

Rapport n° 20265-R-25-FR

Évaluation Ex-Post de Politiques pour la Sécurité Routière en Belgique avec des Méthodes d'Inférence Causale

Évaluation de l'Impact de la Directive Européenne d'Échange Transfrontalier d'Informations et de la Réforme du Code de la Route Relative aux Engins de Déplacement Motorisés



SERVICE PUBLIC FÉDÉRAL
MOBILITÉ ET TRANSPORTS

Numéro de rapport	R-2025-25-FR
Dépôt légal	D/2025/0779/67
Client	Service Public Fédéral Mobilité et Transports
Date de publication	13/04/2026
Auteur(s)	Sinem Bas, Matthieu Billuart
Relecteur(s)	Mario Cools (Université de Liège)
Éditeur responsable	Karin Genoe

Les vues ou opinions exprimées dans ce rapport ne sont pas nécessairement celles du client.

La reproduction des informations de ce rapport est autorisée à condition que la source soit explicitement mentionnée : Sinem, B., & Billuart, M. (2026). Évaluation Ex-Post de Politiques pour la Sécurité Routière en Belgique avec des Méthodes d'Inférence Causale – Évaluation de l'Impact de la Directive Européenne d'Échange Transfrontalier d'Informations et de la Réforme du Code de la Route Relative aux Engins de Déplacement Motorisés, Bruxelles: Institut Vias
Dit rapport is eveneens beschikbaar in het Nederlands.

This report includes a summary in English.

Table des matières

Liste des tableaux et figures	5
Résumé	6
Summary	8
1 Introduction	10
2 Revue de la littérature	12
2.1 Inférence causale et cadre contrefactuel	12
2.2 Méthodes causales	13
2.3 Réglementations en matière de sécurité routière et à la mobilité et inférence causale	16
2.3.1 Évaluation de l'inférence causale de la directive CBE	16
2.3.2 Évaluation par inférence causale de la réglementation sur les trottinettes électriques	17
2.3.3 Inférence causale pour d'autres réglementations en matière de sécurité routière	17
3 La répression transfrontalières a-t-elle amélioré la sécurité routière? Une analyse de doubles différences	20
3.1 Contexte	20
3.2 Données et définitions	21
3.2.1 Sources des données	22
3.2.2 Préparation des données	22
3.3 Méthodologie	24
3.3.1 Modèle complémentaire de doubles différences (DiD) : part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger	24
3.3.2 Spécification saturée de doubles différences (DiD)	26
3.3.3 Spécification de l'étude d'événement pour le diagnostic des tendances parallèles	26
3.3.4 Contrôles de robustesse et spécifications alternatives	27
3.4 Modèles descriptifs et diagnostics pré-tendances	27
3.5 Résultats	31
3.5.1 Contrôles de robustesse et analyse de sensibilité	33
3.6 Discussion	34
3.7 Limites	35
3.8 Recommandations	35
4 La règlement de 2022 sur les EDM a-t-elle réduit le nombre de victimes d'accidents de trottinettes électriques ? Une analyse de séries chronologiques interrompues	37
4.1 Contexte	37
4.1.1 Trottinettes électriques et sécurité routière	37
4.1.2 Contexte politique	39
4.2 Données et définition	40
4.3 Méthodologie	41
4.4 Résultats	42
4.4.1 ITS principal : impact sur le nombre de victimes	42
4.4.2 Contrôles de robustesse	43
4.4.3 Impact sur l'exposition	44
4.5 Discussion	44

4.6	Limites et recherches futures	46
4.7	Recommandations	46
5	Conclusions	48
	Références	50
	Annexe	60

Liste des tableaux et figures

Tableau 1 Aperçu des méthodes d'inférence causale couramment utilisées.	15
Tableau 2 Part moyenne des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger avant et après l'introduction de la directive CBE.	30
Tableau 3 Effet de la directive CBE sur les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger.	31
Tableau 4 Évolution du nombre de victimes dans les accidents impliquant un trottinette électrique par niveau de gravité entre 2019 et 2024.	37
Tableau 5 Gravité modifiée des accidents pour les utilisateurs et les adversaires des trottinettes électriques et des vélos (2019-2024).	38
Tableau 6 Critères de sélection du modèle ITS principal.	42
Tableau 7 Statistiques des principaux paramètres du modèle ITS.	43
Tableau 8 Estimations et niveau de signification des modèles <i>placebo</i> ITS.	43
Tableau 9 Résultats du modèle DiD saturé de Poisson.	60
Figure 1 Conception de la méthode des doubles différences (DiD) et hypothèse de tendance parallèle.	25
Figure 2 Accidents mensuels impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger (2012-2018).	28
Figure 3 Part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger.	28
Figure 4 Part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par province (2012-2018). ..	29
Figure 5 Estimations d'étude d'événements pour le modèle log-DiD saturé.	30
Figure 6 Évolution des accidents et des victimes liés aux trottinettes électriques.	37
Figure 7 Types d'opposant aux cyclistes et utilisateurs de trottinettes électriques.	38
Figure 8 Nombre estimé de victimes d'accidents impliquant des trottinettes électriques selon le modèle SARIMAX.	42
Figure 9 Nombre de trajets en trottinettes électriques partagées ajusté par SARIMAX.	44
Figure 10 Nombre prévu de victimes d'accidents de trottinettes électriques sans changement de politique.	45
Figure 11 Tests <i>placebo</i> utilisant des modèles complémentaires basés sur des parts.	60
Figure 12 Résultats des modèles basés sur des parts excluant le Royaume-Uni, l'Irlande et le Danemark. ..	60
Figure 13 Résultats des modèles fondés sur des parts pour les victimes.	61
Figure 14 Tests <i>placebo</i> sur les victimes.	61
Figure 15 Accidents mensuels impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger, tous types de véhicules confondus.	62
Figure 16 Victimes mensuelles impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger – tous types de véhicules.	63
Figure 17 Part des véhicules immatriculés à l'étranger dans l'ensemble des victimes au fil du temps – tous types de véhicules.	63
Figure 18 Victimes selon le statut d'immatriculation et la province au fil du temps – tous types de véhicules.	64
Figure 19 Résultats DiD pour les voitures – nombre d'accidents.	65
Figure 20 Résultats DiD pour les camions – Nombre d'accidents.	65
Figure 21 Résultats DiD pour les camionnettes – nombre d'accidents.	66
Figure 22 Résultats DiD pour les motos – nombre d'accidents.	66
Figure 23 Résultats DiD pour l'ensemble des véhicules – nombre de victimes.	67
Figure 24 Résultats DiD pour les voitures – nombre de victimes.	67
Figure 25 Résultats DiD pour les camions – Nombre de victimes.	68
Figure 26 Résultats DiD pour les camionnettes – nombre de victimes.	68
Figure 27 Résultats DiD pour les motos – nombre de victimes.	69

Résumé

Ce rapport examine deux cas d'usage afin d'étudier l'application des modèles d'inférence causale dans le contexte de la sécurité routière. Les politiques publiques sont adoptées dans l'espoir d'améliorer la sécurité routière ou d'influencer les comportements de manière ciblée, par exemple en réduisant la vitesse de conduite. La motivation qui sous-tend ces interventions repose sur des relations de cause à effet présumées. La mise en place de ces interventions entraînerait (ou provoquerait) un changement dans les chiffres mesurés (par exemple, le nombre d'accidents).

L'évaluation *ex-post* vise donc à déterminer si les changements observés peuvent réellement être attribués à l'intervention elle-même. Les simples comparaisons avant/après, bien que faciles à réaliser, ne permettent souvent pas de saisir l'effet causal. Les changements des indicateurs peuvent être dus à des éléments indépendants de l'intervention, tels que les fluctuations naturelles au fil du temps, les tendances de mobilité, les effets saisonniers ou les changements d'exposition. Lorsque ces facteurs ne sont pas pris en compte, un changement du résultat peut coïncider avec l'intervention sans pour autant qu'elle n'en soit la cause. Il s'agit là du principe bien connu : la corrélation n'implique pas nécessairement la causalité.

Les méthodes d'inférence causale traitent ce problème en estimant ou en construisant explicitement un contrefactuel (ce qui se serait passé en l'absence de l'intervention). En comparant ce contrefactuel avec le résultat observé, ces méthodes visent à isoler l'effet causal de l'intervention (appelée 'traitement') et à fournir aux décideurs des preuves plus fiables de l'impacts des décisions politiques sur les chiffres de sécurité routière.

Partage Transfrontalier d'Informations (Directive CBE)

Le premier cas d'utilisation évalue l'impact de la directive européenne de partage transfrontalier d'informations (Directive CBE – *Cross Border Enforcement*) implémentée en Belgique en mai 2015 sur les chiffres de sécurité routière impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. La directive CBE permet aux pays de l'UE de partager des informations sur les véhicules et les conducteurs afin de sanctionner les infractions au code de la route (telles que les excès de vitesse, l'alcool au volant, l'utilisation du téléphone) commises par des conducteurs résidant dans un autre État membre. L'analyse s'appuie sur l'ensemble de données détaillées des accidents enregistrés par la police entre mai 2012 et avril 2018, et complété par des indicateurs météorologiques mensuels. En comparant les tendances pour les véhicules immatriculés en Belgique avec les véhicules immatriculés à l'étranger avant et après l'introduction de la directive CBE, l'étude évalue si l'amélioration de la répression transfrontalière a entraîné des changements mesurables en matière de sécurité routière.

Bien que les véhicules immatriculés à l'étranger ne représentent qu'une faible part des accidents en Belgique, ils peuvent différer des véhicules immatriculés en Belgique sur des points importants, notamment les habitudes de déplacement, la mobilité saisonnière et le risque d'accident propre. Les données descriptives montrent une variation saisonnière claire et des schémas d'accidents distincts entre les deux groupes. Afin de tenir compte de ces différences, l'étude s'appuie sur la méthode des doubles différences (DiD – *Difference in Differences*) qui consiste à comparer, au fil du temps, l'implication dans les accidents des véhicules étrangers et belges. La spécification principale utilise un modèle à effets fixes saturé comparant le nombre d'accidents au sein d'une même province et d'un même mois, complété par des modèles basés sur la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. Nous effectuons une série de contrôles de robustesse, notamment une analyse des tendances pré-intervention, des modèles d'étude d'événements et des tests *placebo*. Ces contrôles confirment la validité de l'approche DiD, même si les niveaux de base des accidents diffèrent entre les deux groupes.

Après avoir contrôlé les effets fixes provinciaux et mensuels, la température, les précipitations et les cycles de mobilité saisonniers, les résultats indiquent que la directive CBE a significativement amélioré la sécurité routière. La directive CBE est associée à une réduction d'environ 0,5 point de pourcentage de la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger, par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique, selon un modèle complémentaire fondé sur les proportions. La spécification principale suggère une diminution d'environ 5% après mai 2015, correspondant à une baisse d'environ 8,5% à 9% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. Bien que cet effet soit modeste, sa direction est conforme à l'objectif de la directive CBE. Lorsque l'estimation est extrapolée à l'échelle nationale en utilisant le nombre moyen d'accidents par province avant l'intervention, cette réduction correspond à 130-150 accidents de moins par an impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. Compte tenu de l'incertitude statistique, l'intervalle de confiance à 95% suggère que cette réduction se situerait entre 20 et 250 accidents par an environ. Cette

réduction varie d'une province à l'autre, allant d'environ 2 à 6 accidents par an dans les provinces moins densément peuplées telles que Luxembourg et Namur à plus de 20 accidents par an dans les provinces à plus forte densité telles qu'Anvers et la Flandre-Orientale.

Les résultats montrent donc que la directive CBE a permis d'améliorer la sécurité routière de manière claire, mesurable et statistiquement significative, même si la taille de l'effet est faible. La directive a réduit l'écart en matière d'application de la loi qui permettait auparavant aux contrevenants immatriculés à l'étranger d'échapper aux sanctions, et cette augmentation de la certitude de sanction semble avoir influencé le comportement des conducteurs.

Réglementation des EDM

La deuxième étude empirique examine la réforme de juillet 2022 concernant l'utilisation des trottinettes électriques en Belgique, qui a introduit des restrictions d'âge, clarifié les règles de conduite et de stationnement et restreint la circulation des trottinettes électriques dans les zones piétonnes. À l'aide d'une série chronologique interrompue et de tests *placebo* approfondis, l'analyse révèle une baisse forte et immédiate du nombre de victimes par mois suivant l'adoption de la réforme, ce qui suggère que la politique a réussi à modifier les conditions de mobilité de manière à réduire le risque de blessures. Toutefois, la tendance à long terme du nombre de victimes de trottinettes électriques, qui s'explique par l'adoption plus large de la micromobilité, reste à la hausse. La réforme a donc atténué mais pas inversé ni réduit l'augmentation globale. La diminution de l'utilisation des trottinettes électriques partagées observée après la réforme suggère qu'une partie de l'amélioration de la sécurité résulte d'une exposition moindre et non du changement de comportement. Ces résultats montrent que des réglementations comportementales ciblées peuvent permettre d'améliorer rapidement la sécurité, mais que des améliorations durables dépendent de la conception des infrastructures, des pratiques des utilisateurs et des tendances de mobilité à long terme.

Dans l'ensemble, le rapport démontre l'intérêt des méthodes d'inférence causale, qui s'appuient sur des diagnostics approfondis des tendances pré-interventions et des contrôles de robustesse pour évaluer les politiques de sécurité routière. Les conclusions suggèrent que la poursuite des améliorations en matière de contrôle transfrontalier, combinée à des stratégies de communication ciblées et à des initiatives de sécurité coordonnées entre les États membres, sont susceptibles d'entraîner de nouveaux gains en matière de sécurité. Dans le même temps, les résultats de la réforme sur les trottinettes électriques soulignent que les politiques comportementales peuvent produire des changements rapides, mais qu'elles doivent être soutenues par des infrastructures sûres et une évaluation continue. Le renforcement de l'intégration des données relatives aux accidents, aux victimes, à l'application de la loi et à l'exposition améliorerait encore la capacité de la Belgique à mettre en œuvre et à évaluer des interventions de sécurité routière efficaces.

Summary

This report examines two use cases to explore the application of casual inference models in the context of road safety. Policy interventions are introduced with the expectation that they will improve road safety outcomes or influence behaviour in a targeted way, such as reducing driving speeds. The reasoning behind such policy interventions rests on assumed cause-effect relationships. By introducing these interventions, a change in outcomes (e.g. number of crashes) will be effected (or caused).

Ex-post evaluation therefore aims to assess whether observed changes can truly be attributed to the intervention itself. However, simple before/after comparisons often fail to capture the causal effect though they are easy to apply. Changes in outcomes may occur for reasons unrelated to the intervention, such as natural fluctuations over time, mobility trends, seasonal effects, or changes in exposure. When these factors are not taken into account, a change in the outcomes may simply coincide with the intervention rather than be caused by it. This is a well-known principle that correlation does not necessarily imply causation.

Causal inference methods address this challenge by explicitly estimating or constructing a counterfactual (what would have happened in the absence of the intervention). By comparing this counterfactual with the observed outcome, these methods aim to isolate the causal effect of the intervention (which is called as treatment) and provide decision-makers with more reliable evidence on the impacts of policy measures on road safety outcomes.

EU Cross Border Enforcement (CBE Directive)

The first use case evaluates the impact of the EU Cross Border Enforcement (CBE) Directive implemented in Belgium in May 2015 on road safety outcomes involving foreign registered vehicles. The CBE Directive enables EU countries to share vehicle and driver information to enforce road safety traffic violations (like speeding, drunk-driving, phone use) committed by non-resident drivers. The analysis draws on a detailed panel dataset of all police recorded crashes from May 2012 to April 2018, supplemented with monthly weather indicators. By comparing trends for Belgian registered and foreign registered vehicles before and after the CBE Directive was introduced, the study analyses whether improved cross border enforcement led to measurable changes in road safety outcomes.

Although foreign registered vehicles account for only a small share of crashes in Belgium, they might differ from Belgian registered vehicles in important ways, including travel patterns, seasonal mobility, and underlying crash risk. The descriptive evidence shows clear seasonal variation and distinct crash patterns between two groups. To help account for these differences, the study relies on a difference-in-differences (DiD) approach that focuses on comparing foreign and Belgian crash involvement over time. The main specification employs a saturated fixed-effects model comparing number of crashes within same province and month, complemented by models based on the share of crashes involving foreign registered vehicles. We conduct a series of robustness checks, including pre-intervention trend analysis, event-study models, and placebo tests. These checks support the validity of DiD approach, even though baseline crash levels differ between two groups.

After controlling for provincial and monthly fixed effects, temperature, precipitation, and seasonal mobility cycles, the results indicate that the CBE Directive significantly improved road safety outcomes. The CBE Directive is associated with a reduction of approximately 0.5 percentage points in the share of crashes involving foreign registered vehicles, relative to Belgian registered vehicles using complementary share-based model. The main specification suggests an approximate 5% decline following May 2015, corresponding to a decline from approximate 9% to about 8.5% of crashes involving foreign registered vehicles. Although this magnitude might seem modest, the direction of the effect is in line with the objective of the CBE Directive. When the estimate is extrapolated nationwide using average crash counts per province before the implementation of the policy, this reduction corresponds to 130-150 fewer crashes per year involving foreign registered vehicles. Taking statistical uncertainty into account, the 95% confidence interval suggests that this reduction would range approximately between 20 and 250 crashes per year. This reduction varies across provinces, ranging from about 2-6 crashes per year in less densely populated provinces such as Luxembourg and Namur to more than 20 crashes per year in provinces with higher density such as Antwerp and East Flanders.

Therefore, the results show that the CBE Directive produced clear, measurable, and statistically significant road safety improvements, even if the magnitude of the effect is small. The Directive reduced the enforcement gap that previously allowed foreign registered offenders to evade sanctions, and this increase in enforcement certainty appears to have influenced driver behaviour.

PMDs regulation

The second empirical investigation examines the July 2022 reform governing e-scooter use in Belgium, which introduced age restrictions, clarified rules for riding and parking, and restricted e-scooter circulation in pedestrian areas. Using an interrupted time-series design with extensive placebo testing, the analysis reveals a sharp and immediate decline in monthly victims following the reform, suggesting that the policy successfully altered mobility conditions in a way that reduced injury risk. However, the underlying long-term trend in e-scooter casualties, which is driven by broader adoption of micromobility, remains upward, indicating that the reform mitigated but did not reverse or reduce the overall increase. The reduction in shared e-scooter usage observed after the reform is consistent with part of the safety improvement arising from reduced exposure rather than solely behaviour change. These findings illustrate that targeted behavioural regulations can deliver rapid safety gains, but sustained improvements depend on infrastructure design, user practices, and longer-term mobility patterns.

Overall, the report demonstrates the value of causal inference methods which is supported by extensive pre-trend diagnostics and robustness checks in evaluating road safety policies. The findings suggest that continued improvements in cross border enforcement, combined with targeted communication strategies, and coordinated safety initiatives across Member States, are likely to yield further safety gains. At the same time, the results from the e-scooter reform underline that behavioural policies can produce rapid changes but must be supported by safe infrastructure and ongoing monitoring. Strengthening the integration of crash, victim, enforcement, and exposure data across domains would further enhance Belgium's capacity to implement and evaluate effective road safety interventions.

1 Introduction

L'amélioration de la sécurité routière reste une priorité centrale tant pour l'Union européenne que pour la Belgique. Bien que des progrès substantiels aient été réalisés au cours des dernières décennies, ces dernières années ont été marquées par un ralentissement de la baisse du nombre de décès et l'émergence de nouveaux défis liés à l'évolution des modes de mobilité. La croissance rapide des nouveaux modes de transport tels que les trottinettes électriques partagées, ainsi que les lacunes persistantes en matière d'application de la loi liées aux flux de trafic internationaux, soulignent la nécessité de réponses réglementaires fondées sur des preuves. Les décideurs politiques exigent de plus en plus d'évaluations *ex-ante* des mesures proposées, mais aussi des évaluations *ex-post* solides pour déterminer si les réglementations développées produisent les effets escomptés dans le monde réel. Cette exigence est cohérente avec les récentes observations mondiales en matière de sécurité routière, qui soulignent que les progrès ont ralenti dans de nombreux contextes et que des interventions durables et fondées sur des données probantes restent nécessaires (OMS, 2023).

Évaluer l'impact des réglementations est intrinsèquement difficile. Les accidents de la route sont des événements rares et hautement aléatoires, influencés par une combinaison complexe de facteurs comportementaux, environnementaux et structurels, notamment les conditions météorologiques, les habitudes d'utilisation des routes, les technologies automobiles, les tendances démographiques et l'intensité des contrôles d'infractions. Les comparaisons traditionnelles avant/après ne permettent pas de déterminer si les changements observés sont dus à l'intervention ou à d'autres facteurs. Par exemple, (Auerbach et al., 2019) ont montré que l'analyse avant/après de la politique *Vision Zéro* de la ville de New York surestimait son impact, et qu'une estimation plus réaliste ne représentait qu'environ deux tiers de la réduction initialement, une fois les facteurs externes pris en compte grâce à une analyse causale. Comme largement reconnu dans la littérature sur la sécurité routière, une évaluation crédible nécessite des méthodes d'inférence causale capables de tenir compte de la saisonnalité, de la régression vers la moyenne¹ et d'autres facteurs de confusion qui peuvent masquer l'impact réel d'un changement réglementaire.

Ce rapport applique deux modèles d'inférence causale, à savoir la méthode des doubles différences (DiD – *Difference in Differences*) et les séries chronologiques interrompues (ITS – *Interrupted Time Series*), afin d'évaluer les effets de deux réglementations liées à la sécurité routière en Belgique. Le premier cas d'utilisation examine l'impact de la directive européenne sur le partage d'informations transfrontalier (CBE – *Cross Border Enforcement*), établie en vertu de la directive (UE) 2015/413, qui facilite l'échange transfrontalier de données d'immatriculation des véhicules pour le suivi des infractions routières liées à la sécurité. Les systèmes de contrôle automatisés et les contrôles de police identifient les infractions grâce à la reconnaissance des plaques d'immatriculation, ce qui signifie que les autorités peuvent immédiatement déterminer le pays dans lequel le véhicule est immatriculé. Avant la directive, les amendes infligées aux véhicules immatriculés à l'étranger avaient moins de chances d'être délivrées ou recouvrées, ce qui se traduisait par une moindre certitude de sanction pour les véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique. Afin d'évaluer si la Directive a influencé les résultats en matière de sécurité routière, ce rapport compare l'évolution des accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger à celle des véhicules immatriculés en Belgique, en appliquant un modèle de doubles différences (DiD) conforme à la littérature en matière de contrôle et d'application de la loi. La spécification principale compare le nombre d'accidents au sein d'une même province et d'un même mois à l'aide d'une structure à effets fixes saturée, complétée par des modèles fondés sur la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. La méthode DiD est largement utilisée dans l'analyse d'inférence causale des réglementations et est considérée comme une approche quasi expérimentale robuste lorsque des groupes de contrôle appropriés sont disponibles et que les tendances pré-intervention sont comparables (voir la section Méthodes causales 2.2 pour une définition et une discussion des méthodes quasi expérimentales). Des études antérieures ont systématiquement montré que la certitude d'une sanction, plutôt que sa sévérité, est un facteur déterminant du respect du code de la route (Bailey & Smith, 1973; Blais & Carnis, 2015; Kudła et al., 2024; Kundro et al., 2023). Étant donné que la directive CBE augmente les chances qu'une amende soit effectivement infligée au conducteur, l'évaluation devrait nous permettre de détecter un effet.

Le deuxième cas d'utilisation évalue la réforme de 2022 du code de la route belge pour les engins de déplacement motorisés (EDM), y compris les trottinettes électriques. La réforme a introduit des classifications plus claires des EDM, reclassé les utilisateurs de trottinettes électriques comme cyclistes, fixé un âge minimum

¹ **Régression vers la moyenne** : phénomène statistique selon lequel, si la mesure d'une variable aléatoire est extrême (c'est-à-dire très élevée ou très faible), la mesure suivante de cette même variable aléatoire sera probablement plus proche de sa moyenne (Upton & Cook, 2011).

requis et restreint la circulation sur les trottoirs afin d'améliorer la sécurité des piétons (Mobilité et Transports, 2022). Ces mesures ont été introduites en réponse à une augmentation rapide du nombre de blessures liées aux EDM, à l'augmentation des interactions entre les utilisateurs et les piétons, et à la croissance opérationnelle des flottes de trottinettes électriques partagées (Chambre des Représentants de Belgique, 2021; Slotmans, 2024). À partir de données mensuelles détaillées sur les victimes blessées dans un accident de trottinette électrique, l'évaluation applique un modèle ITS afin de déterminer si la réforme a entraîné des changements mesurables dans les niveaux ou les tendances de blessures. L'ITS est largement utilisée dans la littérature sur la sécurité routière et est considérée comme une approche quasi expérimentale robuste pour évaluer les réformes juridiques au niveau national, car elle permet de saisir à la fois les effets immédiats et à plus long terme, tout en contrôlant les tendances et la saisonnalité.

Ces deux analyses illustrent donc comment l'inférence causale peut renforcer le cycle réglementaire belge en fournissant des preuves transparentes et fondées sur des données pour évaluer les effets réels des réglementations en matière de sécurité routière. Le rapport combine le contexte juridique, des données empiriques et des méthodes statistiques rigoureuses afin d'aider les décideurs politiques à élaborer et à affiner des politiques efficaces en matière de sécurité routière.

