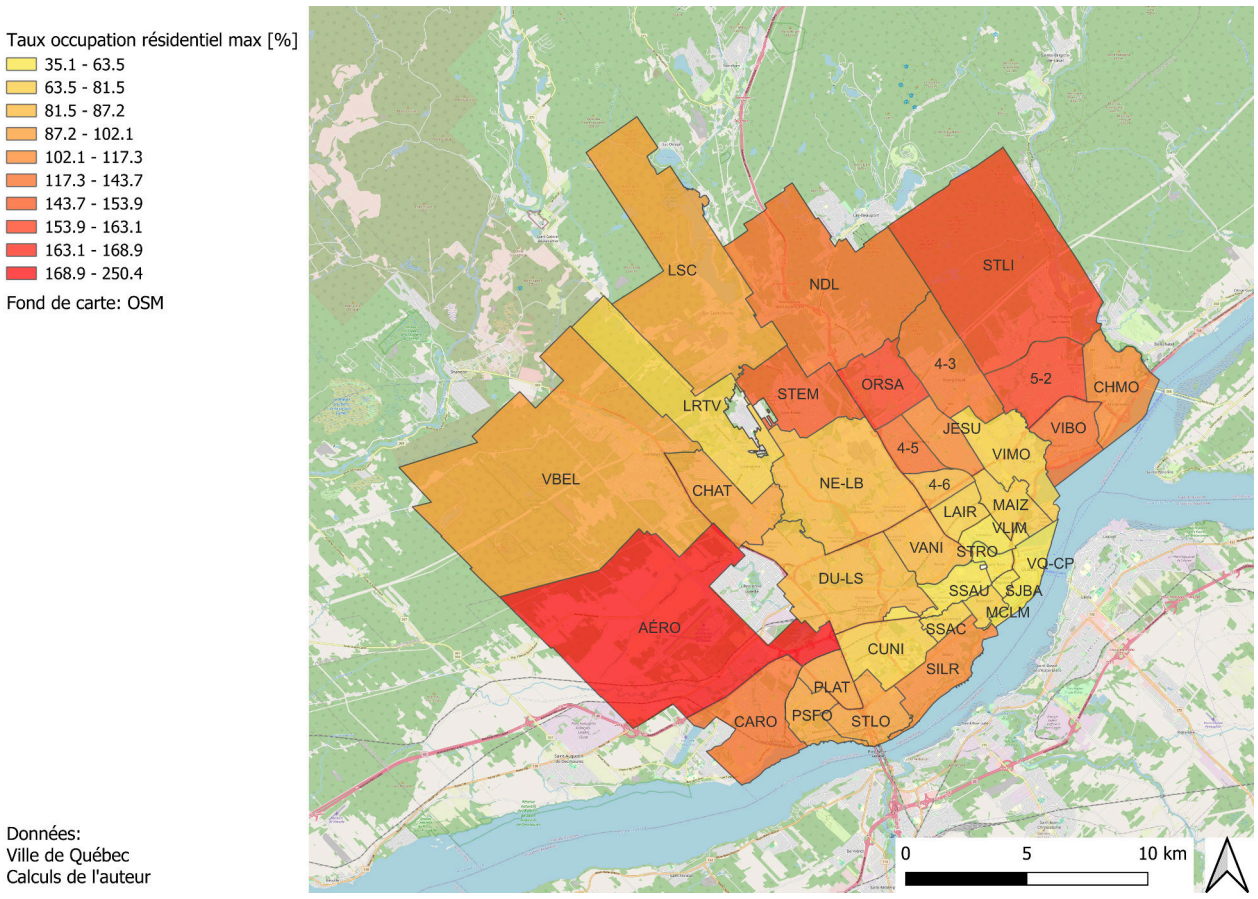


FIGURE 4.128 Taux d'occupation résidentiel maximal prédit

Ceci conclut la section sur les exemples d'analyse. Les données manquantes dans le rôle foncier et la réalisation d'un processus de calibration des unités limitent fortement la pertinence des constats, qui doivent tous être compris comme démonstratifs. La prochaine section donnera un récapitulatif du mémoire.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Cette section donnera un survol des constats dressés au fil du mémoire. La section commence avec une synthèse des travaux, puis enchaine avec les limitations et conclut sur des améliorations qui pourraient être apportées à l'outil et à la méthode.

5.1 Synthèse des travaux

Ce mémoire a documenté un outil web permettant d'enregistrer l'évolution de la réglementation d'urbanisme en matière de stationnement. Ces règlements ont ensuite été utilisés pour prédire la capacité de stationnement hors rue pour la ville de Québec, en utilisant les données du rôle foncier disponibles en données ouvertes et les données cadastrales obtenues sur le portail Géoindex. L'estimation a ensuite été comparée à un petit échantillon pour 7 catégories de lots : résidentiel unifamilial, résidentiel plex, immeuble à appartements, industriel, commercial, services et usages multiples. L'évaluation du modèle a révélé des erreurs moyennes absolues variant de 2.3 places par lot à 22 places. Le processus d'évaluation a révélé que le processus de conversion utilisée pour permettre d'utiliser les données du rôle foncier pour prédire les unités spécifiées dans les règlements d'urbanisme était particulièrement mal calibré et contribuait beaucoup à l'erreur. D'autre part, pour les catégories liées au logement, les erreurs proviennent de deux sources : la première tient du fait que les résidences unifamiliales ont eu plus de places construites que ce que requéraient les minimums. La deuxième provient probablement d'une combinaison d'exemptions et de mauvaises spécifications des règlements avant 1995 qui n'ont pas été recensés. L'application de règlements avant les années '30 contribue probablement à gonfler l'estimation de stationnement résidentiel dans les quartiers centraux.

L'outil en question a été développé et utilise une architecture web qui a une interface spécialisée pour gérer et manipuler l'ensemble des données nécessaires pour mettre en place la méthodologie. Une première proposition d'API et d'interface est aux yeux de l'auteur la proposition la plus intéressante du mémoire, même si elle est à l'état d'ébauche. Si l'outil continue d'être développé et est intégré dans un processus de gouvernance et de maintenance de données, il pourrait permettre de bonifier les modèles de choix modaux et de quantifier l'effet du stationnement sur la mobilité des personnes. D'autre part, l'architecture proposée pourrait permettre de mutualiser les efforts de quantification en partageant la donnée entre différents acteurs de la mobilité. La plateforme pourrait aussi être valorisée pour améliorer la communication de la capacité de stationnement aux citoyens. Le stationnement demeure

un domaine où il y a peu de données en temps réels disponibles pour juger de l'état du réseau contrairement à la congestion ou les délais dans les transports en commun qui ont des données centralisées soit par applications de géolocalisation ou les opérateurs de transport en commun.

Ces constats sont bien évidemment conditionnels à la prise en charge d'un dispositif comme celui proposé qui a les moyens, le mandat et l'autorité requise pour compiler de telles données d'infrastructure (Cohon et al., 1996). L'outil et la méthode ont chacuns des limitations qui seront énumérées à la section suivante.

5.2 Limitations de la solution proposée

À très haut niveau, l'étude a dû faire des arbitrages entre l'illustration d'une chaine complète de la création d'une estimation à l'analyse et l'exhaustivité de chacune de ces étapes. La fragilité de la formulation des règlements, l'absence de scénarios, les choix entourant les structures de données pour la validation et le manque de rigueur statistique dans l'approche d'autoamorçage sont tous des conséquences de ce thème. Les objectifs de l'étude étaient aussi probablement trop diffus. Ce constat est facile a posteriori, mais l'évaluation de la performance avec des données terrain aurait dû être planifiée de manière plus systématique dès le début, plutôt qu'en parallèle au développement d'outils de visualisation. Cela étant dit, c'est aussi la conséquence de la nature exploratoire de l'étude : le stationnement demeure un domaine avec un cadre méthodologique mal établi. L'absence d'un cadre clair d'évaluation des différentes méthodes de dénombrement est une faiblesse qui devrait être examinée dans le futur. Le projet a aussi souffert du syndrome de « What you see is all there is » (Flyvbjerg & Gardner, 2023 ; Kahneman, 2011) où une seule solution est considérée sans se pencher sur des alternatives.

La section discutera des limitations sur 5 dimensions : la nature déductive de l'étude, la méthodologie de prédiction choisie, la procédure d'évaluation, les méthodes d'analyse et l'outil web.

5.2.1 Nature déductive et définitions ambiguës

La nature purement déductive de l'étude limite fortement la capacité de l'auteur à statuer sur la vraie quantité de stationnements. Il est intéressant de noter que la littérature en transport ne semble pas avoir exploré une approche par enquête pour cette tâche malgré une forte culture d'enquête pour la récolte de données sur les comportements de transport. L'auteur suspecte que cela provient d'un biais de la communauté sur la disponibilité d'autres caractéris-

tiques des systèmes de transport qui sont complètement cartographiées (réseaux ferroviaires, routes, TC, etc.). Une estimation partielle, mais fondée sur une base d'enquête robuste, vaut-elle plus qu'une estimation exhaustive, mais truffée d'hypothèses ? Est-ce qu'une telle estimation est utile à la pratique dans des processus consommateurs de la donnée ? Cet auteur n'a pas la réponse et beaucoup de travail demeure pour démêler ces enjeux. L'ambiguïté visuelle et structurelle du stationnement hors rue n'aide pas la chose et la mise en place d'une définition claire, consensuelle et utile à la pratique devrait être une priorité à cet égard.

5.2.2 Limitations de la méthodologie de prédiction

Six limites principales ont été identifiées avec la méthode de prédiction montrée dans cette étude. Elles sont listées en ordre d'importance :

1. Minimums contre construits : la faiblesse centrale du modèle provient de sa dépendance sur l'hypothèse que le stationnement minimum requis par la réglementation est un bon prédicteur de la quantité de stationnements construite. Il est difficile à l'heure actuelle de statuer sur le potentiel futur de cette méthode, mais l'évaluation faite dans le cadre de ce mémoire laisse croire qu'il sera difficile de s'y fier sans investir beaucoup plus de temps pour assurer que les quantités sont sensées particulièrement dans les secteurs où la compétition pour l'espace est faible (F. Li & Guo, 2014)
2. Données nécessaires : Contrairement aux méthodes basées sur l'orthophotographie (Hellekes et al., 2023 ; Qiam et al., 2025), la méthode proposée nécessite d'avoir des données spécialisées exhaustives. L'absence de données pour une proportion importante des propriétés dans les catégories de service et commerciales qui contribuent fortement au nombre total de places est donc une importante limite de la méthode. Selon les distributions montrées dans la section sur les données foncières, les propriétés avec des données manquantes tendent à avoir une valeur au rôle plus élevée et il y a donc un potentiel pour un nombre élevé de places non comptabilisées (cf. Figures 3.12 à 3.20).
3. Conversion d'unités : l'évaluation des prédictions du modèle a montré que la conversion d'unités est une importante source d'erreurs. Cela est dû au fait que relativement peu d'attention a été donnée aux facteurs de conversions. Ces derniers ont été fixés par heuristique et n'ont jamais été réexaminés. D'autre part, bien que le but initial était de pouvoir fixer des facteurs de conversion différents par utilisation du sol, le temps a manqué pour mettre en place cette partie du modèle.
4. Recensement des règlements : L'effort requis pour obtenir des prédictions demeure conséquent, particulièrement la recherche d'archives pour trouver les règlements. D'autre part, cette recherche peut toujours créer une situation où la formulation d'un règle-

ment n'est pas possible avec la structure de base de données. En ce sens, l'outil sera en constant développement tant qu'une masse critique de formulations n'a pas été atteinte.

5. Fragilité de la formulation des règlements : La formulation actuelle des règlements avec les opérateurs, les seuils et la formule mathématique du règlement dans la même table est extrêmement sensible à l'ordre dans lequel les données sont rentrées et l'auteur n'a pas eu le temps de rendre la procédure de calcul plus robuste. D'autre part, il serait pertinent de permettre de désactiver l'utilisation d'unités converties si une formulation alternative existe. Par exemple, si le règlement spécifie une formulation par sièges et une formulation par mètre carré, la formulation par sièges pourrait potentiellement être ignorée.
6. Généralisation de l'association du cadastre au rôle : l'association spatiale du cadastre avec le rôle est nécessaire lorsque les entrées du rôle sont affectées à un même lot. L'absence de prise en compte du fait qu'une entrée du rôle peut concerner plusieurs lots cadastraux est problématique.

5.2.3 Limitations de la procédure d'évaluation

Les limitations suivantes sont identifiées pour la procédure d'évaluation. Les trois derniers ont le point commun d'être reliés à la meilleure manière de communiquer les incertitudes entourant les prédictions.

1. Formulation des catégories : la formulation récursive des catégories a été mise en place pour réduire la quantité de tables requises pour compiler les catégories et réduire les risques de chevauchement entre les catégories. Cette approche mériterait d'être revue et diverses formulations proposées avec avantages et inconvénients
2. Évaluation spatiale du modèle : une importante limitation provient du manque de capacité pour faire des catégories de validation différenciées dans l'espace. L'inclusion de la distance au parlement permet de faire un diagnostic, mais n'est pas très discriminante.
3. Méthode de sélection de l'échantillon : un autre enjeu entoure la sélection d'un échantillon de validation. La sélection actuelle se fie à un nombre pseudoaléatoire généré à partir de l'identifiant pour les mêmes lots à chaque sélection. Cela rend difficile la création de nouveaux échantillons ce qui serait souhaitable à terme si l'on veut faire des audits périodiques
4. Autoamorçage : l'approche par autoamorçage a le mérite d'éviter des hypothèses qui ne tiennent pas pour l'échantillon (notamment sur la distribution), mais une revue de fond sur le meilleur moyen de communiquer l'univers possible d'erreurs du modèle est nécessaire

5. Métrique d'erreur : l'élément précédent nous mène au choix de la métrique d'erreur. L'erreur absolue moyenne et l'erreur moyenne ont été choisies pour leur simplicité d'interprétation, mais elles manquent complètement la variation de l'erreur selon l'échelle de la prédiction.
6. Analyse des résidus : aucune modélisation formelle des résidus n'a été mise en place limitant la qualité des observations dans la section 4.3

5.2.4 Limitations de l'analyse

Cinq défauts majeurs dans la méthodologie d'analyse sont donnés ci-dessous. Dans l'ensemble, elles doivent leur présence à la nature prospective de l'étude. En

1. Sous-estimation de la consommation d'espace : la formulation actuelle de l'indicateur de consommation d'espace sous-estime cette dernière. En réalité les plus grands stationnements requièrent des voies d'accès et l'aménagement d'espaces verts qui consomment encore plus d'espace. D'autre part, les requis municipaux requièrent aussi des voies de déchargement de camion sur certaines propriétés commerciales qui vont modeler le transport de marchandises. Ces espaces peuvent d'autre part être utilisés comme stationnement pour voiture compliquant encore l'évaluation.
2. Limitations d'une analyse agrégée : l'analyse actuelle a entièrement évacué toute approche désagrégée. Idéalement, on pourrait statuer sur la compétition pour le stationnement sur chaque déplacement de l'enquête OD, estimant le nombre de véhicules dans la zone avoisinante et estimant un temps de recherche ou une mesure proxy pour comprendre l'impact de restrictions sur la capacité de manière plus fine.
3. Agrégation trop grossière : même dans un contexte où l'on fait de l'analyse agrégée, le niveau d'agrégation actuel rend difficile le diagnostic de la prédiction. L'outil devrait permettre d'intégrer différents niveaux d'agrégation
4. Agrégation des utilisations pour le stationnement inutilisé : l'analyse actuelle met en commun l'ensemble des places de stationnement dans un quartier sans distinction pour les droits d'accès. Sachant que les lieux de résidences se vident pendant la journée, mais demeurent en accès exclusif aux propriétaires, la métrique telle qu'implémentée est d'une utilité limitée. A minima, une différentiation entre le stationnement public et le stationnement résidentiel est requise.
5. Analyse de variabilité : L'analyse de variabilité souffre d'un manque de développement. Encore une fois le manque d'outils d'analyse désagrégée des résultats rend le diagnostic difficile. Plus de méthodes de visualisation sont requises.

5.2.5 Limitations de l'outil web développé

Onze limitations liées à l'outil et à la formulation actuelle du projet sont identifiées. Le plan initial était d'inclure une plus grande quantité de méthodes. Au final, les enjeux de l'outil sont très similaires aux enjeux liés à la gestion du stationnement c'est-à-dire une fragmentation des responsabilités, des acteurs et des typologies de stationnement.

1. Variabilité temporelle : pour comprendre l'impact du stationnement sur la mobilité des personnes, il serait souhaitable de pouvoir représenter la variation de l'offre de stationnement dans le temps. Ainsi, on pourrait identifier des typologies de déplacements et comprendre l'effet de l'offre de stationnement sur différents déplacements et inférer la causalité (Deschaintres et al., 2021).
2. Scénarios et affinement des prédictions : La structure de la base de données et les diverses fonctions ne permettent pas de comparer systématiquement l'impact d'un changement de règlement sur la capacité de stationnement. Par exemple, il aurait été intéressant de spécifier des alternatives au scénario actuel où les règlements de stationnement des années '90 sont reproduits pour tous les bâtiments avant cette date. Idéalement, il serait possible de créer différents scénarios et observer les deltas entre les différentes implémentations et de pouvoir choisir un scénario central en fonction de la performance à la validation. Cette remarque tient aussi pour des scénarios prospectifs. Une fois un scénario établi, l'outil ne permet actuellement pas de faire de prospective sur l'effet de la construction de nouveaux stationnements sur le parc de stationnement.
3. Visualisations alternatives des prédictions : une des leçons apprises lors de l'évaluation du modèle est que la visualisation désagrégée des prédictions et la possibilité de faire des graphiques de la prédiction de la capacité de stationnement en fonction de diverses variables d'intérêt permettrait de plus facilement trouver les données aberrantes. L'outil cartographique implémenté est intéressant, mais n'est pas très efficace pour chercher des problèmes et une approche hybride entre la cartographie et les graphiques aurait été préférable. D'autre part, la navigation à un lieu dans la ville demeure ardue. Il est à l'heure actuelle nécessaire de sélectionner un quartier pour voir l'inventaire. Cela mène à beaucoup de cas où l'on doit alterner entre une recherche visuelle dans l'analyse cartographique agrégée et la section d'inventaire. Une échelle d'agrégation intermédiaire serait aussi bénéfique pour identifier des lieux où l'on prédit beaucoup de stationnements.
4. Navigation des liens de la prédiction : la navigation de la prédiction aux ensembles de règlements et à la définition des règlements demeure ardue. Le travail à cet égard est partiellement fait puisque l'ajout d'un paramètre dans l'URL permet de naviguer à un

règlement ou un ensemble de règlements précis, mais cela n'a pas encore été implémenté dans la page d'inventaire. L'outil devrait permettre de visualiser un règlement puis de retourner rapide à l'inventaire sans avoir à se replacer.

5. Réutilisation de composantes : l'implémentation actuelle est complexe avec des composantes spécifiques pour chaque page et certaines fonctions qui se répètent. Cela est dû au processus d'empilement des fonctions qui a eu lieu au fil de la recherche. Un élagage des fonctions et une combinaison des composantes qui peuvent être réutilisées faciliteraient la mise à jour et la maintenance du code. Un arbitrage entre ce que doit faire le serveur, le serveur Python et le client serait aussi bénéfique. Ce processus d'élagage serait aussi bénéfique pour la base de données. Les tables de l'inventaire, de l'analyse de variabilité et d'intrants de validation reprennent beaucoup d'information commune. L'état actuel des choses est le résultat d'empilement de fonctionnalité plutôt qu'une formulation claire des besoins en données de chaque processus.
6. Lenteur d'exécution : Certaines fonctionnalités de calculs sont aussi lentes. L'implémentation actuelle ne permet pas de lancer les calculs et de continuer sur d'autres tâches, rendant l'expérience utilisateur frustrante par moments. Ce constat est particulièrement fort pour les requêtes spatiales et l'intervention de scripts Python. Cela est en partie lié au point précédent où certaines requêtes à la base de données sont parfois répétées par différentes composantes.
7. Méthodes alternatives et stationnement sur rue : l'outil devrait intégrer les méthodes de Bourdeau développées pour le stationnement sur rue (Bourdeau, 2014 ; Morency et al., 2022). Cela permettrait de mieux évaluer les interactions entre ces deux types de stationnement. Dans un monde idéal, un processus d'évaluation similaire à celui implémenté permettrait de quantifier l'erreur des deux modèles. L'implémentation d'autres modèles d'estimation ou d'inférence du modèle avec des propriétés complémentaires à l'inventaire réglementaire permettrait de créer une boîte à outils adaptée à différents contextes et différentes parties prenantes.
8. Intégration de données et interopérabilité : L'outil émet des prédictions dans un format dédié à l'heure actuelle et l'auteur a manqué de temps pour permettre l'extraction des données en formats standards (CSV, etc.). Cela s'applique aussi aux données géospatiales qu'il n'est pas possible de rapidement transférer vers OSM ou les autres standards de données énumérés à la section 2.5.
9. Tarification : La tarification des places n'est pas incluse dans l'outil et demeure un angle mort dans les données développées. La structure de données requise pour pleinement représenter la tarification est particulièrement complexe dans la norme 5206-1 (Organisation internationale de normalisation, 2023).

10. Visualisation des règlements : La méthode actuelle de visualisation des règlements est limitée aux 9 grands CUBF et aux règlements avec une seule unité. Idéalement, on pourrait comparer pour tous les CUBF et comparer différentes unités. L'intégration de propriétés typiques dans l'analyse serait aussi pertinente pour comparer des formulations.
11. Accès différencié et sécurité des données : l'outil ne contrôle absolument pas l'accès aux données. Cela limite la possibilité d'exposer les prédictions au grand public ou à des analystes tiers. L'implémentation de procédure d'identification et la hiérarchisation des accès devraient être considérées avant tout déploiement.

5.3 Améliorations futures

Des recommandations seront émises selon la même structure que les limitations énoncées précédemment.

5.3.1 Développement d'une procédure inductive pour estimer la capacité

Une approche de mesure basée enquête devrait être développée pour donner une estimation fiable de la capacité de stationnement incluant toutes les typologies. Les méthodes par apprentissage profond pourraient être complémentaires, mais sont d'une utilité limitée pour les quartiers centraux où les données de stationnement seront le plus utiles. Une approche sur base d'échantillonnage spatial systématique semble comme le moyen le plus efficace de récolter la donnée (Perret et al., 2022). Des approches de modèles et d'estimation des petites aires (Ghosh & Rao, 1994 ; Särndal et al., 2003) pourraient être intéressantes pour réduire le fardeau et avoir une meilleure discrimination spatiale (Brus, 2023).

5.3.2 Amélioration de la méthode de prédiction

Les améliorations suivantes sont suggérées pour l'amélioration des prédictions :

1. Facteurs de conversion : la priorité pour améliorer les prédictions devrait être de rendre les conversions d'unités plus représentatives. La table multiplication_facteurs_colonnes devrait être scindée en trois tables. La première contiendrait l'identifiant d'unité et la description. La deuxième serait une table de formulations décrivant la colonne du rôle à utiliser et la formulation mathématique à utiliser. La troisième mettrait en place une association entre les CUBF et les formulations de conversion. Comme pour les ensembles de règlements, la formulation en arbre des CUBF pourrait être exploitée pour ne pas avoir à énumérer l'ensemble des CUBF pertinents. Cette formulation devrait être

associée avec un module qui permet de chercher les lots par CUBF, puis de formuler un modèle de régression adéquat par catégorie d'usages. À terme, les régressions pourraient être prédéfinies, mais un utilitaire pour les modifier demeurera utile pour une nouvelle application ou un nouveau contexte (imaginons par un stade sportif pour un sport qui n'a pas encore été observé dans un autre pays).

2. Amélioration de la robustesse de la formulation des règlements : le modèle actuel de règlement est très fragile et mal normalisé. La compilation des sous-ensembles, des seuils et des formulations en une seule table rend l'extraction de données peu robuste. La solution ici devrait être encore une fois de scinder la table reg_stationnement_empile en plusieurs parties. Cette approche rend la base de données plus complexe, mais plus robuste. La figure 5.1 donne une proposition alternative qui permet une formulation plus robuste (et plus complexe).
3. Redressement des prédictions : Une fois la validation complétée, un modèle de correction pourrait être implémenté en utilisant des méthodes bayésiennes avec la catégorie de validation et la prédiction réglementaire comme antécédent pour définir une distribution de probabilité pour les valeurs plausibles de stationnement sur un lot. Il s'agirait ici encore d'une prédiction et sujette au fait qu'il ne s'agit pas d'une mesure directe.
4. Numérisation automatique des règlements : des chercheurs ont commencé à développer des méthodes pour numériser plus rapidement des requis d'urbanisme en utilisant des méthodes d'apprentissage profond (Axelrod et al., 2023). Un transfert de ces méthodes pour identifier plus rapidement les requis de stationnement rendrait la tâche beaucoup plus digeste.