Le reste du rapport est organisé comme suit : la section 2 couvre les fondements théoriques de l'inférence causale à l'aide d'une revue de la littérature. La section 3 traite du cas d'utilisation dans lequel nous étudions l'impact de la directive CBE sur les résultats en matière de sécurité routière et la section 4 le cas d'utilisation sur l'effet de la réforme sur les EDM. Les conclusions et recommandations sont présentées dans la section 5.

2 Revue de la littérature

L'évaluation des impacts réels des réglementations de sécurité routière nécessite une méthodologie capable de distinguer les effets des mesures politiques de la multitude de facteurs externes qui influencent les chiffres d'accidents et de victimes. Les résultats en matière de sécurité routière sont influencés par des facteurs comportementaux, démographiques, environnementaux, technologiques et structurels. De nombreuses publications montrent que les conditions météorologiques, les variations saisonnières, les changements de démographiques, les comportements de mobilité, la composition du parc automobile et les évolutions technologiques, ainsi que les variations dans l'intensité des contrôles d'infractions contribuent aux schémas d'accidents observés (Blais & Dupont, 2005; Elvik, 2009, 2012; Evans, 2004; Lie & Tingvall, 2002; OECD/ITF, 2018; Qiu & Nixon, 2008; Wegman & Aarts, 2006; World Health Organization, 2019). Ces forces génèrent des fluctuations naturelles qui compliquent l'identification des relations causales. Cela a stimulé un intérêt croissant pour l'inférence causale afin d'estimer ce qui se serait produit si l'intervention n'avait pas eu lieu, mettant le contrefactuel au cœur de toute évaluation solide des politiques publiques. Une revue détaillée est disponible à la section 2.3.

Avant d'examiner les études qui appliquent l'inférence causale, nous expliquons brièvement ce qu'est l'inférence causale et décrivons le cadre contrefactuel. Nous présentons et décrivons ensuite les principales méthodes d'inférence causale. Dans la dernière sous-section, nous discutons de l'utilisation des méthodes d'inférence causale dans la recherche en sécurité routière.

2.1 Inférence causale et cadre contrefactuel

L'analyse *ex-post* est effectuée après qu'une décision ait été prise et appliquée. Elle permet aux décideurs d'estimer les effets causés par une intervention, plutôt que de se fier simplement à la différence absolue entre les résultats avant et après l'intervention, qui peut être impactée par de nombreux facteurs externes. Ce type d'analyse permet également de déterminer si les effets de l'intervention ont été conformes aux attentes et d'expliquer les écarts par rapport aux prévisions (Angrist & Pischke, 2009; Meyer, 1995; Rossi et al., 2004; Schiff et al., 2017; Weiss, 1998).

Afin d'estimer les effets causés par une intervention, nous avons besoin d'un contrefactuel auquel comparer les résultats post-intervention. Le contrefactuel représente l'état du monde sans l'intervention. Les effets causés par l'intervention sont estimés à partir des différences entre les observations réels et les observations contrefactuelles. Le problème est qu'un contrefactuel ne peut être observé directement ; il n'est pas possible d'observer simultanément les résultats pour un lieu ou un groupe donné avec et sans intervention. Le scénario contrefactuel doit donc être estimé à l'aide de données et de modèles statistiques, et certaines hypothèses sont nécessaires pour comparer le scénario contrefactuel aux résultats post-intervention (Angrist & Pischke, 2009; Gertler et al., 2016; Holland, 1986; Morgan & Winship, 2014; Rubin, 1974; Schiff et al., 2017).

Une approche courante pour construire un contrefactuel consiste à comparer les résultats d'un groupe 'traité', qui comprend des unités telles que des lieux ou des populations affectés par l'intervention, avec les résultats d'un groupe 'témoin' composé d'unités qui n'ont pas été affectés par l'intervention. L'idée est que, en l'absence d'intervention, le groupe traité aurait suivi une trajectoire similaire à celle du groupe témoin. Ainsi, les résultats observés dans le groupe témoin servent d'estimation du résultat contrefactuel pour le groupe traité (Meyer, 1995; Schiff et al., 2017; Shadish et al., 2002). L'effet du traitement est alors calculé comme la différence entre le résultat réel post-intervention du groupe traité et le contrefactuel estimé sur la base du groupe témoin. Cette logique est au cœur des conceptions quasi-expérimentales, qui exploitent les variations naturelles ou induites par les politiques pour se rapprocher des conditions d'une expérience randomisée, et permettre ainsi d'estimer les effets causaux sur base de données d'observation (Meyer, 1995; Shadish et al., 2002). Les conceptions telles que les doubles différences utilisent des groupes témoins pour fournir la meilleure approximation possible de ce qui serait arrivé aux groupes traités si l'intervention n'avait pas eu lieu.

Comme cet état contrefactuel n'est pas directement observable, son estimation devient le défi central de l'inférence causale (Morgan & Winship, 2014). Les simples comparaisons descriptives avant/après supposent implicitement que, sans intervention, les tendances passées seraient restées stables. Or, cette hypothèse est rarement valable en matière de sécurité routière, où le nombre de collisions affiche une baisse à long terme grâce à des véhicules et des infrastructures plus sûrs, fluctue au cours de l'année en raison d'une forte saisonnalité et varie de manière aléatoire en raison d'influences ponctuelles telles que les périodes de tourisme, les conditions météorologiques extrêmes ou les opérations de contrôle ciblées (Elvik, 2002; Hauer, 1997; Lian

et al., 2025; Qiu & Nixon, 2008). Ces sources d'instabilité rendent les résultats en matière de sécurité routière particulièrement vulnérables aux effets de confusion. Comme ils influencent à la fois l'intervention et le résultat, les facteurs externes biaisent ou exagèrent les effets mesurés s'ils ne sont pas correctement contrôlés (Elvik, 2002; Hauer, 1997; Shadish et al., 2002). Ils peuvent imiter ou masquer l'impact d'une intervention et interagissent souvent avec la régression vers la moyenne et l'exposition variable dans le temps (par exemple, l'évolution du flux de circulation au fil du temps) pour modifier davantage les simples comparaisons avant/après (Hauer, 1997; Qiu & Nixon, 2008). Les plans quasi-expérimentaux sont plus à même d'offrir une évaluation crédible, puisqu'ils visent à se rapprocher du contrefactuel et à distinguer les effets réels de l'intervention des tendances de fond et de l'hétérogénéité non observée² (Angrist & Pischke, 2009; Lopez Bernal et al., 2016; Meyer, 1995). Ces approches sont largement utilisées dans la recherche sur les transports et la sécurité routière pour tirer des conclusions causales à partir de données d'observation.

2.2 Méthodes causales

Cette sous-section présente les méthodes causales les plus couramment utilisées et explique les hypothèses qui sous-tendent ces méthodes. Ces conditions jouent un rôle crucial dans le choix du modèle approprié pour chaque cas d'utilisation de notre rapport.

L'approche la plus efficace consiste à utiliser une expérience randomisée bien conçue pour traiter le problème fondamental de l'inférence causale et produire une estimation non biaisée des effets du traitement (Rubin, 1974; Shadish et al., 2002). Dans ce type d'expériences, les unités d'observation sont réparties de manière aléatoire entre le groupe bénéficiant du traitement (intervention) et le groupe témoin. Comme la randomisation garantit que, en moyenne, les groupes de traitement et de contrôle sont comparables en termes de facteurs observés et non observés, les différences de résultats entre les groupes peuvent être attribuées à l'intervention elle-même. Dans cette configuration, les résultats observés dans le groupe témoin fournissent une approximation crédible du contrefactuel, c'est-à-dire ce qui serait arrivé aux unités traitées en l'absence d'intervention (Holland, 1986).

Cependant, les véritables expériences randomisées sont souvent irréalisables dans le domaine des transports et de la sécurité routière, et plus généralement pour les politiques publiques. Des contraintes éthiques, juridiques, logistiques ou politiques peuvent empêcher l'attribution aléatoire du traitement. Les décideurs politiques peuvent également choisir de cibler les mesures sur des zones ou des populations qui semblent en avoir le plus besoin, rendant ainsi impossible l'attribution aléatoire (Gertler et al., 2016; Schiff et al., 2017; Shadish et al., 2002). Dans de telles situations, les analystes doivent s'appuyer sur des hypothèses supplémentaires pour estimer le contrefactuel. Cependant, ces hypothèses, en particulier lorsqu'elles ne peuvent être testées empiriquement, impliquent que les estimations de l'effet du traitement sont moins précises que celles obtenues à partir d'une expérience randomisée bien conçue (Morgan & Winship, 2014; Schiff et al., 2017). Lorsque la randomisation pure n'est pas possible, il peut néanmoins être envisageable de concevoir une quasi-expérience en analysant minutieusement la manière dont l'intervention est mise en œuvre. Lorsqu'elles sont appliquées avec soin, ces approches peuvent fournir des preuves crédibles des effets de l'intervention, même dans le contexte complexe de la mobilité et de la sécurité routière. Bien que non exhaustives, nous présentons ici des méthodes qui ont démontré leur pertinence dans le domaine de la sécurité routière et de la mobilité.

La méthode des doubles différences (DiD) est devenue l'une des approches les plus largement utilisées pour évaluer les interventions en matière de transport et de sécurité routière. La méthode DiD estime les effets causaux en comparant l'évolution dans le temps des résultats entre un groupe exposé à une intervention (groupe de traitement) et un groupe comparable qui n'est pas traité (groupe témoin) (Angrist & Pischke, 2009; Meyer, 1995). La crédibilité de ce design dépend de l'hypothèse de tendances parallèles, qui suppose que les deux groupes auraient continué à évoluer selon des trajectoires similaires si l'intervention n'avait pas eu lieu. Lorsque cette hypothèse est raisonnable et que le groupe traité est exposé de manière unique à une intervention ou à un changement réglementaire tandis que le groupe témoin fournit une base de référence stable, la DiD offre une stratégie robuste pour isoler l'impact de l'intervention (Lechner, 2010; Wing et al., 2018). Des travaux récents en économétrie appliquée ont permis de clarifier le développement de designs transparents de DiD et d'étude d'événements lorsque les effets peuvent être dynamiques, renforçant ainsi l'importance d'un diagnostic explicite des tendances préalables et le choix minutieux des spécifications du modèle (Callaway & Sant'Anna, 2021; Goodman-Bacon, 2021; Roth, 2022; Sun & Abraham, 2021). Ce design

² **Hétérogénéité non observée** : variation dans la population qui n'est pas capturée par les variables mesurées et qui ne peut donc pas être prise en compte dans le modèle statistique.

est donc particulièrement utile pour la sécurité routière, où la mise en œuvre des politiques varie selon les populations, les lieux ou les types de véhicules au fil du temps. On peut citer comme exemples les systèmes de points de pénalité qui s'appliquent uniquement à certains groupes de conducteurs, le déploiement échelonné des technologies de contrôle des limitations de vitesse ou les campagnes de contrôle ciblées qui s'appliquent de manière inégale dans l'espace ou dans le temps. Des informations plus détaillées sur le design DiD, y compris une illustration schématique, sont fournies à la section 3.4.1 (figure 1).

Les modèles de séries chronologiques interrompues (ITS) sont particulièrement bien adaptés à l'évaluation des interventions à l'échelle de la population qui prennent effet à un moment clairement défini. Les modèles ITS évaluent si une intervention est associée à un changement immédiat de niveau, à un changement de tendance, ou aux deux, tout en ajustant explicitement les tendances préexistantes, la saisonnalité et l'autocorrélation³ (Linden, 2015; Lopez Bernal et al., 2016). L'un des principaux atouts de l'ITS est sa capacité de distinction entre les effets soudains et les réponses comportementales ou systémiques plus progressives, offrant ainsi une image nuancée de la manière dont une intervention se développe au fil du temps (Wagner et al., 2002). Ces caractéristiques rendent l'ITS particulièrement utile dans la recherche sur la sécurité routière et les transports, où des interventions telles que les réformes juridiques, les opérations de contrôle à grande échelle, les restrictions sur la disponibilité de l'alcool ou les changements législatifs nationaux s'appliquent souvent simultanément à l'ensemble de la population et ne peuvent être évaluées à l'aide de designs aléatoires (Kontopantelis et al., 2015; Taljaard et al., 2014).

Les modèles de régression sur discontinuité (RD) jouent un rôle important dans l'évaluation des interventions en matière de transport et de sécurité routière qui reposent sur des seuils clairs : par exemple, les conditions d'obtention du permis de conduire en fonction de l'âge, les systèmes de pénalités par points ou les changements politiques brusques liés à des dates de mise en œuvre spécifiques. Lorsque les unités situées juste au-dessus et au-dessous du seuil d'application sont comparables, la RD peut fournir des estimations causales très fiables en exploitant la discontinuité créée au seuil (Imbens & Lemieux, 2008; Lee & Lemieux, 2010).

Les méthodes de score de propension offrent un moyen pratique d'évaluer les interventions de transport et de sécurité routière lorsque l'assignation aléatoire n'est tout simplement pas possible. L'idée de base est qu'au lieu de comparer des unités traitées et non traitées (témoins) qui peuvent différer de manière importante, les chercheurs modélisent d'abord la probabilité de bénéficier de l'intervention en fonction des caractéristiques observées. Cette probabilité, appelée score de propension, est ensuite utilisée pour équilibrer les observations à l'aide de différentes stratégies telles que l'appariement, la pondération ou le regroupement des unités, afin que les groupes traités et témoins se ressemblent davantage sur les facteurs susceptibles d'influencer l'attribution du traitement (Austin, 2011; Rosenbaum & Rubin, 1983). Dans le domaine de la recherche en sécurité routière, cela est particulièrement utile car les interventions ciblent souvent des lieux à haut risque ou des populations spécifiques, ce qui crée de forts biais de sélection. Les études utilisant les méthodes du score de propension pour, par exemple, améliorer la sécurité routière d'un site, montrent que l'équilibrage des sites traités et non traités sur des variables telles que l'historique des accidents, la conception des routes ou le volume de trafic peut améliorer considérablement la crédibilité des effets estimés (Sasidharan & Donnell, 2013). Lorsqu'elles sont utilisées avec prudence, les méthodes du score de propension permettent de remédier aux facteurs de confusion sur les caractéristiques observées et fournissent une base plus fiable pour estimer dans quelle mesure une intervention a réellement impacté les résultats.

D'autres approches quasi-expérimentales sont également largement utilisées dans l'évaluation de la sécurité routière. Les modèles à effets fixes, par exemple, sont fréquemment utilisés dans l'évaluation des politiques de transport pour contrôler les caractéristiques régionales non observées et stables dans le temps, telles que la qualité des infrastructures, la culture de l'application de la loi ou les conditions socio-économiques. En comparant les changements dans le temps au sein d'une même région plutôt que les différences entre les régions, les modèles à effets fixes permettent d'isoler l'effet des politiques publiques des différences géographiques stables qui, autrement, brouilleraient l'analyse (Wooldridge, 2010). Pour les études de sites, les méthodes *d'Empirical Bayes* (EB) sont largement utilisées dans les analyses de sécurité des caméras de circulation, la correction des points noirs et les changements d'infrastructures, où elles atténuent les régressions à la moyenne en combinant les données observées sur les accidents avec des informations antérieures afin de produire des estimations plus fiables de la fréquence prévue des accidents (Elvik, 2002; Hauer, 1997). Ensemble, ces approches constituent des outils puissants qui permettent à la recherche en

³ **Autocorrélation** : mesure de la corrélation entre les observations et une copie différée d'elles-mêmes. Elle quantifie la similitude entre les observations d'une variable à différents moments.

sécurité routière de tirer des conclusions causales solides lorsque des expériences randomisées ne sont pas réalisables.

Ces considérations expliquent pourquoi les simples comparaisons avant/après sont largement considérées comme insuffisantes pour évaluer les interventions en matière de transport et de sécurité routière. La littérature méthodologique recommande fortement l'utilisation de modèles quasi-expérimentaux, notamment les doubles différences, les séries chronologiques interrompues, la régression sur discontinuité et les méthodes basées sur les scores de propension, qui sont explicitement conçues pour estimer le contrefactuel non observé et isoler l'effet causal d'une intervention (Angrist & Pischke, 2009; Lopez Bernal et al., 2016; Meyer, 1995). Ce large consensus constitue le fondement des évaluations modernes des réglementations complexes en matière de sécurité routière, offrant un cadre cohérent pour analyser des interventions telles que la directive européenne sur le contrôle transfrontalier et la réforme des engins de déplacement motorisé de 2022, où l'attribution aléatoire d'un design expérimental est impossible, mais où une inférence causale rigoureuse reste essentielle. Le tableau 1 présente un aperçu des méthodes d'inférence causale couramment utilisées et abordées dans cette section.

Tableau 1 Aperçu des méthodes d'inférence causale couramment utilisées.

Méthode	Cas d'utilisation type	Principaux atouts	Principales limites
Expériences randomisées	Interventions pilotes avec mise en œuvre contrôlée	Forte validité interne ; dépendance minimale vis-à-vis des hypothèses de modélisation	Souvent irréalisables en raison de contraintes éthiques, juridiques ou politiques
Doubles différences (DiD)	Interventions affectant certains groupes mais pas d'autres au fil du temps	Ajustement pour l'hétérogénéité non observée et invariante dans le temps ; interprétation intuitive	Reposent sur l'hypothèse de tendances parallèles ; sensibles aux chocs affectant un groupe spécifique
Séries chronologiques interrompues (ITS)	Interventions à l'échelle de la population avec une date de début claire	Ajustement en fonction des tendances préexistantes et de la saisonnalité ; fonctionnent sans groupe témoin	Vulnérables aux autres interventions ou chocs concomitants
Régression sur discontinuité (RD)	Politiques basées sur des seuils d'éligibilité stricts (par exemple, âge, points)	Identification causale locale forte autour du seuil	Validité externe limitée ; nécessitent un seuil clair
Méthodes basées sur le score de propension	Interventions ciblées avec des covariables riches	Amélioration de l'équilibre des facteurs observés	Ne permettent pas de traiter les facteurs de confusion non observés
Méthodes empiriques bayésiennes (EB)	Mesures de sécurité au niveau du site (par exemple, points noirs, caméras)	Prise en compte de la régression à la moyenne	Non adaptées pour les effets comportementaux ou les effets d'une politique générale.
Modèles à effets fixes	Données de panel avec observations répétées sur des régions ou des unités	Ajustement pour l'hétérogénéité non observée et invariante dans le temps ; intuitifs	Ne peuvent pas traiter les facteurs de confusion non observés variant dans le temps

Bien qu'il existe toute une gamme de méthodes quasi-expérimentales pour l'évaluation causale en sécurité routière, leur pertinence dépend de la manière dont une intervention est mise en œuvre et de la structure des données disponibles. Dans le présent rapport, nous nous concentrons sur la méthode des doubles différences (DiD) et de séries chronologiques interrompues (ITS), car ils correspondent particulièrement aux caractéristiques des deux interventions politiques examinées. L'évaluation de la directive européenne sur le contrôle transfrontalier (CBE) adopte une conception DiD, car la directive concerne les véhicules immatriculés

à l'étranger, tandis que les véhicules immatriculés en Belgique constituent un groupe de comparaison naturel dont les résultats peuvent être observés sur la même période. L'évaluation de la réforme belge de 2022 relative aux EDM adopte une approche ITS, car la réforme a été mise en œuvre à l'échelle nationale à un moment clairement défini et ne propose pas de groupe témoin non traité.

D'autres approches quasi-expérimentales évoquées à la section 2.2 ont été soigneusement examinées, mais elles se sont avérées moins adaptées dans ce contexte. La régression sur discontinuité nécessitent un seuil d'éligibilité clairement défini qui attribue le traitement de manière discontinue; or, ni la directive CBE ni la réforme EDM n'ont un tel seuil. Les méthodes de score de propension sont plus efficaces lorsque des données individuelles riches sont disponibles pour modéliser l'attribution du traitement, alors que les analyses présentées dans ce rapport s'appuient sur des données d'accidents agrégées, ce qui limite la possibilité d'équilibrer sur base de caractéristiques observées. Les méthodes *d'Empirical Bayes* sont principalement conçues pour évaluer les mesures de sécurité au niveau des sites plutôt que pour évaluer les changements comportementaux ou réglementaires au niveau national ou au niveau de groupes. Les modèles à effets fixes ne fournissent pas à eux seuls une stratégie d'identification causale et sont donc utilisés comme outils d'aide plutôt que comme modèle d'évaluation principal. Ces considérations justifient l'accent mis sur les méthodes DiD et ITS comme étant les approches les plus appropriées pour évaluer les impacts causaux des interventions dans ce rapport.

2.3 Réglementations en matière de sécurité routière et à la mobilité et inférence causale

La sous-section 2.3 résume les recherches existantes qui utilisent les modèles décrits précédemment pour analyser comment les interventions ou les réglementations liées à la mobilité et à la sécurité routière influencent les résultats en matière de sécurité routière. Nous résumons d'abord les études d'inférence causale liées à nos deux cas d'utilisation, la directive CBE et la réglementation sur les trottinettes électriques. Nous présentons ensuite la littérature plus générale sur d'autres réglementations de mobilité et de sécurité routière.

2.3.1 Évaluation de l'inférence causale de la directive CBE

La directive européenne sur le contrôle transfrontalier (CBE) crée un système juridique et technique commun qui aide les États membres à identifier et poursuivre les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger qui commettent des infractions à la sécurité routière lorsqu'ils voyagent à l'étranger. Grâce à ce cadre, les pays peuvent accéder aux bases de données d'immatriculation des véhicules des autres pays, ce qui permet à l'État où l'infraction a été commise d'obtenir le nom et l'adresse du propriétaire ou du détenteur du véhicule fautif. La directive s'applique à un ensemble défini d'infractions clés, telles que les excès de vitesse, l'absence de ceinture de sécurité, le non-respect des feux rouges, la conduite sous l'influence de l'alcool, l'utilisation d'un téléphone portable au volant ou l'utilisation illégale d'une voie de circulation. Elle a été introduite pour remédier au problème de l'impunité des conducteurs étrangers. Son objectif plus large est de garantir l'égalité de traitement entre les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger et ceux immatriculés dans le pays, et d'encourager le respect des règles de sécurité routière dans toute l'UE (*European Parliament and Council of the European Union, 2015*).

Bien que la littérature sur l'évaluation causale en matière de sécurité routière se développe rapidement, les recherches sur la directive CBE restent limitées dans leur portée méthodologique. Les études existantes sur la directive CBE se concentrent sur les performances administratives telles que les taux d'identification transfrontalière, le suivi des notifications et les comportements de paiement plutôt que sur l'estimation des résultats en matière de sécurité routière. En conséquence, il n'existe aucune preuve causale solide pour déterminer si la directive a réduit le nombre de collisions, de blessés ou de décès (*European Parliamentary Research Service, 2025; European Transport Safety Council, 2022*).

L'impact de la certitude de l'application de la loi (la probabilité d'être pris en cas d'infraction) sur les résultats en matière de sécurité routière a toutefois été étudié avec succès dans le contexte de la sécurité routière à l'aide d'une inférence causale (voir section 2.3.3). La certitude de la sanction étant l'un des aspects clés de la directive CBE, nous pensons que des méthodes quasi-expérimentales peuvent être appliquées à cette politique.

2.3.2 Évaluation par inférence causale de la réglementation sur les trottinettes électriques

En ce qui concerne les études d'inférence causale sur l'impact de réglementations relatives aux trottinettes électriques sur la sécurité routière, la littérature est assez limitée. Cloud et al. (2023) fournissent l'une des premières estimations causales fiables de l'impact des trottinettes électriques sur la sécurité, en utilisant une méthode de doubles différences échelonnée dans 93 villes de six pays européens. En exploitant les variations quasi-expérimentales dans le calendrier de déploiement et en utilisant une conception DiD, ils montrent que l'introduction des services de trottinettes électriques partagées a entraîné une augmentation moyenne de 8,2% des accidents avec dommages corporels signalés par la police, avec des effets nettement plus importants pendant les mois d'été (environ 11,5%) et des effets négligeables en hiver. Cette étude démontre que l'inférence causale est possible dans le domaine de la micromobilité lorsque des variations naturelles sont disponibles. Edwards et al. (2025) étudient, à l'aide d'une expérience naturelle, l'introduction de systèmes de location de trottinettes électriques dans certains districts en Angleterre et leur impact sur les accidents de vélo. Ils montrent que ces systèmes de trottinettes électriques ont réduit les collisions impliquant des vélos de 20%.

Bien que les preuves causales sur la sécurité des trottinettes électriques soient rares, des modèles de recherche quasi-expérimentaux ont été utilisés pour étudier le transfert modal. Citons par exemple Kazemzadeh et Sprei (2024) qui étudient l'impact des programmes de trottinettes électriques partagées sur le transfert modal en Suède. Ils évaluent l'impact de l'utilisation d'une trottinette électrique sur la probabilité de remplacer d'autres modes de transport par des trajets en trottinette électrique. Ils appliquent l'appariement par score de propension pour constituer un groupe témoin artificiel de non-utilisateurs présentant des caractéristiques observables similaires, pour obtenir des estimations non biaisées de l'impact de l'utilisation des trottinettes électriques sur la substitution modale. Ils constatent que le fait d'être utilisateur de trottinette électrique augmente d'environ 46% la probabilité de remplacer d'autres modes de transport par la trottinette électrique pour les trajets de courte distance. Luo et al. (2021) étudient l'impact des trajets en trottinette électrique sur le système de bus en utilisant des modèles de doubles différences, avec l'Indiana comme étude de cas. Ils montrent que la relation de concurrence entraîne une diminution de la fréquentation des bus et que le système de trottinettes électriques en libre-service peut compléter le réseau de bus là où la couverture est faible. Yang et al. (2021) analysent l'impact du partage de trottinettes électriques sur l'utilisation du système de vélos en libre-service à Chicago à l'aide d'un design de doubles différences basé sur la méthode d'appariement par score de propension. Leurs résultats montrent que l'introduction du partage de trottinettes électriques a réduit l'utilisation hebdomadaire du vélo en libre-service de 10,2%.

Bien que les évaluations causales des réglementations relatives aux EDM restent limitées, les études présentées dans la section suivante suggèrent que les règles de classification, les limitations de vitesse, les conditions d'âge et les réglementations relatives à l'environnement de conduite peuvent avoir une influence significative sur les résultats en matière de sécurité. Étant donné que les comportements et les risques liés aux EDM peuvent évoluer rapidement à la suite de changements réglementaires, les méthodes ITS offrent un cadre particulièrement efficace pour détecter les effets des politiques telles que la réglementation belge de 2022 sur les EDM.

2.3.3 Inférence causale pour d'autres réglementations en matière de sécurité routière

Les évaluations quasi-expérimentales sont de plus en plus courantes pour d'autres types de réglementations liées à la mobilité et de sécurité routière. La littérature sur le contrôle de la vitesse fournit certaines des preuves les plus solides concernant l'efficacité des interventions. La vitesse à laquelle un véhicule roule est un facteur important en matière de blessures : plus le véhicule roule vite, plus l'énergie infligée aux occupants lors d'une collision est importante, et plus les blessures sont graves. Il est donc essentiel d'étudier l'impact des radars ou des contrôles automatisés sur les résultats de sécurité routière pour évaluer l'efficacité des interventions liées à la vitesse.

De nombreuses études ont démontré que les radars et les contrôles automatisés entraînent une réduction significative du nombre d'accidents graves et mortels. Wilson et al. (2010) passent en revue les études qui évaluent l'impact des radars sur la vitesse et la sécurité routière à l'aide d'essais contrôlés randomisés (ECR), de séries chronologiques interrompues (ITS) et d'études contrôlées avant/après. Ils indiquent que ces études font état d'une réduction de la vitesse moyenne après l'intervention des radars et que toutes les études ont constaté une diminution du nombre d'accidents dans les zones équipées de radars après la mise en œuvre du programme. Willardsen (2021) a exploité une expérience naturelle rare à Dayton, où les tribunaux ont imposé

à plusieurs reprises au fil du temps la désactivation et la réactivation des radars, provoquant trois chocs exogènes. À l'aide d'un estimateur avant/après et d'un estimateur de doubles différences, l'étude révèle que les radars opérationnels ont systématiquement réduit le nombre total d'accidents, de collision en T et de blessures graves.

Li et al. (2020) étudient comment l'effet des radars automatiques sur les accidents de la route évolue au fil du temps en analysant 771 sites équipés de radars et 4787 sites de contrôles de vitesse potentiels sur une période de 18 ans (1999-2016) dans toute l'Angleterre. Ils appliquent une méthode d'appariement des scores de propension (PSM) basée sur les doubles différences (DiD) et constatent que les radars ont considérablement réduit le nombre d'accidents de la route à proximité des sites équipés. Cependant, les effets varient selon les périodes. Ils indiquent que la réduction est moins importante sur le long terme. Ils soulignent que des réglementations et une gestion appropriées du trafic routier, ainsi que des critères de sélection adéquats pour les sites équipés, sont importants pour maintenir l'efficacité des radars.

Gehrsitz (2017) évalue les effets des suspensions temporaires du permis de conduire sur le comportement au volant en Allemagne, où les conducteurs qui commettent une série d'infractions pour excès de vitesse dans un délai de 365 jours se voient suspendre leur permis pendant un mois. La méthode de régression sur discontinuité est utilisée pour exploiter l'attribution quasi aléatoire des suspensions de permis causées par la limite de 365 jours et montre que les suspensions de permis d'un mois réduisent de 20% la probabilité de récidive dans l'année. Blais et Carnis (2015) étudient l'effet du programme français de contrôle automatisé de la vitesse (ASEP) sur les accidents impliquant différents types d'usagers de la route. Ils utilisent un modèle de séries chronologiques interrompues (ITS) et montrent que, dans l'ensemble, l'ASEP est associé à une diminution de 19,7% des décès et des accidents avec blessés sur la route.

Les interventions liées à l'alcool constituent un autre domaine de recherche où les modèles quasi-expérimentaux sont largement utilisés. Yu et Kaffine (2011) utilisent un modèle de régression sur discontinuité pour estimer l'effet des *Blue Laws* du Colorado sur les accidents liés à l'alcool et les contraventions pour conduite en état d'ivresse. Les *Blue Laws* du Colorado sont des restrictions visant à promouvoir des codes moraux, notamment l'interdiction de vendre de l'alcool le dimanche, et ont été abrogées le juillet 1, 2008. Yu et Kaffine ne trouvent aucune preuve que l'abrogation de ces lois bleues ait eu un impact sur les accidents et les infractions liés à l'alcool.

Nistal-Nuno (2017) applique également des modèles ITS pour évaluer l'effet d'une nouvelle loi introduite en mars 2012 qui a abaissé le seuil limite pour deux types d'alcoolémies au volant de 1 à 0,8 (g/L) et de 0,5 à 0,3 (g/L) sur la mortalité au Chili. L'étude montre que le nombre de décès sur les routes a diminué, mais que cette diminution n'était pas statistiquement significative. Wright et Lee (2021) exploitent les variations quasi aléatoires des lois des États pour estimer l'effet causal des lois sur l'alcool dans la circulation routière sur la fréquence des accidents mortels. Ils montrent que les sanctions les plus efficaces pour réduire les accidents mortels liés à l'alcool sont la tolérance zéro en matière de consommation d'alcool pour les conducteurs mineurs, l'interdiction d'avoir des boissons alcoolisées ouvertes dans les véhicules et la restriction de l'utilisation des véhicules pour les personnes ayant déjà été condamnées pour conduite en état d'ivresse (suspension du permis de conduire et obligation d'installer un dispositif anti-démarrage). Ils indiquent également que la conclusion varie considérablement selon les différentes approches empiriques.

Otero et Rau (2017) analysent les effets de l'abaissement de la limite légale d'alcoolémie pour les conducteurs de 0,5 à 0,3 (g/L) et de l'allongement des périodes de suspension du permis pour les contrevenants à l'aide d'un modèle de régression sur discontinuité. Ils montrent que même si l'on constate une baisse significative de 32% des accidents de voiture liés à l'alcool juste après l'adoption de la loi, les effets ne sont que modérés dans le temps, avec une réduction de 15% après trois ans. Chamlin (2016) étudie l'impact de la législation du New Jersey sur le taux d'alcoolémie sur le nombre de décès dus à des accidents de la route. Les résultats des analyses ITS montrent que la réduction du taux d'alcoolémie maximal autorisé à 0,8 (g/L) n'a aucun effet sur le nombre total de décès ou sur le nombre de décès de conducteurs, mais entraîne une baisse durable du nombre de décès de passagers.

Haghpahan et al. (2019) tirent parti de l'abaissement de la limite d'alcoolémie au volant de 0,8 à 0,5 (g/L) en Écosse en décembre 2014 pour créer une expérience naturelle, puisque l'Angleterre et le Pays de Galles n'ont connu aucun changement et ont pu servir de groupe témoin. Ils constatent que l'abaissement de la limite d'alcoolémie au volant en Écosse n'a pas été associé à une réduction des accidents de la route. Liang et Huang (2008) analysent comment les lois de tolérance zéro, qui rendent illégale la conduite avec un taux d'alcoolémie mesurable pour toute personne âgée de moins de 21 ans, influencent la consommation d'alcool et les comportements de conduite en état d'ivresse à l'aide d'un modèle de doubles différences. Ils utilisent des

étudiants universitaires plus âgés dans leur échantillon comme groupe témoin. Ils montrent que les lois de tolérance zéro réduisent la consommation d'alcool et la conduite en état d'ivresse chez les étudiants universitaires.

La cohérence des résultats obtenus à partir de plusieurs méthodes, contextes et périodes fournit des preuves solides que les réglementations en matière d'alcool au volant comptent parmi les interventions les plus efficaces, pour peu qu'elles soient mises en œuvre de façon adéquate.

Les recherches sur la distraction au volant ont donné des résultats mitigés, en grande partie à cause de la variabilité de l'application et du respect de la loi. Abouk et Adams (2013) fournissent l'un des exemples les plus marquants : à l'aide de la méthode DiD, ils ont constaté que l'interdiction d'envoyer des SMS n'était efficace que lorsqu'elle était classée comme infraction primaire, permettant aux agents d'arrêter les conducteurs pour cette seule infraction. Cependant, les interdictions en tant qu'infraction secondaire, nécessitant donc l'arrêt du conducteur pour une autre infraction, n'ont eu aucun impact mesurable. Rocco et Sampaio (2016) analysent également l'efficacité des interdictions d'envoyer des SMS et d'utiliser un téléphone portable à la main pour réduire le nombre de décès, à partir de données au niveau des comtés américains. Ils montrent que les États qui ont promulgué des interdictions primaires d'utiliser un téléphone portable ont connu une réduction significative du nombre de décès.

Les systèmes de points de pénalité constituent un autre domaine important de la recherche sur l'application de la loi. De Paola et Scoppa (2013), à l'aide d'un modèle de régression sur discontinuité, estiment les effets sur la sécurité routière de l'introduction en Italie en juillet 2003 d'un système de points de pénalité pour les infractions au code de la route. Ils constatent que l'introduction du système de points de pénalité a entraîné une réduction d'environ 9% des accidents de la route et d'environ 30% des décès sur la route. Leur analyse démontre que le renforcement de la cohérence et de la visibilité des sanctions induit une adaptation comportementale mesurable. Il est important de noter que les systèmes de points de pénalité ne sont pas appliqués dans tous les pays. Une analyse systématique a conclu que la probabilité de détection des infractions en Belgique était beaucoup trop faible pour qu'un système à points ait un effet dans notre pays, soulignant une fois de plus l'importance de la consistance des sanctions (Silverans et al., 2018).

Les travaux théoriques et empiriques sur la théorie de la dissuasion apportent un soutien solide à l'application de méthodes d'inférence causale telles que les doubles différences pour évaluer les effets des politiques de répression comme la directive CBE. Les recherches sur la dissuasion montrent systématiquement que l'augmentation de la certitude de la sanction, plutôt que la sévérité seule, constitue le principal mécanisme par lequel l'application de la loi influence le comportement (Nagin, 2013). Cette idée trouve écho dans les évaluations de la législation sur la distraction au volant. Les études de Chamlin (2016) et Nistal-Nuno (2017) montrent que les lois qui existent sur le papier mais ne sont pas appliquées de manière crédible n'entraînent que des changements de comportement minimes. Ces conclusions concordent avec des données plus générales issues de l'économie comportementale, qui indiquent que les usagers de la route réagissent non seulement aux amendes ou aux interdictions légales, mais aussi à la probabilité perçue d'être détectés.

Tous ces exemples montrent que les modèles d'inférence causale sont essentiels pour évaluer les réglementations en matière de sécurité routière, en particulier celles qui visent à modifier les comportements ou qui sont mises en œuvre à grande échelle. En s'appuyant sur ces méthodes, le présent rapport garantit une évaluation rigoureuse et crédible de deux interventions de sécurité routière majeures en Belgique.

3 La répression transfrontalières a-t-elle amélioré la sécurité routière? Une analyse de doubles différences

3.1 Contexte

Les véhicules immatriculés à l'étranger représentent un défi permanent pour l'application des règles de sécurité routière dans l'Union européenne. Avant 2015, les autorités nationales rencontraient des obstacles majeurs pour identifier les propriétaires de véhicules immatriculés à l'étranger lorsque des infractions au code de la route étaient détectées par des systèmes automatisés, tels que les radars ou les feux rouges. Les États membres de l'UE s'appuyaient sur différents accords bilatéraux pour obtenir les données d'immatriculation des véhicules étrangers. En pratique, les infractions commises par des véhicules immatriculés à l'étranger ne faisait donc pas l'objet d'un suivi efficace, en particulier en l'absence d'accord d'échange. Cela a créé ce que les institutions de l'UE décrivent comme une forme d'impunité relative pour les usagers de la route conduisant des véhicules immatriculés à l'étranger. Par rapport aux conducteurs de véhicules immatriculés dans le pays où est commis l'infraction, la probabilité de recevoir une amende était nettement plus faible.

En réponse à cette situation, l'Union européenne a adopté la directive relative à la poursuite transfrontalière (CBE ; *European Parliament and Council of the European Union, 2015*), qui visait à réduire cet écart en matière d'application de la loi en établissant un système harmonisé d'échange d'informations transfrontalier. La plupart des États membres de l'UE étaient tenus de transposer la directive dans leur législation nationale avant mai 2015, à l'exception du Danemark, de l'Irlande et du Royaume-Uni (alors membre de l'UE), qui avaient jusqu'à mai 2017 pour s'adapter à la directive. Malgré ces exceptions, la directive a considérablement élargi la capacité de pays comme la Belgique à identifier et à poursuivre les véhicules immatriculés à l'étranger impliqués dans des infractions routières grâce au système d'échange d'informations *EUCARIS*. Lorsqu'un dispositif de contrôle automatisé détecte une infraction en Belgique, le système peut demander les données d'immatriculation aux États membres et verbaliser le contrevenant. En conséquence, l'évaluation empirique se concentre sur les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger, qui représentent le groupe directement exposé à une certitude de sanction accrue.

Les évaluations existantes de la directive CBE sont essentiellement de natures administrative et juridique, axées sur la capacité d'application, les mécanismes de suivi et les taux de paiement des amendes, avec peu d'évaluation empirique des résultats de sécurité routière (*European Commission, 2023*). Les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger représentent environ 5% du trafic routier dans l'UE, et un véhicule immatriculé à l'étranger est environ trois fois plus susceptible de commettre une infraction au code de la route qu'un véhicule immatriculé dans le pays (*European Transport Safety Council, 2022*). En 2019, la Commission européenne (2023) a recensé environ 14,5 millions d'infractions au code de la route commises avec un véhicule immatriculé à l'étranger et non identifié sur place. Parmi celles-ci, environ 8,2 millions ont donné lieu à un paiement (8 millions volontairement, 200 000 à la suite d'une procédure d'exécution réussie). Environ 6,3 millions d'infractions n'ont pas donné lieu à une sanction. Ainsi, 40% des infractions transfrontalières ont été commises en toute impunité, soit parce que l'enquête a échoué (et que le présumé contrevenant n'a jamais reçu d'avis de sanction), soit parce que l'exécution a échoué (l'amende envoyée n'a pas été payée). Ce chiffre est relativement élevé, en particulier par rapport au niveau général d'impunité pour des infractions intra-nationales comparables (principalement des excès de vitesse détectés par des radars), qui varie de 5% dans les pays les plus performants (Pays-Bas, Suède, Pologne) à 10-20% en moyenne (Luxembourg, Lettonie, Irlande, Espagne, Estonie, Hongrie). Il est également indiqué que, bien que la part des infractions détectées qui impliquent des véhicules immatriculés à l'étranger varie considérablement d'un État membre à l'autre, en moyenne, environ 18% de toutes les infractions pour excès de vitesse sont commises par des conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger.

L'évaluation ex-post de la Commission européenne fait état d'une augmentation substantielle du nombre d'infractions transfrontalières faisant l'objet d'une enquête. Bien que son efficacité varie d'un État membre à l'autre, la directive CBE a réduit l'anonymat des contrevenants étrangers et facilité l'application de la loi. Au niveau de l'UE, le taux de paiement volontaire (c'est-à-dire le paiement dès réception de l'avis de sanction) des contrevenants étrangers, qui était d'environ 50% en 2016, est passé à 70%. Il s'agit d'une amélioration significative par rapport à la situation avant l'entrée en vigueur de la directive CBE (*European Commission, 2023*).

Des organisations indépendantes telles que le Conseil européen pour la sécurité des transports (2022) ont conclu que la directive CBE avait amélioré la répression transfrontalière, même si des lacunes subsistent. Ces conclusions ont directement contribué à la révision de la directive en 2025. La révision va au-delà de son objectif initial d'échange de données en renforçant la coopération procédurale, en élargissant la liste d'infractions couvertes et en améliorant les mécanismes d'assistance mutuelle et de sanctions entre les États membres. La mise à jour de la directive clarifie également la transparence et les droits procéduraux des conducteurs non-résidents et vise à remédier aux faiblesses en matière de répression identifiées dans l'évaluation de 2016 (EPRS, 2025). Si les résultats en matière d'application se sont améliorés, les conséquences de ces changements sur le comportement des conducteurs et, plus largement, sur la sécurité routière n'ont pas encore fait l'objet d'une évaluation empirique complète.

Malgré les progrès réalisés en matière de sanction, aucune analyse évaluée par les pairs n'a examiné l'impact de la directive CBE sur la sécurité routière, et les analyses d'impact de l'UE reconnaissent explicitement cette lacune. Cette absence se fait d'autant plus sentir que l'on s'attend à ce qu'une plus grande certitude d'application de la loi ait une incidence sur le comportement des conducteurs. La théorie de la dissuasion souligne que lorsque la certitude perçue d'une sanction augmente, le respect des règles s'améliore (Nagin, 2013). Bien que l'adaptation comportementale soit rarement observée directement dans les recherches en sécurité routière, de nombreuses études empiriques documentent une réduction des infractions et des accidents à la suite d'interventions visant à renforcer l'application de la loi et à augmenter le risque d'être pris en flagrant délit. Par exemple, le système italien de points de pénalité a réduit les infractions et contribué à une diminution du nombre de décès (De Paola & Scoppa, 2013); le contrôle automatisé de la vitesse a considérablement réduit les excès de vitesse et les accidents avec blessés (Pérez et al., 2007; Willardsen, 2021); et l'interdiction des téléphones portables a réduit les accidents liés à la distraction dans les États où cette mesure est strictement appliquée (Abouk & Adams, 2013). Rebollo-Sanz et al. (2021) montrent que l'introduction du système de points de pénalité en Espagne a eu un fort effet dissuasif, réduisant le nombre d'infractions au code de la route d'environ 14%, avec des réductions plus importantes pour les infractions plus graves, ce qui est conforme aux théories économiques de la dissuasion. Ce changement de comportement s'est traduit par des gains substantiels en matière de sécurité routière, notamment une réduction persistante de 14 à 16% des accidents, des blessés et des décès. Ceci indique que les sanctions non pécuniaires peuvent constituer une politique de sécurité routière très efficace et rentable. Bien que ces études déduisent le changement de comportement à partir des résultats en matière d'accidents et d'infractions plutôt que de mesurer directement le respect des règles, elles démontrent collectivement que lorsque la détection devient plus certaine, les conducteurs modifient leur comportement en conséquence. C'est précisément ce mécanisme que la directive CBE cherche à activer pour les véhicules immatriculés à l'étranger. On s'attend à ce que la suppression des lacunes en matière de contrôle conduise à un comportement de conduite plus sûr et à une diminution du nombre d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger.

Ce rapport fournit la première évaluation causale visant à déterminer si la directive CBE a permis d'améliorer la sécurité routière en Belgique. À partir des données officielles sur les accidents enregistrés par la police entre 2012 et 2018 et d'une méthode de doubles différences, l'analyse compare les véhicules immatriculés à l'étranger, qui constituent le groupe traité concerné par la directive CBE, et les véhicules immatriculés en Belgique, qui constituent le groupe témoin non concerné par la directive CBE. Le choix d'un design DiD découle directement de la structure de l'intervention politique. En renforçant la certitude que les véhicules immatriculés à l'étranger seraient sanctionnés en cas d'infraction, la directive CBE a modifié les incitations conformément à la théorie de la dissuasion. Les véhicules immatriculés à l'étranger constituent donc la population directement exposée au changement législatif, tandis que les véhicules immatriculés en Belgique constituent un groupe de comparaison naturel pour lequel la répression restent inchangée. La comparaison du changements des chiffres accidents de ces groupes avant et après la mise en œuvre de la directive nous permet de construire une tendance contrefactuelle crédible et d'isoler l'effet de la politique sur les résultats de sécurité routière.

Le reste du chapitre présente les données, les définitions, la stratégie empirique, les modèles descriptifs, les diagnostics pré-tendances et les principaux résultats.

3.2 Données et définitions

L'ensemble de données analysé combine les accidents signalés par la police et les informations météorologiques pour la période allant de mai 2012 à avril 2018.

3.2.1 Sources des données

La principale source de données pour cette étude est la base de données nationale sur les accidents de la route ayant entraîné des décès ou des blessures. Cette base de données est constituée à partir des rapports d'accident remplis par la police fédérale/DGR/DRI/BIPOL à la suite d'un accident. Les rapports d'accident contiennent les accidents constatés sur place ainsi que les accidents signalés au poste de police. Les données sont ensuite transmises à Statbel (Direction générale des statistiques - *Statistics Belgium*) qui les vérifie et les approuve. Les personnes mortellement blessées sont ajoutées par la Police fédérale et Statbel sur la base des certificats de décès délivrés par les procureurs et des informations provenant de la base de données MaCH. En outre, le nombre de décès est également vérifié sur base du registre national des personnes physiques, qui décrit les caractéristiques des personnes décédées.

Pour chaque accident enregistré, la base de données contient des informations détaillées sur :

- la date et l'heure de la collision,
- la localisation géographique (province, arrondissement),
- les caractéristiques de la route et de l'environnement,
- les caractéristiques du véhicule (par exemple, le type de véhicule, le pays d'immatriculation),
- les caractéristiques du conducteur,
- la gravité de l'accident et le nombre de victimes

La variable qui nous intéresse dans le cadre de cette étude est un indicateur permettant de déterminer si un accident implique au moins un véhicule immatriculé à l'étranger. Cette variable reflète le mécanisme d'application visé par la directive CBE pour augmenter la probabilité que les infractions routières commises par les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger donnent lieu à des sanctions.

Idéalement, une évaluation de la directive CBE examinerait également les infractions routières, car la directive vise directement l'application de la loi et est susceptible d'influencer le comportement des contrevenants et leur sentiment d'impunité. Toutefois, les données sur les infractions par statut d'immatriculation des véhicules ne sont pas facilement disponibles et utilisables pour une analyse causale. La présente étude se concentre donc sur les résultats en matière de sécurité routière. Bien que l'effet sur les accidents soit indirect, il reste très pertinent sur le plan politique puisqu'on s'attend à ce qu'un meilleur respect des règles de circulation se traduise en fin de compte par un comportement de conduite plus sûr et une diminution du nombre d'accidents. Des recherches futures combinant les données sur les infractions et les accidents permettraient d'obtenir une image plus complète des effets de l'application transfrontalière de la loi sur le comportement et la sécurité.

3.2.2 Préparation des données

Le jeu de données empiriques couvre la période allant de mai 2012 à avril 2018. Cette période correspond à une fenêtre symétrique de trois ans avant et après la mise en œuvre de la directive européenne sur le contrôle transfrontalier (CBE), qui est entrée en vigueur en Belgique en mai 2015. La période choisie offre une période de pré-traitement suffisamment longue pour évaluer la dynamique avant la mise en place de la politique et permet d'identifier les changements postérieurs liés à la directive.

Pour l'analyse, nous avons agrégé le nombre d'accidents par province et par mois. Les données sont agrégées au niveau mensuel pour deux raisons. Premièrement, les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger représentent une part relativement faible de l'ensemble des accidents, et une agrégation temporelle plus fine (par exemple quotidienne ou hebdomadaire) conduirait à un nombre excessif de zéros et à des estimations instables au niveau provincial. Deuxièmement, l'agrégation mensuelle nous permet de saisir les tendances saisonnières du trafic et des conditions météorologiques tout en conservant une variation suffisante pour identifier les effets de la politique autour de la mise en œuvre de la directive CBE.

Tous les accidents impliquant au moins un véhicule motorisé ont été pris en compte. Nous nous concentrons sur les voitures particulières, les camions, les camionnettes et les motos. Les voitures particulières représentent la plus grande part du trafic routier et offrent donc la plus grande puissance statistique pour détecter les changements de comportement. Les camions sont impliqués dans moins d'accidents en nombre, mais présentent des risques plus graves en raison de leur masse et de leur énergie cinétique, et ils représentent une part importante du trafic de marchandises transfrontalier. Les camionnettes présentent un profil de risque distinct, car elles sont couramment utilisées pour des activités commerciales et de livraison, ce qui implique souvent un kilométrage plus élevé, des contraintes de temps et une conduite urbaine intensive, des facteurs

associés à un risque d'accident élevé. Les motocyclistes sont particulièrement vulnérables en raison de l'absence de protection physique et d'une plus grande exposition en cas de collision.

Les accidents impliquant des cyclomoteurs sont exclus de l'analyse causale. Le 31 mars 2014, la Belgique a introduit l'immatriculation obligatoire pour tous les cyclomoteurs, accompagnée d'une procédure de régularisation pour les véhicules déjà en circulation. Avant cette réforme, une partie importante des cyclomoteurs circulant en Belgique n'étaient pas immatriculés, ce qui signifie que des informations sur leur pays d'immatriculation n'étaient pas enregistrées de façon fiable. Ce changement a créé une discontinuité dans les données. Après 2014, un grand nombre de cyclomoteurs apparaissent comme nouvellement immatriculés en Belgique, non pas en raison de changements des tendances sous-jacentes de modes de déplacement ou de sécurité, mais en raison de l'évolution administrative. Un changement aussi brusque dans la mesure de la variable de traitement viole directement l'hypothèse de tendances parallèles requise dans les designs de doubles différences et empêche la construction d'un contrefactuel cohérent avant la politique. Pour cette raison, les cyclomoteurs ne sont pas inclus dans les modèles DiD.