5.3.3 Améliorations aux procédures d'évaluation

Les améliorations suivantes sont suggérées pour la procédure d'évaluation du modèle

1. Structure des catégories : la structure de données récursive apparaît en premier lieu élégante, mais est plus complexe à gérer. Le désir de contenir l'implémentation à une seule table a mené à des compromis. Plus d'effort devrait être mis dans la formulation des besoins pour l'élaboration de ces catégories pour déterminer la structure de données à implémenter
2. Évaluation des lots sans catégorie : la méthode actuelle ne crée pas automatiquement de catégorie pour les lots non affectés à une catégorie. Cela limite nécessairement l'exhaustivité de la validation. Le choix automatique d'un échantillon autre serait une première étape pour déterminer les enjeux entourant ces lots
3. Métrique d'évaluation : les métriques d'erreur absolue moyenne, d'erreur moyenne et

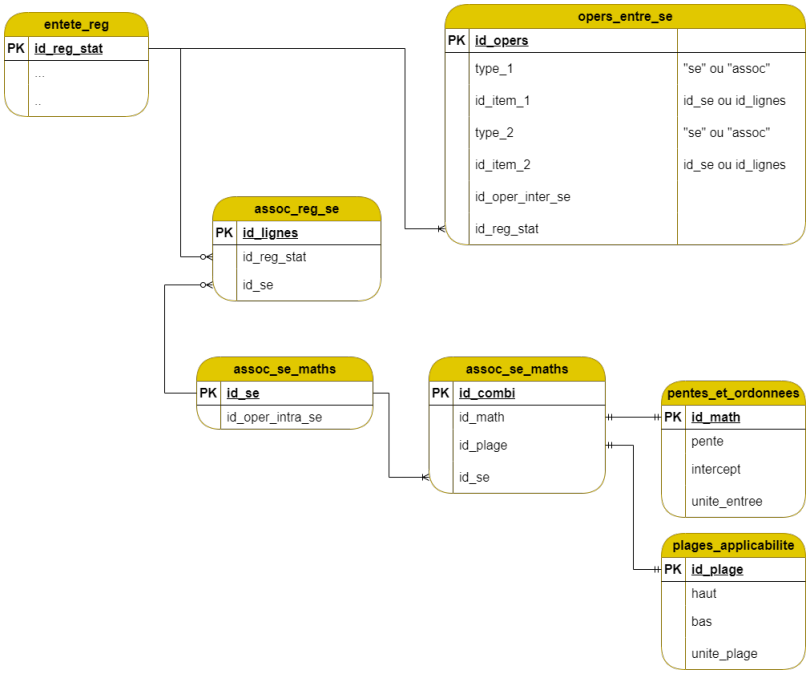


FIGURE 5.1 Proposition alternative de diagramme entité association pour les règlements

de racine de la moyenne quadratique ont toutes été choisies pour leur simplicité sans vraiment poser la question si elles étaient les bonnes métriques. Une revue systématique des métriques utilisées pour communiquer l'erreur de modèles de prédictions pour des tâches de dénombrement (biologie, infrastructures, recensements) serait avisée. La formulation d'un GLM sur les valeurs observées en fonction de valeur prédite serait un moyen de capturer l'erreur en fonction de l'échelle, mais présente des enjeux d'interprétation.

4. Détermination d'une taille d'effet d'intérêt : l'approche par équivalence semble être le cadre statistique le plus robuste pour l'évaluation du modèle. Un travail en amont pour savoir l'écart maximal que peut tolérer une analyse de choix modal ou de motorisation permettrait de déterminer la viabilité de méthodes d'estimation de la capacité de stationnement
5. Quantification de l'incertitude : l'approche par autoamorçage a tenté de quantifier à quel point les métriques d'erreurs sont sensibles à l'échantillon. Cependant, une revue plus systématique de quantification de l'incertitude des prédictions dans un cadre déductif devrait être entreprise pour structurer l'évaluation sur des fondations statistiques et méthodologiques plus solides que celles de cette étude
6. Utilisation de noyau aléatoire : la mise en place d'un noyau aléatoire qui peut être choisi

ou renouvelé pour générer l'échantillon d'évaluation permettrait de mieux équilibrer la répétabilité de l'échantillon à court terme contre pour éviter de perdre du travail accompli avec le besoin de changer l'échantillon pour des audits périodiques.

5.3.4 Améliorations à apporter à l'outil

Les améliorations suivantes sont suggérées pour l'outil :

1. Intégration des méthodes sur rue : l'intégration des méthodes de prédictions et la visualisation des prédictions sur rue semblent comme une prochaine étape logique pour démocratiser les connaissances en stationnement.
2. Jointure et boucles : la méthode de calcul actuelle est très dépendante de boucles imbriquées. Une grande partie de ce travail pourrait être fait par jointure, accélérant substantiellement le calcul et donc l'application. L'intégration de ces jointures de manière automatique dans Postgres à l'aide de fonction automatique déclenchées lors de la modification de tables serait un bon moyen de réduire les temps d'attente
3. Ménage des composantes, des adresses et des tables : une revue de fond sur les points communs des composantes (cartes, graphiques) permettrait de consolider une grande partie de l'interface et de faire des efforts plus concertés pour accélérer l'exécution. Il y a aussi de la duplication dans les définitions d'API qui pourrait être gérés à l'aide de paramètres plutôt que des adresses complètement différentes. L'inclusion de variables de format permettrait par exemple que la gestion des graphiques se fasse simplement avec un paramètre de requêtes plutôt qu'une adresse séparée. Finalement, il y a à l'heure actuelle une duplication des requêtes SQL entre le serveur et les scripts Python. Une approche où toutes les interactions sont gérées par Typescript et envoyées aux scripts éviterait la duplication de fonctions
4. Amélioration de la navigation de l'inventaire : des outils de sélection plus fins, ainsi que le chargement dynamique de la cartographie en fonction du niveau de zoom et la localisation sur la carte aiderait beaucoup à fluidifier l'expérience. L'ajout de l'identifiant de lot à l'URL pour pouvoir naviguer entre les pages et revenir au même lot rapidement rendrait l'expérience beaucoup plus fluide. La recherche d'adresse serait aussi un atout majeur pour corriger des lieux au besoin sans avoir à errer sur la carte. Finalement, l'intégration de visualisations alternatives (graphiques XY, distributions) et la possibilité de sélectionner ces items et les corriger rapidement aideraient à plus rapidement cerner les enjeux.
5. Intégration de méthodes de segmentation d'images : comme la méthode par les règlements, les méthodes d'apprentissage profond requièrent des outils spécialisés. L'intégra-

tion de tels outils directement dans le site web permettraient de les démocratiser pour des plus petites municipalités et éviterait la duplication de travail par les municipalités

6. Connecteurs et interopérabilité : l'ajout d'une connexion à OSM et la capacité de traduire les formats discutés à la section 2.5 serait un ajout intéressant. Dans le cas d'OSM, la capacité d'extraire automatiquement des capacités et des formes de stationnement et de les introduire dans OSM pour les grands stationnements améliorerait la qualité des données sur OSM. La comparaison de la cartographie en place avec l'estimé développé pourrait être un point intéressant ou une donnée supplémentaire à utiliser comme bras de levier pour améliorer les prédictions. Par exemple, la couverture du lot par les bâtiments pourrait être utilisée comme prédicteur pour la présence de stationnement souterrain, ou l'improbabilité d'une estimation dans certains secteurs.
7. Interface de création de données ISO5206 : Le format de données ISO5206-1 permet de pleinement modéliser la tarification, mais est extrêmement lourd. La création d'une interface permettant à un analyste de recenser la tarification des garages privés et de l'affecter à un lot sur le territoire ou aux opérateurs de fournir des fichiers dédiés comme c'est le cas pour GTFS par exemple serait un moyen d'améliorer les connaissances sur la tarification en plus de la quantité de stationnements.

Beaucoup de travail demeure pour pleinement intégrer les effets du stationnement sur la mobilité des personnes et améliorer les processus de décisions les entourant. L'état des lieux du parc actuel demeure un enjeu de taille et n'est qu'un prélude à la construction d'autres outils d'aide à la décision pour les municipalités.

RÉFÉRENCES

Agard, B. (2024). IND6212 - Valorisation de données industrielles - Introduction.

Aignel, R., Touchette-Lacasse, A., Mouhyi, B., Tapp, B., Gagnon, C., et Dionne, L. (2015). *Élaboration de la politique de stationnement. Portrait, diagnostic et assistance à la rédaction de la politique* (rapp. tech. N° 60334977). AECOM. Montréal.

Akbari, H., Shea Rose, L., et Taha, H. (2003). Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape and Urban Planning*, *63*(1), 1-14. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00165-2

Albalate, D., et Gragera, A. (2018). Misinformation and Misperception in the market for parking. *IREA Working Papers*. Récupérée juillet 14, 2025, à partir de https://ideas.repec.org//p/ira/wpaper/201812.html

Alliance for Parking Data Standards. (2017a, septembre). About Us - Alliance for Parking Data Standards. Récupérée juillet 15, 2025, à partir de https://allianceforparkingdatastandards.org/about-us/

Alliance for Parking Data Standards. (2017b, septembre). FAQ - Alliance for Parking Data Standards. Récupérée juillet 15, 2025, à partir de https://allianceforparkingdatastandards.org/faq/

Alliance for Parking Data Standards. (2020). API Specification for APDS. Récupérée juillet 15, 2025, à partir de https://github.com/parkingdata/spec/tree/master

Amato, G., Carrara, F., Falchi, F., Gennaro, C., Meghini, C., et Vairo, C. (2017). Deep learning for decentralized parking lot occupancy detection. *Expert Systems with Applications*, *72*, 327-334. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.055

Anderson, S. P., et de Palma, A. (2004). The economics of pricing parking. *Journal of Urban Economics*, *55*(1), 1-20. https://doi.org/10.1016/j.jue.2003.06.004

Andersson, M., Mandell, S., Thörn, H. B., et Gomér, Y. (2016). The effect of minimum parking requirements on the housing stock. *Transport Policy*, *49*, 206-215. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.05.005

Anik, A. A., Xavier, B. A., Hansmann, J., Ansong, E., Chen, J., Zhao, L., et Michals, E. (2020). Accuracy and Reproducibility of Linear and Angular Measurements in Virtual Reality : a Validation Study. *Journal of Digital Imaging*, *33*(Compendex), 111-120. https://doi.org/10.1007/s10278-019-00259-3

Arcadis. (2025). CurbIQ - Digital Solutions for Curbside Management. Récupérée août 2, 2025, à partir de https://www.curbiq.io

Ardilly, P. (2006). *Les techniques de sondage* (Nouv. éd. actualisée et augm.). Paris : Technip, 2006.

Arnold Jr., C. L., et Gibbons, C. J. (1996). Impervious Surface Coverage : The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, *62*(2), 243-258. https://doi.org/10.1080/01944369608975688

Arnott, R. (2006). Spatial competition between parking garages and downtown parking policy. *Transport Policy*, *13*(6), 458-469. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.05.003

Arnott, R., et Inci, E. (2006). An integrated model of downtown parking and traffic congestion. *Journal of Urban Economics*, *60*(3), 418-442. https://doi.org/10.1016/j.jue.2006.04.004

Arnott, R., et Inci, E. (2010). The stability of downtown parking and traffic congestion. *Journal of Urban Economics*, *68*(3), 260-276. https://doi.org/10.1016/j.jue.2010.05.001

Arnott, R., et Rowse, J. (2009). Downtown parking in auto city. *Regional Science and Urban Economics*, *39*(1), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.08.001

Arrondissement Côte-des-Neiges, Ville de Montréal. (2020). Règlement RCA20 17336 modifiant le Règlement d'urbanisme de l'arrondissement de Côte-des-Neiges - Notre-Dame-de-Grâce (01-276) et le Règlement d'urbanisme d'une partie de l'arrondissement Mont-Royal (01-281) afin de favoriser la mobilité durable et le verdissement. Récupérée février 3, 2025, à partir de https://montreal.ca/reglements-municipaux/recherche/60d7f287fd653152ba5a6a91

Arrondissement Plateau Mont-Royal, Ville de Montréal. (2015). Règlement modifiant le Règlement d'urbanisme du Plateau-Mont-Royal (01-277) relatif au verdissement et au développement durable (RCA PMR 01-277-75). Récupérée février 3, 2025, à partir de https://montreal.ca/reglements-municipaux/recherche/60d7dc10fd6531dc5c5a0a01

Arrondissement Sud-Ouest, Ville de Montréal. (2020). Règlement modifiant le Règlement d'urbanisme de l'arrondissement du Sud-Ouest (01-280) pour une transition écologique (01-280-57). Récupérée février 3, 2025, à partir de https://montreal.ca/reglements-municipaux/recherche/60d7f187fd6531a59d5a65ed

Arrondissement Ville-Marie, Ville de Montréal. (2018). Règlement modifiant le Règlement d'urbanisme (01-282), le Règlement sur les dérogations mineures (CA-24-008) et le Règlement certificats d'autorisation d'occupation (CA-24-224) - mobilité durable. Récupérée février 3, 2025, à partir de https://montreal.ca/reglements-municipaux/recherche/60d7ea71fd653105775a4784

Au, G., et Young, W. (2016). A users' perspective of paid parking at a local retail precinct. *38th Australasian Transport Research Forum, ATRF 2016, November 16, 2016 - November 18, 2016*.

Axelrod, J., Lo, L., et Bronin, S. C. (2023). *Automating Zoning Data Collection* (rapp. tech.). Urban Institute. Washington, D.C.

Ayerst, J. (2017). react-chartjs-2 | react-chartjs-2. Récupérée août 8, 2025, à partir de https://react-chartjs-2.js.org/

Azimi, S. M., Henry, C., Sommer, L., Schumann, A., et Vig, E. (2019). SkyScapes Fine-Grained Semantic Understanding of Aerial Scenes, 7392-7402. https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00749

Benenson, I., Martens, K., et Birfir, S. (2008). PARKAGENT : An agent-based model of parking in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, *32*(6), 431-439. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.011

Bianco, M. J., Stratham, J. G., et Dueker, K. J. (1998). *Strategies to Attract Auto Users to Public Transportation* (rapp. tech.). Transportation Research Board. Washington, D.C. Récupérée juillet 13, 2025, à partir de https://www.trb.org/Publications/Blurbs/153846.aspx

Biswal, B. K., Bolan, N., Zhu, Y.-G., et Balasubramanian, R. (2022). Nature-based Systems (NbS) for mitigation of stormwater and air pollution in urban areas : A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *186*, 106578. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106578

Blais, P. a. (2024). *Perverse cities : hidden subsidies, wonky policy, and urban sprawl*. Vancouver : UBC Press, [2010].

Blanc, B. R., Gangi, M., Atkinson-Palombo, C., McCahill, C., et Garrick, N. W. (2014). Effects of urban fabric changes on real estate property tax revenue : Evidence from six American cities. *Transportation Research Record*, *2453*, 145-152. https://doi.org/10.3141/2453-18

Bourdeau, J.-S. (2014, août). *Méthodologie d'analyse automatisée des stationnements* [Maitrise]. École Polytechnique de Montréal. Récupérée mars 19, 2024, à partir de https://publications.polymtl.ca/1529/

Bouzouidja, R., Leconte, F., Kiss, M., Pierret, M., Pruvot, C., Detriche, S., Louvel, B., Bertout, J., Aketouane, Z., Wu, T. V., Goiffon, R., Colin, B., Petrissans, A., Lagiere, P., et Petrissans, M. (2021). Experimental comparative study between conventional and green parking lots : Analysis of subsurface thermal behavior under warm and dry summer conditions. *Atmosphere*, *12*(Compendex). https://doi.org/10.3390/atmos12080994

Breiman, L. (2001). Statistical Modeling : The Two Cultures. *Statistical Science*, *16*(3), 199-215. Récupérée novembre 15, 2025, à partir de https://www.jstor.org/stable/2676681

Bronin, S. C., Markley, S., Fader, A., et Derickson, E. (2023, juin). How to Make a Zoning Atlas 2.0 : The Official Methodology of the National Zoning Atlas. https://doi.org/10.2139/ssrn.4476927

Brus, D. J. (2023). *Spatial sampling with R*. Récupérée novembre 17, 2025, à partir de https://dickbrus.github.io/SpatialSamplingwithR/

Button, K. (2006). The political economy of parking charges in "first" and "second-best" worlds. *Transport Policy*, *13*(6), 470-478. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.05.004

Buyantuyev, A., et Wu, J. (2010). Urban heat islands and landscape heterogeneity : linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, *25*(1), 17-33. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9402-4

Calthrop, E., et Proost, S. (2006). Regulating on-street parking. *Regional Science and Urban Economics*, *36*(1), 29-48. https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2005.04.002

Cameron, A. C., et Trivedi, P. K. (1998). *Regression analysis of count data*. Cambridge University Press. Récupérée septembre 30, 2025, à partir de https://doi.org/10.1017/CBO9780511814365

Castillo-Páez, S., Fernández-Casal, R., et García-Soidán, P. (2019). A nonparametric bootstrap method for spatial data. *Computational Statistics & Data Analysis*, *137*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.csda.2019.01.017

Celik, A. K., Kabaku, N., et Tortum, A. (2023). Influential Factors of Household Car and Vehicle Ownership in Urban Areas of Turkey. *Transportation Research Record*, *2677*(Compendex), 218-240. https://doi.org/10.1177/03611981221145138

Charbonneau, P. (2025a, octobre). EPMPaulPoly/interface_backend_stationnement_maitrise. Récupérée novembre 3, 2025, à partir de https://github.com/EPMPaulPoly/interface_backend_stationnement_maitrise

Charbonneau, P. (2025b, novembre). EPMPaulPoly/error_propagation. Récupérée novembre 3, 2025, à partir de https://github.com/EPMPaulPoly/error_propagation

Charbonneau, P. (2025c, novembre). EPMPaulPoly/graphiques_memoire. Récupérée novembre 7, 2025, à partir de https://github.com/EPMPaulPoly/graphiques_memoire

Chatman, D. G. (2013). Does TOD Need the T ? : On the Importance of Factors Other Than Rail Access. *Journal of the American Planning Association*, *79*(1), 17-31. https://doi.org/10.1080/01944363.2013.791008

Chatman, D. G., et Manville, M. (2014). Theory versus implementation in congestion-priced parking : An evaluation of SFpark, 2011–2012. *Research in Transportation Economics*, *44*, 52-60. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.04.005

Chernenko, M. (2024). *Full Stack Web Development : Mastering Web Development from Client to Server-Side Technologies*. Packt Publishing, Limited. Récupérée mars 3, 2025, à partir de http://ebookcentral.proquest.com/lib/polymtl-ebooks/detail.action?docID=31682744

Chester, M., Fraser, A., Matute, J., Flower, C., et Pendyala, R. (2015). Parking Infrastructure : A Constraint on or Opportunity for Urban Redevelopment ? A Study of Los Angeles County Parking Supply and Growth. *Journal of the American Planning Association*, *81*(4), 268-286. Récupérée avril 30, 2024, à partir de https://ideas.repec.org//a/taf/rjpaxx/v81y2015i4p268-286.html

Chester, M., Helmrish, A., et Li, R. (2022, février). *Inventorying San Francisco Bay Area Parking Spaces : Technical Report Describing Objectives, Methods, and Results* (rapp. tech.). Récupérée mars 11, 2024, à partir de https://transweb.sjsu.edu/research/2123-Bay-Area-Parking-Inventory

Christiansen, P., Engebretsen, Ø., Fearnley, N., et Usterud Hanssen, J. (2017). Parking facilities and the built environment : Impacts on travel behaviour. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *95*, 198-206. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.025

Christiansen, P., Fearnley, N., Hanssen, J. U., et Skollerud, K. (2017). Household parking facilities : relationship to travel behaviour and car ownership. *Transportation Research Procedia*, *25*, 4185-4195. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.366

Chun, B., et Guldmann, J.-M. (2018). Impact of greening on the urban heat island : Seasonal variations and mitigation strategies. *Computers, Environment and Urban Systems*, *71*(Compendex), 165-176. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.05.006

Cochran, W. G. (1963). *Sampling techniques* (2nd e). J. Wiley.

Cohon, J. L., Green, G. M., Byrd, L. G., Eberts, R. W., Ellis, H., Glaser, H. T., Humplick, F., Johnson, E. L., Neumann, L. A., Ngo, V., Rodriguez, S., Rowe, G., Rubin, K. I., et Zandi, I. (1996, janvier). *Measuring and Improving Infrastructure Performance*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/4929

Consortium CIMA+ - Daniel Arbour et associés. (1998). *Inventaire des espaces de stationnement dans la grande région de Montréal - Rapport Final* (rapp. tech.). Montréal.

Cote, J.-N., Levac, E., Germain, M., et Lavigne, E. (2024). Projected risk and vulnerability to heat waves for Montreal, Quebec, using Gaussian processes. *Sustainable Cities and Society*, *116*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105907

Cudney, G. (2017). Parking Structure Cost Outlook for 2017.

Cumming, G. (2012). *Understanding the new statistics : effect sizes, confidence intervals, and meta-analysis*. New York : Routledge, Taylor & Francis Group, [2012]. Récupérée septembre 29, 2025, à partir de https://US2KV5PK3N.search.serialssolutions.com/?V=1.0&L=US2KV5PK3N&S=JCs&C=TC0000679475&T=marc&tab=BOOKS

Curran-Everett, D. (2013). Explorations in statistics : the analysis of ratios and normalized data. *Advances in Physiology Education*, *37*(3), 213-219. https://doi.org/10.1152/advan.00053.2013

Currans, K. M., Abou-Zeid, G., et Iroz-Elardo, N. (2021). Linking Residential Parking to Automobile Transportation Impact Outcomes at a Development Level. *Transportation Research Record*, *2675*(1), 321-331. https://doi.org/10.1177/0361198120964791

Currans, K. M., Abou-Zeid, G., McCahill, C., Iroz-Elardo, N., Clifton, K. J., Handy, S., et Pineda, I. (2023). Households with constrained off-street parking drive fewer miles. *Transportation*, *50*(6), 2227-2252. https://doi.org/10.1007/s11116-022-10306-8

Cutter, W. B., et Franco, S. F. (2012). Do parking requirements significantly increase the area dedicated to parking ? A test of the effect of parking requirements values in Los Angeles County. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *46*(6), 901-925. https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.012

Cutter IV, B., et DeWoody, A. (2010). Parking Externalities in Commercial Real Estate. *Real Estate Economics*, *38*(2), 197-223. https://doi.org/10.1111/j.1540-6229.2010.00265.x

Dain, A. (2005). *Residential Land-Use Regulation in Eastern Massachusetts* (rapp. tech.). Pioneer Institute for Public Policy research.

Dale, S., Frost, M., Ison, S., et Budd, L. (2019). The impact of the Nottingham Workplace Parking Levy on travel to work mode share. *Case Studies on Transport Policy*, *7*(Compendex), 749-760. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.09.001

Dale, S., Frost, M., Ison, S., Quddus, M., et Warren, M. P. (2017). Evaluating the impact of a workplace parking levy on local traffic congestion : The case of Nottingham UK. *Transport Policy*, *59*, 153-164. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.07.015

Davis, A. Y., Pijanowski, B. C., Robinson, K., et Engel, B. (2010). The environmental and economic costs of sprawling parking lots in the United States. *Land Use Policy*, *27*(2), 255-261. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.03.002

Davis, A. Y., Pijanowski, B. C., Robinson, K. D., et Kidwell, P. B. (2010). Estimating parking lot footprints in the Upper Great Lakes Region of the USA. *Landscape and Urban Planning*, *96*(2), 68-77. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.02.004

Davison, A. C., et Hinkley, D. V. (1999). *Bootstrap methods and their application* (Reprinted with corrections). Cambridge University Press. Récupérée octobre 29, 2025, à partir de https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=589159

de Almeida, P. R. L., Oliveira, L. S., Britto, A. S., Silva, E. J., et Koerich, A. L. (2015). PKLot – A robust dataset for parking lot classification. *Expert Systems with Applications*, *42*(11), 4937-4949. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.009

De Borger, B., et Russo, A. (2017). The political economy of pricing car access to downtown commercial districts. *Transportation Research Part B : Methodological*, *98*, 76-93. https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.012

De Gruyter, C., Truong, L. T., de Jong, G., et Foster, S. (2025). Determinants of zero-car and car-owning apartment households. *Transportation*, *52*, 1593-1620. https://doi.org/10.1007/s11116-024-10467-8

den Braver, N. R., Lakerveld, J., Gozdyra, P., van de Brug, T., Moin, J. S., Fazli, G. S., Rutters, F., Brug, J., Moineddin, R., Beulens, J. W., et Booth, G. L. (2022). Development of a neighborhood drivability index and its association with transportation behavior in Toronto. *Environment International*, *163*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107182

Department for Transport. (2022, mars). *Consultation on Reform of Traffic Regulation Orders* (rapp. tech.). London. Récupérée août 4, 2025, à partir de https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1059131/consultation-on-reform-of-traffic-regulation-orders.pdf

Department for Transport. (2025, juillet). Digital Traffic Regulation Orders Data Model User Guide. Récupérée août 4, 2025, à partir de https://department-for-transport-public.github.io/D-TRO/#tros-in-context

Deschaintres, E., Morency, C., et Trépanier, M. (2021). Measuring Changes in Multimodal Travel Behavior Resulting from Transport Supply Improvement. *Transportation Research Record*, *2675*(9), 533-546. https://doi.org/10.1177/03611981211003104

Deutsches Institut für Normung. (2022). *DIN CEN/TS 16157-6, Intelligent transport systems - DATEX II data exchange specifications for traffic management and information. Part 6, Parking publications* (English version CEN/TS 16157-6 :2022). Beuth Verlag GmbH.