La spécification principale compare le nombre d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique au sein d'une même province et d'un même mois, en utilisant une structure à effets fixes saturée, qui absorbe tous les chocs spécifiques à une province au cours d'un mois donné (y compris les variations saisonnières et l'exposition variable dans le temps). En plus de l'analyse du nombre d'accidents, l'analyse causale se concentre sur l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents. En tant que mesure complémentaire et facilement interprétable, nous présentons également des résultats basés sur la part des accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger dans une province et un mois donnés. Cette variable normalisée capte les changements dans l'implication relative et est moins sensible aux fluctuations globales du volume de trafic, de l'intensité de déclaration ou du risque global d'accident qui affectent simultanément tous les usagers de la route. Ainsi, pour chaque province et chaque mois, la variable de part est construite comme suit :

- *foreign_share* = le rapport entre le nombre d'accidents dans lesquels au moins un véhicule impliqué était immatriculé à l'étranger en Europe et le nombre total d'accidents.

L'unité spatiale d'analyse comprend les dix provinces belges et la région de Bruxelles-Capitale. Une variable catégorielle (*prov*) est utilisée pour identifier ces 11 zones.

Pour l'analyse des doubles différences, nous devons définir une variable de traitement. Le traitement correspond à la mise en œuvre de la directive CBE, qui est entrée en vigueur en Belgique en mai 2015. Une variable binaire est donc créée pour refléter ce moment :

- *post_cbe* = 1 pour les mois à partir de mai 2015
- *post_cbe* = 0 pour les mois antérieurs à mai 2015

La variation identifiable provient donc des changements dans l'implication dans les accidents des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique avant et après l'introduction de la directive CBE.

Afin d'examiner la dynamique de l'effet de la politique et d'évaluer les potentielles réponses anticipées ou retardées, une variable de temps d'événement est également créée :

- *rel_month* = le nombre de mois par rapport à mai 2015, les valeurs négatives indiquant les périodes antérieures au traitement et les valeurs positives indiquant les périodes postérieures au traitement.

Afin de tenir compte des conditions environnementales susceptibles d'influencer le risque d'accident et les tendances saisonnières, les ajustement variables dans le temps suivants sont inclus :

- *avg_tem* : température mensuelle moyenne (°C)
- *avg_pre* : moyenne mensuelle des précipitations quotidiennes totales (mm)

Enfin, les modèles empiriques incluent des effets fixes provinciaux (*prov*) afin de tenir compte des différences structurelles entre les provinces, telles que les infrastructures routières, les patterns de densité du trafic, l'urbanisation et la capacité à appliquer la loi. De plus, des effets fixes mensuels sont inclus afin de refléter les schémas saisonniers classiques d'accidents et de conditions de conduite.

3.3 Méthodologie

Cette section décrit la stratégie empirique utilisée pour estimer l'impact de la directive européenne relative au contrôle transfrontalier (CBE) sur l'implication des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents de la route en Belgique. L'analyse est mise en œuvre à l'aide d'un modèle de doubles différences (DiD) comparant les véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique avant et après mai 2015. La spécification privilégiée compare le nombre d'accidents au sein d'une même province et d'un même mois à l'aide d'une structure à effets fixes saturée, ce qui réduit la sensibilité à la saisonnalité propre aux provinces, aux fluctuations de l'exposition et à d'autres facteurs de confusion variant dans le temps. En complément, nous estimons également des modèles DiD utilisant la part des accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger par province et par mois, ce qui fournit une mesure normalisée intuitive de l'implication relative.

Une méthode de doubles différences (DiD) est bien adaptée à ce contexte, car elle compare les changements dans le temps du groupe traité avec ceux du groupe témoin, avant et après la directive CBE. Le principal défi dans l'évaluation de l'impact de la directive CBE consiste à déterminer si l'implication des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents a changé après l'introduction de la politique en mai 2015, par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique. Comme la directive CBE vise les véhicules immatriculés en dehors de la Belgique, les véhicules immatriculés à l'étranger constituent le groupe de traitement. Le groupe témoin est donc composé de véhicules immatriculés en Belgique. Notre hypothèse est que si la directive CBE a permis de modifier le comportement des conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger grâce à une plus grande certitude de sanction, les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger devraient évoluer différemment après mai 2015 par rapport à ceux impliquant des véhicules immatriculés en Belgique.

Il convient de noter que la conception DiD n'exige pas que les groupes de traitement et de contrôle aient des niveaux de résultats identiques ou des tendances qui se superposent parfaitement. Elle autorise des différences entre les véhicules immatriculés à l'étranger et ceux immatriculés en Belgique, ainsi que des chocs communs affectant les deux groupes. Il est toutefois nécessaire que les évolutions des résultats pour les véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique suivent des tendances similaires avant mai 2015. Il s'agit là de l'hypothèse clé de la conception DiD, appelée 'hypothèse de tendances parallèles'. Si cette hypothèse est valide, toute divergence systématique observée après mai 2015 peut être attribuée à l'intervention politique plutôt qu'à des différences préexistantes ou à des chocs communs. Nous avons mené une étude d'événements qui permet d'analyser l'hypothèse des tendances parallèles et de détecter les effets d'anticipation ou les réponses progressives à la politique. Ainsi, la conception DiD, les spécifications de l'étude d'événements et les tests *placebo* garantissent à la fois la validité et la robustesse de l'estimation de l'effet de la directive sur les résultats en matière de sécurité routière et l'obtention d'estimations causales crédibles.

3.3.1 Modèle complémentaire de doubles différences (DiD) : part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger

L'approche par doubles différences (DiD) compare l'évolution d'un résultat dans le temps entre un groupe d'intervention (traitement) et un groupe de comparaison (contrôle). Dans la figure 1, les deux groupes ont leurs propres niveaux de résultats avant l'intervention. Il est important de noter qu'ils suivent des tendances similaires, conformément à l'hypothèse de tendances parallèles. Cela signifie que sans l'intervention, la différence entre les deux groupes serait restée constante au fil du temps. Après l'intervention, le groupe de comparaison continue à suivre sa tendance initiale, tandis que le groupe d'intervention affiche une augmentation plus marquée du résultat. La ligne rouge en pointillés représente le contrefactuel non observé, c'est-à-dire le résultat qu'aurait obtenu le groupe d'intervention si l'intervention n'avait pas eu lieu. L'estimation DiD est obtenue en comparant le résultat post-intervention réel du groupe traité à cette tendance contrefactuelle et en soustrayant le changement observé dans le groupe de comparaison. De cette manière, la DiD isole l'impact causal de l'intervention en supprimant à la fois les différences de base et les tendances générales dans le temps qui affectent les deux groupes.

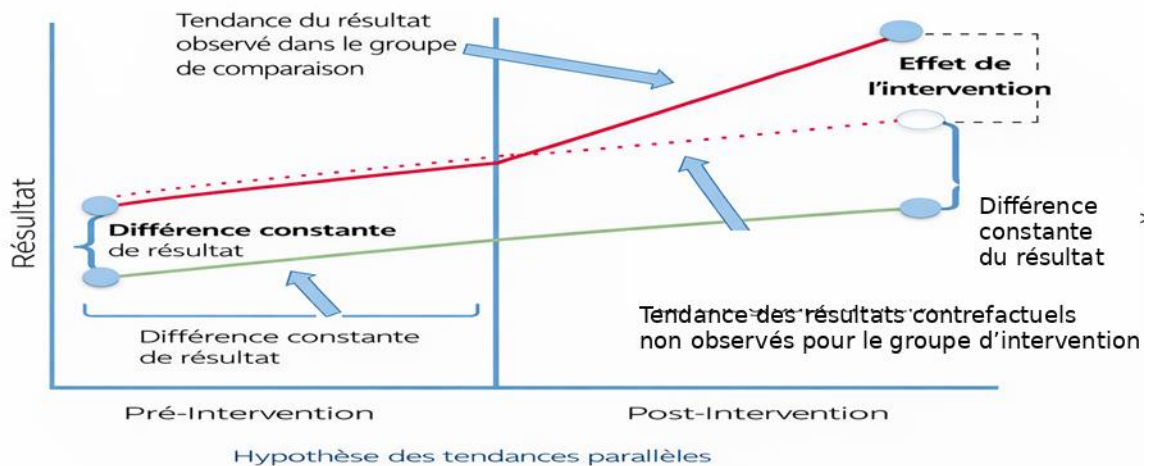


Figure 1 Conception de la méthode des doubles différences (DiD) et hypothèse de tendance parallèle.

Source : <https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/difference-difference-estimation>

La spécification complémentaire évalue si la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger a changé après la mise en œuvre de la directive CBE. L'équation du modèle est définie comme suit :

$$foreign_share_{pt} = \beta_0 + \beta_1 post_cbe_t + \gamma X_{pt} + \alpha_p + \lambda_m + \varepsilon_{pt}$$

où :

- $foreign_share_{pt}$ = la proportion d'accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger dans la province p , au mois t ;
- $post_cbe_t$ = indicateur binaire égal à 1 pour les mois à partir de mai 2015 et 0 avant ça ;
- X_{pt} = contrôles météorologiques mensuels (température et précipitations) ;
- α_p = effets fixes de la province (pour contrôler les différences non observées et invariables dans le temps entre les provinces) ;
- λ_m = effets fixes mensuels capturant les tendances saisonnières communes à toutes les provinces ;
- ε_{pt} = terme d'erreur type regroupé au niveau provincial pour tenir compte de la corrélation sérielle et de la dépendance arbitraire au sein des provinces.

Dans ce modèle, le coefficient d'intérêt est β_1 , qui mesure la variation moyenne de la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger après la mise en œuvre de la directive CBE par rapport à la période précédant l'application de la directive. Comme le résultat est une part plutôt qu'un nombre, l'effet estimé doit être interprété comme une variation en points de pourcentage de l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents.

Bien que l'analyse empirique soit réalisée en utilisant la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger comme variable de résultat, la stratégie d'identification suit un cadre de doubles différences avec effets fixes bidirectionnels. Le traitement est défini par l'application de la directive CBE en mai 2015, qui concerne les véhicules immatriculés à l'étranger mais pas les véhicules immatriculés en Belgique. Le groupe de contrôle est donc implicitement intégré dans le résultat par normalisation par rapport au nombre total d'accidents. Cette formulation compare les changements dans le temps de l'implication relative des véhicules étrangers avant et après la mise en œuvre de la politique, en utilisant les véhicules belges comme groupe contrefactuel.

Bien qu'informatrice, la spécification fondée sur les parts reste une mesure de résultat normalisée. La spécification empirique principale repose sur un modèle de doubles différences saturé utilisant le nombre d'accidents, qui est présenté dans la sous-section suivante.

3.3.2 Spécification saturée de doubles différences (DiD)

Afin d'estimer l'impact causal de la directive CBE, la spécification principale repose sur un modèle de doubles différences (DiD) saturé utilisant le nombre d'accidents plutôt que la part des accidents. Cette spécification renforce l'identification et aligne l'analyse sur un cadre DiD standard en comparant les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et des véhicules immatriculés en Belgique par province et par mois.

La spécification principale est la suivante :

$$y_{ptg} = \exp(\beta(\text{foreign}_g * \text{post_cbe}_t) + \gamma X_{pt} + \alpha_g) + \varepsilon_{ptg}$$

où:

- y_{ptg} = le nombre d'accidents dans la province p , au mois t et pour le groupe d'immatriculation g (étranger ou belge);
- foreign_g = variable indicatrice égale à 1 pour les véhicules immatriculés à l'étranger et à 0 pour les véhicules immatriculés en Belgique;
- post_cbe_t = indicateur binaire égal à 1 pour les mois à partir de mai 2015 et à 0 avant;
- X_{pt} = effets fixes province \times mois (c.-à-d. province \times année-mois), absorbant tous les chocs variant dans le temps et communs aux deux groupes au sein d'une même province et d'un même mois;
- α_g = capte les différences de niveau persistantes entre les véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique;
- ε_{ptg} = terme d'erreur avec erreurs standards regroupées (clustérisées) au niveau de la province afin de tenir compte de la corrélation sérielle et de la dépendance arbitraire intra-province.

Ce modèle saturé absorbe tous les chocs mensuels spécifiques aux provinces, y compris la saisonnalité, les fluctuations macroéconomiques, les changements dans l'intensité des contrôles et d'autres facteurs de confusion variant dans le temps et communs au sein d'une même province et d'un même mois. L'identification provient donc de comparaisons intra-province du nombre d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique avant et après l'introduction de la directive CBE.

Nous estimons une spécification log-linéaire par MCO comme modèle principal et un modèle de Poisson comme test de robustesse. Dans la spécification log-linéaire, le coefficient du terme d'interaction $\text{foreign}_g * \text{post_cbe}_t$ (noté β) mesure la variation en pourcentage des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique après l'introduction de la directive CBE. Plus précisément, l'effet estimé peut être interprété comme $\exp(\beta) - 1$, ce qui approxime la variation proportionnelle du nombre d'accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger par rapport au groupe de contrôle. La spécification de Poisson, estimée avec la même structure d'effets fixes, fournit un test de robustesse complémentaire fondé sur les données de comptage sous une forme fonctionnelle différente.

3.3.3 Spécification de l'étude d'événement pour le diagnostic des tendances parallèles

Afin d'évaluer la validité de l'hypothèse des tendances parallèles et d'examiner l'évolution dynamique de l'effet de la politique, une spécification en étude d'événement est estimée, alignée sur le modèle saturé de doubles différences:

$$\log(y_{ptg}) = \sum_{k \neq -1} \delta_k [\text{foreign}_g * 1(\text{rel_month}_t = k)] + \gamma X_{pt} + \alpha_g + \varepsilon_{ptg}$$

où y_{ptg} désigne le nombre d'accidents dans la province p , au mois t et pour le groupe d'immatriculation g (étranger ou belge) ; $1()$ dans l'équation désigne une fonction indicatrice égale à un si la condition entre parenthèses est remplie et à zéro dans le cas contraire. Le modèle est estimé sous forme logarithmique, de

sorte que les coefficients peuvent être interprétés comme des variations approximatives en pourcentage. Ici, *rel_month* mesure le nombre de mois par rapport à mai 2015, -1 servant de période de référence omise (avril 2015). Chaque coefficient δ_k représente la différence relative dans les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique au mois k relativement à la période de référence (avril 2015), et retrace l'évolution dynamique de l'effet de la politique avant et après l'introduction de la directive CBE. La spécification tient également compte des effets fixes provinciaux, des effets fixes mensuels et des conditions météorologiques.

Si les hypothèses DiD sont valables, les coefficients pré-traitement ($k < 0$) devraient fluctuer de manière aléatoire autour de zéro sans afficher de tendance systématique à la hausse ou à la baisse. Si les estimations de l'étude d'événement étaient systématiquement positives ou négatives avant mai 2015, cela indiquerait que les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger suivaient déjà une tendance différente avant l'entrée en vigueur de la directive. Une telle tendance pourrait refléter des effets d'anticipation, c'est-à-dire des changements de comportement en réponse à des annonces ou à des discussions antérieures à la directive, ou à d'autres évolutions contemporaines affectant les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger. Dans ce cas, un simple modèle DiD pourrait attribuer à tort la dynamique préexistante à l'intervention politique.

À l'inverse, les coefficients post-traitement ($k > 0$) décrivent comment les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et des véhicules immatriculés en Belgique ont évolué après la mise en œuvre. Une tendance négative soutenue après mai 2015 serait cohérente avec une réduction relative des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique à la suite de l'introduction de la directive CBE, tandis que des estimations proches de zéro suggéreraient un impact limité ou non mesurable sur l'implication relative dans les accidents.

Dans l'ensemble, les estimations de l'étude d'événements servent à la fois d'outil de diagnostic en évaluant la plausibilité de l'hypothèse de tendance parallèle et d'illustration descriptive du moment et de la direction des changements de résultats de sécurité routière liés à l'intervention (Goodman-Bacon, 2021).

3.3.4 Contrôles de robustesse et spécifications alternatives

Plusieurs contrôles de robustesse sont effectués pour évaluer la sensibilité des résultats. Il s'agit notamment de tests *placebo* utilisant des dates alternatives de mise en œuvre de la politique et d'échantillons alternatifs basés sur des modèles complémentaires fondés sur les parts. Un modèle à effets fixes saturé est également estimé à l'aide d'une régression de Poisson. En outre, des modèles basés sur le nombre d'accidents sont présentés en annexe afin de fournir des preuves complémentaires et d'illustrer comment les résultats se comparent selon différentes définitions des variables de résultat.⁴

Les modèles sont estimés à l'aide de la *version 4.0.2* de R et du package *fixest*, qui est conçu pour la régression à effets fixes de haute dimension et l'estimation robuste DiD (Berge, 2018).

3.4 Modèles descriptifs et diagnostics pré-tendances

Avant d'estimer l'effet causal de la directive sur le contrôle transfrontalier (CBE), il est important de décrire les patterns d'accidents sous-jacents impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger. L'analyse descriptive fournit un contexte essentiel pour interpréter les résultats DiD, en mettant en évidence les tendances à long terme, les variations saisonnières, la composition du trafic et les différences entre les catégories de véhicules. Ces modèles descriptifs permettent également d'évaluer si l'évolution des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger avant la mise en œuvre de la directive est globalement comparable à celle des véhicules immatriculés en Belgique, ce qui est un élément important pour la crédibilité de l'analyse causale.

Cette section présente donc les schémas descriptifs et les diagnostics pré-tendances des accidents mensuels impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger sur la période 2012-2018. Les chiffres pour tous les véhicules (voitures, camions, camionnettes et motos confondus) sont présentés dans cette section.

Les accidents impliquant des véhicules immatriculés en Belgique dominent les chiffres globaux, ce qui reflète leur part beaucoup plus importante dans le parc automobile belge

⁴ L'analyse a également été réalisée séparément par type de véhicule (voitures, motos, camions et camionnettes). Les résultats correspondants peuvent être fournis sur demande, mais ne sont pas inclus dans le rapport en raison de leur longueur.

Accidents mensuels impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger

Tous véhicules confondus, Belgique (2012–2018)

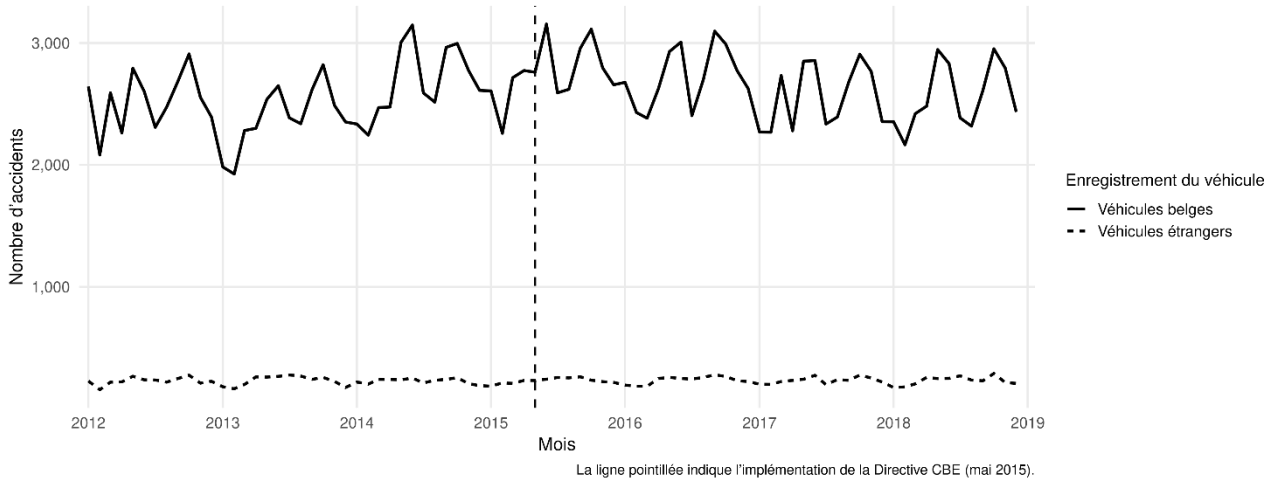


Figure 2 Accidents mensuels impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger (2012-2018).

Comme le montre la figure 2, le nombre mensuel d'accidents impliquant des véhicules immatriculés en Belgique varie entre 2 000 et 3 000, tandis que les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger se situent entre 200 et 400 par mois. Les deux séries présentent des fluctuations saisonnières, avec un nombre d'accidents plus élevé au printemps et en été et un nombre plus faible en hiver. Elles présentent également des mouvements cycliques similaires avant la mise en place de la politique. Cela suggère qu'il n'y a pas de divergence évidente dans la dynamique antérieure à la politique et soutient l'hypothèse formelle de tendances parallèles présentée plus loin à l'aide de modèles d'étude d'événements. Enfin, nous ne constatons pas de discontinuité brutale vers mai 2015 au niveau descriptif, ce qui est cohérent avec un effet de la politique modeste par rapport aux variations saisonnières et structurelles sous-jacentes.

Part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger

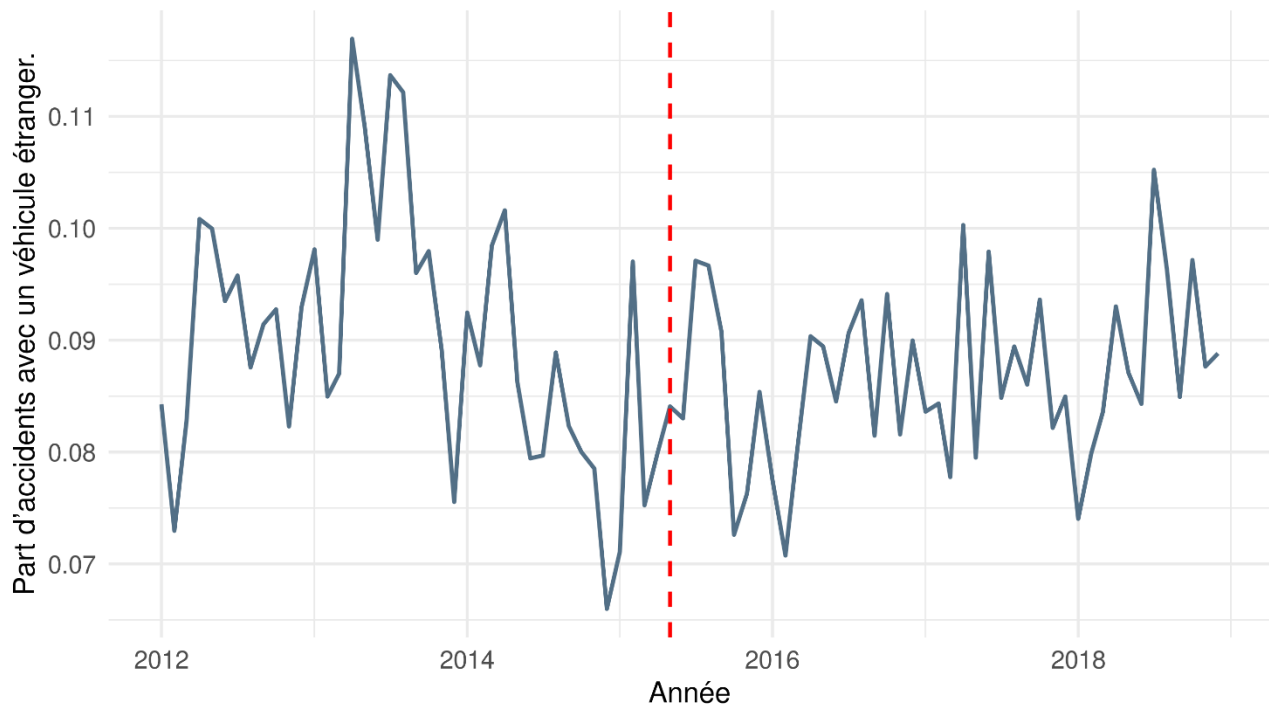


Figure 3 Part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger.