Diallo, A., Bourdeau, J.-S., Morency, C., et Saunier, N. (2015). Methodology of parking analysis. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *42*(4), 281-285. https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0458

DiCiccio, T. J., et Efron, B. (1996). Bootstrap confidence intervals. *Statistical Science*, *11*(3), 189-228. https://doi.org/10.1214/ss/1032280214

Dolence, M. (2015). Using key performance indicators to drive strategic decision making. *New Directions for Institutional Research*. https://doi.org/10.1002/IR.37019948207

Donald Shoup. (2016). Introduction - Access Spring 2016. Récupérée avril 18, 2025, à partir de https://www.accessmagazine.org/fall-2016/introduction-12/undefined

Dudorova, N. V., et Belan, B. D. (2022). The Energy Model of Urban Heat Island. *Atmosphere*, *13*(3), 457. https://doi.org/10.3390/atmos13030457

Éditeur officiel du Québec. (1979). Loi sur l'urbanisme et l'aménagement. Récupérée juillet 14, 2025, à partir de https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/A-19.1

Efron, B. (1979). Bootstrap Methods : Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, *7*(1), 1-26. https://doi.org/10.1214/aos/1176344552

Élections Québec. (2021, février). Atlas historique des circonscriptions électorales du Québec. Récupérée juillet 25, 2024, à partir de https://www.electionsquebec.qc.ca/cartes-electorales/carte-electorale-du-quebec/atlas-historique-des-circonscriptions-electorales-du-quebec/

Eros, E., Webb, K., et Biggs, R. (2025, avril). CurbLR Specification. Récupérée juillet 15, 2025, à partir de https://github.com/curblr/curblr-spec

Ewing, R., et Cervero, R. (2010). Travel and the Built Environment : A Meta-Analysis. *Journal of the American Planning Association*, *76*(3), 265-294. https://doi.org/10.1080/01944361003766766

Ewing, R. H. (2008). Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl : A Literature Review. In J. M. Marzluff, E. Shulenberger, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, U. Simon et C. ZumBrunnen (Éd.), *Urban Ecology : An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature* (p. 519-535). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_34

Fabrique des Mobilités. (2021). FabmobQC/curblr. Récupérée juillet 21, 2025, à partir de https://github.com/FabmobQC/curblr

Fabrique des Mobilités. (2022a). Carte CurbLR de Montréal - Communauté de la Fabrique des Mobilités. Récupérée juillet 21, 2025, à partir de https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Carte_CurbLR_de_Montr%C3%A9al

Fabrique des Mobilités. (2022b). CurbLR Viewer. Récupérée juillet 21, 2025, à partir de https://stationnements-quebec-curblr.netlify.app/

Fielding, R. T. (2000). *Architectural styles and the design of network-based software architectures* [phd]. University of California, Irvine.

Flyvbjerg, B., et Gardner, D. (2023). *How big things get done : the surprising factors that determine the fate of every project, from home renovations to space exploration and everything in between*. Signal. Récupérée novembre 19, 2024, à partir de https://cap.banq.qc.ca/notice?id=p::usmarcdef_0006962052

Franco, S., Cutter, W., et Lewis, S. (2020). The Shadow Cost of Parking Minimums : Evidence from Los Angeles County. *Pomona Economics*. https://scholarship.claremont.edu/pomona_fac_econ/11

Gabbe, C. J., et Pierce, G. (2017). Hidden Costs and Deadweight Losses : Bundled Parking and Residential Rents in the Metropolitan United States. *Housing Policy Debate*, *27*(2), 217-229. https://doi.org/10.1080/10511482.2016.1205647

Gabbe, C. J., Pierce, G., et Clowers, G. (2020). Parking policy : The effects of residential minimum parking requirements in Seattle. *Land Use Policy*, *91*, 104053. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104053

Garrido-Jimenez, F. J., Magrinya, F., et del Moral-avila, M. C. (2018). Municipal operating costs and revenues in future developments as a function of urban planning variables. *Journal of Urban Planning and Development*, *144*(Compendex). https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000407

Geman, S., Bienenstock, E., et Doursat, R. (1992). Neural Networks and the Bias/Variance Dilemma. *Neural Computation*, *4*(1), 1-58. https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.1.1

Geopandas developers. (s. d.). geopandas.clip — GeoPandas 1.0.1+0.g747d66e.dirty documentation. Récupérée février 15, 2025, à partir de https://geopandas.org/en/stable/docs/reference/api/geopandas.clip.html

Ghosh, M., et Rao, J. N. K. (1994). Small Area Estimation : An Appraisal. *Statistical Science*, *9*(1), 55-76. https://doi.org/10.1214/ss/1177010647

Goodfellow, I., Bengio, Y., et Courville, A. (2016, novembre). *Deep Learning* (F. Bach, Éd.). MIT Press. Récupérée novembre 17, 2025, à partir de https://mitpress.mit.edu/9780262035613/deep-learning/

Goodman, C. B. (2019). The Fiscal Impacts of Urban Sprawl : Evidence From U.S. County Areas. *Public Budgeting & Finance*, *39*(4), 3-27. https://doi.org/10.1111/pbaf.12239

Goodman, S. (2015, juin). graphing parking. Récupérée novembre 8, 2025, à partir de https://graphingparking.com/

Gouvernement du Québec. (2022). *Les données du rôle d'évaluation foncière en format ouvert* (rapp. tech.). Bibliothèque et Archives nationales du Québec. Récupérée février 4, 2025, à partir de https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/061c8cb7-ca4e-45be-a990-61fce7e7d2dc/resource/6f2599be-e49d-4b9a-8702-b12ad0f56141/download/gui_donneesrolesformatouvert_vf20220627.pdf

Gouvernement du Québec. (2024a). *Manuel d'évaluation foncière du Québec – Édition 2024* (rapp. tech.). Bibliothèque et Archives nationales du Québec. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/evaluation_fonciere/manuel_evaluation_fonciere/2024/GUI_manuel_evaluation_fonciere_2024.pdf

Gouvernement du Québec. (2024b). Rôles d'évaluation foncière du Québec - Rôles d'évaluation foncière du Québec géoréférencés 2024 - Données Québec. Récupérée mars 5, 2025, à partir de https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/roles-d-evaluation-fonciere-du-quebec/resource/fe31dfcd-0753-4769-9868-d897d9c5a0ba

Gumuchian, H., et Marois, C. (2000). *Initiation à la recherche en géographie : Aménagement, développement territorial, environnement*. Presses de l'Université de Montréal. Récupérée septembre 30, 2025, à partir de https://books.openedition.org/pum/14790

Guo, Z. (2013a). Residential Street Parking and Car Ownership : A Study of Households With Off-Street Parking in the New York City Region : Journal of the American Planning Association : Vol 79, No 1. *Journal of the American Planning Association*, *79*(1), 32-48. https://doi.org/10.1080/01944363.2013.790100

Guo, Z. (2013b). Does residential parking supply affect household car ownership ? The case of New York City. *Journal of Transport Geography*, *26*, 18-28. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.08.006

Gyourko, J., Saiz, A., et Summers, A. (2008). A New Measure of the Local Regulatory Environment for Housing Markets : The Wharton Residential Land Use Regulatory Index. *Urban Studies*, *45*(3), 693-729. https://doi.org/10.1177/0042098007087341

Hamer, P., Currie, G., et Young, W. (2009). Exploring travel and parking impacts of the Melbourne CBD parking levy. *32nd Australasian Transport Research Forum, ATRF 2009, September 29, 2009 - October 1, 2009*.

Hamre, A., et Buehler, R. (2014). Commuter Mode Choice and Free Car Parking, Public Transportation Benefits, Showers/Lockers, and Bike Parking at Work : Evidence from the Washington, DC Region. *Journal of Public Transportation*, *17*(2), 67-91. https://doi.org/10.5038/2375-0901.17.2.4

Hebbern, C., Gosselin, P., Chen, K., Chen, H., Cakmak, S., MacDonald, M., Chagnon, J., Dion, P., Martel, L., et Lavigne, E. (2023). Future temperature-related excess mortality under climate change and population aging scenarios in Canada. *Canadian Journal of Public Health*, *114*(5), 726-736. https://doi.org/10.17269/s41997-023-00782-5

Hellekes, J., Kehlbacher, A., Diaz, M. L., Merkle, N., Henry, C., Kurz, F., et Heinrichs, M. (2023). Parking space inventory from above : Detection on aerial images and

estimation for unobserved regions. *IET Intelligent Transport Systems*, *17*(5), 1009-1021. https://doi.org/10.1049/itr2.12322

Hensher, D. A., et King, J. (2001). Parking demand and responsiveness to supply, pricing and location in the Sydney central business district. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *35*(3), 177-196. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00054-3

Héran, F., et Ravalet, E. (2008). *La consommation d'espace-temps des divers modes de déplacement en milieu urbain Application au cas de l'Ile de France* (rapp. tech.). Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres. Récupérée juillet 7, 2025, à partir de https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0063/Temis-0063282/17652_2008.pdf

Herbert, C., Fried, J. S., et Butsic, V. (2023). Validation of Forest Vegetation Simulator Model Finds Overprediction of Carbon Growth in California. *Forests*, *14*(Compendex). https://doi.org/10.3390/f14030604

Hess, D. B. (2001). Effect of Free Parking on Commuter Mode Choice : Evidence from Travel Diary Data. *Transportation Research Record*, *1753*(1), 35-42. https://doi.org/10.3141/1753-05

Hidalgo, J., Masson, V., Baklanov, A., Pigeon, G., et Gimeno, L. (2008). Advances in Urban Climate Modeling. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1146*(1), 354-374. https://doi.org/10.1196/annals.1446.015

Hines, W. W., Montgomery, D. C., Goldsman, D. M., Borror, C. M., Adjengue, L.-D., et Carmichael, J.-P. (2005). *Probabilités et statistique pour ingénieurs*. Chenelière éducation.

Hoehne, C. G., Chester, M. V., Fraser, A. M., et King, D. A. (2019). Valley of the sun-drenched parking space : The growth, extent, and implications of parking infrastructure in Phoenix. *Cities*, *89*, 186-198. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.02.007

Hoehne, C. G., Chester, M. V., Sailor, D. J., et King, D. A. (2022). Urban Heat Implications from Parking, Roads, and Cars : a Case Study of Metro Phoenix. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, *7*(4), 272-290. https://doi.org/10.1080/23789689.2020.1773013

Holcombe, R., et Williams, D. (2008). The Impact of Population Density on Municipal Government Spendings. *Public Finance Review - PUBLIC FINANC REV*, *36*, 359-373. https://doi.org/10.1177/1091142107308302

Hortas-Rico, M., et Solé-Ollé, A. (2010). Does Urban Sprawl Increase the Costs of Providing Local Public Services ? Evidence from Spanish Municipalities. *Urban Studies*, *47*(7), 1513-1540. Récupérée juillet 3, 2025, à partir de https://www.jstor.org/stable/43079926

Howard, L. (1833). *The Climate of London : Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it*. Harvey ; Darton, J. ; A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.

Hurst-Tarrab, N., Chang, L., Gonzalez-Mendoza, M., et Hernandez-Gress, N. (2020). Robust Parking Block Segmentation from a Surveillance Camera Perspective. *Applied Sciences*, *10*(15), 5364. https://doi.org/10.3390/app10155364

Inci, E. (2015). A review of the economics of parking. *Economics of Transportation*, *4*(1), 50-63. https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2014.11.001

Inci, E., Ommeren, J. v., et Kobus, M. (2017). The external cruising costs of parking. *Journal of Economic Geography*, *17*(6), 1301-1323. https://doi.org/10.1093/jeg/lbx004

Isola, F., Leone, F., et Pittau, R. (2024). Urban Heat Island Phenomenon and Ecosystem Services. A Systematic Review. *24th International Conference on Computational Science and Its Applications, ICCSA 2024, July 1, 2024 - July 4, 2024*, *14818 LNCS*, 352-369. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65273-8_23

ITE. (2021, septembre). ITE-Curbside/curbside-management-tool. Récupérée août 1, 2025, à partir de https://github.com/ITE-Curbside/curbside-management-tool

ITE. (2023). *Parking generation manual* (6th edition). Institute of Transportation Engineers.

Jasienski, M., et Bazzaz, F. A. (1999). The Fallacy of Ratios and the Testability of Models in Biology. *Oikos*, *84*(2), 321-326. https://doi.org/10.2307/3546729

Jia, W., et Wachs, M. (1999). Parking requirements and housing affordability : case study of San Francisco. *Transportation Research Record*, (Compendex), 156-160. https://doi.org/10.3141/1685-20

Jordans, T., Seidel, A., et Lingner, L. (2025, février). osmberlin/parkraum.osm- verkehrswende .org : Information about parking spaces generated from OpenStreetMap Data. Récupérée juillet 31, 2025, à partir de https://github.com/osmberlin/parkraum.osm-verkehrswende.org/tree/main?tab=readme-ov-file

Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. [Toronto] : Anchor Canada, 2013.

Kelvin, W. T. B. (1891). *Popular Lectures and Addresses : Constitution of matter*. Macmillan ; Company.

Khordagui, N. (2019). *Commute Mode Choice, Parking Policies, and Social Influence* [phd]. University of California Irvine. https://escholarship.org/content/qt07z507xf/qt07z507xf.pdf

Kok, N., Monkkonen, P., et Quigley, J. M. (2014). Land use regulations and the value of land and housing : An intra-metropolitan analysis. *Journal of Urban Economics*, *81*, 136-148. https://doi.org/10.1016/j.jue.2014.03.004

Korzybski, A. (1998). *Une carte n'est pas le territoire : prolégomènes aux systèmes non-aristotéliciens et à la sémantique générale*. éditions de l'éclat.

L. Glaeser, E., Gyourko, J., et Saks, R. (2005). Why Is Manhattan So Expensive ? Regulation and the Rise in Housing Prices*. *The Journal of Law and Economics*. https://doi.org/10.1086/429979

Ladd, H. F. (1992). Population Growth, Density and the Costs of Providing Public Services. *Urban Studies*, *29*(2), 273-295. https://doi.org/10.1080/00420989220080321

Lakens, D., Scheel, A. M., et Isager, P. M. (2018). Equivalence Testing for Psychological Research : A Tutorial. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, *1*(2), 259-269. https://doi.org/10.1177/2515245918770963

Lawhead, J. (2023). *Learning Geospatial Analysis with Python : Unleash the Power of Python 3 with Practical Techniques for Learning GIS and Remote Sensing*. Packt Publishing, Limited. Récupérée février 10, 2025, à partir de http://ebookcentral.proquest.com/lib/polymtl-ebooks/detail.action?docID=30842021

Lecun, Y., et Bengio, Y. (1995). Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series.

Lefebvre-Ropars, G.-L. (2021, décembre). *Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue* [phd]. Polytechnique Montréal. Récupérée mars 9, 2024, à partir de https://publications.polymtl.ca/9949/

Lehe, L. (2018). How minimum parking requirements make housing more expensive. *Journal of Transport and Land Use*, *11*(1). https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1340

Leibbrand, K. (1970). *Transportation and town planning*. L. Hill.

Lewis, P. G., et Marantz, N. J. (2019). What Planners Know : Using Surveys About Local Land Use Regulation to Understand Housing Development. *Journal of the American Planning Association*, *85*(4), 445-462. https://doi.org/10.1080/01944363.2019.1643253

Li, F., et Guo, Z. (2014). Do parking standards matter ? Evaluating the London parking reform with a matched-pair approach. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *67*, 352-365. https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.001

Li, R. (2022). SFBA Parking Code Database. Récupérée novembre 17, 2025, à partir de https://ruilee16.github.io/sfba_parking/

Lichtblau, E., et Oswald, C. J. (2019). Classification of impervious land-use features using object-based image analysis and data fusion. *Computers, Environment and Urban Systems*, *75*, 103-116. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.01.007

Lin, Y.-Y., Ding, C., Wang, Y.-W., Liu, C., Cui, Y.-C., et Mishra, S. (2014). Joint analysis of urban shopping destination and travel mode choice accounting for poten-

tial spatial correlation between alternatives. *Journal of Central South University*, *21*(Compendex), 3378-3385. https://doi.org/10.1007/s11771-014-2312-x

Litman, T. A. (2023a, mars). *Parking Management* (rapp. tech.). Victoria Transport Policy Institute. Victoria, BC. Récupérée mars 9, 2024, à partir de https://www.vtpi.org/park_man.pdf

Litman, T. A. (2023b, novembre). *Comprehensive Parking Supply, Cost and Pricing Analysis* (rapp. tech.). Victoria Transport Policy Institute. Victoria, BC. https://www.vtpi.org/pscp.pdf

Lv, J., Shen, Q., Lv, M., Li, Y., Shi, L., et Zhang, P. (2023). Deep learning-based semantic segmentation of remote sensing images : a review. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *11*. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1201125

Mace, R. L. (1961). *Municipal cost-revenue research in the United States : a critical survey of research to measure municipal costs and revenues in relation to land uses and areas, 1933-1960*. Chapel Hill. https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015078083329&seq=11

Manola, A., Novick, S., Shoung, J.-M., et Altan, S. (2019). A Probability Based Equivalence Test of NIR Versus HPLC Analytical Methods in a Continuous Manufacturing Process Validation Study. *39th Annual Midwest Biopharmaceutical Statistics Workshop, MBSW 2016, May 16, 2016 - May 18, 2016*, *218*, 45-54. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67386-8_4

Manville, M. (2017). Travel and the Built Environment : Time for Change. *Journal of the American Planning Association*, *83*(1), 29-32. https://doi.org/10.1080/01944363.2016.1249508

Manville, M., et Shoup, D. (2005). Parking, people, and cities. *Journal of Urban Planning and Development*, *131*(Compendex), 233-245. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2005)131:4(233)

Marchand, L. (1984). Un concept fécond : la consommation d'espace temps. *Les Cahiers Scientifiques du Transport - Scientific Papers in Transportation*, *10 / 1984*. https://doi.org/10.46298/cst.11814

Martens, K., Benenson, I., et Levy, N. (2010). The Dilemma of On-Street Parking Policy : Exploring Cruising for Parking Using an Agent-Based Model. In B. Jiang et X. Yao (Éd.), *Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics* (p. 121-138). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8572-6_7

Marzban, F., Sodoudi, S., et Preusker, R. (2018). The influence of land-cover type on the relationship between NDVI–LST and LST-Tair. *International Journal of Remote Sensing*, *39*(5), 1377-1398. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1402386

Mashreghi, Z., Haziza, D., et Léger, C. (2016). A survey of bootstrap methods in finite population sampling. *Statistics Surveys*, *10*(none). https://doi.org/10.1214/16-SS113

Mattioli, G., Roberts, C., Steinberger, J. K., et Brown, A. (2020). The political economy of car dependence : A systems of provision approach. *Energy Research & Social Science*, *66*, 101486. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101486

McAslan, D., et Sprei, F. (2023). Minimum parking requirements and car ownership : An analysis of Swedish municipalities. *Transport Policy*, *135*, 45-58. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.03.003

McCahill, C., et Garrick, N. (2012). Automobile use and land consumption : Empirical evidence from 12 cities. *URBAN DESIGN International*, *17*(3), 221-227. https://doi.org/10.1057/udi.2012.12

McCahill, C. T., Garrick, N., Atkinson-Palombo, C., et Polinski, A. (2016). Effects of Parking Provision on Automobile Use in Cities : Inferring Causality. *Transportation Research Record*, *2543*(1), 159-165. https://doi.org/10.3141/2543-19

McCahill, C. T., et Garrick, N. W. (2010). Influence of Parking Policy on Built Environment and Travel Behavior in Two New England Cities, 1960 to 2007. *Transportation Research Record*, *2187*(1), 123-130. https://doi.org/10.3141/2187-16

Melia, S., et Clark, B. (2018). What happens to travel behaviour when the right to park is removed ? *Transport Policy*, *72*(Compendex), 242-247. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.07.002

Méthot, S., Blais, L., Gravel, J., Latrémouille, I., St-Pierre, S., et Vézeau, S. (2014). Guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier.

Metro Vancouver Regional Planning. (2023, septembre). *Cost of providing Infrastructure and Services to Different Residential Services* (rapp. tech.). Metro Vancouver Regional Planning. Vancouver, BC. https://metrovancouver.org/services/regional-planning/Documents/costs-of-providing-infrastructure-and-services-to-different-residential-densities.pdf

Miller, R. G. (1974). The Jackknife - A Review. *Biometrika*, *61*(1), 1-15. https://doi.org/10.2307/2334280

Miner, P., Smith, B. M., Jani, A., McNeill, G., et Gathorne-Hardy, A. (2024). Car harm : A global review of automobility's harm to people and the environment. *Journal of Transport Geography*, *115*, 103817. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103817

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2023, août). Polygones des lots officiels - Banque de données cadastrales du Québec - 2023.

Ministère des Transports et de la Mobilité Durable. (2017). *Enquête O-D Québec Lévis 2017 : Structure standard du fichier "plat"* (rapp. tech.). Québec, Qc.

Ministère des Transports et de la Mobilité Durable. (2019). *La mobilité des personnes dans la région de Québec-Lévis : Volet Enquête ménage - Sommaire des résultats* (rapp. tech.). Québec, Qc. Récupérée août 4, 2025, à partir de https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/Planification-transports/enquetes-origine-destination/quebec/2017/Documents/EOD17_sommaire.pdf

Morency, C., Bourdeau, J.-S., et Verreault, H. (2022). *Développement et mise en place d'un inventaire dynamique de stationnement à Montréal* (rapp. tech.). Polytechnique Montréal. Montréal, QC. Récupérée mai 29, 2024, à partir de https://share.polymtl.ca/alfresco/service/api/path/content;cm:content/workspace/SpacesStore/Company%20Home/Sites/chaire-de-recherche-mobilit-web/documentLibrary/RapportsRecherche/rapport_final_AMD_inventaire_dynamique.pdf?guest=true

Morency, C., Paulhiac Scherrer, F., et Meloche, J.-P. (2017). *Le stationnement dans la métropole : bâtir des connaissances pour une mobilité urbaine durable - CRE Montréal* (F. Gravel, Éd. ; rapp. tech.). Conseil Régional de l'Environnement de Montréal. Récupérée mars 11, 2024, à partir de https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYdNZRxWi163lmbLnVjgAqMF/asset/files/Outils/2017-02_Etude_Stationnement-metropole-batir-connaissances.pdf

Morency, C., et Trépanier, M. (2008). *Characterizing parking using Travel survey data* (rapp. tech. N° CIRRELT-2008-15). CIRRELT. Montréal, QC. Récupérée mai 27, 2024, à partir de https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2008-15.pdf

Morency, C., Verreault, H., et Demers, M. (2015). Identification of the minimum size of the shared-car fleet required to satisfy car-driving trips in Montreal. *Transportation*, *42*(3), 435-447. https://doi.org/10.1007/s11116-015-9605-2

Mouratidis, K. (2025). Transport and quality of life : The car and its link to subjective well-being, health, and life domains. *Transport Policy*, *168*, 101-111. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.04.014

Muller, A., Osterlund, H., Marsalek, J., et Viklander, M. (2020). The pollution conveyed by urban runoff : A review of sources. *Science of the Total Environment*, *709*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125

Narayanan, S., Álvarez-Ossorio Martinez, S., et Antoniou, C. (2024). Household car-ownership in a world of constant change : The continued influence of traditional variables and the rising influence of emerging mobility scenarios. *Transportation*. https://doi.org/10.1007/s11116-024-10544-y

National Research Council. (2008, juin). *Behavioral Modeling and Simulation : From Individuals to Societies*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12169

National Research Council. (2012, juin). *Assessing the Reliability of Complex Models : Mathematical and Statistical Foundations of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/13395

Nelder, J. A., et Wedderburn, R. W. M. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, *135*(3), 370-384. https://doi.org/10.2307/2344614

Newmark, G. L., et Shiftan, Y. (2007). Examining shoppers' stated willingness to pay for parking at suburban malls. *Behavioral Responses to Policy and System Changes*, (Compendex), 92-101. https://doi.org/10.3141/2010-11

Olson, S., Berkaw, P., Charland, L., Patton, E., et Bilmes, L. (2019). The $64 Billion Massachusetts Vehicle Economy. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.3499676

Olus Inan, M., Inci, E., et Robin Lindsey, C. (2019). Spillover parking. *Transportation Research Part B : Methodological*, *125*(Compendex), 197-228. https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.05.012

Open Knowledge Foundation Deutschland. (2025, mai). Parkraumdaten aus OpenStreetMap - Prozessierung und Visualisierung. Récupérée juillet 31, 2025, à partir de https://www.prototypefund.de/projects/parkraumdaten-aus-openstreetmap-prozessierung-und-visualisierung

Open Mobility Foundation. (2022, mai). About | Open Mobility Foundation. Récupérée juillet 21, 2025, à partir de https://www.openmobilityfoundation.org/about/

Open Mobility Foundation. (2024a, août). Curb Data Specification - Events API. Récupérée juillet 23, 2025, à partir de https://github.com/openmobilityfoundation/curb-data-specification/tree/main/events

Open Mobility Foundation. (2024b, décembre). Curb Data Specification - Curbs API. Récupérée juillet 22, 2025, à partir de https://github.com/openmobilityfoundation/curb-data-specification/tree/main/curbs

Open Mobility Foundation. (2024c, décembre). Curb Data Specification - Overview. Récupérée juillet 21, 2025, à partir de https://github.com/openmobilityfoundation/curb-data-specification/blob/main/README.md

OQLF. (2006). langage orienté objet. Récupérée février 9, 2025, à partir de https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8384945/langage-oriente-objet

Oreskes, N. (1998). Evaluation (not validation) of quantitative models. *Environmental Health Perspectives*, *106 Suppl 6*(Suppl 6), 1453-1460. https://doi.org/10.1289/ehp.98106s61453

Organisation internationale de normalisation. (2023). Intelligent transport systems - Parking Part 1, Core data model = Systèmes intelligents de transport - Stationnement Partie 1, Modèle de données de base.