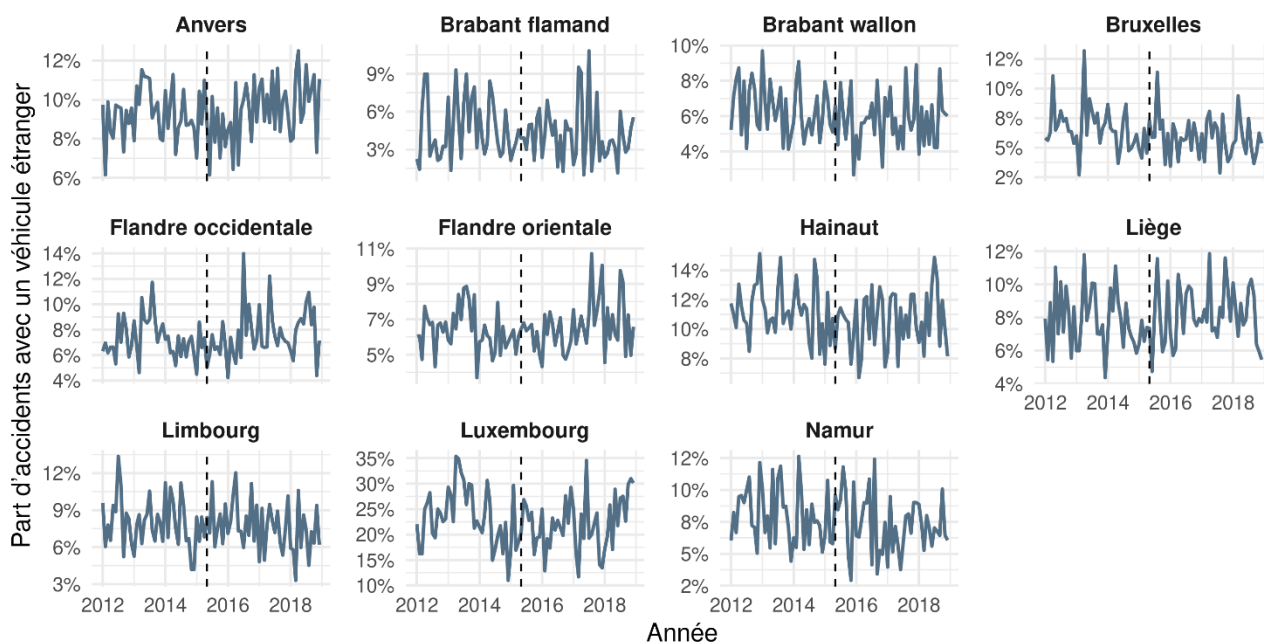
La figure 3 illustre l'évolution mensuelle de la part des accidents en Belgique sur la période 2012-2018 impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger. Il ressort de cette figure que les véhicules immatriculés à l'étranger représentent une faible proportion du nombre total d'accidents, entre 7% et 11% au

cours de la période considérée. Toutefois, ils représentent une part mesurable des accidents, et la série montre des variations saisonnières, avec des proportions plus élevées pendant les mois d'été et de printemps, en raison de l'augmentation du trafic touristique et de la présence de visiteurs transfrontaliers. La figure 3 montre également qu'avant l'introduction de la directive CBE en mai 2015, la part des accidents impliquant des véhicules étrangers fluctuait dans une fourchette relativement stable, sans suivre une tendance à la hausse ou à la baisse soutenue. Si des augmentations et des diminutions à court terme sont visibles, ces mouvements ne suivent pas une tendance directionnelle constante.

Lorsque l'on examine la date de mise en œuvre (ligne pointillée dans la figure), on ne constate aucune discontinuité brutale suggérant que l'effet de la politique est probablement faible par rapport aux variations saisonnières et structurelles sous-jacentes. Cela renforce la crédibilité de la comparaison des tendances des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique, car il n'y a aucune preuve d'une divergence systématique antérieure à la politique qui compromettrait la comparaison contrefactuelle. Ceci confirme la pertinence d'une conception DiD.

Part d'accident avec un véhicule enregistré à l'étranger, par province

Évolution mensuelle en Belgique (2012–2018)



La ligne pointillée indique l'implémentation de la Directive CBE (mai 2015).

Figure 4 Part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par province (2012-2018).

La figure 4 présente l'évolution mensuelle de la part des accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger, ventilée par province pour la période 2012-2018. On constate une hétérogénéité entre les provinces en ce qui concerne le niveau d'implication des véhicules étrangers dans les accidents. Les provinces frontalières affichent des parts plus élevées d'accidents impliquant des véhicules étrangers. La province de Luxembourg se distingue particulièrement avec 15 à 30% des accidents, ce qui reflète sa grande autoroute de transit et sa position frontalière. Bruxelles et Anvers affichent également des proportions relativement élevées par rapport aux autres provinces, de par leur connectivité internationale et le volume élevé de trafic non résidentiel. On constate également une saisonnalité dans presque toutes les provinces, les proportions d'accidents impliquant des véhicules étrangers étant généralement plus élevées au printemps et en été. Le fait que des cycles saisonniers similaires apparaissent avant et après mai 2015 souligne l'importance de contrôler les effets fixes mensuels dans l'analyse empirique.

En examinant la figure 4, nous constatons également qu'il n'y a pas de forte tendance à la hausse ou à la baisse continue avant l'introduction de la directive CBE en mai 2015. Les chiffres mensuels indiquent des fluctuations mais ces mouvements ne montrent pas de divergence avant la mise en place de la politique. Cette stabilité est particulièrement visible dans des provinces telles qu'Anvers, la Flandre-Orientale, Liège, le Limbourg et la Flandre-Occidentale. Enfin, nous ne constatons pas de rupture brutale ou structurelle dans ces provinces vers mai 2015. Cela suggère que l'impact de la directive CBE est probablement modeste par rapport

aux variations saisonnières et provinciales sous-jacentes. Dans l'ensemble, même si les proportions diffèrent d'une province à l'autre, l'évolution des parts d'accidents impliquant des étrangers avant la mise en œuvre de la politique semble être parallèle dans toutes les provinces. Tous ces éléments soutiennent l'utilisation d'un design DiD plutôt que d'une analyse descriptive, et la crédibilité de la stratégie d'identification.

Tableau 2 Part moyenne des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger avant et après l'introduction de la directive CBE.

Période	Moyenne	SD
Avant	9 %	5,43 %
Après	8,67 %	5,17 %

Le tableau 2 présente la moyenne et l'écart-type de la part des accidents impliquant des véhicules étrangers avant et après l'introduction de la directive CBE. En moyenne, la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger passe de 9% avant la mise en place de la politique à 8,7% après. Bien que cette différence soit faible et descriptive, elle indique une légère réduction de la part relative des véhicules immatriculés à l'étranger après mai 2015. La forte variabilité implique que les simples comparaisons avant/après sont insuffisantes et motive l'utilisation d'une conception DiD qui contrôle explicitement la saisonnalité, l'hétérogénéité provinciale et les effets communs des mois. Ces statistiques descriptives fournissent un contexte utile, mais ne permettent pas à elles seules d'établir un impact causal de la directive.

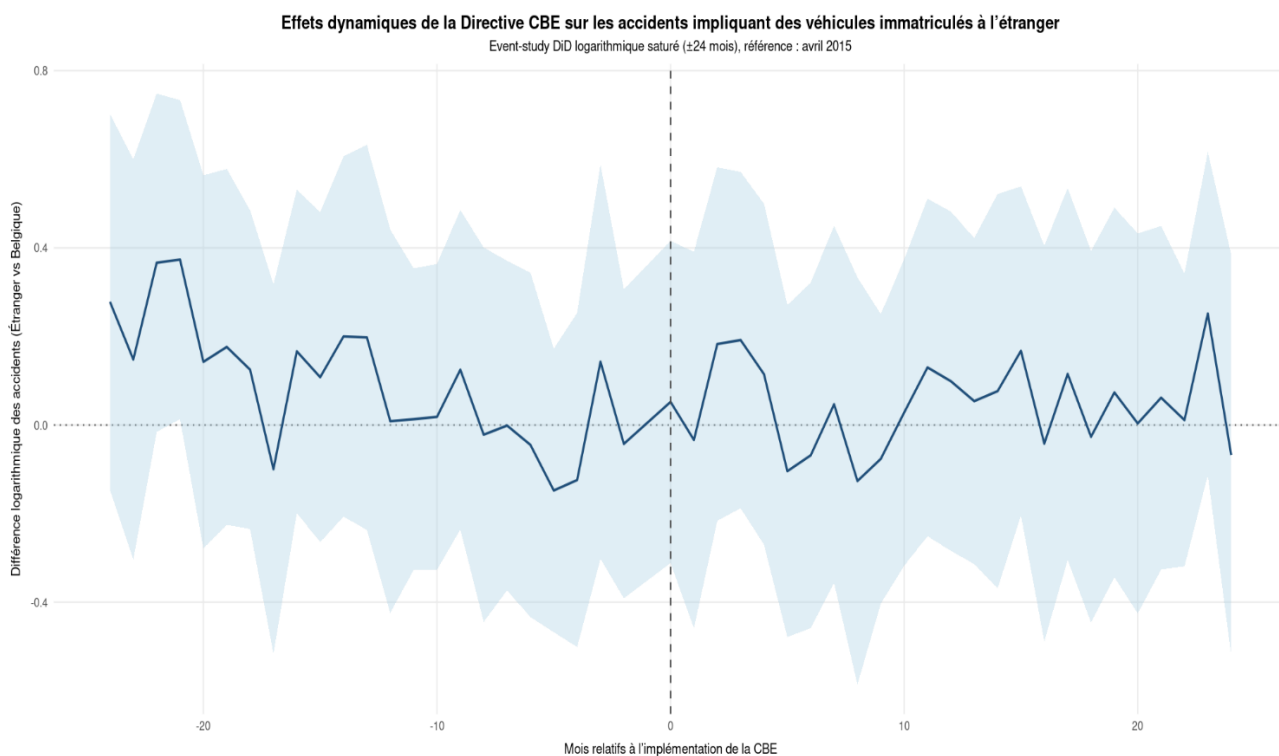


Figure 5 Estimations d'étude d'événements pour le modèle log-DiD saturé.

Une hypothèse clé de la conception DiD est qu'en l'absence de la directive CBE, les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger auraient évolué parallèlement à ceux impliquant des véhicules immatriculés en Belgique. Afin de déterminer si cette hypothèse est valable, l'une des méthodes consiste à mener une étude d'événements. Après l'estimation de l'étude d'événements, nous devons vérifier la pente des coefficients pré-traitement plutôt que leur niveau. Une augmentation ou une diminution monotone, une trajectoire non linéaire nette ou une rupture structurelle peuvent être considérées comme des preuves de la violation de l'hypothèse de tendances parallèles et comme des indications de différences dans les pentes pré-intervention entre les groupes de traitement et de contrôle. En revanche, les coefficients qui sont systématiquement positifs ou négatifs mais stables dans le temps reflètent des différences de niveau plutôt que des tendances divergentes et n'invalident pas le design de doubles différences.

La figure 5 présente les estimations dynamiques de l'étude d'événement fondées sur la spécification saturée log de doubles différences, en se concentrant sur les 24 mois avant et après l'introduction de la directive CBE

en mai 2015. Il ressort de la figure 5 que les coefficients pré-traitement fluctuent autour de zéro sans présenter de tendance monotone croissante ou décroissante. Bien que les estimations mensuelles individuelles varient et que les intervalles de confiance soient relativement larges; reflétant le nombre limité de clusters et la structure à effets fixes fortement saturée; il n'existe aucune preuve d'une divergence soutenue ou monotone entre les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et ceux impliquant des véhicules immatriculés en Belgique avant la mise en œuvre. Après l'introduction de la directive CBE, les estimations restent modestes en ampleur et fluctuent autour de zéro, avec des intervalles de confiance qui chevauchent fréquemment zéro, ce qui suggère que toute variation postérieure à la politique des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique est faible au regard de la variabilité globale. L'étude d'événement sert donc à la fois d'outil diagnostique validant la stratégie d'identification et de figure descriptive illustrant le calendrier et la persistance des effets potentiels de la politique.

Dans l'ensemble, les estimations dynamiques ne mettent pas en évidence de divergence claire ou persistante avant la mise en œuvre de la politique entre les véhicules immatriculés à l'étranger et ceux immatriculés en Belgique. Bien que les coefficients mensuels individuels varient et reflètent la volatilité inhérente aux données, rien n'indique l'existence d'une tendance systématique à la hausse ou à la baisse avant le traitement qui suggérerait une rupture structurelle préalable à la mise en œuvre. Pris dans leur ensemble, les éléments graphiques appuient l'interprétation selon laquelle les principaux résultats de doubles différences reflètent un ajustement modeste après la mise en œuvre de la politique plutôt qu'une divergence préexistante.

3.5 Résultats

Cette section présente les principaux résultats empiriques concernant l'impact en Belgique de la directive CBE sur les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. L'analyse repose sur un modèle de doubles différences (DiD) appliqué à des données mensuelles au niveau des provinces couvrant la période de mai 2012 à avril 2018. Notre spécification principale est un modèle saturé de doubles différences, et la variable dépendante est le nombre d'accidents dans une province et un mois donnés impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger. Le coefficient d'intérêt mesure la variation du nombre d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger après mai 2015, relativement aux accidents impliquant des véhicules immatriculés en Belgique. Le modèle inclut des effets fixes province \times mois afin de contrôler les différences régionales et les schémas saisonniers communs, et les erreurs standards sont regroupées (clustérisées) au niveau de la province.

À titre d'éléments complémentaires, nous présentons également une spécification complémentaire fondée sur les parts, qui examine les variations de la proportion d'accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger. Comme test de robustesse, nous présentons aussi une version du modèle saturé suivant une loi de Poisson.

Tableau 3 Effet de la directive CBE sur les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger.

	DiD sur la part	Log DiD saturé
post_cbe	-0,0050+ (0,075)	-
Foreign * post_cbe	-	-0.0526* (0.018)
température	-0,0001 (0,6315)	-
précipitations	-0,0020 (0,2493)	-
effets fixes de la province	oui	Effets fixes province \times mois
effets fixes mensuel	oui	Effets fixes province \times mois
observations	792	1584
R2 ajusté	0,796	0.931

+p \leq 0,10; *p \leq 0,05 ; **p \leq 0,01 ; ***p \leq 0,001

Le tableau 3 présente les estimations des modèles de doubles différences (DiD). Les valeurs entre parenthèses correspondent aux *p-values*. La colonne (1) présente la spécification complémentaire utilisant la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger comme variable dépendante, tandis que la colonne (2) rapporte la spécification saturée fondée sur le nombre d'accidents, estimée en logarithme avec des effets fixes province \times mois.

Dans le modèle complémentaire fondé sur la part (colonne 1), le coefficient *post_cbe*, qui constitue la variable d'intérêt principale, est négatif et statistiquement significatif au seuil de 10%. Le coefficient estimé est de -0,0050, ce qui signifie qu'après l'introduction de la directive CBE en mai 2015, la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger a diminué d'environ 0,5 point de pourcentage par rapport à la période précédant la mise en place de la politique.

Comme le montre le tableau 1 de la section précédente, la part moyenne des accidents impliquant des véhicules étrangers avant la mise en place de la politique est estimée à environ 9%. L'estimation DiD correspond donc à une réduction relative de 5-6% de l'implication des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents. Bien que cette ampleur soit modeste et statistiquement significative au seuil de 10%, la direction de l'effet est conforme à l'objectif de la directive CBE, qui vise à renforcer les incitations à respecter la loi pour les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger en facilitant l'échange d'informations transfrontalier. Ainsi, cette estimation fournit des premiers éléments indiquant que la directive pourrait avoir réduit l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents.

La colonne (2) présente la spécification DiD saturée log-linéaire, qui compare le nombre d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique au sein d'une même province et d'un même mois, tout en absorbant les chocs mensuels spécifiques aux provinces. Le coefficient d'interaction estimé est de -0,0526 ($p = 0,018$). Interprété comme $\exp(\beta) - 1$, cela implique une réduction relative d'environ 5,1% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique à la suite de la directive. Cela ne signifie pas que la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger a diminué de 5 points de pourcentage. En revanche, compte tenu d'une part moyenne pré-intervention à 9%, une baisse relative de 5,1% signifie que la part moyenne des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger a chuté à approximativement 8,5-8,6%. L'ampleur de l'effet est modeste mais statistiquement significative au seuil de 5% et étroitement alignée avec les résultats fondés sur les parts.

Bien que les effets estimés soient exprimés en termes relatifs, il est utile de traduire les résultats en nombres approximatifs d'accidents afin de faciliter l'interprétation. La spécification privilégiée suggère une réduction relative d'environ 5% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger à la suite de l'introduction de la directive CBE. Sur la base du nombre moyen d'accidents par province avant l'introduction de la directive, cette estimation correspond à une réduction d'environ 130 à 150 accidents par an à l'échelle nationale impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. L'ampleur de cette réduction varie d'une province à l'autre, allant d'environ 3 à 6 accidents par an dans les provinces à faible densité de population, telles que le Luxembourg et Namur, à plus de 20 accidents par an dans les provinces à forte circulation, telles qu'Anvers et la Flandre-Orientale.

En tenant compte de l'incertitude statistique, l'intervalle de confiance à 95% suggère une diminution comprise entre environ 1% et 9%, correspondant à une baisse significative mais modérée des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. Bien que ces chiffres soient approximatifs, ils indiquent que même une réduction relative relativement faible peut se traduire par un nombre non négligeable d'accidents évités au niveau national.

Les coefficients estimés pour la température et les précipitations sont faibles et statistiquement non significatifs. Cela suggère qu'une fois les effets saisonniers absorbés par les effets fixes mensuels, les variations à court terme des conditions météorologiques n'ont pas d'incidence systématique sur l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents, même si les conditions météorologiques peuvent influencer le risque global d'accident.

À titre de test de robustesse, une spécification de Poisson utilisant la même structure d'effets fixes produit un effet négatif d'ampleur similaire (environ -2,7%), bien que la significativité statistique soit plus faible ($p \approx 0,10$). Les résultats complets du modèle de Poisson sont présentés en annexe. La cohérence du signe de l'effet à travers les différentes spécifications renforce la confiance dans les principaux résultats.

Comme indiqué dans la section précédente, les estimations en étude d'événement ne montrent aucune divergence systématique des tendances avant mai 2015, ce qui soutient la plausibilité de l'hypothèse des tendances parallèles. Les coefficients post-traitement sont généralement négatifs, suggérant que la réduction des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger est apparue au moment de la mise en œuvre et s'est maintenue par la suite, plutôt que de refléter une rupture brutale ponctuelle. Étant donné que les discussions et les étapes préparatoires de la directive CBE ont précédé son entrée en vigueur formelle, ce schéma peut refléter une combinaison d'effets de mise en œuvre graduels et de réponses comportementales liées à une plus grande certitude en matière d'application de la réglementation.

Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que l'introduction de la directive CBE est associée à une baisse statistiquement détectable de l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents. Cela est cohérent avec une adaptation comportementale en réponse au renforcement de la certitude de sanction. Les résultats corroborent l'avis de l'ETSC (2022) pour qui les mécanismes de sanctions transfrontalières améliorent le respect des règles et la sécurité routière, et qui souligne la nécessité d'une coopération transfrontalière continue et d'interventions ciblées. Cela montre l'intérêt de maintenir et de renforcer la coordination à l'échelle de l'UE en matière de contrôle routier.

À titre d'analyse complémentaire, nous avons également estimé des modèles DiD en utilisant comme résultat la part des victimes d'accidents (mortels et non mortels) impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. Compte tenu de la fréquence plus faible et de la volatilité plus élevée des indicateurs relatifs aux victimes, l'analyse se concentre sur la spécification fondée sur les parts plutôt que sur le modèle saturé basé sur les comptages. Bien que le coefficient estimé soit négatif, il n'est pas statistiquement significatif une fois que les effets fixes de la province et du mois sont pris en compte (voir la figure 12 en annexe). Cela indique que, bien que la directive CBE soit associée à une légère réduction de l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger dans les accidents, cette évolution ne se traduit pas par un changement statistiquement détectable dans la répartition des victimes d'accidents. Vu la plus grande volatilité et complexité des résultats concernant les victimes, l'analyse principale se concentre plutôt sur l'implication dans les accidents.

3.5.1 Contrôles de robustesse et analyse de sensibilité

Plusieurs contrôles de robustesse ont été effectués afin d'évaluer la crédibilité des estimations DiD et la sensibilité des résultats à d'autres choix de modélisation. Ces analyses supplémentaires sont principalement mises en œuvre à l'aide de la spécification fondée sur les parts, qui fournit une mesure normalisée de la variable dépendante et facilite la comparaison entre les différentes variantes de modélisation. Tout d'abord, toutes les spécifications fondées sur les parts incluent des effets fixes de province et de mois. Les effets fixes liés à la province absorbent les différences provinciales persistantes en matière d'exposition au trafic, d'infrastructures et de modes de déplacement, tandis que les effets fixes liés au mois reflètent les variations saisonnières courantes en matière d'accidents et de conditions de conduite. Des contrôles météorologiques sont inclus afin de tenir compte des conditions environnementales susceptibles d'influencer le risque d'accident. Les coefficients estimés pour ces contrôles sont stables dans l'ensemble des spécifications et n'affectent pas de manière substantielle l'effet estimé de la politique.

Deuxièmement, les erreurs types sont regroupées au niveau provincial afin de tenir compte de la corrélation sérielle et des chocs non observés au sein des provinces au fil du temps. Cette approche prudente élargit les intervalles de confiance, mais réduit le risque de fausse significativité statistique.

Troisièmement, dans le cadre de l'analyse de robustesse, nous estimons des versions du modèle DiD qui permettent à chaque groupe d'immatriculation (véhicules immatriculés en Belgique versus à l'étranger) de suivre sa propre tendance temporelle linéaire. Conformément aux meilleures pratiques en matière de recherche appliquée DiD, nous évaluons la robustesse des effets estimés en permettant aux groupes de traitement et de contrôle de suivre des tendances linéaires propres. Cette approche assouplit l'hypothèse standard des tendances parallèles en autorisant des différences dans les trajectoires sous-jacentes avant le traitement. L'utilisation de tendances linéaires différentielles comme diagnostic est bien établie dans la littérature DiD et est recommandée lorsque les chercheurs soupçonnent une hétérogénéité sous-jacente dans les pentes (Angrist & Pischke, 2009; Duflo & Mullainathan, 2004; Goodman-Bacon, 2021). Des contributions méthodologiques récentes soulignent en outre que l'examen de la sensibilité aux tendances propres à chaque groupe est un moyen efficace d'évaluer les violations de l'hypothèse des tendances parallèles (Clarke & Schythe, 2021; Roth, 2022; Sun & Abraham, 2021).

Enfin, nous avons effectué des tests de timing *placebo* afin d'examiner si le déclin estimé de la part des accidents étrangers après 2015 pouvait être dû au hasard ou à des variations séculaires sans rapport. À l'aide d'un échantillon élargi couvrant la période 2008-2019, nous avons réestimé le modèle complémentaire fondé sur les parts tout en attribuant des dates de mise en œuvre fictives à plusieurs années antérieures à la politique (2011-2014) et à une année postérieure à la politique (2016). La plupart des coefficients *placebo* sont faibles et statistiquement non significatifs, bien qu'un effet négatif modeste soit détecté pour une année *placebo*. Il est important de noter que les estimations *placebo* ne présentent pas de tendance systématique ou monotone à l'approche de la date de mise en œuvre fictive de mai 2015. Cela suggère que, si la part des accidents impliquant des véhicules étrangers présente une variation progressive à long terme, le moment et la persistance de la baisse restent étroitement liés à l'introduction effective de la directive CBE. À titre de contrôle

de sensibilité, nous avons également estimé le modèle DiD complémentaire fondé sur les parts de référence après avoir exclu les véhicules immatriculés au Royaume-Uni, en Irlande et au Danemark. Ces pays diffèrent sur le plan institutionnel des 27 pays de l'UE et représentent une part relativement importante du trafic étranger en Belgique. L'effet estimé post-CBE reste négatif et d'une ampleur similaire (-0,36 point de pourcentage), bien que la significativité statistique s'affaiblisse à 10%. Cela indique que le résultat principal n'est pas influencé par un petit nombre de pays étrangers à fort volume, tout en reflétant une puissance statistique réduite dans l'échantillon restreint. Les résultats se trouvent en annexe.

Dans l'ensemble, ces contrôles de robustesse indiquent que les résultats complémentaires fondés sur les parts ne sont pas influencés par des effets saisonniers, des facteurs de confusion propres à certaines provinces, des coïncidences fortuites ou des tendances différentielles avant le traitement. Ils corroborent plutôt l'interprétation selon laquelle la baisse de la part des accidents impliquant des étrangers observée après 2015 reflète une réponse modeste mais statistiquement détectable à l'introduction de la directive CBE.

3.6 Discussion

Cette étude examine l'impact de la directive européenne relative au contrôle transfrontalier (CBE) sur les résultats en matière de sécurité routière en Belgique, en se concentrant sur les accidents impliquant au moins un véhicule immatriculé à l'étranger. À l'aide d'un ensemble de données riche qui nous permet d'exploiter les variations entre les véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger par mois et par province, nous avons appliqué un modèle de doubles différences. La spécification principale repose sur une structure à effets fixes saturée comparant le nombre d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger et en Belgique par mois et par province, complétée par des modèles fondés sur les parts ainsi que par des tests de robustesse supplémentaires tels que des tests *placebo* et des spécifications DiD alternatives.

Nos résultats indiquent que la directive CBE est associée à une amélioration mesurable et significative de la sécurité routière en Belgique. Nous constatons que la directive CBE est associée à une réduction d'environ 0,5 point de pourcentage de la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger, par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique dans la spécification complémentaire fondée sur les parts. Étant donné une part moyenne pré-politique d'environ 9%, cela correspond à une diminution à environ 8,5% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. La spécification log saturée privilégiée suggère une réduction relative d'environ 5% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique après la mise en œuvre. En termes pratiques, cette réduction relative est cohérente avec une baisse de la part d'environ 9% à approximativement 8,5–8,6%, plutôt qu'avec une diminution de 5 points de pourcentage. Bien que cette ampleur puisse sembler modeste, la direction de l'effet est conforme à l'objectif de la directive CBE.

Lorsque l'estimation est extrapolée à l'échelle nationale à partir du nombre moyen d'accidents par province avant la mise en œuvre de la politique, cette réduction correspond à 130-150 accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger de moins par an. Compte tenu de l'incertitude statistique, l'intervalle de confiance à 95% suggère que cette réduction se situerait entre 1% et 9%. En examinant les provinces en détail, on constate que cette réduction varie d'une province à l'autre, allant d'environ 2 à 6 accidents par an dans les provinces moins peuplées telles que Luxembourg et Namur à plus de 20 accidents par an dans les provinces où le trafic est plus dense, telles qu'Anvers et la Flandre-Orientale.

Il est important de noter que ces chiffres ne doivent pas être interprétés comme une réduction du nombre total d'accidents, mais plutôt comme une diminution de l'implication relative des véhicules immatriculés à l'étranger, conformément au mécanisme de fonctionnement de la directive CBE. Les résultats suggèrent donc que la coopération transfrontalière avec d'autres États membres de l'UE peut apporter des avantages mesurables en matière de sécurité, même dans les cas où les véhicules immatriculés à l'étranger représentent une part relativement faible du trafic total. Dans l'ensemble, les résultats concordent avec l'évaluation de l'ETSC (2022) selon laquelle la répression transfrontalière contribue à promouvoir le respect du code de la route. Les conclusions soulignent en outre l'importance d'une coopération continue entre les autorités nationales afin de garantir le bon fonctionnement des cadres de répression à l'échelle de l'UE.

Ces conclusions apportent de nouvelles preuves empiriques à la littérature plus générale sur l'application transfrontalière du code de la route et la dissuasion. La littérature actuelle manque d'analyses de l'impact de la directive CBE sur la sécurité routière, ce qui fait de cette étude une contribution importante à ce domaine. Dans l'ensemble, l'étude démontre que l'harmonisation et le renforcement de l'application transfrontalière peuvent améliorer de manière significative les résultats en matière de sécurité routière. Alors que la mobilité

au sein de l'Union européenne continue d'augmenter, il est essentiel, pour garantir une politique de sécurité routière efficace et équitable, de veiller à ce que les règles de circulation soient appliquées de manière cohérente, quel que soit le lieu d'immatriculation du véhicule. Les recherches futures pourraient s'appuyer sur ces résultats en étudiant les canaux comportementaux, l'intensité de la répression et l'hétérogénéité des effets selon les types de routes, les technologies d'application et les populations de conducteurs.

3.7 Limites

Bien que les modèles DiD fournissent une approche structurée et largement utilisée pour estimer l'effet causal de la directive CBE, plusieurs limites doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats. Premièrement, l'analyse ne peut exclure totalement l'influence d'autres mesures de sécurité routière introduites à peu près au même moment que la directive. La Belgique a étendu l'utilisation des radars tronçons, de la reconnaissance automatique des plaques d'immatriculation (ANPR) et des contrôles routiers régionaux pendant la période étudiée, et plusieurs provinces ont amélioré leurs infrastructures autoroutières. Si ces interventions ont eu un impact disproportionné sur les conducteurs étrangers, par exemple parce qu'elles se sont concentrées sur les grandes autoroutes interurbaines, les estimations pourraient erronément attribuer en partie ces effets à la directive CBE. Les modèles isolent les changements relatifs entre les véhicules immatriculés à l'étranger et ceux immatriculés en Belgique, mais ils ne peuvent pas démêler les réformes qui se chevauchent et qui ont influencé différemment les deux groupes.

Les résultats sont également influencés par les données disponibles. Si les registres administratifs des accidents couvrent de manière exhaustive tous les accidents signalés, ils ne comprennent pas de mesures d'exposition telles que le nombre de kilomètres parcourus, les flux transfrontaliers, l'intensité du tourisme ou les volumes de fret. Si la mobilité des conducteurs étrangers a augmenté ou diminué pour des raisons indépendante de la directive, les changements dans le nombre d'accidents ou de victimes peuvent refléter des variations de l'exposition plutôt que des changements de comportement. Les données sur les victimes sont particulièrement volatiles en raison des accidents impliquant plusieurs victimes. L'agrégation au niveau mensuel des provinces masque en outre les variations au sein des provinces, et les données ne comprennent pas d'informations sur la détection des infractions, le paiement des amendes ou le respect des règles, ce qui limite la capacité à identifier les mécanismes. En outre, les contraintes liées à la taille de l'échantillon affectent la robustesse de certaines estimations.

Dans l'ensemble, ces limites n'invalident pas la stratégie empirique, mais elles impliquent que les effets estimés doivent être interprétés comme le changement relatif net associé à la directive CBE plutôt qu'une isolation parfaite de la réforme de toutes les autres influences contemporaines. Les résultats fournissent des données utiles aux décideurs sur l'évolution des accidents et des victimes impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger après la directive, mais ils ne permettent pas de séparer complètement l'effet de la directive des changements plus généraux de contrôle routier, de mobilité ou de sécurité routière au cours de la même période.

3.8 Recommandations

Les conclusions mettent en évidence plusieurs pistes que les décideurs politiques pourraient suivre pour renforcer l'impact des mesures transfrontalières de contrôle de la sécurité routière. Étant donné que la directive CBE semble avoir amélioré les résultats en matière de sécurité routière, il serait utile de développer et de soutenir davantage les mécanismes permettant le suivi transfrontalier des infractions routières. Il est essentiel que les autorités chargées de l'application de la loi dans les États membres de l'UE aient accès en temps utile à des données fiables sur l'immatriculation des véhicules. L'infrastructure technique et administrative qui permet l'échange d'informations transfrontalières peut être étendue et améliorée grâce à des investissements supplémentaires afin de réduire les lacunes qui subsistent en matière de répression et qui permettent aux contrevenants d'échapper à leurs responsabilités.

En décembre 2024, la Commission européenne a adopté une version révisée de la directive CBE afin de combler les lacunes des règles précédentes en matière d'application : environ 40% des infractions transfrontalières restaient impunies en raison des difficultés à identifier les contrevenants ou à infliger les amendes. Outre l'amélioration de l'identification des contrevenants, la liste des infractions soumises à la directive CBE a été élargie pour inclure des comportements dangereux supplémentaires tels que le non-respect de la distance de sécurité, les dépassements dangereux ou les délits de fuite. Une fois que les États membres auront transposé ce règlement dans leur législation nationale et que les données sur les accidents seront

disponibles, une étude similaire pourrait examiner la valeur ajoutée de la révision et quantifier les lacunes de la directive CBE initiale.

Outre les mesures politiques, une étape cruciale consisterait à développer des jeux de données plus complets, combinant les registres administratifs des accidents avec des informations détaillées sur les activités de répression telles que les contrôles d'alcoolémie et de stupéfiants, le moment et le lieu de déploiement des radars, et des données d'exposition telles que le volume de trafic par province. La mise en relation de ces jeux de données permettrait d'identifier plus précisément l'impact de la directive CBE sur le comportement des conducteurs et de le distinguer de celui d'autres interventions (telles que le déploiement de nouveaux radars) mises en place au cours de la même période. L'harmonisation des données entre les États membres, garantissant des définitions similaires de la gravité des blessures, de la classification des véhicules et des types d'infractions, permettrait de réaliser des analyses comparatives plus solides entre les pays. En outre, la directive CBE a un effet direct sur les infractions routières. Il serait donc intéressant de mener une analyse causale à partir des données disponibles sur les infractions. Dans le présent rapport, nous étudions l'effet indirect de la directive CBE sur les résultats en matière de sécurité routière.

Du point de vue de la modélisation, des données plus riches contenant des informations telles que des mesures d'exposition (par exemple, le nombre de kilomètres parcourus) permettraient d'améliorer le design causal. Il serait particulièrement utile d'intégrer la dépendance spatiale et les effets de débordement transfrontaliers, car le comportement routier dans les provinces frontalières peut être influencé par les niveaux de contrôle dans les pays voisins. À mesure que des données de meilleure qualité seront disponibles, les évaluations futures pourront tirer parti de la combinaison de modèles DiD avec des modèles structurels ou comportementaux qui capturent la manière dont les conducteurs réagissent aux changements dans la probabilité d'être sanctionnés.

Enfin, les résultats soulignent l'importance d'une coopération transfrontalière soutenue en matière de sécurité routière. La mobilité au sein de l'UE continue d'augmenter et les cadres d'application du code de la route doivent s'adapter en parallèle. Renforcer la cohérence des sanctions, raccourcir les délais de réponse pour les notifications transfrontalières et sensibiliser davantage le public à l'applicabilité des règles routières au-delà des frontières pourraient contribuer à garantir que les conducteurs de véhicules immatriculés à l'étranger soient soumis aux mêmes mesures dissuasives que les conducteurs de véhicules immatriculés en Belgique.

4 La règlement de 2022 sur les EDM a-t-elle réduit le nombre de victimes d'accidents de trottinettes électriques ? Une analyse de séries chronologiques interrompues

4.1 Contexte

4.1.1 Trottinettes électriques et sécurité routière

Malgré leurs avantages, les trottinettes électriques présentent des risques liés à l'appareil lui-même (roues plus petites, freins sous-dimensionnés, etc. ; Störmann et al., 2020), au comportement des utilisateurs (circulation sur les trottoirs, non-port du casque, etc.) ou aux autres usagers (manque de vigilance ; Sloomans, 2024).

Depuis 2019, les registres de la police relatifs aux accidents ayant entraîné des blessures corporelles permettent d'identifier les utilisateurs de trottinettes électriques. Les données montrent que le nombre d'accidents impliquant une trottinette électrique et le nombre de victimes blessées dans ces accidents ont depuis augmenté de manière constante, à l'exception de l'année 2023.

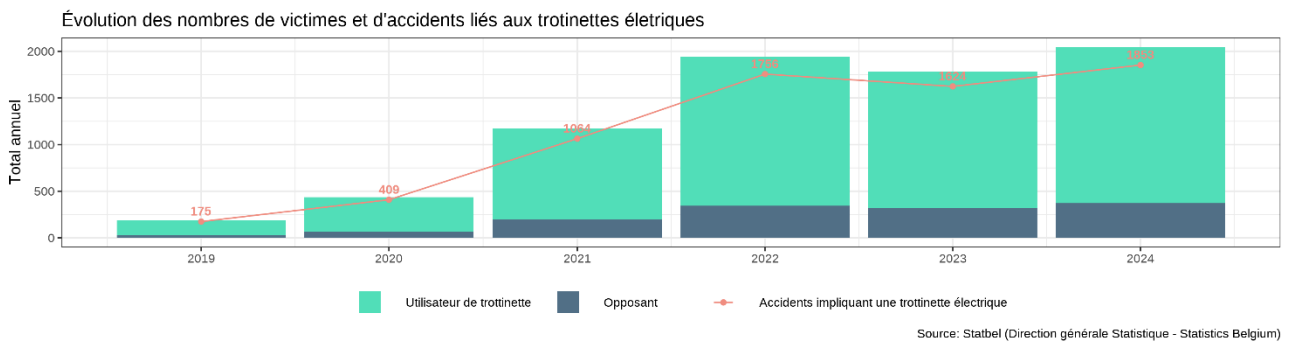


Figure 6 Évolution des accidents et des victimes liés aux trottinettes électriques.

En 2024, le nombre total de victimes dans un accident impliquant une trottinette électrique s'élevait à 2 044, soit 10,8 fois plus qu'en 2019 (189 victimes). Le nombre d'accidents a suivi une tendance similaire, atteignant 1 853 en 2024, plus de 10 fois plus qu'en 2019. Le tableau 4 présente une ventilation de cette évolution par degré de gravité des blessures. Les blessures graves ont connu la plus forte augmentation, ce qui suggère que les accidents de trottinette électrique sont non seulement plus fréquents, mais aussi plus graves. Bien que le nombre de décès ait également augmenté, la faible incidence rend l'interprétation incertaine. Ces chiffres doivent être interprétés à la lumière de l'utilisation accrue des trottinettes électriques au cours de la même période (+ 139% entre 2020 et 2024 ; Vias Institute, 2023).

Tableau 4 Évolution du nombre de victimes dans les accidents impliquant un trottinette électrique par niveau de gravité entre 2019 et 2024.

	2019	2024	Évolution 2019-2024
Légèrement blessés	180	1921	+967 %
Gravement blessés	8	119	+ 1387 %
Décédés dans les 30 jours	0	3	+ 3
Toutes victimes confondues	189	2044	+ 982 %

La littérature internationale révèle une tendance similaire. À Vienne, le nombre de patients blessés a été multiplié par environ 19 entre 2018 et 2021 (Frank et al., 2024). Aux États-Unis, le nombre de victimes d'accidents impliquant des trottinettes électriques a augmenté chaque année de plus de 45% entre 2017 et 2022 (Fernandez et al., 2024).

Une autre façon d'évaluer l'impact des trottinettes électriques sur la sécurité routière consiste à examiner la gravité des accidents. Celle-ci est généralement calculée comme suit : $(\text{nombre de décès} / \text{nombre d'accidents}) \times 1000$. Cependant, le faible nombre de décès rend cet indicateur instable. À titre d'alternative, nous avons également pris en compte le nombre de victimes gravement blessées afin d'obtenir une estimation plus stable. Pour la période 2019-2024, la gravité des accidents de trottinettes électriques était de 221. À titre de comparaison, pendant la même période, la gravité des accidents de vélo était de 259. La gravité pour les opposants est similaire dans les deux groupes, mais nous observons une grande différence pour les utilisateurs : la gravité des accidents est de 57 pour les utilisateurs de trottinettes électriques, contre 102 pour les cyclistes.

Tableau 5 Gravité modifiée des accidents pour les utilisateurs et les adversaires des trottinettes électriques et des vélos (2019-2024).

	Trottinette électrique	Vélo
Conducteur	57	102
Opposant	165	158
Général	221	259

Une analyse d'une centaine de rapports de police sur des accidents de la route survenus dans la région bruxelloise en 2020 et impliquant au moins une trottinette électrique montre que l'utilisateur de trottinette électrique est responsable de l'accident dans 46% des cas (De Vos et al., 2023). La responsabilité est partagée dans 35% des accidents. La plupart du temps, il s'agit d'accidents entre des trottinettes électriques et des véhicules à moteur.

Les données Statbel sur les accidents offrent une vision plus détaillée des opposants dans les accidents de trottinettes électriques avec dommages corporels. La figure 7 présente une ventilation du type d'opposant dans les accidents avec des utilisateurs de trottinettes électriques blessés/tués, en comparaison des cyclistes. Dans 72% des accidents ayant entraîné des blessures chez les utilisateurs de trottinettes électriques, l'opposant était un véhicule motorisé. Dans 3,2% des cas, l'adversaire était un piéton, ce qui est similaire aux cyclistes. Enfin, 15% des utilisateurs de trottinettes électriques blessés n'avaient pas d'opposant, légèrement plus que les cyclistes (12,7%). Les données de Statbel et les registres de la police ne reflètent toutefois qu'une partie de la réalité, car ils ne couvrent que les accidents avec blessures corporelles qui ont été signalés à/par la police.

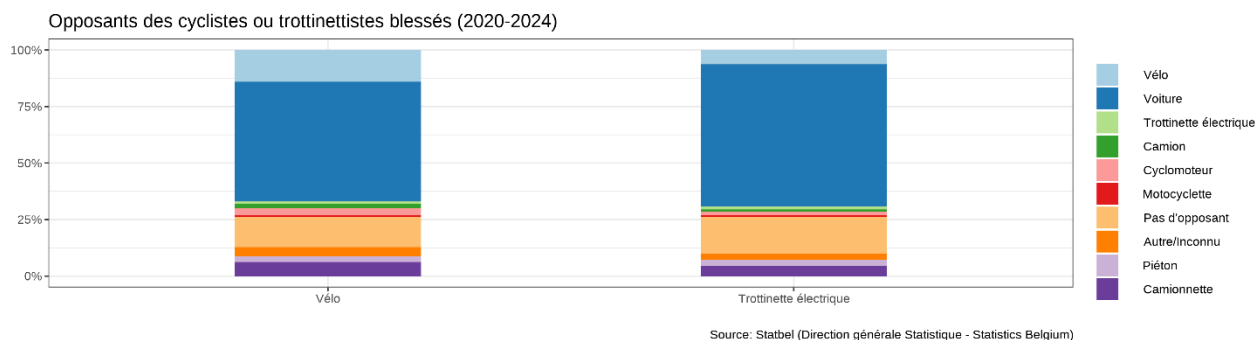


Figure 7 Types d'opposant aux cyclistes et utilisateurs de trottinettes électriques.

Les données hospitalières montrent une réalité différente. Sur la base de 8 études utilisant des données hospitalières, l'OCDE a conclu en 2020 que seulement 4% des accidents impliquant des trottinettes électriques impliquait un autre usager de la route (ITF & OECD, 2020). Des études menées en Espagne, en Israël et en Allemagne (Coelho et al., 2021 ; Shichman et al., 2022 ; Störmann et al., 2020) ont montré que les accidents étaient beaucoup plus souvent causés par des chutes que par des collisions avec un autre usager de la route. L'analyse des dossiers de 3 331 patients admis aux urgences pour des blessures liées à des trottinettes électriques révèle que seulement 4,8% des patients étaient des piétons heurtés par une trottinette électrique (Shichman et al., 2022).

Malgré le nombre relativement faible de décès liés aux accidents de trottinette électrique, une proportion considérable de victimes blessées nécessitent des soins médicaux importants, souvent une intervention chirurgicale ou une admission en unité de soins intensifs (Dhillon et al., 2020 ; Liew et al., 2020). La tendance

la plus frappante relevée par plusieurs études américaines est la fréquence élevée des traumatismes crâniens, qui représentent environ un tiers de toutes les lésions documentées (Aizpuru et al., 2019 ; Bauer et al., 2020 ; Bresler et al., 2019 ; Störmann et al., 2020). Une étude allemande exhaustive portant sur 538 victimes d'accidents souligne davantage la gravité de la situation, en indiquant que 83% d'entre elles ont subi une blessure grave à la tête ou au visage (échelle abrégée des blessures [AIS] ≥ 2 ; Hartz et al., 2025). Les blessures graves les plus courantes comprenaient l'hémorragie sous-arachnoïdienne, la fracture de la base du crâne et les fractures multiples des côtes. Une étude polonaise inclut également les extrémités parmi les zones de blessures les plus fréquentes (51%), devant la tête et le visage (36% ; Kłosiewicz et al., 2024). Les données hospitalières belges confirment cette tendance, révélant que 60% des utilisateurs de trottinettes électriques gravement blessés ont subi un traumatisme crânien sévère, 24% d'entre eux souffrant également de blessures aux hanches et aux cuisses (Bouwen, 2024).

La prévalence des traumatismes crâniens graves peut s'expliquer par le faible taux d'utilisation du casque chez les utilisateurs de trottinettes électriques. Les données d'observation soulignent cette lacune en matière de sécurité. Quand on compare les victimes d'accidents admises aux urgences à Washington D.C., les utilisateurs de trottinettes électriques étaient nettement moins susceptibles de porter un casque que les cyclistes (2% contre 66,4% ; Cicchino et al., 2021). Une autre étude américaine a révélé que les utilisateurs de trottinettes électriques partagées portaient un casque 70% moins souvent que les utilisateurs de trottinettes privées (Frye et al., 2024). Ce comportement contribue directement à la gravité des blessures.

Dans l'ensemble, les données établissent clairement que, même si elles ne causent pas un nombre élevé de décès, les trottinettes électriques présentent un risque important de blessures graves, coûteuses en ressources et susceptibles de changer le cours d'une vie. Ces blessures graves entraînent également des coûts de santé considérables, les frais médian d'une hospitalisation étant estimé à 291 dollars en Pologne (Kłosiewicz et al., 2024).

Bien qu'elles jouent un rôle important dans le développement de la mobilité, les trottinettes électriques ont un impact avéré sur la sécurité routière. En juillet 2022, une nouvelle réglementation est entrée en vigueur afin d'endiguer ce phénomène. L'objectif de notre analyse est d'évaluer l'impact de cette nouvelle loi sur le nombre mensuel de victimes d'accidents de trottinettes électriques (tant privées que partagées, pour l'utilisateur comme l'opposant) en Belgique, en comparant la trajectoire de janvier 2019 à juin 2022 avec celle de juillet 2022 à décembre 2024.

4.1.2 Contexte politique

Depuis 2007, le code de la route a introduit une catégorie spécifique pour les 'engins de déplacement motorisés' (EDM), regroupant les véhicules motorisés à une ou plusieurs roues et dont la vitesse maximale est de 25 km/h. Parmi ces dispositifs figurent les trottinettes électriques, similaires aux trottinettes classiques, mais équipées d'une batterie alimentant un moteur électrique.

Les utilisateurs de trottinettes électriques possèdent leur propre appareil ou, dans la plupart des grandes villes, peuvent utiliser leur smartphone pour déverrouiller un appareil partagé appartenant à une société de location. Bien que le profil et la motivation des utilisateurs diffèrent, les appareils privés et partagés ont gagné en popularité ces dernières années grâce à leurs aspects fonctionnels (prix abordable, accessibilité urbaine, multimodalité, etc.) ainsi qu'aux valeurs fondamentales et aux besoins qu'ils satisfont (impact environnemental réduit, liberté, santé et bien-être, etc. ; Espinoza et al., 2019 ; Vandael Schreurs et al., 2023).

En réaction à l'augmentation de leur utilisation et, par corollaire, du nombre de victimes, les autorités ont modifié le code de la route afin d'y inclure des réglementations plus spécifiques concernant les EDM tels que les trottinettes électriques. Cette loi, entrée en vigueur le 1er juillet 2022⁵, assimile les utilisateurs de ces engins aux cyclistes plutôt qu'aux piétons, les soumettant ainsi au même règlement que les cyclistes. Les principales conséquences et dispositions de cette nouvelle réglementation sont les suivantes :

1. L'interdiction de rouler en trottinette électrique sur les trottoirs, elles doivent désormais emprunter la piste cyclable (ou la chaussée s'il n'y a pas de piste).
2. Une vitesse maximale limitée à 25 km/h, avec des limitations plus spécifiques dans la région de Bruxelles-Capitale (8 km/h dans certaines zones piétonnes, 20 km/h pour le reste du territoire).

⁵ 15 MAI 2022. - Loi modifiant l'arrêté royal du 1^{er} décembre 1975 portant sur le règlement général de la police de la circulation routière et de l'utilisation de la voie publique, en ce qui concerne la réglementation des appareils de locomotion, BS 15 juin 2022, bl. 50763.

3. Un âge minimum de 16 ans pour conduire un trottinette électrique (sauf dans les zones résidentielles, piétonnes et de rencontre, ainsi que sur les chemins et les rues réservés aux jeux).
4. L'interdiction de transporter un passager.
5. Les trottinettes électriques doivent être garées en dehors de la chaussée et des zones de stationnement, à l'exception des places de stationnement réservées désignées par les panneaux de signalisation M21 à M24.
6. L'extension de l'équipement obligatoire : réflecteurs, réflecteurs latéraux, freins et avertisseur sonore.

Cette réglementation vise à limiter les comportements dangereux et à clarifier le cadre juridique régissant ces nouveaux dispositifs de mobilité urbaine. En outre, les trottinettes électriques doivent être conformes aux normes EN17128 régissant les caractéristiques de sécurité des véhicules électriques personnels légers (telles que la vitesse, le système de freinage et la gestion de la batterie) et à la législation nationale. Les trottinettes électriques doivent être équipées d'un réflecteur, d'un avertisseur sonore, d'un système de freinage adapté et avoir une largeur maximale de 1 mètre.

D'autres règles de circulation, telles que l'interdiction d'utiliser le téléphone au volant ou de conduire sous l'influence de l'alcool, s'appliquent également aux utilisateurs de trottinettes électriques.

Bien que d'autres types de dispositifs de micromobilité tels que les monoroues, les hoverboards ou les skateboards électriques soient également concernés par les réglementations mentionnées, leur utilisation reste très marginale (Mobilians & Smart Mobility Lab, 2025 ; SPF Mobilité et Transports, 2020). Le plus souvent, ils sont exclus ou regroupés dans une catégorie générique 'Autres' dans les enquêtes sur la mobilité (Eurostat, 2021 ; Ipsos & Europ Assistance, 2025 ; Vias Institute, 2023). Cela vaut également pour les données de police dans lesquels ils ne peuvent être clairement identifiés. Pour ces raisons, notre analyse se concentre uniquement sur les trottinettes électriques.

4.2 Données et définition

La base de données nationale sur les accidents de la route ayant entraîné des décès ou des blessés est la principale source de données utilisée ici. Elle est décrite à la section 3.2.1. À partir de cette base de données, nous avons extrait le nombre mensuel de victimes tuées ou blessées dans un accident impliquant au moins un trottinette électrique entre le 1^{er} janvier 2019 et le 31 décembre 2024.

Le jeu de données ouvertes des stations météorologiques automatiques (AWS) de l'IRM a été utilisé pour contrôler l'effet météorologique (*Royal Meteorological Institute of Belgium*, 1995). Les bulletins météorologiques horaires entre 8 h et 20 h provenant d'Uccle ont été extraits pour toute la période. La température moyenne (*TEMP_AVG*) et le niveau de précipitations (*PRECIP_QUANTITY*) ont été moyennés par mois afin de créer deux régresseurs externes.

La pandémie de COVID-19 ayant frappé pendant la période étudiée, l'Oxford COVID-19 Government Response Tracker (OxCGRT) a été utilisé pour dériver un troisième régresseur externe (Hale et al., 2021). À l'aide de l'ensemble de données OxCGRT_simplified, nous avons extrait le score quotidien des variables *C1* à *C8* (fermeture des écoles, fermeture des lieux de travail, annulation des événements publics, restrictions sur la taille des rassemblements, fermeture des transports publics, obligation de rester chez soi, restrictions sur les déplacements internes, restrictions sur les voyages internationaux) pour la Belgique. Les valeurs ont ensuite été moyennées par mois afin de refléter la sévérité des politiques de fermeture et de confinement mises en place en réponse à la pandémie de COVID-19. L'ensemble de données couvre la période du 1^{er} janvier 2020 au 30 décembre 2022. En dehors de cette période (c'est-à-dire pour 2019, 2023 et 2024), l'indice a été fixé à 0, reflétant l'absence de politique de confinement.