OSM Contributors. (2023, avril). Parking Map - OpenStreetMap Wiki. Récupérée juillet 19, 2025, à partir de https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Parking_Map

OSM Contributors. (2025a). OpenStreetMap. Récupérée juillet 18, 2025, à partir de https://www.openstreetmap.org/

OSM Contributors. (2025b, février). Amenity parking - OpenStreetMap Wiki. Récupérée juillet 18, 2025, à partir de https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Tag:amenity%3Dparking

OSM Contributors. (2025c, avril). Wiki Main Page - OpenStreetMap. Récupérée juillet 18, 2025, à partir de https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page

OSM Contributors. (2025d, juin). Street parking - OpenStreetMap Wiki. Récupérée juillet 18, 2025, à partir de https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Street_parking

OSM Contributors. (2025e, octobre). Key highway - OpenStreetMap Wiki. Récupérée juillet 28, 2025, à partir de https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway

Pandas contributors. (2025). pandas - Python Data Analysis Library. Récupérée octobre 20, 2025, à partir de https://pandas.pydata.org/

Parison, S., Chaumont, M., Kounkou-Arnaud, R., Long, F., Bernik, A., Da Silva, M., et Hendel, M. (2023). The effects of greening a parking lot as a heat mitigation strategy on outdoor thermal stress using fixed and mobile measurements : case-study project "tertiary forest". *Sustainable Cities and Society*, *98*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104818

Parking Reform Network. (2025). Parking Mandates Map. Récupérée août 1, 2025, à partir de https://parkingreform.org/resources/mandates-map/

Parmar, J., Saiyed, G., et Dave, S. (2023). Analysis of taste heterogeneity in commuters' travel decisions using joint parking– and mode–choice model : A case from urban India. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *170*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103610

Pendall, R., Wegmann, J., Martin, J., et Wei, D. (2018). The Growth of Control ? Changes in Local Land-Use Regulation in Major U.S. Metropolitan Areas From 1994 to 2003. *Housing Policy Debate*, *28*(6), 901-919. https://doi.org/10.1080/10511482.2018.1494024

Perktold, J., Seabold, S., Sheppard, K. S., Fulton, C., Shedden, K., Brockmendel, J., Grana, J., Quackenbush, P., Arel-Bundock, V., McKinney, W., Langmore, I., Baker, B., Gommers, R., bonito yoga, y., scherrer s-, s., Zhurko, Y., Brett, M., Giampieri, E., Millman,

J., . . . Halchenko, Y. (2024, avril). statsmodels/Generalized linear models. https://doi.org/10.5281/ZENODO.593847

Perret, J., Charpentier, A., Pradel, R., Papuga, G., et Besnard, A. (2022). Spatially balanced sampling methods are always more precise than random ones for estimating the size of aggregated populations. *Methods in Ecology and Evolution*, *13*(12), 2743-2756. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14015

Populus. (2025). Curb Manager. Récupérée août 2, 2025, à partir de https://www.populus.ai/products/curb-manager

PostgreSQL Global Development Group. (2025a, mai). 8.11. Text Search Types. Récupérée août 6, 2025, à partir de https://www.postgresql.org/docs/17/datatype-textsearch.html

PostgreSQL Global Development Group. (2025b, novembre). F.26. pgcrypto — cryptographic functions. Récupérée novembre 24, 2025, à partir de https://www.postgresql.org/docs/18/pgcrypto.html

Pushkarev, B., et Zupan, J. M. (1975). *Urban Space for Pedestrians*. MIT Press. Récupérée juillet 7, 2025, à partir de https://s3.us-east-1.amazonaws.com/rpa-org/pdfs/RPA-Urban-Space-for-Pedestrians.pdf

Qiam, S., Devunuri, S., et Lehe, L. J. (2025). A Pipeline and NIR-Enhanced Dataset for Parking Lot Segmentation. *2025 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 1227-1236. https://doi.org/10.1109/WACV61041.2025.00127

Raghav, S., Kasraian, D., et Miller, E. J. (2019, juillet). *Literature review of the costs of infrastructure provision for different development forms* (rapp. tech.). University of Toronto Transportation Research Institute. Toronto, Canada. https://icity.utoronto.ca/Asset/ProjectPresentations/Project2.4/2%20LR_DevCosts_final.pdf

Real Estate Research Corporation. (1974a). *The Costs of Sprawl : Detailed cost analysis*. U.S. Government Printing Office.

Real Estate Research Corporation. (1974b). *The Costs of Sprawl : Literature Review and Bibliography*. https://pdxscholar.library.pdx.edu/oscdl_planning/26

Rhodes, C. J., Henrys, P., Siriwardena, G. M., Whittingham, M. J., et Norton, L. R. (2015). The relative value of field survey and remote sensing for biodiversity assessment (R. Freckleton, Éd.). *Methods in Ecology and Evolution*, *6*(7), 772-781. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12385

Richardson, E., et Merz, S. K. (2010). Extracting maximum benefit from parking policy - 10 years experince in Perth, Australia. *ETC Papers*. https://aetransport.org/public/downloads/kex6e/4246-514ec5e8d94fa.pdf

Robinson, A. P., et Froese, R. E. (2004). Model validation using equivalence tests. *Ecological Modelling*, *176*(3-4), 349-358. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.013

Ronneberger, O., Fischer, P., et Brox, T. (2015). U-Net : Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells et A. F. Frangi (Éd.), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015* (p. 234-241). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Rye, T., Hunton, K., Ison, S., et Kocak, N. (2008). The role of market research and consultation in developing parking policy. *Transport Policy*, *15*(6), 387-394. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.12.005

Rye, T., et Ison, S. (2005). Overcoming barriers to the implementation of car parking charges at UK workplaces. *Transport Policy*, *12*(1), 57-64. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.11.002

Sale, D. (2014). *Testing Python : applying unit testing, TDD, BDD, and acceptance testing*. Wiley. Récupérée septembre 23, 2025, à partir de https://cornell-library.skillport.com/skillportfe/main.action?assetid=72946

Saleh, H. (2013). *JavaScript unit testing : your comprehensive and practical guide to efficiently performing and automating JavaScript unit testing*. Packt Pub. Récupérée septembre 23, 2025, à partir de http://site.ebrary.com/id/10648835

Särndal, C.-E., Swensson, B., et Wretman, J. (2003, octobre). *Model Assisted Survey Sampling*. Springer Science & Business Media.

Scharnhorst, E. (2018). *Quantified Parking : Comprehensive Parking Inventories for Five U.S. Cities* (rapp. tech.). Research Institute For Housing America. Récupérée mars 8, 2024, à partir de https://assets.dmagstatic.com/wp-content/uploads/2018/07/18806_Research_RIHA_Parking_Report-1.pdf

Schmider, A. (1977). L'Espace Urbain, Un Bien Public. *Metropolis*, (24-25), 55-57.

Schuirmann, D. J. (1987). A comparison of the two one-sided tests procedure and the power approach for assessing the equivalence of average bioavailability. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*, *15*(6), 657-680. https://doi.org/10.1007/BF01068419

Seidel, A. (2021a). Methodenbericht zur Parkraumanalyse für den Berliner Ortsteil Neukölln. Récupérée juillet 31, 2025, à partir de https://parkraum.osm-verkehrswende.org/project-prototype-neukoelln/report/

Seidel, A. (2021b, mars). Parking space analyses based on OSM. Récupérée juillet 31, 2025, à partir de https://www.openstreetmap.org/user/Supaplex030/diary/396104

Seiler, C. (2008). *Republic of Drivers : A Cultural History of Automobility in America*. University of Chicago Press. Récupérée octobre 15, 2024, à partir de http://ebookcentral.proquest.com/lib/hecm-ebooks/detail.action?docID=432294

Senft, G. (2005). U-pass at the university of british columbia : Lessons for effective demand management in the campus context. *2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada : Transportation - Investing in Our Future, TAC/ATC 2005, September 18, 2005 - September 21, 2005*.

Seo, Y.-W., Ratliff, N., et Urmson, C. (2009). Self-supervised aerial image analysis for extracting parking lot structure. *21st International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 2009, July 11, 2009 - July 16, 2009*, 1837-1842.

Shah, M., Adediji, Y., Donaldson, L., Piryonesi, S. M., et Murtaza, H. (2024, mars). *Impact of parking requirements on housing affordability* (rapp. tech.). Urban Analytics Institute - CMHC. Récupérée juillet 2, 2025, à partir de https://assets.cmhc-schl.gc.ca/sf/project/archive/housing_organizations4/impact-of-parking-requirements-on-housing-affordability_final-report.pdf

Shaikh, T. A., Adjovu, G. E., Stephen, H., et Ahmad, S. (2023). Impacts of Urbanization on Watershed Hydrology and Runoff Water Quality of a Watershed : A Review, 1271-1283. https://doi.org/10.1061/9780784484852.116

Shamsaei, M., Carter, A., et Vaillancourt, M. (2022). A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods. *Construction and Building Materials*, *359*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129350

SharedStreets. (2018). GitHub - sharedstreets/sharedstreets-ref-system : Making maps connectable : stable, non-proprietary IDs and data standards for streets. Récupérée juillet 19, 2025, à partir de https://github.com/sharedstreets/sharedstreets-ref-system?tab=readme-ov-file

SharedStreets. (2020a). About SharedStreets. Récupérée juillet 19, 2025, à partir de https://www.sharedstreets.io/about/https:/sharedstreets.io/about/

SharedStreets. (2020b). curblr conversion · curblr/curblr-spec. Récupérée juillet 19, 2025, à partir de https://github.com/curblr/curblr-spec/tree/master/conversions/js

SharedStreets. (2021). GitHub - sharedstreets/curb-map : Web map for visualizing curb regulations and key stats. Uses CurbLR data spec. Récupérée juillet 19, 2025, à partir de https://github.com/sharedstreets/curb-map

SharedStreets. (2024, novembre). shared streets/ shared streets-js. Récupérée juillet 19, 2025, à partir de https://github.com/sharedstreets/sharedstreets-js

Sheng, L., Lu, D., et Huang, J. (2015). Impacts of land-cover types on an urban heat island in Hangzhou, China. *International Journal of Remote Sensing*, *36*(6), 1584-1603. https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1019016

Shin, Y. E., Vuchic, V. R., et Bruun, E. C. (2009). Land Consumption Impacts of a Transportation System on a City : An Analysis. *Transportation Research Record*, *2110*(1), 69-77. https://doi.org/10.3141/2110-09

Shoup, D. (2005). *High Cost of Free Parking*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351179539

Shoup, D. (2018). *Parking and the city*. New York, NY : Routledge, 2018.

Shu, C., Gaur, A., Wang, L., et Lacasse, M. A. (2023). Evolution of the local climate in Montreal and Ottawa before, during and after a heatwave and the effects on urban heat islands. *Science of the Total Environment*, *890*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164497

Smart, M. J., et Klein, N. J. (2020). Disentangling the role of cars and transit in employment and labor earnings. *Transportation*, *47*(3), 1275-1309. https://doi.org/10.1007/s11116-018-9959-3

Smith, W. F., Bertha, B. A., Hedlund, D., Ricks, B., Aurbach, L., et Philips, W. (1964). *The low-rise speculative apartment*. Center for Real Estate ; Urban Economics, Institute of Urban ; Regional Development, University of California.

Stangl, K. (2019). Parking ? Lots ! Parking Over the Minimum in Los Angeles. https://doi.org/10.17610/T65P41

Stantec Consulting Ltd. (2013). *Quantifying the costs and Benefits of alternative growth Scenarios* (rapp. tech.). Halifax Regional Municipality, Nova Scotia. Récupérée mars 11, 2024, à partir de https://www.halifax.ca/sites/default/files/documents/about-the-city/regional-community-planning/HRMGrowthScenariosFinalReportJuly82013.pdf

Statistique Canada. (2021a). *Guide du Recensement de la population, 2021* (rapp. tech.). Ottawa, ON. https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/ref/98-304/index-fra.cfm

Statistique Canada. (2021b, novembre). Fichier des limites des subdivisions de recensement. Récupérée août 4, 2025, à partir de https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/geo/sip-pis/boundary-limites/index-fra.cfm

Statistique Canada. (2022, février). Téléchargements du Profil du recensement, 2021. Récupérée août 4, 2025, à partir de https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/dp-pd/prof/details/download-telecharger.cfm?Lang=F

Stevens, M. R. (2017). Does Compact Development Make People Drive Less ? *Journal of the American Planning Association*, *83*(1), 7-18. https://doi.org/10.1080/01944363.2016.1240044

Stiebe, M., von Arx, W., et Vu, T. T. (2025). Impacts of integrated mobility concepts in residential complexes on residents' travel behavior. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *197*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.tra.2025.104502

Sweet, M. N., et Ferguson, M. R. (2019). Parking demand management in a relatively uncongested university setting. *Case Studies on Transport Policy*, *7*(Compendex), 453-462. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.01.008

Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. New York, London, Harper & Brothers. Récupérée août 1, 2025, à partir de http://archive.org/details/principlesofscie00taylrich

The City Planning Board, Hay, F. H., Barr, M. A., Conrad, S. S., Parker, W. S., Sidd, N., et Herlihy, E. M. (1934). *Report on the income and cost of six districts in the city of Boston.* (rapp. tech.). City of Boston. Boston, MA. https://archive.org/details/reportonincomeco00bost/page/n5/mode/2up

Thompson, M., 1946-. (2012). *Understand philosophy of science*. London : Teach Yourself, 2012.

Tillé, Y. (2019). *Théorie des sondages : échantillonage et estimation en populations finies - 2e éd.* (2e éd.). Dunod. Récupérée août 15, 2025, à partir de https://banq.pretnumerique.ca/resources/5d3a14e123579414a9836edd

Ting, S., Lymburn, T., Stemler, T., Sun, Y., et Small, M. (2023, septembre). Model Calibration and Validation From A Statistical Inference Perspective. https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.08562

Translink et Metro Vancouver Regional Planning. (2019, mars). *The 2018 Regional Parking Study* (rapp. tech.). Vancouver, BC.

Transportation Research Board et National Cooperative Highway Research Program. (2012, mai). *Travel Demand Forecasting : Parameters and Techniques*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/14665

Tukey, J. W. (1962). The Future of Data Analysis. *The Annals of Mathematical Statistics*, *33*(1), 1-67. https://doi.org/10.1214/aoms/1177704711

Union Internationale des Transports Publics. (1959). *It's High Time to put an End to Traffic Congestion* (rapp. tech.). Union Internationale des Transports Publics. Bruxelles, BE.

University of Toronto CHASS. (2024). Canadian Census Analyser / Analyseur de recensement canadien. Récupérée août 4, 2025, à partir de https://datacentre.chass.utoronto.ca/census/

van Ommeren, J., McIvor, M., Mulalic, I., et Inci, E. (2021). A novel methodology to estimate cruising for parking and related external costs. *Transportation Research Part B : Methodological*, *145*, 247-269. https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.12.005

van Ommeren, J., Wentink, D., et Dekkers, J. (2011). The real price of parking policy. *Journal of Urban Economics*, *70*(1), 25-31. https://doi.org/10.1016/j.jue.2011.02.001

van Ommeren, J. N., Wentink, D., et Rietveld, P. (2012). Empirical evidence on cruising for parking. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *46*(1), 123-130. https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.011

Van Der Waerden, P., Borgers, A., et Timmermans, H. (2009). Consumer response to introduction of paid parking at a regional shopping center. *Transportation Research Record*, (Compendex), 16-23. https://doi.org/10.3141/2118-03

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł. u., et Polosukhin, I. (2017). Attention is All you Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *30*. Récupérée juin 28, 2024, à partir de https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html

Verma, V. (2025). A Comprehensive Framework for Residual Analysis in Regression and Machine Learning. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, *10*(31s), 34-46. https://doi.org/10.52783/jisem.v10i31s.4958

Vickrey, W. (1994). Statement to the Joint Committee on Washington, DC, Metropolitan Problems (with a foreword by Richard Arnott and Marvin Kraus) - ScienceDirect (R. Arnott et M. Kraus, Éd.). *Journal of Urban Economics*, *36*(1), 42-65. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/juec.1994.1025

Vidgen, B., et Yasseri, T. (2016). P-Values : Misunderstood and Misused. *Frontiers in Physics*, *4*. https://doi.org/10.3389/fphy.2016.00006

Ville de Québec. (s. d.). Repères chronologique concernant la ville de Québec. Récupérée juin 11, 2024, à partir de https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/patrimoine/archives/jalons_historiques/docs/reperes_chronologiques_ville.pdf

Ville de Québec. (1995). Règlement de Zonage municipal. Récupérée juin 22, 2024, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/resource/an/V.Q.Z.3_FR_004_0001.pdf

Ville de Québec. (2008a). *Commercial - Synthèse des requis de stationnement avant harmonisation* (rapp. tech.). Québec, Qc.

Ville de Québec. (2008b). *Résidentiel - Synthèse des requis de stationnement avant harmonisation* (rapp. tech.). Québec, Qc.

Ville de Québec. (2009, avril). RVQ 1400 - Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme. Récupérée juin 11, 2024, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/showdoc/cr/R.V.Q.1400/

Ville de Québec. (2016, mars). RVQ 2380 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à diverses dispositions. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%202380#se:8-ss1

Ville de Québec. (2017, mai). RVQ 2459 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à diverses dispositions. Récupérée novembre 7, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%202459#se:4-ss1

Ville de Québec. (2018a, août). RVQ 2694 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement aux postes d'essence. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%202694#se:1-ss1

Ville de Québec. (2018b, octobre). RVQ 2680 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à diverses dispositions. Récupérée novembre 7, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%202680#se:1-ss1

Ville de Québec. (2019, juin). RVQ 2730 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à l'hébergement touristique. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%202730#se:16-ss1

Ville de Québec. (2022, novembre). RVQ 3068 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à plusieurs dispositions. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%203068#se:8-ss1

Ville de Québec. (2023a, mai). RVQ 3123 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à plusieurs dispositions. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%203123#se:28-ss1

Ville de Québec. (2023b, novembre). RVQ 3187 - Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement à plusieurs dispositions. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://reglements.ville.quebec.qc.ca/fr/document/ra/R.V.Q.%203187#se:24-ss1

Ville de Québec. (2024a). *Normes applicables à l'aménagement d'un stationnement desservant un usage autre que l'habitation* (rapp. tech.). Ville de Québec. Québec, Qc. Récupérée mai 7, 2025, à partir de https://www.ville.quebec.qc.ca/docs/reglementation/32_stationnement_ICI.pdf

Ville de Québec. (2024b). *Normes applicables à un stationnement d'une habitation en rangée comportant un logement* (rapp. tech.). Ville de Québec. Québec, Qc. Récupérée mai 7, 2025, à partir de https://www.ville.quebec.qc.ca/docs/reglementation/68_stationnement_maison_rangee.pdf

Ville de Québec. (2024c). *Normes applicables à un stationnement d'une habitation jumelée (2 logements et moins)* (rapp. tech.). Ville de Québec. Québec, Qc. Récupérée mai 7, 2025, à partir de https://www.ville.quebec.qc.ca/docs/reglementation/64_stationnement_jumelee.pdf

Ville de Québec. (2024d). Quartiers - Données Québec. Récupérée mai 6, 2025, à partir de https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vque_9

Ville de Québec. (2024e, mai). RVQ 3303 - Adoption du Règlement modifiant le Règlement d'harmonisation sur l'urbanisme et les règlements d'arrondissement sur l'urbanisme relativement au nombre minimal de cases de stationnement requis pour un usage de la classe Habitation.

Ville de Québec. (2024f, juin). Grille de spécifications du zonage - Grille de spécifications du zonage - Données Québec. Récupérée juin 10, 2024, à partir de https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grille-de-specifications-du-zonage/resource/85b49cce-7756-41c6-b77f-8df395aea201

Ville de Québec. (2024g, juin). Zonage municipal - Zones - Données Québec. Récupérée juin 10, 2024, à partir de https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vque_56

Ville de Québec. (2025a). *Budget 2025 - fonctionnement et investissement* (Budget). Ville de Québec. Québec, Qc. https://www.ville.quebec.qc.ca/apropos/profil-financier/docs/budget2025-Detaille.pdf

Ville de Québec. (2025b). *Normes applicables à l'aménagement d'un stationnement d'une habitation de 4 logements et plus* (rapp. tech.). Ville de Québec. Québec, Qc. Récupérée mai 7, 2025, à partir de https://www.ville.quebec.qc.ca/docs/reglementation/69_stationnement_multi.pdf

Vuchic, V., et Bruun, E. (1995). Time-Area Concept : Development, Meaning, and Applications. *Transportation Research Record*, (1499), 95-104. https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1499/1499.pdf

Walker, E., et Nowacki, A. S. (2011). Understanding Equivalence and Noninferiority Testing. *Journal of General Internal Medicine*, *26*(2), 192-196. https://doi.org/10.1007/s11606-010-1513-8

Wallach, D. (2024). *Le deep learning pour le traitement d'images : classification, détection et segmentation avec Python et TensorFlow* (Éditions ENI). Saint-Herblain.

Walters, A. A. (1961). The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion. *Econometrica*, *29*(4), 676-699. https://doi.org/10.2307/1911814

Wang, J.-F., Stein, A., Gao, B.-B., et Ge, Y. (2012). A review of spatial sampling. *Spatial Statistics*, *2*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.spasta.2012.08.001

Wang, J., Meng, Q., Zou, Y., Qi, Q., Tan, K., Santamouris, M., et He, B.-J. (2022). Performance synergism of pervious pavement on stormwater management and urban heat island mitigation : A review of its benefits, key parameters, and co-benefits approach. *Water Research*, *221*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118755

Wasserstein, R. L., et Lazar, N. A. (2016). The ASA Statement on p-Values : Context, Process, and Purpose. *The American Statistician*. Récupérée septembre 25, 2025, à partir de https://amstat.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00031305.2016.1154108

Wei, L., Xiuyuan, Z., et Papacostas, C. (2008). Analysis of parking fee effect on travel behavior in a downtown district. *1st International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices 2008, TDIBP 2008, April 24, 2008 - April 26, 2008*, *319*, 69-74. https://doi.org/10.1061/40961(319)12

Weinberger, R. (2012). Death by a thousand curb-cuts : Evidence on the effect of minimum parking requirements on the choice to drive. *Transport Policy*, *20*(Compendex), 93-102. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.08.002

Weinberger, R., Seaman, M., et Johnson, C. (2009). Residential Off-Street Parking Impacts on Car Ownership, Vehicle Miles Traveled, and Related Carbon Emissions : New York City Case Study. *Transportation Research Record*, *2118*(1), 24-30. https://doi.org/10.3141/2118-04

Willson, R. W. (1995). Suburban Parking Requirements : A Tacit Policy for Automobile Use and Sprawl. *Journal of the American Planning Association*, *61*(1), 29-42. https://doi.org/10.1080/01944369508975617

Wilson, R. W. (1992). Estimating the travel and parking demand effects of employer-paid parking. *Regional Science and Urban Economics*, *22*(1), 133-145. https://doi.org/10.1016/0166-0462(92)90029-Z

Windsor, D. (1979). A Critique of The Costs of Sprawl. *Journal of the American Planning Association*, *45*(3), 279-292. https://doi.org/10.1080/01944367908976967

Wong, W., et Wong, S. C. (2016). Biased standard error estimations in transport model calibration due to heteroscedasticity arising from the variability of linear data projection. *Transportation Research Part B : Methodological*, *88*(100), 72-92. Récupérée novembre 1, 2025, à partir de https://ideas.repec.org//a/eee/transb/v88y2016icp72-92.html

Xu, W., Markley, S., Bronin, S. C., et Drogaris, D. (2023). A National Zoning Atlas to Inform Housing Research, Policy, and Public Participation. *Cityscape*, *25*(3), 55-72.