Pour estimer de manière indirecte l'utilisation des trottinettes électriques, nous utilisons le nombre mensuel de trajets déclarés par la société de trottinettes électriques en libre-service opérant à Bruxelles (*Évolution mensuelle de la mobilité*, s. d.). Comme aucun chiffre n'était disponible avant 2021, nous avons imputé les valeurs manquantes en supposant une augmentation linéaire partant de 0 en janvier 2019 et augmentant jusqu'à 2726 (première valeur disponible) en janvier 2021.

4.3 Méthodologie

Pour répondre à cette question, une série chronologique interrompue (ITS) a été utilisée. L'ITS est une approche quasi expérimentale qui évalue si une politique produit des changements mesurables en comparant les tendances avant et après l'intervention, tout en tenant compte des tendances temporelles sous-jacentes et des influences externes telles que la saisonnalité, les tendances en matière de mobilité ou les conditions météorologiques (Linden, 2015 ; Lopez Bernal et al., 2016). Les études utilisant l'ITS pour évaluer les politiques en matière d'alcool, de contrôles de vitesse et d'évaluations des permis de conduire (voir section 2.2.3) constituent des exemples idéaux pour évaluer la réforme du code de la route applicable aux EDM. La date de mise en œuvre précise, la portée nationale et la nature exhaustive de la réforme font de l'ITS un outil idéal pour identifier les effets immédiats et à long terme sur les tendances en matière de blessures liées aux EDM.

Dans ce cadre, l'effet de l'intervention est mesuré à travers les changements dans le niveau et la pente de la série chronologique.

- Un changement significatif du niveau indique un changement immédiat — soit une diminution, soit une augmentation brutale — du nombre de victimes d'accidents de trottinettes électriques juste après l'entrée en vigueur de la réforme.
- Un changement significatif de la pente reflète une modification de la trajectoire à long terme. Cela peut signaler un inversement de tendance (par exemple, une tendance auparavant à la hausse commence à baisser) ou un changement du taux de croissance (par exemple, une hausse rapide devient plus modérée ou une tendance déjà à la baisse s'accélère).

En modélisant simultanément ces composantes, l'approche ITS permet non seulement de déterminer si l'intervention a eu un effet, mais aussi de clarifier *comment* et *quand* cet effet s'est matérialisé afin de distinguer les impacts rapides et à court terme des changements structurels progressifs dans les schémas d'accidents liés aux trottinettes électriques.

Un modèle SARIMAX a été utilisé pour analyser et prédire les données. Un modèle ARIMA, qui signifie *AutoRegressive Integrated Moving Average* (moyenne mobile intégrée autorégressive), est une approche statistique utilisée pour analyser et prévoir des données chronologiques en capturant les patterns, les tendances, et les structures d'erreur dans les valeurs passées de la série. Il combine trois composantes. La partie autorégressive (AR) modélise la relation entre la valeur actuelle et les observations précédentes, le paramètre p indiquant le nombre de valeurs passées prises en compte. La composante intégrée (I) représente la différenciation appliquée à la série pour supprimer les tendances ou la non-stationnarité, et son paramètre d spécifie le nombre de fois où les données sont différenciées. La partie moyenne mobile (MA) capture l'influence des erreurs de prédictions passées sur les valeurs actuelles, le q indiquant le nombre d'erreurs différées incluses.

Pour les séries chronologiques qui présentent des tendances saisonnières, telles que des cycles mensuels ou hebdomadaires, le modèle peut être étendu à un ARIMA Saisonnier, écrit comme suit

$$ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_m$$

Dans cette version, les paramètres P, D et Q reflètent ceux des modèles non saisonniers, mais fonctionnent à la fréquence saisonnière, tandis que m définit la longueur du cycle saisonnier (dans notre cas, 12 pour les données mensuelles avec une saisonnalité annuelle). Ensemble, ces paramètres permettent au modèle ARIMA de prendre en compte la dynamique à court terme, les tendances à long terme et les comportements saisonniers récurrents, ce qui en fait un outil flexible pour prévoir et comprendre les processus dépendants du temps (Box et al., 2016). La littérature (Frank et al., 2024 ; Kłosiewicz et al., 2024 ; Sloomans, 2024) et nos données suggèrent la saisonnalité des accidents de trottinettes électriques (avec un pic en été), ce qui nous a amenés à choisir un modèle tenant compte de la saisonnalité.

Les trois régresseurs externes décrits à la section 4.2 (niveau de précipitations, température et indice de confinement) ont été ajoutés au modèle afin de prendre en compte l'impact des facteurs externes.

Les paramètres des modèles ont été sélectionnés à l'aide de la fonction *auto.arima* du package R *forecast* v8.15 (Hyndman & Khandakar, 2008). Cette fonction explore différentes combinaisons de modèles et sélectionne automatiquement la meilleure. La performance d'un modèle est basée sur l'évaluation de divers critères d'information tels que le critère d'information d'Akaike (AIC) ou le critère d'information bayésien (BIC), qui équilibrent la qualité de l'ajustement et la complexité du modèle. Le processus de recherche exhaustive

(plutôt que par étapes) a été utilisé pour sélectionner le modèle présentant la valeur de critère d'information la plus faible comme spécification optimale. Tant pour le processus de recherche exhaustive que pour le processus par étapes, les paramètres non saisonnier d et saisonnier D sont d'abord choisis en testant la stationnarité de la série et, si celle-ci n'est pas stationnaire, en augmentant la valeur des paramètres d'un point jusqu'à ce que la stationnarité soit atteinte. Une fois d et D fixés, le processus par étapes sélectionne les ordres AR et MA (p, q, P, Q) à l'aide d'un algorithme. L'algorithme commence par 4 modèles prédéfinis et sélectionne celui qui présente l'AIC le plus faible. Jusqu'à 17 variations du modèle actuel sont ensuite testées et chaque fois qu'un modèle présentant un AIC plus faible est trouvé, il devient le 'nouveau' modèle actuel et la procédure est répétée. Le processus s'arrête lorsqu'il ne trouve plus d'autre modèle proche du modèle actuel avec un AIC inférieur. À l'inverse, le processus de recherche est exhaustif et teste explicitement à toutes les combinaisons valides pour p, q, P et Q avant de sélectionner le modèle avec l'AIC le plus bas. Cette méthode a un coût de calcul beaucoup plus élevé, mais ne dépend pas des valeurs de départ, des améliorations locales ou des mouvements incrémentiels, de sorte qu'elle ne peut pas se retrouver bloquée dans un minimum local.

Deux analyses ad hoc ont été réalisées afin d'évaluer la robustesse de nos résultats et d'apporter un éclairage supplémentaire sur leur interprétation. Tout d'abord, nous avons mené un 'test *placebo*' en utilisant des dates d'intervention fictives (un an avant et après l'application de la réforme). La comparaison de ces résultats avec la date réelle permet de confirmer que notre modèle reflète bien l'impact direct de la loi et non des anomalies saisonnières ou des fluctuations aléatoires. Ensuite, à l'aide du même modèle, nous avons prédit le nombre de trajets effectués à l'aide de trottinettes électriques partagées à Bruxelles pour investiguer, par approximation, l'impact de la réglementation sur l'utilisation des trottinettes électriques⁶.

4.4 Résultats

4.4.1 ITS principal : impact sur le nombre de victimes

Le modèle estimé est un modèle SARIMAX ($ARIMA(0,1,1)(1,0,0)_{12}$). La figure 7 compare les valeurs ajustées (c'est-à-dire le nombre de victimes estimé par le modèle pour chaque mois) avec les valeurs réelles telles que rapportées dans les données sur les accidents.

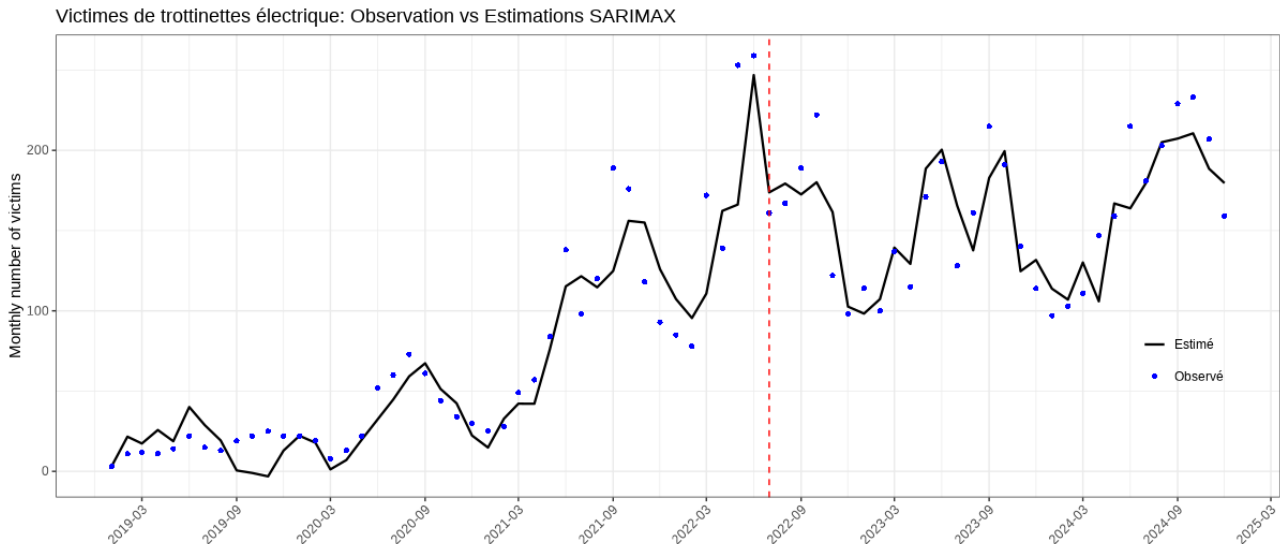


Figure 8 Nombre estimé de victimes d'accidents impliquant des trottinettes électriques selon le modèle SARIMAX.

La variance d'erreur estimée était de 629,4, avec une log-vraisemblance de $-327,84$. Les critères de sélection du modèle étaient $AIC = 671,69$ et $BIC = 689,79$ (tableau 6).

Tableau 6 Critères de sélection du modèle ITS principal.

Statistique	Valeur
-------------	--------

⁶ Les données n'ayant pas été collectées avant janvier 2021, le nombre de trajets a été interpolé pour la période janvier 2019-décembre 2020.

Sigma²	629,40
Log-vraisemblance	-327,84
AIC	671,69
AICc	674,01
BIC	689,79

Les estimations pour chaque paramètre du modèle sont résumées dans le tableau 7. Le terme de moyenne mobile (MA1) était négatif et statistiquement significatif (-0,33), tandis que le terme autorégressif saisonnier 12 (SAR1) était positif (0,53). Parmi les régresseurs, la température était significativement et positivement associée au résultat ($\beta = 3,88$), tandis que la quantité de précipitations et l'indice de confinement ne présentaient aucune association significative. Enfin, en ce qui concerne l'impact de la politique, le paramètre de changement de niveau était négatif et significatif ($\beta = -78,11$), tandis que le terme de changement de pente était faible et non significatif ($\beta = -1,67$). Cela indique un effet immédiat de la politique, mais aucun changement dans la trajectoire à long terme.

Tableau 7 Statistiques des principaux paramètres du modèle ITS.

Paramètre	Estimation	Erreur type	Valeur p
MA(1)	-0,325	0,129	0,01**
SAR(1)	0,525	0,106	0,001***
Température	3,875	0,946	0,001***
Précipitations	-3,244	3,889	0,4
Indice de confinement	-18,607	10,018	0,06
Changement de niveau	-78,113	22,512	0,001***
Changement de pente	-1,673	4,404	0,7

*p ≤ 0,5 ; **p ≤ 0,01 ; ***p ≤ 0,001

4.4.2 Contrôles de robustesse

Les estimations pour les modèles *placebo* sont présentées dans le tableau 8. Les modèles ont été ajustés à l'aide des mêmes paramètres et des mêmes régresseurs externes. Le changement de niveau et le changement de pente ont été adaptés pour refléter une date de mise en œuvre fictive au 1^{er} juillet 2021 ou 2023. Les modèles présentent un bon ajustement ($AIC_{2021} = 683,02$; $AIC_{2023} = 682,75$) et des estimations similaires pour la température, les précipitations et l'indice de confinement. Le niveau et la pente ne sont toutefois pas significatifs pour les deux dates fictives, ce qui signifie qu'aucune différence n'a été constatée entre la période avant et après les dates butoirs.

Tableau 8 Estimations et niveau de signification des modèles *placebo* ITS.

Paramètre	Juillet 2021		Juillet 2023	
	Estimation	Valeur p	Estimation	Valeur p
MA(1)	-0,414	0,016*	-0,386	0,023*
SAR(1)	0,501	0,001***	0,489	0,001***
Température	3,622	0,001***	3,754	0,001***
Précipitations	0,993	0,82	2,118	0,618
Indice de confinement	-18,848	0,07	-19,667	0,067

Décalage de niveau	21,811	0,37	-0,358	0,988
Changement de pente	1,604	0,66	5,280	0,241

*p ≤ 0,5 ; **p ≤ 0,01 ; ***p ≤ 0,001

4.4.3 Impact sur l'exposition

Le dernier modèle testé examine un résultat différent et se concentre sur l'impact de la politique sur le nombre de trajets effectués en trottinettes électriques partagées à Bruxelles. Les estimations indiquent que le nombre de trajets a considérablement diminué après juillet 2022 (-10 133 trajets par mois, $p = 0,004^{**}$). Toutefois, il convient de garder à l'esprit que la variance estimée modérément élevée de l'erreur de prévision à un pas ($\sigma^2 = 15\,671\,755$) indique un bruit résiduel important dans les données, ce qui suggère l'impact important d'autres facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Les spécifications et estimations complètes du modèle sont disponibles en annexe.

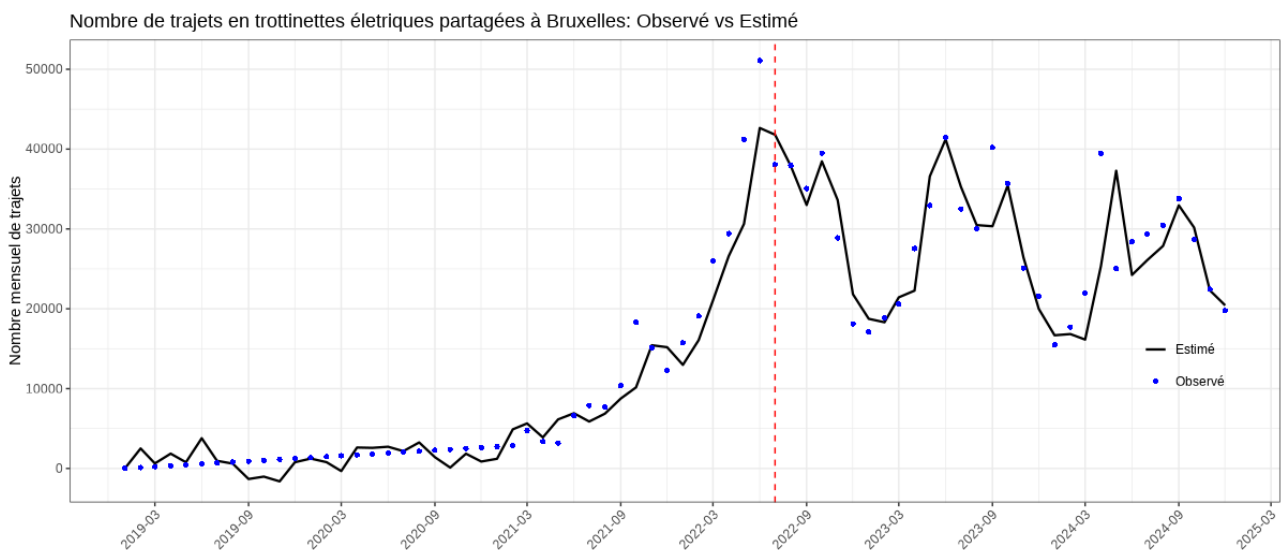


Figure 9 Nombre de trajets en trottinettes électriques partagées ajusté par SARIMAX.

4.5 Discussion

Cette étude visait à évaluer l'impact de la réforme du code de la route belge de juillet 2022 sur le nombre mensuel de victimes d'accidents de trottinettes électriques en Belgique, à l'aide d'un design ITS avec une spécification SARIMAX prenant en compte les conditions météorologiques, les restrictions liées au COVID-19 et saisonnalité. Le terme d' 'impact de la réglementation' doit ici être compris dans son sens large plutôt que comme le simple fait de promulguer une nouvelle loi. Il englobe également d'autres éléments essentiels à la conformité à la loi, tels que l'éducation, la communication, la sensibilisation et la répression (R. D. Cooter & Gilbert, 2022; Roy, 2021; Van Rooij, 2021).

Les résultats suggèrent que la nouvelle réglementation a entraîné une réduction immédiate et mesurable du nombre de victimes, mais n'a pas généré de changement détectable à long terme dans la tendance. Sur la figure 9, l'effet de rupture est visuellement indiqué par le fait que les valeurs observées (en noir) sont systématiquement inférieures aux valeurs attendues (en bleu) juste après l'intervention. L'absence d'effet de pente est illustrée par le fait que les valeurs attendues et observées restent à peu près parallèles après l'intervention. La zone bleu clair montre l'intervalle de confiance à 95% autour des valeurs estimées et l'incertitude croissante au fil du temps.

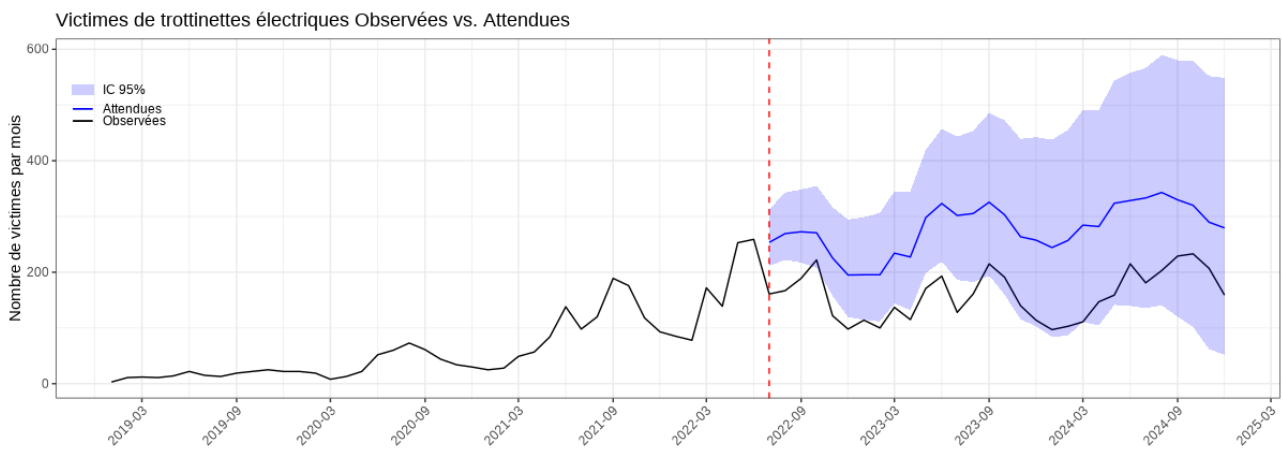


Figure 10 Nombre prévu de victimes d'accidents de trottinettes électriques sans changement de politique.

Le modèle indique un changement de niveau d'environ 78 victimes par mois après la mise en œuvre de la réglementation. Cet effet est substantiel, compte tenu notamment de la croissance rapide de l'utilisation des trottinettes électriques et de l'augmentation du nombre de blessés observés entre 2019 et 2024. Cependant, l'absence de changement significatif de la pente implique que la trajectoire de croissance sous-jacente reste globalement intacte, indiquant que la loi a atténué mais n'a pas inversé le risque à long terme.

Les deux analyses *placebo* confirment la crédibilité des résultats. Aucune d'entre elles n'a produit d'effets significatifs sur le niveau ou la pente, suggérant que le changement détecté en juillet 2022 n'est pas attribuable à des pics saisonniers, à des fluctuations aléatoires ou à des tendances de mobilité plus générale. Cela renforce l'interprétation causale selon laquelle la réduction observée est liée à la politique elle-même.

Parallèlement, l'analyse des données sur les trajets en trottinette électrique partagées à Bruxelles montre que la réglementation a entraîné une baisse significative du nombre de trajets. Ce résultat suggère que la réduction du nombre de victimes pourrait en partie venir d'une exposition moindre, plutôt que d'une amélioration du comportement des utilisateurs ou de la sécurité intrinsèque des appareils. Cette distinction est importante pour l'interprétation des politiques : si la réduction du nombre de blessés est souhaitable, les baisses uniquement dues à une diminution de l'utilisation ne reflètent pas nécessairement un environnement ou un comportement plus sûrs en matière de mobilité. En revanche, les changements dans le comportement des utilisateurs, le respect des règles ou les infrastructures pourraient générer des avantages à plus long terme.

La nature des blessures observées dans les données hospitalières belges et internationales souligne l'importance de cette question. Bien que les décès restent relativement rares, les trottinettes électriques sont associées à un nombre élevé de blessures graves, telles que des traumatismes crâniens et d'autres affections nécessitant des soins intensifs (Bouwen, 2024 ; Dhillon et al., 2020 ; Liew et al., 2020). Le port du casque reste très faible et les utilisateurs d'appareils partagés semblent encore moins enclins à porter un casque que les utilisateurs privés (Cicchino et al., 2021 ; Frye et al., 2024). Étant donné que les chutes sont la principale cause de blessures, la conception de l'appareil, le comportement protecteur du conducteur et les infrastructures sont des facteurs de risque déterminants.

Dans le même temps, la connaissance du public concernant la réglementation semble inégale. L'enquête ESRA indique que les règles relatives à l'ivresse, à l'utilisation du téléphone portable et à l'utilisation obligatoire des pistes cyclables sont relativement bien connues, mais que la connaissance des règles concernant le port du casque, les écouteurs ou le transport de marchandises reste limitée (Delavary et al., 2024). Le niveau de connaissance de ces règles est similaire en Belgique par rapport à d'autres pays européens. Une enquête plus spécifique sur les modifications législatives de 2022 permettrait d'évaluer leur impact et de déterminer si elles ont atteint leur plein potentiel. Le niveau de connaissance et le niveau de conformité parmi ceux qui connaissent la loi sont des informations cruciales pour décider si des efforts supplémentaires sont nécessaires et s'il faut plutôt se concentrer sur la sensibilisation, sur la répression, ou les deux. Enfin, des données internationales suggèrent que les infrastructures urbaines modèrent l'impact des trottinettes électriques sur la sécurité. Les villes avec des infrastructures cyclables limitées ont connu une augmentation plus importante du nombre d'accidents lors de l'introduction des trottinettes électriques, tandis que les villes disposant d'une forte densité de pistes cyclables n'ont constaté que peu ou pas d'effet (Cloud et al., 2022, 2023). Cette hétérogénéité met en évidence le contexte plus large dans lequel s'inscrit la loi de 2022 : la réglementation seule ne suffit

pas et doit s'accompagner d'investissements dans les infrastructures, la conception des véhicules et les comportements de conduite sûrs.

4.6 Limites et recherches futures

Il est difficile de prendre en compte tous les facteurs qui ont pu influencer le nombre de victimes au moment de l'entrée en vigueur de la nouvelle réglementation. En outre, d'autres changements simultanés ont pu contribuer à la diminution observée. L'absence de données détaillées sur l'exposition constitue une limitation importante, car elle limite la capacité à calibrer le modèle avec plus de précision et à déterminer si la réduction reflète des conditions de circulation plus sûres ou simplement des changements dans l'utilisation.

De plus, les accidents impliquant des trottinettes électriques sont largement sous-déclarés dans les données policières, en particulier les accidents unilatéraux et les collisions entraînant des blessures légères, ce qui rend difficile l'obtention d'une vue d'ensemble. Même si la réglementation avait eu un effet majeur sur ces événements, nous ne pourrions pas le mesurer avec les données disponibles actuellement.

La réglementation a également modifié plusieurs aspects à la fois, tels que le comportement des conducteurs grâce à des limites d'âge et les performances des appareils grâce à des restrictions de vitesse, ce qui rend impossible de déterminer quel élément spécifique a entraîné l'effet observé ou d'estimer l'importance relative de chacun. Enfin, comme il existe des conditions préalables au respect de la loi (communication, éducation, application, etc.), il est difficile de déterminer le rôle joué par chaque élément dans l'impact (ou l'absence d'impact) du changement législatif. La diminution du nombre de victimes reflète l'impact cumulé de toutes les conditions préalables sur toutes les dimensions (changements de comportement et d'appareils).