Yan, X., Levine, J., et Marans, R. (2019). The effectiveness of parking policies to reduce parking demand pressure and car use. *Transport Policy*, *73*(Compendex), 41-50. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.10.009

Yin, C., Shao, C., et Wang, X. (2018). Built Environment and Parking Availability : Impacts on Car Ownership and Use. *SUSTAINABILITY*, *10*(7), 2285. https://doi.org/10.3390/su10072285

Yin, Y., Hu, W., Tran, A., Kruppa, H., Zimmermann, R., et Ng, S.-K. (2022). A Context-enriched Satellite Imagery Dataset and an Approach for Parking Lot Detection. *2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 1391-1400. https://doi.org/10.1109/WACV51458.2022.00146

Yuan, Y., Li, X., Wang, H., Geng, X., Gu, J., Fan, Z., Wang, X., et Liao, C. (2024). Unraveling the global economic and mortality effects of rising urban heat island intensity. *Sustainable Cities and Society*, *116*(Compendex). https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105902

Zhou, W., Huang, G., et Cadenasso, M. L. (2011). Does spatial configuration matter ? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, *102*(1), 54-63. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009

Ziman, J. M. (1984). Research. In *An Introduction to Science Studies : The Philosophical and Social Aspects of Science and Technology* (p. 13-33). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511608360.003

ANNEXE A MÉTHODES STATISTIQUES RECENSÉES

Un cadre de quantification de l'incertitude utilisant des méthodes basées sur la statistique inférentielle a été considéré pour l'évaluation de la performance de modèle. Cependant, un cadre basé sur la statistique prédictive a été adopté car des tailles d'effets n'étaient pas immédiatement apparents et ont donc été conservés en annexe. Elle commencera par discuter des méthodes d'équivalence initialement utilisées pour déclarer deux médicaments équivalents, puis discutera des enjeux entourant les valeurs p communément utilisées statuer sur la validité de constats scientifiques et finalement des différentes caractéristiques qui peuvent être utilisées pour statuer sur la forme d'une distribution.

Test d'équivalence

Le test d'hypothèse nulle standard est typiquement formulé de la manière suivante : H_0 : $\mu = \mu_0$ où μ_0 est une quantité fixe et μ est la moyenne de l'échantillon. Si la moyenne observée μ tombe en dehors de la région critique définie par la statistique de test, on rejette l'hypothèse nulle et conclut les valeurs différentes. Cependant, dans le cas opposé, on peut seulement dire qu'on ne rejette pas la nulle, ce qui implique que les données ne fournissent pas de preuve suffisante pour affirmer une différence. Ce type de conclusion est considéré comme une conclusion faible statistiquement (Hines et al., 2005). Or une conclusion faible n'est pas satisfaisante lorsque l'on veut statuer que deux valeurs sont assez proches pour être équivalentes, comme lorsque l'on veut dire qu'un modèle est équivalent à la réalité (Robinson & Froese, 2004).

Heureusement, la pharmacologie a développé un ensemble de méthodes d'inférence statistique qui visent à déterminer l'équivalence de deux produits (Lakens et al., 2018 ; Schuirmann, 1987). Ces méthodes dites d'équivalence utilisent deux tests (une borne inférieure et une borne supérieure) pour déterminer si l'effet est assez petit pour qu'il soit considéré équivalent. La taille d'effet minimale d'intérêt peut être fixée en utilisant des mesures objectives (à l'aide d'études ou d'enquêtes précédentes démontrant une détection par les sujets) ou subjectives (en déterminant les seuils d'études précédentes qui n'ont pas trouvé de significativité) (Lakens et al., 2018). Les seuils peuvent être fixés en termes standardisés (d de Cohen), en termes bruts ou en utilisant un log du terme brut pour permettre de spécifier des pourcentages d'erreur. Il est peu recommandé d'utiliser des ratios ou des pourcentages, car ces derniers créent des distributions peu robustes aux tests statistiques et sont peu utiles à l'interprétation

s'ils sont différents de 1 (Curran-Everett, 2013 ; Jasienski & Bazzaz, 1999).

Les tests d'équivalence débutent avec choix d'un niveau de significativité (typiquement $\alpha = 0.05$). On effectue alors deux tests unilatéraux (TOST, Two One-Sided Tests), chacun au niveau α. Alternativement, on vérifie si l'intervalle de confiance bilatéral de $\mu_T - \mu_R$ à $100(1-2\alpha)\%$ (soit 90 % si $\alpha = 0.05$) est entièrement inclus dans les marges d'équivalence.

$$H_0 : \mu_T - \mu_R \leq \theta_1 \text{ ou } \mu_T - \mu_R \geq \theta_2 \tag{A.1}$$

$$H_1 : \theta_1 < \mu_T - \mu_R < \theta_2 \tag{A.2}$$

Ces tests d'hypothèses sont donc l'inverse logique des tests d'hypothèses standards où l'hypothèse nulle est la différence des deux quantités (Walker & Nowacki, 2011). Il est important de noter que deux quantités peuvent être équivalentes, mais tout de même différentes statistiquement si l'intervalle de confiance de la valeur d'intérêt n'inclut pas la valeur hypothétique, mais est tout de même à l'intérieur des bornes fixées par le test d'équivalence.

Les méthodes d'équivalence ont déjà été utilisées pour l'évaluation de modèles de prédiction. On trouve des articles utilisant ces méthodes pour des modèles de croissance et de séquestration de carbone d'arbres (Herbert et al., 2023 ; Robinson & Froese, 2004), l'équivalence de méthodes de tests pour le contrôle de procédé (Manola et al., 2019) ou l'évaluation de méthodes de mesures en réalité virtuelle par rapport à des mesures physiques (Anik et al., 2020) .

Le choix de valeur pour la statistique α est lui-même problématique et a donné lieu à des abus qui seront discutés dans la section suivante.

Valeurs p, réplication, tailles d'effets et la nouvelle statistique

Les valeurs p dénotent la probabilité d'obtenir des résultats si l'hypothèse nulle est vraie. Elles ont longtemps été utilisées pour dénoter la validité de certaines déclarations, utilisant le mot significativité (« significance » en anglais) pour dénoter qu'une variable était statistiquement valide dans un test d'hypothèse ou une régression. Cette pratique a donné lieu à des controverses dans certaines disciplines où les chercheurs essayaient de nombreux modèles, jusqu'à temps d'atteindre un seuil sans nécessairement déclarer les alternatives considérées (Vidgen & Yasseri, 2016 ; Wasserstein & Lazar, 2016). D'autre part, les valeurs p ne sont pas faciles à interpréter (Cumming, 2012) puisqu'elles ne distinguent pas l'effet moyen de l'incertitude entourant cet effet.

Cumming (2012) suggère de donner des tailles d'effet (où la réponse d'un modèle ou d'une

étude est normalisée) et des intervalles de confiance qui tendent à être plus faciles à interpréter et de privilégier la planification méthodologique des études avant la collecte des données afin de réduire les biais dans la sélection des résultats.

Valeur d'intérêt

Un autre enjeu réside dans la métrique à utiliser pour quantifier la validité d'un modèle ou d'une expérience. On veut ici définir la métrique qui servira à juger la validité du modèle de prédiction. Les moyennes peuvent être dictées par des échantillons erronés alors que les quantiles de la distribution (médianes, quartiles) donnent typiquement un portrait plus juste de la distribution. Les intervalles de confiances ou quantiles peuvent aussi être signalés pour décrire le degré de covariance de deux variables. Les quantiles ne sont pas des statistiques lisses et sont donc plus difficiles à estimer par autoamorçage (Davison & Hinkley, 1999).

ANNEXE B DÉTAILS DES DIFFÉRENTS DOMAINES DE DONNÉES DE L'API

API : routes d'appel

L'appel routes permet d'énumérer une liste des URI disponibles, des méthodes possibles pour chaque URI et des fonctions TypeScript appelées par chaque URI

- GET /api/routes renvoie l'ensemble des routes implémentées sur le serveur. Les colonnes disponibles pour chaque entrée sont listées ci-dessous :
  - path : renvoie l'URI pour la route
  - methods : renvoie une liste des méthodes (GET, PUT, POST, DELETE) pour l'URI en question
  - middlewares : le nom de la fonction TypeScript appelée par le serveur pour renvoyer l'information

API : Inventaire

Les appels d'API suivants sont proposés pour les objets de type inventaire :

- GET /api/inventaire/quartier/$< id_{quartier} >$: Renvoie l'inventaire pour un quartier complet
- GET /api/inventaire/calcul/quartier/$< id_{quartier} >$: renvoie le résultat du calcul détaillé dans la section 3.5 pour un quartier d'analyse
- GET /api/inventaire/calcul/lot/$< g\_no\_lot >$: renvoie le résultat du calcul détaillé dans la section 3.5 pour un lot cadastral. Pour l'ensemble des identifiants de lots cadastraux, les espaces dans le numéro de lot sont remplacés par des tirets bas. Ce remplacement est nécessaire pour éviter de mettre des espaces dans l'Uniform Resource Locator (URL).
- POST /api/inventaire/calcul/reg-val-man permet de faire un calcul pour des valeurs manuellement entrées par l'utilisateur. Les valeurs manuelles sont transmises dans le corps de la requête. Les entrées suivantes doivent être présentes pour chaque entrée :
  - g_no_lot : l'identifiant de lot
  - cubf : le code d'utilisation du bien fond applicable
  - id_reg_stat : l'identifiant de règlement pertinent
  - id_er : l'identifiant d'ensemble de règlements pertinent

  - unite : l'identifiant d'unité de la valeur fournie
  - valeur : la valeur manuelle entrée par l'utilisateur
- POST /api/inventaire/nouv-en-gros : Cette adresse permet de créer des entrées d'inventaire en gros. Les colonnes suivantes doivent être dans le corps de la requête REST :
  - g_no_lot
  - n_places_min
  - n_places_max
  - n_places_mesure
  - n_places_estime
  - id_er
  - id_reg_stat
  - commentaire
  - methode_estime
  - cubf
- POST /api/inventaire : nouvelle entrée dans la table inventaire_stationnement. Les informations suivantes sont fournies dans le corps du message :
  - g_no_lot
  - n_places_min
  - n_places_max
  - n_places_mesure
  - n_places_estime
  - id_er
  - id_reg_stat
  - commentaire
  - methode_estime
  - cubf
- PUT /api/inventaire/< id_{inv} > : Modification de l'entrée dans la table inventaire_stationnement dont l'identifiant est égal à la valeur entre <>. Le contenu de l'entrée est communiqué dans le corps du message avec les variables suivantes :
  - g_no_lot
  - n_places_min
  - n_places_max
  - n_places_mesure

    - n_places_estime
    - id_er
    - id_reg_stat
    - commentaire
    - methode_estime
    - cubf
- PUT /api/inventaire/maj-en-gros : permet de faire la modification en gros d'inventaire de stationnement. Contrairement à la mise à jour d'un seul élément, l'ensemble des champs de la table inventaire_stationnement doivent être présents dans le corps de la requête.
- DELETE /api/inventaire/< id_{inv} > : supprime l'entrée dont l'id_inv est égal à la valeur entre <>.

API : Règlements

Les appels d'API suivants sont proposés pour les objets de type règlement :

- GET /api/reglements/entete : renvoie tous les entêtes de règlements (description, information administrative). Les paramètres de filtrage suivants peuvent être fournis dans l'URI pour réduire la liste de règlements renvoyés. Les éléments description, ville, texte, article et paragraphe utilisent les fonctions de recherches incluses dans PostgreSQL. (PostgreSQL Global Development Group, 2025a)
    - annee_debut_avant
    - annee_debut_apres
    - annee_fin_avant
    - annee_fin_apres
    - description
    - ville
    - texte
    - article
    - paragraphe
- GET /api/reglements/complet/<id_reg_stat> : renvoie un règlement complet (l'entête et la définition mathématique). Le format JSON renvoyé est le suivant :
    - entete : un vecteur contenant les éléments suivants
        - id_reg_stat : l'identifiant du règlement

    - description : description sommaire du règlement
    - annee_debut_reg : Année d'entrée en vigueur du règlement inclusif
    - annee_fin_reg : Année d'abrogation du règlement (inclusif)
    - texte_loi : Texte de loi définissant le règlement
    - article_loi : Article de loi où le règlement est défini
    - paragraphe_loi : Paragraphe de la loi où le règlement est défini
    - ville : nom commun de la juridiction
  - définition : une table contenant la définition du règlement avec les éléments suivants
    - id_reg_stat_emp : identifiant unique de la ligne de définition mathématique
    - id_reg_stat : identifiant du règlement
    - ss_ensemble : sous-ensemble du règlement auquel appartient la ligne
    - seuil : seuil au dessus duquel le règlement s'applique quand l'opérateur à l'intérieur du sous-ensemble
    - oper : colonne contenant les opérateurs. Le premier élément du sous-ensemble contient l'opérateur applicable entre ce sous-ensemble et le précédent, les autres sont l'opérateur utilisé entre les lignes
    - cases_fix_min : ordonnée à l'origine de la droite représentant le stationnement minimum
    - pente_min : pente de la droite représentant le stationnement minimum
    - cases_fix_max : ordonnée à l'origine de la droite représentant le stationnement maximum
    - pente_max : pente de la droite représentant le stationnement maximum
    - unite : unité de l'axe des x de la droite pour les requis minimum et maximum
- GET /api/reglements/operations : renvoie le contenu de la table liste_operations (Tableau 3.16)
- GET /api/reglements/unites : renvoie les informations contenues dans la table multiplicateur_facteurs_ colonnes (Tableau 3.18)
- GET /api/reglements/unites/<id> : renvoie la ligne de la table multiplicateur _facteurs_colonnes dont l'identifiant est entre <>
- POST /api/reglements/entete : permet de créer un nouvel entête de règlement. Les éléments suivants doivent être fournis dans le corps du message (voir Tableau 3.14)
  - description
  - annee_debut_reg

  - annee_fin_reg
  - texte_loi
  - article_loi
  - paragraphe_loi
  - ville
- PUT /api/reglements/entete/<id> : permet de modifier un entête de règlement. Les mêmes champs doivent être fournis dans le corps que pour la fonction POST tandis que l'identifiant id_reg_stat doit être dans l'adresse.
- DELETE /api/reglements/<id> : permet de supprimer le règlement dont l'identifiant id_reg_stat est égal à la valeur entre <>
- POST /api/reglements/ligne-def : permet de créer une nouvelle entrée dans la table reg_stationnement_empile (voir Tableau 3.15). Les valeurs suivantes doivent être fournies dans le corps de la requête :
  - id_reg_stat : identifiant du règlement
  - ss_ensemble
  - seuil
  - oper
  - cases_fix_min
  - pente_min
  - cases_fix_max
  - pente_max
  - unite
- PUT /api/reglements/ligne-def/<id> : permet de modifier la ligne de définition mathématique dont l'identifiant (id_reg_stat_emp) est entre <>. Les même champs que la requête POST doivent être fournis.
- DELETE /api/reglements/ligne-def/<id> : permet la suppression de la ligne de définition mathématique dont l'identifiant est entre <>.
- GET /api/reglements/graphiques : renvoit le nombre de places minimums requis pour le règlement en fonction de l'unité fournie dans les paramètres de requête. Au minimum, les identifiants séparés par des virgules et l'identifiant d'unité doivent être fournis. Les paramètres suivants peuvent être fournis pour raffiner le graphique :
  - min : valeur minimale de l'axe des x
  - max : valeur maximale de l'axe des x
  - pas : pas pour les valeurs entre min et max

API : Ensembles de règlements

Les appels d'API suivants sont proposés pour les ensembles de règlements.

- GET /api/ens-reg/entete : renvoie l'ensemble des entêtes de règlements de stationnement dont les propriétés sont listées dans le Tableau 3.22 :
  - id_er
  - date_debut_er
  - date_fin_er
  - description_er
- PUT /api/ens-reg/entete/<id_er> : permet de modifier l'entête d'ensemble de règlements dont l'identifiant est entre <>. Les paramètres suivants doivent être fournis dans le corps de la requête (voir Tableau 3.22) :
  - description_er
  - date_debut_er
  - date_fin_er
- POST /api/ens-reg/entete/ : permet de créer un l'entête d'un nouvel ensemble de règlements. Les mêmes champs doivent être fournis que la fonction PUT.
- PUT /api/ens-reg/assoc/<id_assoc_er_reg> : permet de modifier une association spécifique dans un ensemble de règlements. Les champs décrits dans le tableau 3.24. Les entrées ayant un CUBF entre 1 et 9 ne peuvent modifier que le règlement. En effet, au minimum, un ensemble de règlements doit contenir les CUBF 1 à 9. Les variables suivantes doivent être fournies dans le corps de la requête.
  - id_reg_stat, l'identifiant du règlement
  - cubf, le CUBF pour l'utilisation du sol
  - id_er, l'identifiant d'ensemble règlement
- POST /api/ens-reg/assoc permet de créer une nouvelle association entre un CUBF et un règlement. Les variables du tableau 3.24 doivent être fournies :
  - id_reg_stat, l'identifiant du règlement
  - cubf, le CUBF pour l'utilisation du sol
  - id_er, l'identifiant d'ensemble règlement
- DELETE /api/ens-reg/assoc/<id_assoc_er_reg> permet de supprimer l'association dont l'identifiant est fourni dans l'URL.
- GET /api/ens-reg/complet/<id_er> renvoie les données suivantes pour l'ensemble de règlements dont l'identifiant est égal à id_er :

    - entete
        - id_er
        - date_debut_er
        - date_fin_er
        - description_er
    - assoc_util_sol
        - id_assoc_er_reg identifiant primaire
        - id_reg_stat, l'identifiant du règlement
        - cubf, le CUBF pour l'utilisation du sol
        - id_er, l'identifiant d'ensemble règlement
    - table_util_sol
        - CUBF
        - description
- DELETE /api/ens-reg/<id_er> permet de supprimer un ensemble de règlements. Le serveur s'assure que cet ensemble n'est pas utilisé dans un ensemble de règlements-territoire avant de supprimer.

En plus des adresses basiques fournies ci-dessus, des adresses supplémentaires ont été créées pour certaines pages particulières au sein de l'interface.

- GET /api/ens-reg/reg-associes/<id_er> renvoie les entêtes des règlements qui sont utilisés dans l'ensemble de règlements dont l'identifiant est égal à id_er.
- GET /api/ens-reg/entete-par-territoire/<id_periode_geo> renvoie les entêtes des ensembles de règlements associés au territoire dont l'identifiant est égal à id_periode_geo.
- GET /api/ens-reg/par-role/<id_provinc> : permet d'obtenir les entêtes d'ensemble de règlements associés à l'inventaire pour une ou plusieurs entrées du rôle. Plusieurs identifiants séparés par des virgules peuvent être fournis entre <>
- POST /api/ens-reg/informations-pour-graphique : permet d'obtenir les règlements pertinents et les unités formulées pour les ensembles de règlements et le CUBF sélectionné. Les identifiants de règlements et le CUBF sont envoyés dans le corps de la requête

API : Territoire

L'API possède les appels suivants pour obtenir les territoires. Pour l'instant, aucune fonction n'a été implémentée pour modifier ou supprimer les territoires pour l'instant.

— GET /api/territoire/periode/<id_periode> permet d'obtenir l'ensemble des territoires associés qui sont associés à la période spécifiée dans l'URL.
— GET /api/territoire/periode-geo/<id_periode_geo> permet d'obtenir un territoire selon son identifiant unique.

API : Ensembles de règlements territoire

Les ensembles de règlements territoire sont l'association entre les ensembles de règlements et les territoires. Il s'agit pour l'essentiel d'une association entre le territoire et l'ensemble de règlements. Les dates de validités du RST t inférées à partir des dates de validité de l'ensemble de règlements et du territoire. Cet objet a le complément complet d'options pour modifier les associations (contrairement aux territoires et aux quartiers d'analyse qui doivent être téléversés manuellement). Les adresses d'API sont les suivants :

— GET /api/ens-reg-terr/par-territoire/<id_periode_geo> : permet d'obtenir les RST associés au territoire dont l'identifiant est spécifié
— GET /api/ens-reg-terr/associations : permet d'obtenir des associations en fonction de la latitude, la longitude ou les dates d'entrée en vigueur et d'abrogation au moyen des paramètres de requêtes suivants :
  — lat : Latitude en degrés décimale ; doit être utilisé avec une longitude
  — long : Longitude en degrés décimale ; doit être utilisé avec une latitude
  — annee_debut_avant : année de début de la période ou de l'ensemble de règlements est avant l'année spécifiée
  — annee_debut_apres : année de début de la période ou de l'ensemble de règlements est après l'année spécifiée
  — annee_fin_avant : année de fin de la période ou de l'ensemble de règlements est avant l'année spécifiée
  — annee_fin_apres : année de fin de la période ou de l'ensemble de règlements est après l'année spécifiée
  — ville_comme : la ville du territoire ressemble à la chaîne de caractères soumise
  — secteur_comme : le secteur du territoire ressemble à la chaîne de caractères soumise
— POST /api/ens-reg-terr/association : permet de créer une nouvelle association dans la table association_er_territoire (voir tableau 3.25. Les champs suivants doivent être spécifiés dans le corps de la requête :
  — id_er : l'identifiant du PRS

    - id_periode_geo : l'identifiant du territoire
- PUT /api/ens-reg-terr/association/<id_asso_er_ter> : permet de modifier l'association dont l'identifiant est entre <>. Les mêmes champs doivent être spécifiés que pour la création d'une nouvelle association
- DELETE /api/ens-reg-terr/association/<id_asso_er_ter> : permet de supprimer l'association dont l'identifiant est entre <>.

API : Historique

L'API possède les appels suivants pour manipuler l'historique de la ville :

- GET /api/historique obtient l'ensemble des entrées de la table historique_geopol avec les entrées du tableau 3.11. Aucun paramètre de filtrage n'a été mis en place à l'heure actuelle pour l'historique du fait de la simplicité des données en cours.
- PUT /api/historique/<$id_{periode}$> permet de modifier un item de la table historique_geopol. Les colonnes suivantes doivent être dans le corps du message selon les types.
    - nom_periode
    - date_debut_periode
    - date_fin_periode
- POST /api/historique permet de créer une nouvelle période dans la base de données. Les colonnes suivantes doivent être dans le corps du message.
    - nom_periode
    - date_debut_periode
    - date_fin_periode
- DELETE /api/historique/<$id_{periode}$> permet de supprimer la période dont l'identifiant est égal à $id_{periode}$

API : Lots cadastraux et entrées du rôle foncier

Les appels d'API suivants ont été implémentés pour les lots cadastraux et les entrées du rôle. Il est important de noter que des fonctions d'association, de création, de mise à jour et de suppression du rôle seraient pertinentes pour une implémentation en production. Dans le cadre de ce mémoire, les informations du rôle et du cadastre ont été créées manuellement dans la base de données. Finalement, les espaces dans la chaîne de caractères des identifiants doivent être remplacés par le caractère _.

— GET /api/cadastre/lot/quartier-ana/<$id_{quartier}$> permet d'obtenir l'ensemble des lots qui se situent à l'intérieur du quartier d'analyse dont l'identifiant est fourni dans l'URI

— GET /api/cadastre/lot/<*g_no_lot*> permet d'obtenir le lot dont l'identifiant est égal à la valeur fournie de g_no_lot.

— GET /api/cadastre/role-associe/<*g_no_lot*> permet d'obtenir les entrées du rôle foncier associées au lot dont l'identifiant est fourni entre <>. L'identifiant spécifié est celui du lot.

Une fonction permettant de faire des requêtes complexes en utilisant des boites englobantes est en cours de développement, mais incomplète. Elle est principalement pensée pour permettre de réduire le nombre de données géospatiales à garder en mémoire en parcourant la carte.

API : Codes d'utilisation du Bien-Fonds

Les appels pour les CUBF sont principalement utilisés pour créer les associations entre les règlements et les utilisations du sol. Pour rendre la recherche plus facile, des paramètres de requête ont été implémentés pour pouvoir obtenir des sous-ensembles pertinents de la liste des CUBF. Sans paramètre de requête l'API renvoie les 1700 CUBF. La création, la modification et la suppression de CUBF n'ont pas été implémentés

— GET /api/cubf : permet de renvoyer les CUBF et leur description. Deux paramètres de requête sont mis en place pour permettre d'extraire des sous-ensembles.

  — cubf : un CUBF numérique. Il est souvent fourni pour chercher les CUBF enfants

  — niveau : donne le niveau du CUBF. Un niveau 1 implique un CUBF entre 1 et 9, un niveau 2 implique un CUBF entre 10 et 99, un niveau 3 implique un CUBF entre 100 et 999 et un niveau 4 implique un CUBF entre 1000 et 9999

— GET /api/n_entrees : permet de renvoyer le nombre de CUBF pour chaque niveau.

Quelques exemples seront fournis pour clarifier. L'appel à l'adresse « /api/cubf ?niveau=1 » utilisant la méthode GET renvoie les valeurs listées au tableau B.1.

L'appel à la méthode GET à l'adresse « /api/cubf ?niveau=2&cubf=6 » renvoie les entrées au tableau B.2

L'appel de la méthode GET à l'adresse « /api/cubf ?niveau=3&cubf=65 » renvoie les résultats présentés au tableau B.3.

Ainsi, l'inclusion d'un CUBF inférieur à 1000 et un niveau approprié permet d'explorer de manière hiérarchique les CUBF. Si le niveau n'est pas fourni, seule la description du CUBF

Tableau B.1 Réponse à l'appel « /api/cubf ?niveau=1 »

CUBF	Description
1	RÉSIDENTIELLE
2	INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES
3	INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES
4	TRANSPORTS, COMMUNICATIONS ET SERVICES PUBLICS
5	COMMERCIALE
6	SERVICES
7	CULTURELLE, RÉCRÉATIVE DE LOISIRS
8	PRODUCTION ET EXTRACTION DE RICHESSES NATURELLES
9	IMMEUBLES NON EXPLOITÉS ET ÉTENDUES D'EAU

Tableau B.2 Réponse à l'appel « /api/cubf ?niveau=2&cubf=6 »

CUBF	Description
60	IMMEUBLE À BUREAUX
61	FINANCE, ASSURANCE ET SERVICE IMMOBILIER
62	SERVICE PERSONNEL
63	SERVICE D'AFFAIRES
64	SERVICE DE RÉPARATION
65	SERVICE PROFESSIONEL
66	SERVICE DE CONSTRUCTION
67	SERVICE GOUVERNEMENTAL
68	SERVICE ÉDUCATIONNEL
69	SERVICE DIVERS

fourni sera renvoyée. L'appel à GET « /api/cubf/n_entrees » renvoit essentiellement toujours le même résultat donnée au tableau B.4

API : Secteurs d'analyse

L'API permet de manipuler les secteurs municipaux utilisés pour l'analyse qui sont définis à la section 3.5.3. Les fonctions d'édition et de suppression des quartiers d'analyse n'existent pas à l'heure actuelle. Elles devraient être mises en place dans une version de production de l'outil.

— GET /api/quartiers-analyse obtient l'ensemble des quartiers dans la table sec_analyse

Tableau B.3 Réponse à l'appel « /api/cubf ?niveau=3&cubf=65 »

CUBF	Description
651	Service médical et de santé
652	Service juridique
653	Service Social
654	Service social hors institution
655	Service informatique
656	Service de soins paramédicaux
657	Service de soins thérapeutiques
659	Autres services thérapeutiques

Tableau B.4 Réponse de la méthode GET à l'adresse « /api/cubf/n_entrees »

Niveau	Description	n_entrees
1	CUBF 1 à 9	9
2	CUBF 10 à 99	77
3	CUBF 100 à 999	359
4	CUBF 1000 à 9999	1255

API : Analyse agrégée

Plusieurs indicateurs sont agrégés par quartier. Cette section donnera les détails des appels d'API permettant de créer les divers graphiques. La ou les variables sélectionnées ainsi que l'ordre de priorité à sélectionner en cas de présence de plusieurs estimations de stationnement sont communiquées au serveur au moyen de paramètre de requête. 3 types d'analyse de quartier sont possibles : cartographique, par diagramme à barre et par diagramme XY. Chaque type d'analyse se voit attribuer un URI. Les profils d'accumulation de véhicules se voient attribués une URI différente de par leur spécificité. D'autre part, les noms de variables doivent être codifiés dans les scripts clients et serveurs tandis que les requêtes SQL ne sont codifiées que dans le script serveur. Une implémentation future devrait permettre de capturer les variables et toutes les informations attenantes dans un seul fichier pour éviter la duplication et de potentielles erreurs. Les codes de variables sont donnés au Tableau 4.1.

Les URI sont listées ci-dessous :

— GET /api/ana-par-quartier/carto : permet d'obtenir une variable pour une carte choroplèthe. Si une variable liée au stationnement est requise, un ordre de priorité des estimations doit être spécifié. Les paramètres de requête sont les suivants :

    - variable : identifiant de variable tel que spécifié au tableau 4.1
    - ordre : ordre de priorité. Doit être spécifié comme la suite des chiffres 1 2 et 3 séparés de virgules
- GET /api/ana-par-quartier/histo : permet d'obtenir les variables pour un diagramme à barre en fonction du quartier. Si une variable liée au stationnement est requise, un ordre de priorité des estimations doit être spécifié. Les paramètres de requête sont les suivants :
    - variable : identifiant de variable tel que spécifié au tableau 4.1
    - ordre : ordre de priorité. Doit être spécifié comme la suite des chiffres 1 2 et 3 séparés de virgules
- GET /api/ana-par-quartier/XY : permet d'obtenir les quantités pour un diagramme XY. Les quartiers sont spécifiés dans l'entête de la réponse. Si une variable liée au stationnement est requise, un ordre de priorité des estimations doit être spécifié. Les paramètres de requête sont les suivants :
    - X : variable sur l'axe des x
    - Y : variable sur l'axe des y
    - ordre : ordre de priorité. Doit être spécifié comme la suite des chiffres 1 2 et 3 séparés de virgules.

Ainsi, la requête pour obtenir la carte choroplèthe du stationnement total, avec l'ordre de priorité des inventaires étant fixé à « Manuel → réglementaire manuel → Réglementaire automatique » aurait la requête suivante « /api/ana-par-quartier/carto ?variable=stat-tot&ordre=1,3,2 ». Une requête pour les informations d'un graphique XY avec la population en 2021 sur l'axe des X et le stationnement total en axe des y serait « /api/ana-par/quartier/XY ?X=popu-2021&Y=stat-tot&ordre=1,3,2 ». Les données sont renvoyées de manière à être directement utilisables dans la librairie de graphes de react-chart-js (Ayerst, 2017). Deux adresses supplémentaires sont créées pour recalculer les statistiques agrégées.

- GET /api/ana-par-quartier/recalcule-stat-agreg : permet de recalculer le nombre de places de stationnement pour chaque quartier
- GET /api/ana-par-quartier/recalcule-val-autres : permet de recalculer les statistiques issues de l'enquête OD, du recensement ou du rôle foncier pour chaque quartier

API : Profiles d'accumulation véhicule

Les appels d'API suivants sont mis en place pour gérer les profils d'accumulation de véhicules (Diallo et al., 2015 ; Morency & Trépanier, 2008) qui permettent de trouver la « population »

de véhicules dans une géographie en fonction de l'heure de la journée.

- GET /api/PAV ?order=<X,Y,Z>&id_quartier=<$id_{quartier}$> permet d'accéder au profil d'accumulation véhicule pour le quartier dont l'identifiant est spécifié. L'ordre spécifié donne l'ordre de préséance pour le relevé de l'inventaire du quartier. En effet, l'API fournit l'inventaire du quartier en même temps pour visuellement constater l'utilisation de la capacité. Les données sont fournies de manière à être utilisées par react-chart-js (Ayerst, 2017).
- GET /api/PAV/recalcule/<$id_{quartier}$> permet de refaire le calcul du profile d'accumulation véhicule à partir des données de l'enquête OD
- POST /api/PAV/<$id_{quartier}$> permet de mettre à jour le profile d'accumulation dans la base de données une fois que l'utilisateur l'a confirmé

API : Validation

L'API de validation a été mis en place pour permettre de rapidement assurer la qualité de l'inventaire créé. Bien que des développements méthodologiques demeurent, l'implémentation actuelle a les fonctionnalités de base pour créer une structure d'échantillonnage stratifiée, de sélectionner un ensemble de lots selon la méthodologie choisie, d'entrer les données de validation et de visualiser les résultats. Cette section documentera les appels d'API mise en place pour soutenir cette fonctionnalité.

- GET /api/valid/strate : obtiens les strates sauvegardées. Peut être filtré en fonction du nombre d'échantillons, de l'identifiant et du nom de la colonne de filtre
- POST /api/valid/strate : crée une nouvelle strate. L'information sur la nouvelle strate doit être fourni dans le corps de requête ainsi que l'identifiant du parent s'il y en a un. Si le parent existe il sera mis à jour
- PUT /api/valid/strate/<id_{strate}> : mise à jour d'une state existante. Aucune information sur les parents ou les enfants n'est nécessaire
- DELETE /api/valid/strate/<id_{strate}> : supprime une strate et ses enfants. Contient présentement un défaut puisque l'identifiant n'est pas enlevé des listes d'enfants pertinentes.
- GET /api/valid/strate/donnees_intrantes : recalcule les données requises pour la validation incluant la sélection de l'échantillon
- GET /api/valid/strate/colonnes_possibles : renvoie les colonnes qu'il est possible d'utiliser dans les filtres
- GET /api/valid/feuilles : renvoie les strates qui n'ont pas d'enfants et qui sont donc les catégories finales d'échantillonnage

— GET /api/valid/resultats : Renvoie les résultats de validation des paramètres de requête sont en place pour filtrer par identifiant de strate, par identifiant de lot, par fond de tuile et l'identifiant de validation

— POST /api/valid/resultats : nouveau résultat créé dans la table pertinente selon le schéma du tableau 3.37. Le résultat est fourni sans identifiant dans le corps de la requête.

— PUT /api/valid/resultats/<id_{val}> : modifie un résultat de validation dont l'identifiant est spécifié. Le résultat est fourni dans le corps de requête et doit respecter le schéma spécifié dans le tableau 3.37

— DELETE /api/valid/resultats/<id_{val}> : permet de supprimer le résultat dont l'identifiant est fourni

— GET /api/valid/graphiques : obtient les graphiques pour la page de validation. L'identifiant de strate, le type de graphique et la valeur max de x peuvent être spécifiés comme paramètres de requête. Le retour de la fonction est dans un format compatible avec react charts.

— GET /api/valid/popu-strate : renvoie la taille de population d'une strate

ANNEXE C DÉTAILS DES DONNÉES DE RÉGLEMENTAIRES

Ensembles de règlements créés

Le tableau suivant donne une liste des ensembles de règlements créés :

Tableau C.1 Liste des ensembles de règlements créés

Description	Année début	Année Fin
Lac St-Charles - Remplissage	Perpétuité	1987
Sillery - Remplissage	Perpétuité	1994
St-Émile - Remplissage	Perpétuité	1989
Ste-Foy - Remplissage	Perpétuité	1994
Val-Belair - Remplissage	Perpétuité	1987
Vanier - Remplissage	Perpétuité	1992
Lorretteville - Remplissage	Perpétuité	1994
CUQ - HV-BV-Limoilou - Général - Placeholder	Perpétuité	1994
CUQ - Des Rivières - Placeholder	Perpétuité	1994
Beauport - Remplissage	Perpétuité	1986
Cap Rouge - Remplissage	Perpétuité	1994
Charlesbourg - Remplissage	Perpétuité	1995
Beauport - 87-806	1987	2009
Lac St-Charles - 88-257	1988	2009
Val-Belair - VB-344-88	1988	2009
St-Émile - 310-89	1989	2009
Vanier - 93-05-1245	1993	2009
CUQ - Des Rivières	1995	2009
Cap-Rouge - 1151-95	1995	2009
Ste-Foy - 3501	1995	2009
Sillery - 950	1995	2009
CUQ - HV-BV-Limoilou - Prioritraire	1995	1996
CUQ - HV-BV-Limoilou - Général	1995	1996
Lorretteville -1386	1995	2009
Charlesbourg - 96-2921	1996	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - VQ - HV	1997	2009

Tableau C.1 Liste des ensembles de règlements créés (suite)

Description	Année début	Année Fin
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - Maizerets	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - St-Jean-Baptiste	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - Montcalm	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - st-sacrement	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - Lairet	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - Vieux-Limoilou	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - Saint Roch	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - St-Sauveur	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - Cap-Blanc	1997	2009
CUQ - Abrogation secteur prioritaire - VQ - BV	1997	2009
Québec - post harm - structurant B	2010	2015
Québec - post harm - général	2010	2015
Québec - post harm - structurant A	2010	2015
Québec - post harm - urbain dense	2010	2015
Québec - Refonte hotellerie - structurant A	2016	2018
Québec - Refonte hotellerie - général	2016	2018
Québec - Refonte hotellerie - structurant B	2016	2018
Québec - Refonte hotellerie - urbain dense 2016	2016	2017
Québec - modification alimentaire - urbain dense	2018	2018
Québec - modification poste de carburant et minigolf - structurant B	2019	2019
Québec - modification poste de carburant et minigolf - structurant A	2019	2019
Québec - modification poste de carburant et minigolf - urbain dense	2019	2019
ER ITE dummy	2019	2023
Québec - modification poste de carburant et minigolf - général	2019	2019
Québec - refonte hotelliere 2 - général	2020	2023
Québec - refonte hotelliere 2 - urbain dense	2020	2023
Québec - refonte hotelliere 2 - structurant A	2020	2023
Québec - refonte hotelliere 2 - structurant B	2020	2023

Tableau C.1 Liste des ensembles de règlements créés (suite)

Description	Année début	Année Fin
Québec - abrogation minimums résidentiels - max industriel - urbain dense	2024	En vigueur
Québec - abrogation minimums résidentiels - max industriel - structurant A	2024	En vigueur
Québec - max industriel - général	2024	En vigueur
Québec - abrogation minimums résidentiels - max industriel - structurant B	2024	En vigueur

ANNEXE D REQUÊTES ET MORCEAUX DE CODES PERTINENTS

Cette section détaillera certaines requêtes qui n'ont pas été listées dans le texte principal du mémoire, mais qui sont pertinentes.

Code : Sélection d'entrées du rôle foncier lors d'un calcul par quartier d'analyse

Extrait de code D.1 – Requête 1 dans tax_database_for_analysis_territory

```
SELECT
    points.*
FROM
    public.role_foncier AS points,
    public.secteurs_analyse AS polygons
WHERE
    ST_Within(
        points.geometry,
        (SELECT
            polygons.geometry
        WHERE polygons.id_periode_geo = id_quartier_fourni
        )
    )
```

Il est ensuite possible de lister les identifiants provinciaux uniques qui ont été sélectionnés et de trouver les lots associés. Cette opération est faite dans Python avant de lancer une deuxième requête listée ci-dessous.

Extrait de code D.2 – Requête 2 dans tax_database_for_analysis_territory

```
SELECT
    *
FROM
    public.association_cadastre_role
WHERE
    id_provinc IN (LISTE FOURNIE)
```

La table issue de la requête ci-dessus est gardée en mémoire. Les identifiants de lots uniques issus de cette requête sont ensuite utilisés comme intrants dans la requête suivante :

Extrait de code D.3 – Requête 3 dans tax_database_for_analysis_territory

```
SELECT
    *
FROM
    public.cadastre
WHERE
    g_no_lot IN (LISTE DE LOTS)
```

Ces trois tables forment l'ensemble de données foncières (TaxDataset) pour le calcul en cours.

Code : Affectation des ensembles de règlements aux entrées du rôle à l'intérieur du quartier

On obtient tout d'abord les territoires historiques potentiellement affectés.

Extrait de code D.4 – Sélection des territoires touchant au rôle foncier

```
WITH unioned_geometry AS (
    SELECT
        ST_Union(geometry) AS geom
    FROM
        public.role_foncier
    WHERE
        (id_provinc IN (LISTE ID_PROVINCIAUX))
    )
SELECT
    territories.*
FROM
    public.cartographie_secteurs AS territories, unioned_geometry
WHERE
    (ST_Intersects(territories.geometry,unioned_geometry.geom))
```

On trouve l'ensemble des identifiants uniques :

Extrait de code D.5 – Ligne de code Python pour extraire les territoires pertinents

```
relevant_territory_ids = relevant_territories['id_periode_geo'].unique().
   tolist()
```

On cherche les associations aux ensembles de règlements pour trouver ceux qui sont nécessaire

Extrait de code D.6 – Sélection des associations d'ensembles de règlements aux territoires

```
SELECT *
FROM
    public.association_er_territoire
WHERE
    id_periode_geo IN (LISTE DE TERRITOIRES TRANSMISE)
```

On va chercher les géographies pertinentes

Extrait de code D.7 – Sélection des territoires pertinents

```
SELECT *
FROM
    public.cartographie_secteurs
WHERE
    id_periode_geo IN (LISTE DE TERRITOIRES TRANSMISE)
```

On obtient ensuite l'historique géopolitique pour la séparation temporelle des points du rôle foncier

Extrait de code D.8 – Sélection de l'historique géopolitique

```
SELECT
    *
FROM
    public.historique_geopol
```

On crée ensuite les ensembles de règlements territoire et on renvoie une liste :

Extrait de code D.9 – Coeur de la boucle pour créer la liste de RST

```
 # get the regset id to pull
reg_set_to_get = association['id_er']
# get the relevant territory id
relevant_territory_id = association['id_periode_geo']
# get actual territory in full
relevant_territory = territories.loc[territories['id_periode_geo']==
    relevant_territory_id]
# pull territory start and end year
start_year_terr = history.loc[history[id_periode] == relevant_territory['
    id_periode'].values[0],'annee_debut_periode'].values[0]
end_year_terr = history.loc[history[id_periode] == relevant_territory['
    id_periode'].values[0],'annee_fin_periode'].values[0]
# get the reg set and years
reg_set:PRS.ParkingRegulationSet = PRS.from_sql(int(reg_set_to_get),con=
    con)[0]
start_year_regset = reg_set.start_date
end_year_regset = reg_set.end_date
# put the dates into coherence
if start_year_terr is None and start_year_regset is None:
    start_year_RST = None
elif start_year_terr is None:
    start_year_RST = start_year_regset
elif start_year_regset is None:
    start_year_RST = start_year_terr
else:
    start_year_RST = max(start_year_terr,start_year_regset)

if (end_year_terr is None or np.isnan(end_year_terr)) and (end_year_regset
    is None or np.isnan(end_year_regset)):
    end_year_RST = None
elif (end_year_terr is None or np.isnan(end_year_terr)):
    end_year_RST = end_year_regset
elif  (end_year_regset is None or np.isnan(end_year_regset)) :
    end_year_RST = end_year_terr
else:
    end_year_RST = min(end_year_terr,end_year_regset)
RST_to_append = RegSetTerritory(relevant_territory,reg_set,start_year_RST,
    end_year_RST,association['id_assoc_er_ter'])
RST_list_to_return.append(RST_to_append)
```

Code : Affectation des données foncières aux RST

La section suivant donnera un aperçu du code requis pour assigner les données foncières aux différents RST. On ceommence par filtrer par date

Extrait de code D.10 – Procédure d'assignation du rôle foncier aux RST

```
tax_dataset_match = []
for rst_to_filter_by in relevant_rsts:
    filtered_tax_dataset = tax_data.year_filter(rst_to_filter_by.
   start_year,rst_to_filter_by.end_year).territory_filter(rst_to_filter_by
   .territory_info)
    tax_dataset_match.append(filtered_tax_dataset)
```

La méthode territory filter permet de faire un filtre spatial des points du rôle à l'intérieur du polygone de juriction :

Extrait de code D.11 – Fonction territory_filter

```
new_tax_table = self.tax_table.clip(territory).copy()
tax_ids = new_tax_table['id_provinc'].unique().tolist()
new_association_table = self.lot_association.loc[self.lot_association['
   id_provinc'].isin(tax_ids)].copy()
lot_ids = new_association_table['g_no_lot'].unique().tolist()
new_lot_table = self.lot_table.loc[self.lot_table['g_no_lot'].isin(lot_ids
   )].copy()
tax_data_to_out = TaxDataset(new_tax_table,new_association_table,
   new_lot_table)
return tax_data_to_out
```

La fonction de filtre par date est donnée ci-dessous :

Extrait de code D.12 – Méthode year_filter

```
def year_filter(self,start_year=None,end_year=None):
    '''# year_filter
    Returns a tax dataset within a year set
    ## Inputs
        - start_year: start year of filter
        - end_year : end year of filter
    ## Outputs
        - TaxDataSet'''
    if start_year is None and end_year is None:
        raise ValueError
    elif start_year is None:
        new_tax_table:gpd.GeoDataFrame = self.tax_table.loc[((self.
   tax_table['rl0307a']<= end_year))]
    elif end_year is None:
        new_tax_table:gpd.GeoDataFrame = self.tax_table.loc[((self.
   tax_table['rl0307a']>= start_year))]
    else:
        new_tax_table:gpd.GeoDataFrame = self.tax_table.loc[((self.
   tax_table['rl0307a']>= start_year) & (self.tax_table['rl0307a']<=
   end_year))].copy()
    tax_ids = new_tax_table['id_provinc'].unique().tolist()
    new_association_table:pd.DataFrame = self.lot_association.loc[self.
   lot_association['id_provinc'].isin(tax_ids)].copy()
    lot_ids = new_association_table['g_no_lot'].unique().tolist()
    new_lot_table:gpd.GeoDataFrame = self.lot_table.loc[self.lot_table['
   g_no_lot'].isin(lot_ids)].copy()
    new_tax_data = TaxDataset(new_tax_table,new_association_table,
   new_lot_table)
    return new_tax_data
```

Identification lots problématiques

Du fait de problèmes de complétude des données du rôle foncier, il est potentiellement nécessaire d'aider l'analyste à identifier des lots qui doivent potentiellement être revisités.

Extrait de code D.13 – Identification de lots problématiques

```
 SELECT
   cad.g_no_lot,
   COUNT(rf.id_provinc) AS compte_role,
   COUNT(
     CASE
       WHEN (rf.rl0308a IS NULL AND rf.rl0105a::int <= 1999)
          OR (rf.rl0311a IS NULL AND rf.rl0105a::int >= 2000)
       THEN 1
     END
   ) AS compte_donnee_manquant,
   COUNT(CASE WHEN rf.rl0307a IS NULL THEN 1 END) AS
compte_date_manquant,
   (CASE WHEN inv.n_places_min = 0 THEN TRUE ELSE FALSE END) AS
n_places_min_nul
 FROM role_foncier rf
 JOIN association_cadastre_role acr ON acr.id_provinc = rf.id_provinc
 JOIN cadastre cad ON acr.g_no_lot = cad.g_no_lot
 JOIN inventaire_stationnement inv ON cad.g_no_lot = inv.g_no_lot
 WHERE inv.methode_estime = 2
 GROUP BY cad.g_no_lot, inv.n_places_min;
```

Code : calcul d'un sous-ensemble d'addition

Le code pour le calcul d'un sous-ensemble d'addition est donné ci-dessous.

Extrait de code D.14 – Calcul d'un sous-ensemble avec l'opérateur d'addition

```
def calculate_addition_based_subset_from_inputs_class(reg_to_calculate:PR.
    ParkingRegulations,subset:int,data:PII.ParkingCalculationInputs,
    methode_estime:int=3):
if reg_to_calculate.check_subset_exists(subset) and reg_to_calculate.
    check_only_one_regulation():
     operator = reg_to_calculate.get_subset_intra_operation_type(subset)
     if operator==1:
         subset_def = reg_to_calculate.get_subset_def(subset)
         relevant_data = data.get_by_reg(reg_to_calculate.get_reg_id())
         reg_units = reg_to_calculate.get_subset_units(subset)
         if relevant_data.check_units_present(reg_units):
             inventory = pd.DataFrame(relevant_data.loc[relevant_data[unite
    ].isin(reg_units)].merge(subset_def,on=['id_reg_stat','unite'],how='
    left'))
             mask_both_min_not_none = (
                 inventory['cases_fix_min'].notna() &
                 inventory['pente_min'].notna()
             )
             mask_both_max_not_note = (
                 inventory['cases_fix_max'].notna() &
                 inventory['pente_max'].notna()
             )
             mask_crossing_min_not_none = (
                 inventory['cases_fix_min'].notna()&
                 inventory['pente_min'].isna()
             )
             mask_crossing_max_not_none = (
                 inventory['cases_fix_max'].notna()&
                 inventory['pente_max'].isna()
             )
             mask_both_min_none = (
                 inventory['cases_fix_min'].isna()&
                 inventory['pente_min'].isna()
             )
             mask_both_max_none = (
                 inventory['cases_fix_max'].isna()&
                 inventory['pente_max'].isna())
```

Extrait de code D.14 – Calcul d'un sous-ensemble avec l'opérateur d'addition (suite)

```
        inventory.loc[mask_both_min_not_none,'n_places_min'] =
inventory.loc[mask_both_min_not_none,
                'cases_fix_min'] + inventory.loc[
mask_both_min_not_none,
                    'pente_min'] * inventory.loc[
mask_both_min_not_none,'valeur']
        inventory.loc[mask_crossing_min_not_none,'n_places_min'] =
inventory.loc[mask_crossing_min_not_none,'cases_fix_min']
        inventory.loc[mask_both_min_none,'n_places_min'] = np.nan

        inventory.loc[mask_both_max_not_note,'n_places_max'] =
inventory.loc[mask_both_max_not_note,
                'cases_fix_max'] + inventory.loc[
mask_both_max_not_note,
                    'pente_max'] * inventory.loc[
mask_both_max_not_note,'valeur']
        inventory.loc[mask_crossing_max_not_none,'n_places_max'] =
inventory.loc[mask_crossing_max_not_none,'cases_fix_max']
        inventory.loc[mask_both_max_none,'n_places_max'] = np.nan
        inventory.drop(columns=['id_reg_stat_emp','ss_ensemble','seuil
','oper','cases_fix_min','cases_fix_max','pente_min','pente_max'],
inplace=True)
        inventory['commentaire'] = inventory.apply(lambda x: f'Unite:
{x['unite']} Val: {x['valeur']} ', axis=1)
        if config_db.db_column_reg_sets_id not in inventory.columns:
            inventory['id_er']=0
        agg_dict = {
            'cubf': lambda x: '/'.join(map(str, x)),
            'id_reg_stat': lambda x: '/'.join(map(str, x)),
            'id_er': lambda x: '/'.join(map(str, x)),
            'commentaire': lambda x: '/'.join(set(x)),    #
Concatenate unique names
            'n_places_min': 'sum',
            'n_places_max':'sum' # Sum the values
        }
```

Extrait de code D.14 – Calcul d'un sous-ensemble avec l'opérateur d'addition (suite)

```
            inventory_out = inventory.groupby(by=config_db.
db_column_lot_id).agg(agg_dict).reset_index()
            inventory_out.loc[inventory_out['n_places_max']<inventory_out[
'n_places_min'],'n_places_max']=None
            inventory_out['methode_estime'] = methode_estime
            inventory_out['n_places_mesure'] = np.nan
            inventory_out['n_places_estime'] = np.nan
            return ParkingInventory(inventory_out)
        else:
            ValueError('You need to provide all relevant units for a
regulation')
```

Code : calcul d'un sous-ensemble de seuils

Le code pour le calcul d'un sous-ensemble de seuil est donné ci-dessous :

Extrait de code D.15 – Calcul d'un sous-ensemble de type seuils

```
def calculate_threshold_based_subset_from_inputs_class(reg_to_calculate:PR
    .ParkingRegulations,subset:int,data:PII.ParkingCalculationInputs,
    methode_estime:int=3):
if reg_to_calculate.check_subset_exists(subset) and reg_to_calculate.
    check_only_one_regulation():
     units = reg_to_calculate.get_subset_units(subset)
     operator = reg_to_calculate.get_subset_intra_operation_type(subset)
     if len(units)==1 and operator ==4:
         thresholds = reg_to_calculate.get_subset_thresholds(subset)
         previous_threshold = None
         parking_final = pd.DataFrame()
         for threshold in thresholds:
             lower_thresh = float(threshold)
             if previous_threshold is not None:
                 upper_thresh = float(previous_threshold)
             else:
                 upper_thresh = previous_threshold
             relevant_data = data.get_by_reg(reg_to_calculate.get_reg_id())
    .get_by_units(units[0]).filter_by_threshold(lower_thresh, upper_thresh)
             previous_threshold=threshold
             if not relevant_data.empty:
                 line_def = reg_to_calculate.
    get_line_item_by_subset_threshold(subset,threshold)
                 zero_crossing_min = line_def['cases_fix_min'].values[0]
                 zero_crossing_max = line_def['cases_fix_max'].values[0]
                 slope_min = line_def['pente_min'].values[0]
                 slope_max = line_def['pente_max'].values[0]
                 parking_frame_thresh = pd.DataFrame()
                 parking_frame_thresh['g_no_lot'] = relevant_data['g_no_lot
    ']
```

Extrait de code D.15 – Calcul d'un sous-ensemble de type seuils (suite)

```
                if zero_crossing_min is not None and slope_min is not None
    :
                    parking_frame_thresh['n_places_min'] =
    zero_crossing_min + slope_min * relevant_data['valeur']
                elif zero_crossing_min is not None:
                    parking_frame_thresh['n_places_min'] =
    zero_crossing_min
                else:
                    parking_frame_thresh['n_places_min'] = None
                if zero_crossing_max is not None and slope_max is not None
    :
                    parking_frame_thresh['n_places_max'] =
    zero_crossing_max + slope_max * relevant_data['valeur']
                elif zero_crossing_max is not None:
                    parking_frame_thresh['n_places_max'] =
    zero_crossing_max
                else:
                    parking_frame_thresh['n_places_max'] = None
                parking_frame_thresh.loc[parking_frame_thresh['
    n_places_max']<parking_frame_thresh['n_places_min'],'n_places_max']=
    None
                parking_frame_thresh['n_places_mesure'] = None
                parking_frame_thresh['n_places_estime'] = None
                parking_frame_thresh['methode_estime'] = methode_estime
                parking_frame_thresh['id_reg_stat'] = relevant_data['
    id_reg_stat']
                if 'id_er' in relevant_data.columns:
                    parking_frame_thresh['id_er'] = relevant_data['id_er']
                else:
                    parking_frame_thresh['id_er']=0
                parking_frame_thresh['cubf'] = relevant_data['cubf']
                if parking_final.empty:
                    parking_final = parking_frame_thresh
                else:
                    parking_final = pd.concat([parking_final,
    parking_frame_thresh])
            parking_out = ParkingInventory(parking_final)
            return parking_out
        else:
            ValueError('subset should have operator 4 and only one unit')
else:
    ValueError('Can only calculate one rule at a time')
```

Code : Sélection entre deux sous-ensembles

Le code suivant donne la fonction utilisée pour choisir entre l'inventaire de deux sous-ensembles :

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation

```
def subset_operation(inventory_1:ParkingInventory,operator,inventory_2:
    ParkingInventory) ->ParkingInventory:
     logger = logging.getLogger(__name__)
     if isinstance(operator,int):
         match operator:
             case 1:
                 raise NotImplementedError('Subset Operator no implemented'
    )
             case 2:
                 raise NotImplementedError('Obsolete operator')
             case 3:
                 logger.info("entering MOST CONSTRAINING OR operation")
                 if (inventory_1.parking_frame['n_places_min'].isnull().all
    () and inventory_2.parking_frame['n_places_max'].isnull().all()): # one
     is a min, one is a max if min > max
                     logger.info('Entree dans l operation de subset par
    defaut')
                     # create dataframe
                     parking_frame_out = pd.DataFrame()
                     # pull data from left
                     parking_frame_out = inventory_1.parking_frame[[
    config_db.db_column_lot_id,'n_places_max']].copy()
                     parking_frame_out.rename(columns={'n_places_max':'
    n_places_max_left'},inplace=True)
                     # pull data from right
                     parking_frame_right =inventory_2.parking_frame[[
    config_db.db_column_lot_id,'n_places_min']].copy()
                     parking_frame_right.rename(columns={'n_places_min':'
    n_places_min_right'},inplace=True)
                     #merge data
                     parking_frame_out = parking_frame_out.merge(
    parking_frame_right,on=config_db.db_column_lot_id)
```

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation (suite)

```
                # case 1 min<=max
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']<=parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_min_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']<=parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_min_right']
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']<=parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_max_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']<=parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_max_left']
                # case 2 min>max
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']>parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_min_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']<=parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_max_left']
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']>parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_max_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_right']<=parking_frame_out['n_places_max_left'],'
n_places_max_left']
                # clean up the right left stuff
                parking_frame_out.drop(columns=['n_places_min_right','
n_places_max_left'],inplace=True)
                # copy old parking frame
                old_parking_frame = inventory_1.parking_frame.copy()
                # merge the data to the old parking frame
                new_parking_frame = old_parking_frame.merge(
parking_frame_out,how='left',on=config_db.db_column_lot_id)
                # drop the old data
                new_parking_frame.drop(columns=['n_places_min','
n_places_max'],inplace=True)
                # rename columns
                new_parking_frame.rename(columns={'n_places_min_final'
:'n_places_min','n_places_max_final':'n_places_max'},inplace=True)
                #create parking inventory object
                parking_inventory_object = ParkingInventory(
new_parking_frame)
```

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation (suite)

```
            elif (inventory_1.parking_frame['n_places_max'].isnull().
all() and inventory_2.parking_frame['n_places_min'].isnull().all()): #
one is a min, one is a max if min > max
                logger.info('Entree dans loperation de subset par
defaut')
                # create dataframe
                parking_frame_out = pd.DataFrame()
                # pull data from left
                parking_frame_out = inventory_1.parking_frame[[
config_db.db_column_lot_id,'n_places_min']].copy()
                parking_frame_out.rename(columns={'n_places_min':'
n_places_min_left'},inplace=True)
                # pull data from right
                parking_frame_right =inventory_2.parking_frame[[
config_db.db_column_lot_id,'n_places_max']].copy()
                parking_frame_right.rename(columns={'n_places_max':'
n_places_max_right'},inplace=True)
                #merge data
                parking_frame_out = parking_frame_out.merge(
parking_frame_right,on=config_db.db_column_lot_id)
                # case 1 min<=max
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']<=parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_min_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']<=parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_min_left']
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']<=parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_max_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']<=parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_max_right']
                # case 2 min>max
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']>parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_min_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']<=parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_max_right']
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']>parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_max_final'] = parking_frame_out.loc[parking_frame_out['
n_places_min_left']<=parking_frame_out['n_places_max_right'],'
n_places_max_right']
```

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation (suite)

```
                # clean up the right left stuff
                parking_frame_out.drop(columns=['n_places_min_left','
n_places_max_right'],inplace=True)
                # copy old parking frame
                old_parking_frame = inventory_1.parking_frame.copy()
                # merge the data to the old parking frame
                new_parking_frame = old_parking_frame.merge(
parking_frame_out,how='left',on=config_db.db_column_lot_id)
                # drop the old data
                new_parking_frame.drop(columns=['n_places_min','
n_places_max'],inplace=True)
                # rename columns
                new_parking_frame.rename(columns={'n_places_min_final'
:'n_places_min','n_places_max_final':'n_places_max'},inplace=True)
                #create parking inventory object
                parking_inventory_object = ParkingInventory(
new_parking_frame)
            else: # default case, i have a min and a max
                logger.info('Entree dans l operation de subset par
defaut')
                # create an emptry dataframe
                parking_frame_out = pd.DataFrame()
                # copy over self.parking_frame, mins and maxes, rename
 left
                parking_frame_out = inventory_1.parking_frame[[
config_db.db_column_lot_id,'n_places_min','n_places_max']].copy()
                parking_frame_out.rename(columns={'n_places_min':'
n_places_min_left','n_places_max':'n_places_max_left'},inplace=True)
                # copy over inventory_2.parking_frame, mins and maxes,
 rename right
                parking_frame_right =inventory_2.parking_frame[[
config_db.db_column_lot_id,'n_places_min','n_places_max']].copy()
                parking_frame_right.rename(columns={'n_places_min':'
n_places_min_right','n_places_max':'n_places_max_right'},inplace=True)
                # merge the dataframes
                parking_frame_out = parking_frame_out.merge(
parking_frame_right,on=config_db.db_column_lot_id)
```

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation (suite)

```
                # mins and maxes and cleanup
                parking_frame_out['n_places_min_final'] =
parking_frame_out[['n_places_min_left','n_places_min_right']].max(axis
=1)
                parking_frame_out['n_places_max_final'] =
parking_frame_out[['n_places_max_left','n_places_max_right']].min(axis
=1)
                parking_frame_out.drop(columns=['n_places_min_left','
n_places_min_right','n_places_max_left','n_places_max_right'],inplace=
True)
                # copy th old frame
                old_parking_frame = inventory_1.parking_frame.copy()
                # merge new onto old
                new_parking_frame = old_parking_frame.merge(
parking_frame_out,how='left',on=config_db.db_column_lot_id)
                # drop old
                new_parking_frame.drop(columns=['n_places_min','
n_places_max'],inplace=True)
                #name cleanup
                new_parking_frame.rename(columns={'n_places_min_final'
:'n_places_min','n_places_max_final':'n_places_max'},inplace=True)
                new_parking_frame['commentaire'] = inventory_1.
parking_frame['commentaire']+'/' +inventory_2.parking_frame['
commentaire']
                #create object
                parking_inventory_object = ParkingInventory(
new_parking_frame)
            logger.info('Completion du cas de base')
            return parking_inventory_object
        case 4:
            raise NotImplementedError('Subset Operator no implemented'
)
        case 5:
            raise NotImplementedError('Obsolete operator')
```

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation (suite)

```
            case 6:
                logger.info('Entree dans l''operation OU SIMPLE')
                parking_frame_out = pd.DataFrame()
                parking_frame_out = inventory_1.parking_frame[[config_db.
db_column_lot_id,'n_places_min','n_places_max']].copy()
                parking_frame_out.rename(columns={'n_places_min':'
n_places_min_left','n_places_max':'n_places_max_left'},inplace=True)
                parking_frame_right =inventory_2.parking_frame[[config_db.
db_column_lot_id,'n_places_min','n_places_max']].copy()
                parking_frame_right.rename(columns={'n_places_min':'
n_places_min_right','n_places_max':'n_places_max_right'},inplace=True)
                parking_frame_out = parking_frame_out.merge(
parking_frame_right,on=config_db.db_column_lot_id)
                # implemente comme prenant le minimum des requis minimaux.
 Ceci et mis en place selon la logique qu'un developpeur immobilier
voudrait potentiellement
                # Cas 1 la gauche_min est plus petit: min_final = min_left
, max_final = max_left
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left
']<parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_min_final'] =
parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left']<
parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_min_left']
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left
']<parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_max_final'] =
parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left']<
parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_max_left']
                # Cas 2 la droite_min est plus petit: min_final =
min_right, max_final = max_right
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left
']>=parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_min_final'] =
parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left']>=
parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_min_right']
                parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left
']>=parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_max_final'] =
parking_frame_out.loc[parking_frame_out['n_places_min_left']>=
parking_frame_out['n_places_min_right'],'n_places_max_right']
                # ramene le vieux frame
                old_parking_frame = inventory_1.parking_frame.copy()
```

Extrait de code D.16 – Fonction subset_operation (suite)

```
            # drop gauche/droite
            parking_frame_out.drop(columns=['n_places_min_left','
n_places_min_right','n_places_max_left','n_places_max_right'],inplace=
True)
            new_parking_frame = old_parking_frame.merge(
parking_frame_out,how='left',on=config_db.db_column_lot_id)
            new_parking_frame.drop(columns=['n_places_min','
n_places_max'],inplace=True)
            new_parking_frame.rename(columns={'n_places_min_final':'
n_places_min','n_places_max_final':'n_places_max'},inplace=True)
            new_parking_frame['commentaire'] = inventory_1.
parking_frame['commentaire']+'/' +inventory_2.parking_frame['
commentaire']
            if config_db.db_column_reg_sets_id not in
new_parking_frame.columns:
                new_parking_frame[config_db.db_column_reg_sets_id]=0
            parking_inventory_object = ParkingInventory(
new_parking_frame)
            return parking_inventory_object
 else:
    raise ValueError(f'Operator must be integer, you supplied {type(
operator)}')
```

Code : Inventaire compilé par quartier

L'agrégation du stationnement est faite avec une requête spatiale assez onéreuse. D'autre part, un lot aurait potentiellement plusieurs inventaires avec différentes méthodes. L'application web permet de prioriser différents types d'inventaires en fonction de la préférence de l'analyste. Les colonnes inv_XYZ représentent chacune une priorité entre les différentes méthodologies d'inventaire.

Extrait de code D.17 – Compilation de l'inventaire par secteur

```
 DELETE FROM stat_agrege;
         WITH LotNeighborhood AS (
             SELECT
                 c.g_no_lot,
                 s.id_quartier,
                 s.superf_quartier,
                 s.geometry,
                 s.nom_quartier
             FROM public.cadastre c
             JOIN public.sec_analyse s
                 ON ST_Area(ST_Intersection(s.geometry, c.geometry)) /
ST_Area(c.geometry) > 0.9
         ),role_augmente AS (
             SELECT
                 id_provinc,
                 rl0105a::int AS cubf,
                 rl0404a AS valeur_au_role
             FROM role_foncier
         ),joined AS (
             SELECT
                 acr.g_no_lot,
                 ra.cubf,
                 ra.valeur_au_role,
                 ROW_NUMBER() OVER (
                     PARTITION BY acr.g_no_lot
                     ORDER BY ra.valeur_au_role DESC NULLS LAST, ra.
cubf
                 ) AS rn
             FROM public.association_cadastre_role acr
             LEFT JOIN role_augmente ra
                 ON ra.id_provinc = acr.id_provinc
             WHERE acr.g_no_lot IS NOT NULL
         ),
```

Extrait de code D.17 – Compilation de l'inventaire par secteur (suite)

```
        aggregated AS (
            SELECT
                g_no_lot,
                MAX(CASE WHEN rn = 1 THEN cubf END) AS cubf_principal,
                CASE
                    WHEN CARDINALITY(ARRAY_AGG(DISTINCT LEFT(cubf::
text,1)::int)) = 1
                    THEN case WHEN LEFT(MAX(CASE WHEN rn = 1 THEN cubf
 END)::text,1)::int!=3 then LEFT(MAX(CASE WHEN rn = 1 THEN cubf END)::
text,1)::int ELSE 2 END -- mettre toutes les proprietes industrielles
dans un bucket CUBF galore
                    ELSE -1
                END AS cubf_principal_first_digit
            FROM joined
            GROUP BY g_no_lot
        ),rpd AS (
            SELECT
                g_no_lot,
                COALESCE(
                    CASE
                        WHEN methode_estime = 1 THEN n_places_mesure
                        ELSE n_places_min
                    END, 0
                ) AS n_places,
                methode_estime,
                id_inv
            FROM inventaire_stationnement
        ), invent_count AS(
            SELECT
                g_no_lot,
                COUNT(g_no_lot) as n_inv
            from
                inventaire_stationnement
            group by g_no_lot
        ),
```

Extrait de code D.17 – Compilation de l'inventaire par secteur (suite)

```
        lot_park_data AS (
            SELECT
                ln.g_no_lot,
                ln.id_quartier,
                ln.superf_quartier,
                ln.nom_quartier,
                ic.n_inv,
                ag.cubf_principal,
                ag.cubf_principal_first_digit,
                ln.geometry
            FROM LotNeighborhood ln
            LEFT JOIN aggregated ag
                ON ag.g_no_lot = ln.g_no_lot
            left join invent_count ic
                on ag.g_no_lot=ic.g_no_lot
        ), inv_123_per_lot AS (
            SELECT DISTINCT ON (g_no_lot) g_no_lot, n_places
            FROM rpd
            ORDER BY g_no_lot,
                CASE methode_estime WHEN 1 THEN 1 WHEN 2 THEN 2 WHEN 3
THEN 3 ELSE 4 END
        ),inv_132_per_lot AS (
            SELECT DISTINCT ON (g_no_lot) g_no_lot, n_places
            FROM rpd
            ORDER BY g_no_lot,
                CASE methode_estime WHEN 1 THEN 1 WHEN 3 THEN 2 WHEN 2
THEN 3 ELSE 4 END
        ),inv_213_per_lot AS (
            SELECT DISTINCT ON (g_no_lot) g_no_lot, n_places
            FROM rpd
            ORDER BY g_no_lot,
                CASE methode_estime WHEN 2 THEN 1 WHEN 1 THEN 2 WHEN 3
THEN 3 ELSE 4 END
        ), inv_231_per_lot AS (
            SELECT DISTINCT ON (g_no_lot) g_no_lot, n_places
            FROM rpd
            ORDER BY g_no_lot,
                CASE methode_estime WHEN 2 THEN 1 WHEN 3 THEN 2 WHEN 1
THEN 3 ELSE 4 END
        ),
```

Extrait de code D.17 – Compilation de l'inventaire par secteur (suite)

```
        inv_312_per_lot AS (
            SELECT DISTINCT ON (g_no_lot) g_no_lot, n_places
            FROM rpd
            ORDER BY g_no_lot,
                CASE methode_estime WHEN 3 THEN 1 WHEN 1 THEN 2 WHEN 2
 THEN 3 ELSE 4 END
        ), inv_321_per_lot AS (
            SELECT DISTINCT ON (g_no_lot) g_no_lot, n_places
            FROM rpd
            ORDER BY g_no_lot,
                CASE methode_estime WHEN 3 THEN 1 WHEN 2 THEN 2 WHEN 1
 THEN 3 ELSE 4 END
        ), inv_1_per_lot as (
            SELECT g_no_lot, n_places,id_inv
            FROM rpd
            WHERE methode_estime = 1
        ), inv_2_per_lot AS (
            SELECT g_no_lot, n_places,id_inv
            FROM rpd
            WHERE methode_estime = 2
        ), inv_3_per_lot AS (
            SELECT g_no_lot, n_places,id_inv
            FROM rpd
            WHERE methode_estime = 3
        ),
        desc_cubf AS (
            SELECT *
            from (values (-1,'Usage mixte'),(1,'Residentielle'),(2,'
Industrielle'),(4,'Infrastructure'),(5,'Commerciale'),(6,'Services')
,(7,'Recreation'),(8,'Ressources naturelles'),(9,'Inexploite'),(NULL,'
Sans Role'))as sub(cubf_principal_first_digit,desc_usage)
        )
```

Extrait de code D.17 – Compilation de l'inventaire par secteur (suite)

```
        INSERT INTO stat_agrege (id_quartier,cubf_principal_n1,inv_123
,inv_132,inv_213,inv_231,inv_312,inv_321,inv_1,inv_2,inv_3,n_lots)
        SELECT
            lpd.id_quartier,
            lpd.cubf_principal_first_digit as cubf_principal_n1,
            sum(CEIL(i123.n_places)) as inv_123,
            sum(CEIL(i132.n_places)) as inv_132,
            sum(CEIL(i213.n_places)) as inv_213,
            sum(CEIL(i231.n_places)) as inv_231,
            sum(CEIL(i312.n_places)) as inv_312,
            sum(CEIL(i321.n_places)) as inv_321,
            sum(CEIL(i1.n_places)) as inv_1,
            sum(CEIL(i2.n_places)) as inv_2,
            sum(CEIL(i3.n_places)) as inv_3,
            count(*) as n_lots--
        from lot_park_data lpd
        left join
            inv_123_per_lot i123 on i123.g_no_lot = lpd.g_no_lot
        left join
            inv_132_per_lot i132 on i132.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_213_per_lot i213 on i213.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_231_per_lot i231 on i231.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_312_per_lot i312 on i312.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_321_per_lot i321 on i321.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_1_per_lot i1 on i1.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_2_per_lot i2 on i2.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            inv_3_per_lot i3 on i3.g_no_lot=lpd.g_no_lot
        left join
            desc_cubf dc on dc.cubf_principal_first_digit=lpd.
cubf_principal_first_digit or (dc.cubf_principal_first_digit IS NULL
AND lpd.cubf_principal_first_digit IS NULL)
        group by lpd.id_quartier,lpd.cubf_principal_first_digit
        order by lpd.id_quartier,lpd.cubf_principal_first_digit
```

Code : Nombre d'automobiles des résidents et nombre maximal et minimal d'automobiles par quartier

Le nombre de véhicules appartenant aux résidents d'un quartier peut être estimé à l'aide des données de l'enquête OD en multipliant le facteur ménage par le nombre de véhicules du ménage pour toutes les lignes qui sont en tête de ménage. Le nombre maximal de véhicules dans le quartier est issu des profils d'accumulation de véhicules (Diallo et al., 2015).

Extrait de code D.18 – Compilation de la motorisation par quartier

```
 DELETE FROM motorisation_par_quartier;
 INSERT INTO motorisation_par_quartier (id_quartier, nb_voitures,
nb_voitures_max_pav,nb_voitures_min_pav,diff_max_signee)
 WITH aggregated_data AS (
     SELECT
         z.id_quartier::int,
         CEIL(SUM(c.nbveh * c.facmen)) AS nb_voitures
     FROM
         sec_analyse z
     JOIN
         od_data c
         ON ST_Within(c.geom_logis, z.geometry)
     WHERE
         c.tlog = 1
     GROUP BY
         z.id_quartier
 )
 SELECT
     ad.id_quartier,
     ad.nb_voitures,
     MAX(pav.voitures) AS nb_voitures_max_pav,
     MIN(pav.voitures) AS nb_voitures_min_pav,
     CASE
         WHEN ABS(ad.nb_voitures - MAX(pav.voitures)) > ABS(ad.
nb_voitures - MIN(pav.voitures))
         THEN MAX(pav.voitures)-ad.nb_voitures
         ELSE MIN(pav.voitures) - ad.nb_voitures
     END AS diff_max_signee
 FROM
     aggregated_data ad
 LEFT JOIN
     profile_accumulation_vehicule pav
     ON pav.id_quartier::int = ad.id_quartier::int
 GROUP BY ad.id_quartier, ad.nb_voitures;
```

Code : Population issue du recensement

Les données de recensement peuvent être agrégées par quartier en utilisant une approche similaire à au nombre d'automobiles. Cependant, puisque les aires de diffusions sont des polygones et qu'il y a le potentiel d'avoir des aires de diffusions qui touchent à plusieurs quartiers, une condition a été ajoutée voulant que 90% de l'aire de diffusion doive être dans le quartier pour être sommée.

Extrait de code D.19 – Compilation de la population par quartier

```
 DELETE FROM population_par_quartier;
 INSERT INTO population_par_quartier (id_quartier,pop_tot_2016,
pop_tot_2021)
 WITH pop_2016_ag AS(
   SELECT
     z.id_quartier,
     sum(c2016.pop_2016) as pop_tot_2016
   FROM
     sec_analyse z
   JOIN
     census_population_2016 c2016
   ON
     ST_Intersects(z.geometry,c2016.geometry)
   WHERE
     ST_Area(ST_Intersection(z.geometry,c2016.geometry))/ ST_Area(c2016
.geometry) >= 0.9
   GROUP BY
   z.id_quartier
 ), pop_2021_ag as(
   SELECT
     z.id_quartier,
     SUM(c2021.pop_2021) AS pop_tot_2021
   FROM
     sec_analyse z
   JOIN
     census_population c2021
   ON
     ST_Intersects(z.geometry, c2021.geometry)
   WHERE
     ST_Area(ST_Intersection(z.geometry, c2021.geometry)) / ST_Area(
c2021.geometry) >= 0.9
   GROUP BY
     z.id_quartier
 )
```

Extrait de code D.19 – Compilation de la population par quartier (suite)

```
SELECT
  c2016.id_quartier,
  c2016.pop_tot_2016,
  c2021.pop_tot_2021
FROM
  pop_2016_ag c2016
JOIN
  pop_2021_ag c2021
ON
  c2016.id_quartier=c2021.id_quartier;
```

Code : Valeurs foncières agrégées

Certaines valeurs foncières sont agrégées pour donner une indication du degré d'intensité d'utilisation du sol dans un quartier. Les valeurs sont agrégées pour le total, mais aussi pour les logements seulement. La requête ci-dessous donne la méthode de calcul pour les données foncières agrégées.

Extrait de code D.20 – Compilation des données foncières par quartier

```
DELETE FROM donnees_foncieres_agregees;
INSERT INTO donnees_foncieres_agregees (id_quartier,
valeur_moyenne_logement,superf_moyenne_logement,
valeur_fonciere_logement_totale,valeur_fonciere_totale)
WITH role_quartier_log AS(
  SELECT
    sa.id_quartier::int,
    ceil(SUM(rf.rl0404a)/sum(rf.rl0311a)) as val_moy_log,
    ceil(SUM(rf.rl0308a)/sum(rf.rl0311a)) as sup_moy_log,
    ceil(SUM(rf.rl0404a)) as val_tot_log
  FROM
    role_foncier rf
  LEFT JOIN
    sec_analyse sa on ST_Within(rf.geometry,sa.geometry)
  where
    rf.rl0105a::int = 1000
    and rf.rl0404a IS not null
    and rf.rl0308a IS not null
    and rf.rl0311a IS not null
  group by sa.id_quartier
),
```

Extrait de code D.20 – Compilation des données foncières par quartier (suite)

```
  role_quartier_tout AS(
    SELECT
      sa.id_quartier::int,
      ceil(SUM(rf.rl0404a)) as val_tot_tout
    FROM
      role_foncier rf
    LEFT JOIN
      sec_analyse sa on ST_Within(rf.geometry,sa.geometry)
    where
      rf.rl0404a is not null
    group by sa.id_quartier
  )
  SELECT
    sa.id_quartier::int,
    rql.val_moy_log,
    rql.sup_moy_log,
    rql.val_tot_log,
    rqt.val_tot_tout
  from
    sec_analyse sa
  left join
    role_quartier_log rql on rql.id_quartier = sa.id_quartier
  left join
    role_quartier_tout rqt on rqt.id_quartier = sa.id_quartier;
```

Code : Parts modales

Cette section va donner la requête SQL qui compile les différentes parts modales définies dans la section 3.8.

Extrait de code D.21 – Compilation des parts modales par quartier

```
 DELETE FROM parts_modales;
 INSERT INTO parts_modales(id_quartier,ac_res,ap_res,tc_res,mv_res,
bs_res,ac_ori,ap_ori,tc_ori,mv_ori,bs_ori,ac_des,ap_des,tc_des,mv_des,
bs_des,ac_int,ap_int,tc_int,mv_int,bs_int)
 WITH trips AS (
     SELECT
         od.clepersonne,
         od.nolog,
         od.tlog,
         od.facmen,
         od.tper,
         od.mobil,
         od.facper,
         od.mode1,
         od.geom_logis,
         od.geom_ori,
         od.geom_des,
         sa_logis.id_quartier AS quartier_logis,
         sa_ori.id_quartier AS quartier_ori,
         sa_des.id_quartier AS quartier_des,
         CASE
             WHEN sa_ori.id_quartier = sa_des.id_quartier AND sa_ori.
id_quartier IS NOT NULL
             THEN true ELSE false
         END AS internal_trip
     FROM od_data AS od
     LEFT JOIN sec_analyse sa_logis ON ST_Within(od.geom_logis,
sa_logis.geometry)
     LEFT JOIN sec_analyse sa_ori   ON ST_Within(od.geom_ori, sa_ori.
geometry)
     LEFT JOIN sec_analyse sa_des   ON ST_Within(od.geom_des, sa_des.
geometry)
     WHERE od.geom_ori IS NOT NULL AND sa_logis.id_quartier IS NOT NULL
 )
 SELECT
     sa.id_quartier,
```

Extrait de code D.21 – Compilation des parts modales par quartier (suite)

```
    -- Resident trips
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis = sa.id_quartier AND trips.
mode1 = 1 THEN trips.facper END) / SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis =
 sa.id_quartier THEN trips.facper END) * 100 AS AC_res,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis = sa.id_quartier AND trips.
mode1 = 2 THEN trips.facper END) / SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis =
 sa.id_quartier THEN trips.facper END) * 100 AS AP_res,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis = sa.id_quartier AND trips.
mode1 = 6 THEN trips.facper END) / SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis =
 sa.id_quartier THEN trips.facper END) * 100 AS TC_res,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis = sa.id_quartier AND trips.
mode1 IN (5, 13) THEN trips.facper END) / SUM(CASE WHEN trips.
quartier_logis = sa.id_quartier THEN trips.facper END) * 100 AS MV_res,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis = sa.id_quartier AND trips.
mode1 = 7 THEN trips.facper END) / SUM(CASE WHEN trips.quartier_logis =
 sa.id_quartier THEN trips.facper END) * 100 AS BS_res,

    -- Origin trips (external)
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 1 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS AC_ori,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 2 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS AP_ori,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 6 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS TC_ori,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 IN (5, 13) THEN trips.facper END)
 / SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false THEN trips.facper END) * 100 AS MV_ori,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 7 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS BS_ori,
```

Extrait de code D.21 – Compilation des parts modales par quartier (suite)

```
    -- Destination trips (external)
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 1 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS AC_des,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 2 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS AP_des,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 6 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS TC_des,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 IN (5, 13) THEN trips.facper END)
 / SUM(CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false THEN trips.facper END) * 100 AS MV_des,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = false AND trips.mode1 = 7 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_des = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 false THEN trips.facper END) * 100 AS pBS_des,
    -- Internal trips
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = true AND trips.mode1 = 1 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 true THEN trips.facper END) * 100 AS AC_int,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = true AND trips.mode1 = 2 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 true THEN trips.facper END) * 100 AS AP_int,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = true AND trips.mode1 = 6 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 true THEN trips.facper END) * 100 AS TC_int,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = true AND trips.mode1 IN (5, 13) THEN trips.facper END)
/ SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = true THEN trips.facper END) * 100 AS MV_int,
    SUM(CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.
internal_trip = true AND trips.mode1 = 7 THEN trips.facper END) / SUM(
CASE WHEN trips.quartier_ori = sa.id_quartier AND trips.internal_trip =
 true THEN trips.facper END) * 100 AS BS_int
```

Extrait de code D.21 – Compilation des parts modales par quartier (suite)

```
    FROM sec_analyse sa
    LEFT JOIN trips ON
        trips.quartier_logis = sa.id_quartier OR
        trips.quartier_ori = sa.id_quartier OR
        trips.quartier_des = sa.id_quartier
    GROUP BY sa.id_quartier, sa.geometry;
```

Requête SQL : Intrants de validation

La requête suivante est utilisée pour créer les données entrantes pour l'affectation de lots à une strate de validation :

Extrait de code D.22 – Compilation des intrants de validation

```
DROP TABLE inputs_validation;
CREATE TABLE inputs_validation (
    g_no_lot                VARCHAR(255) PRIMARY KEY,
    nb_entrees              BIGINT,
    cubf_presents           INTEGER[],
    n_cubf                  INTEGER,
    toutes_surfaces_valides BOOLEAN,
    toutes_dates_valides    BOOLEAN,
    tous_logements_valides  BOOLEAN,
    sup_planch_tot          DOUBLE PRECISION,
    n_logements_tot         INTEGER,
    premiere_constr         INTEGER,
    valeur_totale           BIGINT,
    cubf_principal          INTEGER,
    valeur_maximale         INTEGER,
    random_value            DOUBLE PRECISION
);
INSERT INTO inputs_validation (
    g_no_lot, nb_entrees, cubf_presents, n_cubf, toutes_surfaces_valides,
    toutes_dates_valides, tous_logements_valides, sup_planch_tot,
    n_logements_tot, premiere_constr, valeur_totale, cubf_principal,
    valeur_maximale, random_value
)
```

Extrait de code D.22 – Compilation des intrants de validation (suite)

```
SELECT
    g_no_lot,
    nb_entrees,
    cubf_presents,
    n_cubf,
    toutes_surfaces_valides,
    toutes_dates_valides,
    tous_logements_valides,
    sup_planch_tot,
    n_logements_tot,
    premiere_constr,
    valeur_totale,
    cubf_principal,
    valeur_maximale,
    random_value
FROM (--1 -enrichissement des roles
    WITH role_augmente AS (
        SELECT
            id_provinc,
            rl0105a::int                    AS cubf,
            rl0308a                         AS sup_planch,
            rl0311a                         AS n_logements,
            rl0307a                         AS annee_constr,
            rl0308a IS NOT NULL             AS sup_planch_valid,
            rl0311a IS NOT NULL             AS n_logements_valid,
            rl0307a IS NOT NULL             AS annee_const_valid,
            rl0404a                         AS valeur_au_role
        FROM role_foncier
    ),-- 2 -  Jointure + rang pour choisir le CUBF principal
    joined AS (
        SELECT
            acr.g_no_lot, ra.id_provinc, ra.cubf, ra.valeur_au_role,
            ra.sup_planch_valid, ra.n_logements_valid,  ra.n_logements,
            ra.sup_planch,ra.annee_const_valid,  ra.annee_constr::int,
            ROW_NUMBER() OVER (
                PARTITION BY acr.g_no_lot
                ORDER BY ra.valeur_au_role DESC NULLS LAST, ra.cubf
            ) AS rn
        FROM public.association_cadastre_role AS acr
        LEFT JOIN role_augmente AS ra ON ra.id_provinc = acr.id_provinc
        WHERE acr.g_no_lot is not null
    ),
```

Extrait de code D.22 – Compilation des intrants de validation (suite)

```
    --3 - Agregation finale par lot
    aggregated AS (
        SELECT
            g_no_lot,
            COUNT(id_provinc)  AS nb_entrees,
            ARRAY_AGG(DISTINCT cubf)  AS cubf_presents,
            CARDINALITY(ARRAY_AGG(DISTINCT cubf))AS n_cubf,
            BOOL_AND(sup_planch_valid) AS toutes_surfaces_valides,
            BOOL_AND(annee_const_valid) AS toutes_dates_valides,
            BOOL_AND(n_logements_valid) AS tous_logements_valides,
            SUM(sup_planch)  AS sup_planch_tot,
            SUM(n_logements)::int AS n_logements_tot,
            MIN(annee_constr) AS premiere_constr,
            SUM(valeur_au_role) AS valeur_totale,
            MAX(CASE WHEN rn = 1 THEN cubf END)  AS cubf_principal,
            MAX(CASE WHEN rn = 1 THEN valeur_au_role END) AS
    valeur_maximale,
            --Valeur pseudo aleatoire deterministe (hash)
            (('x' || substr(md5(g_no_lot::text),1,8))::bit(32)::bigint )::
    numeric
                / (power(2,31) - 1) AS random_value
        FROM joined
        GROUP BY g_no_lot
    )
    SELECT * FROM aggregated
) AS src;
```

Requête SQL : lot où l'estimation de stationnement dépend du nombre de sièges

Cette requête a été utilisée pendant la validation pour identifier les lots où le nombre de sièges est utilisé pour générer leur estimation. Cette unité a été associée à une erreur importante dans la prédiction

Extrait de code D.23 – Recherche d'inventaires selon l'unité de formulation

```
with lot_ass as (
    SELECT
        *
    FROM
        association_strates ass
    WHERE
        id_strate = 42
), lot_values AS(
    SELECT
        g_no_lot,
        nb_entrees,
        cubf_presents,
        sup_planch_tot,
        n_logements_tot,
        premiere_constr,
        valeur_totale,
        cubf_principal
    FROM
        inputs_validation
    where
        g_no_lot in (select g_no_lot from lot_ass)
), distance_to_parliament AS(
    SELECT
        g_no_lot,
        ST_Transform(ST_Centroid(geometry),4326) as lot_centroid,
        ST_Point(-71.21417,46.80861,4326) as parliament,
        ST_distance(ST_Transform(ST_Centroid(geometry),32198),ST_Transform
   (ST_Point(-71.21417,46.80861,4326),32198)) as dist_to_parliament,
        g_va_suprf as superf_lot
    FROM
        cadastre
    WHERE g_no_lot IN(select g_no_lot from lot_ass)
),
```

Extrait de code D.23 – Recherche d'inventaires selon l'unité de formulation (suite)

```
reg_inventory AS (
    SELECT
        g_no_lot,
        CEIL(n_places_min) as y_pred,
        regexp_split_to_array(id_reg_stat, '[,/]')::int[] AS list_id_reg,
        regexp_split_to_array(id_er, '[,/]')::int[] AS list_id_er
    FROM
        inventaire_stationnement
    where g_no_lot in (select g_no_lot from lot_ass) and methode_estime=2
), units AS (
    SELECT
        ri.g_no_lot,
        ri.list_id_reg,
        ri.list_id_er,
        ARRAY_AGG(DISTINCT rse.unite) as list_unite,
        ARRAY[1,3,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21] &&
   ARRAY_AGG(DISTINCT rse.unite) as atypical_units
    FROM
        reg_inventory ri
    left join reg_stationnement_empile rse on rse.id_reg_stat = any(ri.
   list_id_reg)
    group by ri.list_id_reg,ri.list_id_er,ri.g_no_lot
)
SELECT
    lv.*,
    la.id_strate,
    dtp.dist_to_parliament,
    dtp.lot_centroid,
    dtp.parliament,
    dtp.superf_lot,
    u.list_id_reg,
    u.list_id_er,
    u.list_unite,
    u.atypical_units,
    ri.y_pred
from lot_ass la
LEFT JOIN lot_values lv on lv.g_no_lot = la.g_no_lot
left join distance_to_parliament dtp on dtp.g_no_lot=la.g_no_lot
left join units u on u.g_no_lot = la.g_no_lot
left join reg_inventory ri on ri.g_no_lot = la.g_no_lot
where 8 = ANY(u.list_unite)
```

Requête SQL : recherche de lot selon l'intensité de prédiction de stationnement

L'évaluation du modèle a soulevé l'intensité de prédiction de stationnement comme une métrique pour identifier des lots où les prédictions auraient d'importantes erreurs. La requête suivante montre comment compiler une liste de propriété à vérifier selon cet indicateur

Extrait de code D.24 – Recherche inventaire par intensité

```
with inventaire_reg AS(
  SELECT
    g_no_lot,
    n_places_min,
    id_reg_stat
  from
    inventaire_stationnement
  where methode_estime=2
),cad AS(
  SELECT
    g_no_lot,
    geometry
  from
    cadastre
),cubf as(
  select
  *
  from cubf
)

SELECT
  *
from inputs_validation iv
left join inventaire_reg ir on ir.g_no_lot = iv.g_no_lot
left join cad on cad.g_no_lot= iv.g_no_lot
left join cubf on cubf.cubf=iv.cubf_principal
  where iv.cubf_principal>=7000 and iv.cubf_principal<=7999   and (ir.
   n_places_min * iv.sup_planch_tot/iv.valeur_totale)>50
order by n_places_min desc
```

ANNEXE E DÉCOUPAGE GÉOPOLITIQUE UTILISÉ

Comme il est mentionné à la section 3.5.7, une légère modification du découpage municipal brut d'Élections Québec (Élections Québec, 2021) a été faite pour maintenir une différentiation entre le zonage de la vieille partie de Québec et le secteur des Rivières.

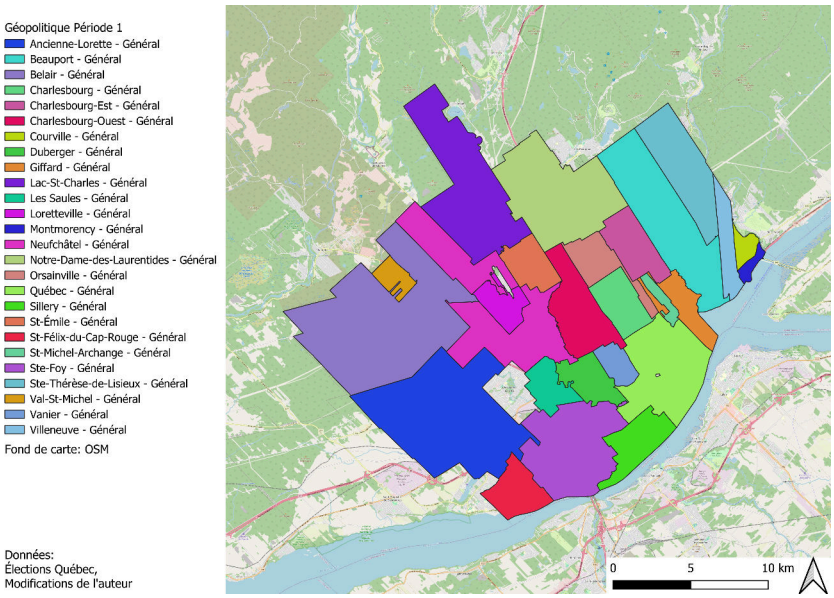


FIGURE E.1 Découpage pour la période 1

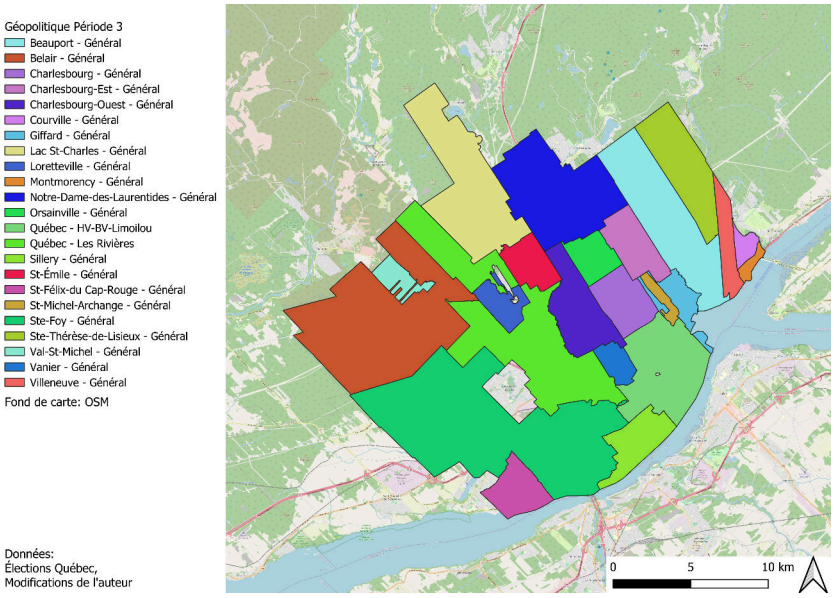


FIGURE E.2 Découpage pour la période 3

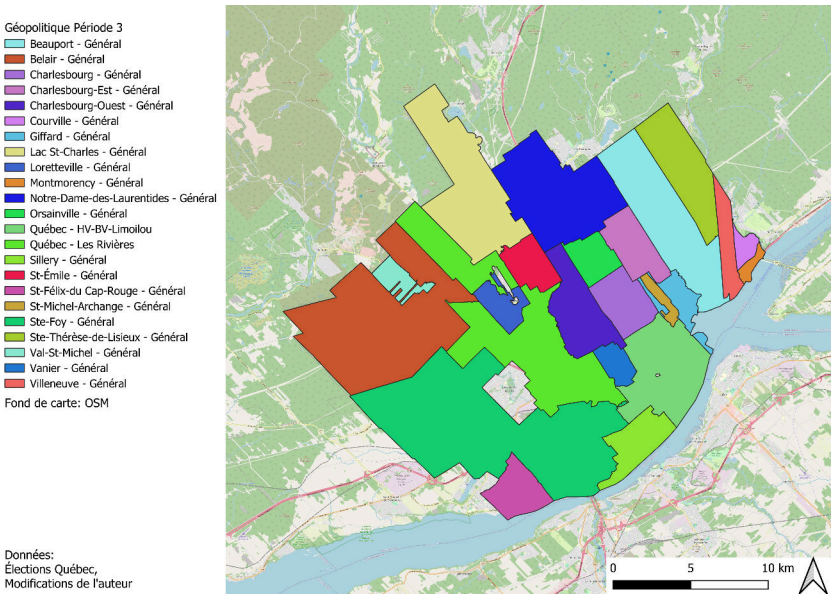


FIGURE E.3 Découpage pour la période 4

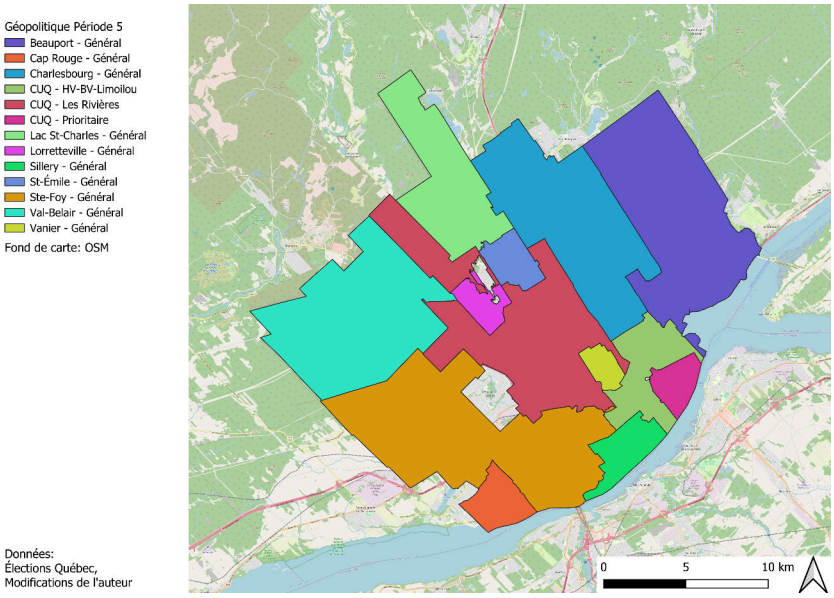


FIGURE E.4 Découpage pour la période 5

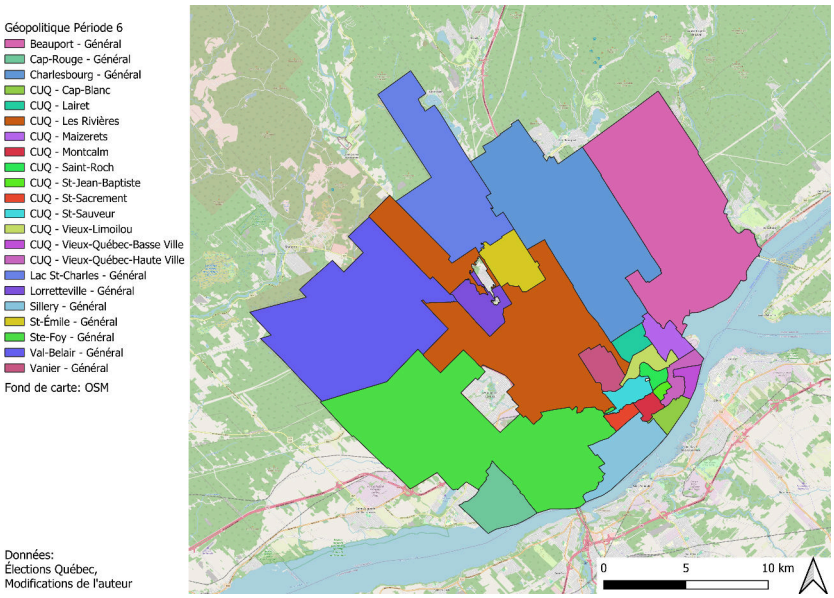


FIGURE E.5 Découpage pour la période 6

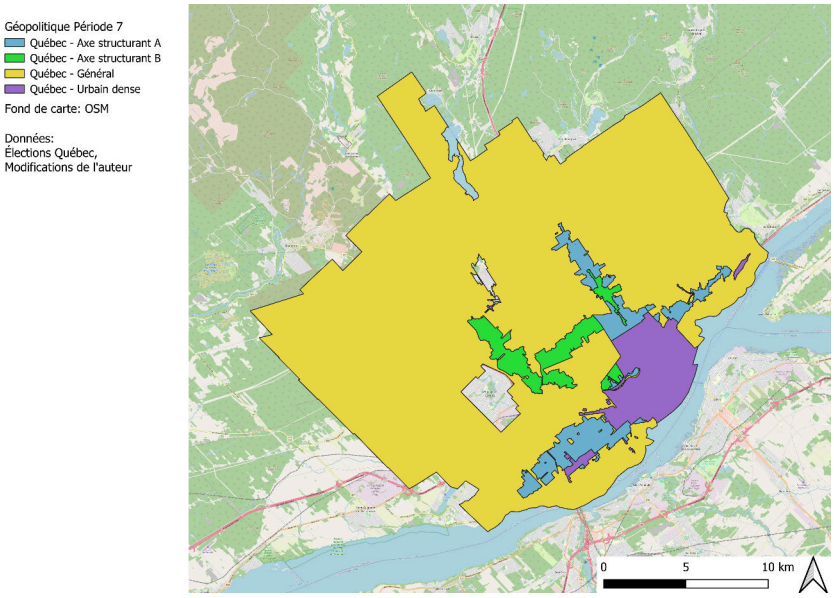


FIGURE E.6 Découpage pour la période 7