Une ventilation plus détaillée des effets de la réglementation en fonction de la gravité des blessures (par exemple, blessures légères ou graves) et du type de victime (utilisateur ou opposant) permettrait de déterminer où se concentrent les avantages de la réglementation et quels groupes d'utilisateurs restent exposés à un risque plus élevé. Une évaluation longitudinale continue est essentielle pour déterminer si la baisse immédiate observée en 2022 persiste, diminue ou évolue avec l'adaptation des utilisateurs. Les études futures devraient également examiner les impacts des mesures ciblées, telles que la modernisation des infrastructures ou les politiques d'utilisation du casque, et évaluer si elles produisent des améliorations plus importantes ou plus durables en matière de sécurité. Une analyse incluant la mesure de l'exposition, telle que la taille du parc, le nombre d'utilisateurs actifs et le nombre de kilomètres parcourus, permettrait également une comparaison dans le temps plus exacte. Une analyse axée sur les différences géographiques (par région, type d'infrastructure, niveau d'urbanisation, etc.) fournirait également des informations précieuses.

4.7 Recommandations

La plupart des recommandations issues des études précédentes de Vias (De Vos et al., 2023 ; Sloomans, 2024) restent pertinentes dans la perspective de la réduction du nombre de victimes d'accidents de trottinettes électriques.

Tout d'abord, il reste essentiel d'améliorer la sécurité des appareils, en particulier compte tenu de la forte prévalence des chutes et des traumatismes crâniens graves. Les efforts pourraient se concentrer sur l'amélioration de la stabilité et des systèmes de freinage, la mise en place de géorepérages pour faire respecter les limites de vitesse et les zones d'interdiction de circulation, et l'encouragement à l'adoption de dispositifs de sécurité avancés. Deuxièmement, il est essentiel de développer des infrastructures de micromobilité sûres, continues et bien entretenues. Les chiffres (Cloud et al., 2022, 2023) montrent que les villes dotées de réseaux cyclables denses connaissent moins d'accidents graves impliquant des trottinettes électriques, ce qui suggère que les investissements dans les infrastructures peuvent avoir des effets bénéfiques plus importants et plus durables sur la sécurité que la seule réglementation. Troisièmement, la promotion d'un comportement plus sûr chez les utilisateurs reste une priorité. Des campagnes de sensibilisation, des initiatives de formation et des incitations ou des obligations visant à améliorer le port du casque pourraient contribuer à réduire le nombre de blessures graves à la tête. Des mesures coercitives (contrôles d'alcoolémie, contrôle de la vitesse et surveillance du respect des règles relatives aux trottoirs et au stationnement) devraient compléter les initiatives éducatives afin de renforcer les normes de sécurité routière.

Enfin, d'un point de vue politique plus large, l'évaluation régulière des nouvelles réglementations en matière de mobilité devrait devenir une pratique courante. Soutenir les systèmes de données grâce à des mesures

d'exposition plus fiables, à des liens entre les données des hôpitaux et de la police, et à l'accès aux données des opérateurs de trottinettes électriques permettrait d'évaluer les politiques de manière plus fiable et aiderait à identifier si des ajustements réglementaires ou des interventions ciblées sont nécessaires. Collectivement, ces mesures peuvent contribuer à garantir que les avantages observés après la réforme de 2022 se traduisent par des améliorations durables de la sécurité des trottinettes électriques.

5 Conclusions

Les deux cas empiriques présentés dans ce rapport examinent, dans des contextes différents, comment les interventions réglementaires influencent les résultats en matière de sécurité routière en Belgique. Bien qu'ils ciblent des domaines de mobilité distincts, à savoir la répression transfrontalière pour les véhicules à moteur et la réglementation de l'utilisation des trottinettes électriques, ils fournissent ensemble une image plus large de la manière dont les changements dans les cadres juridiques, la certitude de l'application de la loi et le comportement des utilisateurs se traduisent par des effets mesurables sur la sécurité.

Nous avons évalué l'impact de la directive européenne relative au contrôle transfrontalier (CBE) sur les accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger en Belgique. La directive CBE visait à combler une lacune en matière d'application de la loi, en facilitant l'identification et la sanction des infractions routières commises en Belgique par des véhicules immatriculés à l'étranger. En utilisant des données mensuelles au niveau provincial et un modèle de doubles différences, nous constatons que l'introduction de la directive CBE est associée à une diminution faible mais statistiquement significative des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. Après mai 2015, les estimations complémentaires fondées sur les parts indiquent que la part des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger a diminué d'environ 0,5 point de pourcentage par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique. Compte tenu d'une moyenne pré-intervention d'environ 9%, cela correspond à une baisse à environ 8,5% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger. La spécification saturée privilégiée suggère une réduction relative d'environ 5% des accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger par rapport aux véhicules immatriculés en Belgique. En termes pratiques, cette réduction relative est cohérente avec une diminution de la part d'environ 9% à près de 8,5–8,6%, plutôt qu'avec une baisse de 5 points de pourcentage. Bien que modeste en ampleur, ce schéma est cohérent avec une réponse comportementale à une plus grande certitude en matière d'application des règles et demeure robuste à travers les différentes spécifications. En revanche, lorsque l'analyse est répétée en utilisant la part des victimes d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger, l'effet estimé est négatif mais non statistiquement significatif. Cela suggère que la variation observée dans l'implication dans les accidents ne se traduit pas clairement par des changements mesurables des issues en matière de blessures, lesquelles sont plus volatiles et influencées par des facteurs supplémentaires au-delà de l'application des règles. Dans l'ensemble, les résultats indiquent que le renforcement de l'application transfrontalière peut influencer le comportement de conduite, mais que l'application seule est peu susceptible de générer des gains de sécurité importants pour l'ensemble des indicateurs ou des groupes d'utilisateurs de la route.

D'un point de vue politique, les résultats plaident en faveur d'une coopération continue entre les États membres en matière de contrôle routier. La poursuite des progrès pourrait dépendre d'une visibilité accrue et d'une perception plus forte de la certitude des sanctions pour les conducteurs étrangers, ainsi que de la poursuite des investissements dans des systèmes de contrôle efficaces et interopérables. Il sera important de surveiller en permanence les patterns d'accidents impliquant des véhicules immatriculés à l'étranger afin d'évaluer les effets à long terme des révisions récentes et futures de la directive CBE.

La réforme de juillet 2022 sur les trottinettes électriques offre en revanche un exemple plus clair d'intervention réglementaire ayant un impact immédiat et mesurable sur la sécurité. L'analyse des séries chronologiques interrompues a mis en évidence une forte réduction du nombre mensuel de victimes à la suite du durcissement des règles régissant les limites d'âge, le comportement des conducteurs et les zones interdites. Les tests *placebo* confirment que cette baisse ne peut s'expliquer par des variations temporelles indépendantes ou par la structure spécifique des données. Il semble également que l'utilisation des trottinettes électriques partagées à Bruxelles ait diminué après la réforme. Si ce changement s'étend aux appareils privés et aux autres régions, l'amélioration de la sécurité observée pourrait résulter d'une exposition réduite et pas exclusivement d'une pratique plus sûre parmi les utilisateurs restants. Dans le même temps, la tendance à la hausse à long terme du nombre de victimes d'accidents de trottinette électrique n'a pas été inversée, ce qui souligne que les gains à court terme ne se traduisent pas automatiquement par une réduction durable des risques si la croissance sous-jacente de la demande de micromobilité se poursuit et si les comportements ou les infrastructures restent inchangés.

Les données montrent que les changements réglementaires ne suffisent pas à eux seuls à garantir des gains de sécurité durables alors que la micromobilité continue de se développer. D'une part, ils pourraient être renforcés par une communication ciblée sur les pratiques de conduite sûres, la consommation d'alcool, la distraction et le port du casque. D'autre part, des infrastructures de micromobilité plus continues et mieux

conçues, en particulier des voies protégées et une séparation plus claire des espaces piétonniers et des véhicules motorisés, restent essentielles pour réduire les conflits.

Du point de vue de la recherche, ces cas d'utilisation montrent l'importance et la faisabilité de l'utilisation de l'inférence causale pour évaluer l'impact des politiques sur la sécurité routière. Le renforcement des données disponibles améliorerait l'évaluation des politiques et la planification future de la sécurité. L'intégration des données policières sur les accidents avec les registres hospitaliers des blessures, l'accès à des mesures d'exposition telles que le volume du trafic et l'harmonisation des pratiques de signalement entre les régions permettraient d'identifier plus précisément les schémas de risque. Le fait de relier les données relatives à l'application de la loi, telles que le déploiement de radars, les opérations de patrouille mobile ou les contrôles d'alcoolémie, aux résultats des accidents permettrait aux décideurs politiques de distinguer les effets de l'application de la loi de ceux des réformes réglementaires.

Dans l'ensemble, ces résultats mènent à une conclusion générale : pour être efficace, la réglementation en matière de sécurité routière ne doit pas se limiter à des modifications législatives ou à des améliorations technologiques des systèmes de contrôle. Conformément à l'approche 'Safe System' développée et promue par l'ITF (2022) et adoptée dans les cadres politiques européens (European Commission, 2022), des améliorations significatives et durables sont obtenues lorsque les politiques reconnaissent que les êtres humains commettent des erreurs, que le système de transport doit être résilient face à ces erreurs et que la responsabilité de la sécurité est partagée entre les usagers de la route, les fournisseurs d'infrastructures, les systèmes de véhicules et les organismes chargés de l'application de la loi. Dans la pratique, cela signifie que les réformes réglementaires sont plus efficaces lorsqu'elles renforcent la certitude de l'application de la loi, s'alignent sur les incitations comportementales et sont soutenues par une conception routière sûre, des infrastructures tolérantes, une communication claire et des soins post-accident. Une surveillance continue, des données intégrées et une évaluation rigoureuse sont essentielles pour soutenir une politique adaptative et fondée sur des preuves dans un système de transport multimodal en constante évolution.

Références

- Abouk, R., & Adams, S. (2013). Texting Bans and Fatal Accidents on Roadways : Do They Work ? Or Do Drivers Just React to Announcements of Bans? *American Economic Journal: Applied Economics*, 5(2), 179-199.
- Aizpuru, M., Farley, K. X., Rojas, J. C., Crawford, R. S., Moore, T. J., & Wagner, E. R. (2019). Motorized scooter injuries in the era of scooter-shares : A review of the national electronic surveillance system. *The American Journal of Emergency Medicine*, 37(6), 1133-1138.
<https://doi.org/10.1016/j.ajem.2019.03.049>
- Angrist, J. D., & Pischke, J.-S. (2009). *Mostly Harmless Econometrics : An Empiricist's Companion*. Princeton University Press.
- Auerbach, J., Eshleman, C., & Trangucci, R. (2017). *A Hierarchical Bayes Approach to Adjust for Selection Bias in Before-After Analyses of Vision Zero Policies* (Version 2). arXiv.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.1705.10876>
- Austin, P. C. (2011). An Introduction to Propensity Score Methods for Reducing the Effects of Confounding in Observational Studies. *Multivariate Behavioral Research*, 46(3), 399-424.
- Bailey, W. C., & Smith, R. W. (1973). Punishment : Its Severity and Certainty. *Journal of Criminal Law and Criminology*, 63(4), 530.
- Bauer, F., Riley, J. D., Lewandowski, K., Najafi, K., Markowski, H., & Kepros, J. (2020). Traumatic Injuries Associated With Standing Motorized Scooters. *JAMA Network Open*, 3(3), e201925.
<https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.1925>
- Berge, L. (2018). Efficient estimation of maximum likelihood models with multiple fixed-effects : The {R} package {FENmlm}. *CREA Discussion Papers*, 13.
- Blais, 'Eric, & Carnis, L. (2015). Improving the Safety Effect of Speed Camera Programs through Innovations : Evidence from the French Experience. *Journal of Safety Research*.
- Blais, 'Eric, & Dupont, B. (2005). Assessing the Capability of Intensive Police Enforcement to Reduce Traffic Collisions. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 732-739.
- Bouwen, L. (2024). *Les blessés de la route hospitalisés en 2022* (Nos. 2024-S-02-FR).
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). *Time series analysis : Forecasting and control* (Fifth edition). Wiley.

- Bresler, A. Y., Hanba, C., Svider, P., Carron, M. A., Hsueh, W. D., & Paskhover, B. (2019). Craniofacial injuries related to motorized scooter use : A rising epidemic. *American Journal of Otolaryngology*, *40*(5), 662-666. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2019.05.023>
- Callaway, B., & Sant'Anna, P. H. C. (2021). Difference-in-Differences with multiple time periods. *Journal of Econometrics*, *225*(2), 200-230. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2020.12.001>
- Chambre des Représentants de Belgique. (2021). *Proposition de loi modifiant l'arrêté royal du 1er décembre 1975 portant règlement général sur la police de la circulation routière et de l'usage de la voie publique, en ce qui concerne la réglementation des engins de déplacement motorisés.*
- Chamlin, M. B. (2016). An Interrupted Time Series Analysis of the Differential Impact of New Jersey's BAC Legislation on Driver and Passenger Crash Fatalities. *Journal of Crime and Justice*.
- Cicchino, J. B., Kulie, P. E., & McCarthy, M. L. (2021). Injuries related to electric scooter and bicycle use in a Washington, DC, emergency department. *Traffic Injury Prevention*, *22*(5), 401-406. <https://doi.org/10.1080/15389588.2021.1913280>
- Clarke, D., & Schythe, K. (2021). Implementing the Panel Event Study. *The Stata Journal*, *21*(4), 853-884.
- Cloud, C., Heß, S., & Kasinger, J. (2022). *Do shared e-scooter services cause traffic accidents? Evidence from six European countries* (arXiv:2209.06870). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.06870>
- Cloud, C., Heß, S., & Kasinger, J. (2023). Shared e-scooter services and road safety : Evidence from six European countries. *European Economic Review*, *160*, 104593. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2023.104593>
- Coelho, A., Feito, P., Corominas, L., Sánchez-Soler, J. F., Pérez-Prieto, D., Martínez-Díaz, S., Alier, A., & Monllau, J. C. (2021). Electric Scooter-Related Injuries : A New Epidemic in Orthopedics. *Journal of Clinical Medicine*, *10*(15), 3283. <https://doi.org/10.3390/jcm10153283>
- Cooter, R. D., & Gilbert, M. D. (2022). Theory of Enforcement. In R. Cooter & M. Gilbert, *Public Law and Economics* (1^{re} éd., p. 461-502). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780197655870.003.0012>
- De Paola, M., & Scoppa, V. (2013). The Deterrent Effects of the Penalty Points System for Driving Offences : A Regression Discontinuity Approach. *Empirical Economics*, *45*(2), 965-985.
- De Vos, N., Sloomans, F., & Moreau, N. (2023). *Analyse approfondie des caractéristiques et profils d'accidents impliquant une trottinette électrique* (R-2023-R-18-FR). Vias Institute.

- Delavary, M., Lyon, C., Vanlaar, W. G. M., Robertson, R. D., Nikolaou, D., & Yannis, G. (2024). *E-Scooter Riders. ESRA3 Thematic report Nr. 6. ESRA project (E-Survey of Road users' Attitudes)*.
- Dhillon, N. K., Juillard, C., Barmparas, G., Lin, T.-L., Kim, D. Y., Turay, D., Seibold, A. R., Kaminski, S., Duncan, T. K., Diaz, G., Saad, S., Hanpeter, D., Benjamin, E. R., Tillou, A., Demetriades, D., Inaba, K., & Ley, E. J. (2020). Electric Scooter Injury in Southern California Trauma Centers. *Journal of the American College of Surgeons*, *231*(1), 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2020.02.047>
- Duflo, E., & Mullainathan, S. (2004). How Much Should We Trust Differences-in-Differences Estimates? *Quarterly Journal of Economics*, *119*(1), 249-275.
- Edwards, H. B., De Vocht, F., Jago, R., Armstrong, M. E. G., Carlton, E., & Ben-Shlomo, Y. (2025). Risk of bicycle collisions and 'safety in numbers': A natural experiment using the local introduction of e-scooters in England. *Injury Prevention*, ip-2024-045569. <https://doi.org/10.1136/ip-2024-045569>
- Elvik, R. (2002). The Importance of Confounding in Observational Before-and-After Studies of Road Safety Measures. *Accident Analysis & Prevention*, *34*(5), 631-635.
- Elvik, R. (2009). The Power Model of the Relationship between Speed and Road Safety. *Transportation Research Record*, *2103*, 1-8.
- Elvik, R. (2012). Speed Enforcement and Speed Choice. *Accident Analysis & Prevention*, *48*, 476-486.
- Espinoza, W., Howard, M., Lane, J., & Hentenryck, P. V. (2019). *Shared E-scooters: Business, Pleasure, or Transit?* (arXiv:1910.05807). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.05807>
- European Commission. (2022). *Road Safety Thematic Report – Safe System Approach*. Directorate General for Transport.
- European Commission. (2023). *Impact Assessment Support Study for the Revision of Directive (EU) 2015/413*. Directorate-General for Mobility and Transport.
- European Parliament and Council of the European Union. (2015). *Directive (EU) 2015/413 Facilitating Cross-Border Exchange of Information on Road-Safety-Related Traffic Offences*.
- European Parliamentary Research Service. (2025). *Cross-Border Exchange of Information on Road-Safety-Related Traffic Offences: Legislative Briefing*.
- European Transport Safety Council. (2022). *Position on the Revision of Directive (EU) 2015/413 Facilitating Cross-Border Enforcement of Traffic Offences*.
- Eurostat. (2021). *Passenger mobility statistics—Statistics Explained*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/81760.pdf>

- Evans, L. (2004). *Traffic Safety*. Science Serving Society.
- Évolution mensuelle de la mobilité. (s. d.). Région de Bruxelles-Capitale. Consulté 10 septembre 2025, à l'adresse <https://be.brussels/fr/transport-mobilite/enjeux-de-la-mobilite/observatoire-thematique/evolution-de-la-mobilite/evolution-mensuelle-de-la-mobilite>
- Fernandez, A. N., Li, K. D., Patel, H. V., Allen, I. E., Ghaffar, U., Hakam, N., & Breyer, B. N. (2024). Injuries With Electric vs Conventional Scooters and Bicycles. *JAMA Network Open*, *7*(7), e2424131. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.24131>
- Frank, S., Sator, T., Kinsky, R. M., Frank, J. K., Frank, R., Fialka, C., Mittermayr, R., & Boesmueller, S. (2024). Continuously increasing e-scooter accidents and their possible prevention in a large European city. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, *50*(6), 2895-2904. <https://doi.org/10.1007/s00068-024-02594-9>
- Frye, W., Chehab, L., Feler, J., Wong, L., Tan, A., Alpers, B., Patel, D., Von Hippel, C., & Sammann, A. (2024). Popular but precarious : Low helmet use among shared micromobility program riders in San Francisco. *Frontiers in Public Health*, *12*, 1477473. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1477473>
- Gehrsitz, M. (2017). Speeding, Punishment, and Recidivism : Evidence from a Regression Discontinuity Design. *Journal of Law and Economics*, *60*(3).
- Gertler, P., Martinez, S., Premand, P., Rawlings, L., & Vermeersch, C. (2016). *Impact Evaluation in Practice* (2^e éd.). World Bank.
- Goodman-Bacon, A. (2021). Difference-in-Differences with Variation in Treatment Timing. *Journal of Econometrics*, *225*(2), 254-277.
- Haghpanahan, H., Lewsey, J., Mackay, D., & others. (2019). Effects of Lowering Blood Alcohol Concentration Limits for Drivers. *The Lancet*, *393*(10169), 321-329.
- Hale, T., Angrist, N., Goldszmidt, R., Kira, B., Petherick, A., Phillips, T., Webster, S., Cameron-Blake, E., Hallas, L., Majumdar, S., & Tatlow, H. (2021). A global panel database of pandemic policies (Oxford COVID-19 Government Response Tracker). *Nature Human Behaviour*, *5*(4), 529-538. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01079-8>
- Hartz, F., Zehnder, P., Resch, T., Römmermann, G., Schwarz, M., Kirchhoff, C., Biberthaler, P., Lefering, R., & Zyskowski, M. (2025). Severe injuries in e-scooter accidents : An evaluation of data from the TraumaRegister DGU. *Deutsches Ärzteblatt International*. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2025.0041>

- Hauer, E. (1997). *Observational Before–After Studies in Road Safety*. Pergamon.
- Holland, P. W. (1986). Statistics and Causal Inference. *Journal of the American Statistical Association*, *81*(396), 945-960.
- Hyndman, R. J., & Khandakar, Y. (2008). Automatic Time Series Forecasting : The forecast Package for R. *Journal of Statistical Software*, *27*(3). <https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03>
- Imbens, G., & Lemieux, T. (2008). Regression Discontinuity Designs : A Guide to Practice. *Journal of Econometrics*, *142*(2), 615-635.
- Ipsos & Europ Assistance. (2025). *2025 Mobility Barometer Among European*.
<https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2025-04/ipsos-europ-assistance-mobility-barometer-report-2025.pdf>
- ITF. (2022). *The Safe System Approach in Action*. OECD Publishing.
- ITF, & OECD. (2020). *Safe Micromobility*. International Transport Forum.
- Kazemzadeh, K., & Sprei, F. (2024). The effect of shared e-scooter programs on modal shift : Evidence from Sweden. *Sustainable Cities and Society*, *101*, 105097. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105097>
- Kłosiewicz, T., Konieczka, P., Rutkowska, D., Duchañ-Ogrodnik, D. P., Zasada, W., Cholerzyńska, H., Rozmarynowska, M., Bednorz, M., & Jodłowski, Ł. (2024). Burden and Patterns of Electric Scooter-Related Injuries : Insights From 2 Polish Emergency Departments. *Medical Science Monitor*, *30*.
<https://doi.org/10.12659/MSM.944448>
- Kontopantelis, E., Doran, T., Springate, D. A., Buchan, I., & Reeves, D. (2015). Regression based quasi-experimental approach when randomisation is not an option : Interrupted time series analysis. *BMJ*, *350*(jun09 5), h2750-h2750. <https://doi.org/10.1136/bmj.h2750>
- Kudła, J., Podsiadło, A., & Woźniak, R. (2024). The effectiveness of regulations preventing alcohol-related road traffic crashes and fatalities in the European Union countries. *Journal of Safety Research*, *88*, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.11.003>
- Kundro, T. G., Nurmohamed, S., Kakkar, H., & Affinito, S. J. (2023). Time and Punishment : Time Delays Exacerbate the Severity of Third-Party Punishment. *Psychological Science*, *34*(8), 914-931.
<https://doi.org/10.1177/09567976231173900>
- Lechner, M. (2010). The Estimation of Causal Effects by Difference-in-Difference Methods Estimation of Spatial Panels. *Foundations and Trends® in Econometrics*, *4*(3), 165-224.
<https://doi.org/10.1561/08000000014>

- Lee, D. S., & Lemieux, T. (2010). Regression Discontinuity Designs in Economics. *Journal of Economic Literature*, 48(2), 281-355. JSTOR.
- Li, H., Zhang, Y., & Ren, G. (2020). A causal analysis of time-varying speed camera safety effects based on the propensity score method. *Journal of Safety Research*, 75, 119-127.
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.08.007>
- Lian, Y., Yasmin, S., & Haque, M. M. (2025). Influence of road safety policies on the long-term trends in fatal Crashes : A Gaussian Copula-based time series count model with an autoregressive moving average process. *Accident Analysis & Prevention*, 211, 107795.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107795>
- Liang, L., & Huang, J. (2008). Go out or stay in? The effects of zero tolerance laws on alcohol use and drinking and driving patterns among college students. *Health Economics*, 17(11), 1261-1275.
<https://doi.org/10.1002/hec.1321>
- Lie, A., & Tingvall, C. (2002). How Do Euro NCAP Results Correlate with Real-Life Injury Risks? A Paired Comparison Study of Car-to-Car Crashes. *Traffic Injury Prevention*, 3(4), 288-293.
<https://doi.org/10.1080/15389580214632>
- Liew, Y., Wee, C., & Pek, J. (2020). New peril on our roads : A retrospective study of electric scooter-related injuries. *Singapore Medical Journal*, 61(2), 92-95. <https://doi.org/10.11622/smedj.2019083>
- Linden, A. (2015). Conducting Interrupted Time-series Analysis for Single- and Multiple-group Comparisons. *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*, 15(2), 480-500.
<https://doi.org/10.1177/1536867X1501500208>
- Lopez Bernal, J., Cummins, S., & Gasparrini, A. (2016). Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions : A tutorial. *International Journal of Epidemiology*, dyw098.
<https://doi.org/10.1093/ije/dyw098>
- Luo, H., Zhang, Z., Gkritza, K., & Cai, H. (2021). Are shared electric scooters competing with buses? A case study in Indianapolis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97, 102877.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102877>
- Meyer, B. D. (1995). Natural and Quasi-Experiments in Economics. *Journal of Business & Economic Statistics*, 13(2), 151-161. <https://doi.org/10.1080/07350015.1995.10524589>
- Mobilians & Smart Mobility Lab. (2025). *Communiqué de presse—Mobilians et Smart Mobility Lab Présentent le Baromètre du Marché de la Micromobilité 2024*. <https://datastore.smart-mobility-lab.com/wp->

content/uploads/2025/05/CP-

Barometre_Micromobilite_Mobilians_SmartMobilityLab_Ventes2024_2025_05.pdf

Mobilité et Transports. (2022). *Loi modifiant l'arrêté royal du 1er décembre 1975 portant sur le règlement général de la police de la circulation routière et de l'utilisation de la voie publique, en ce qui concerne la réglementation des appareils de locomotion*. Moniteur belge.

Morgan, S. L., & Winship, C. (2014). *Counterfactuals and Causal Inference: Methods and Principles for Social Research* (2^e éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107587991>

Nagin, D. S. (2013). Deterrence in the Twenty-First Century. *Crime and Justice*, 42(1), 199-263. <https://doi.org/10.1086/670398>

Nistal-Nuño, B. (2017). Segmented regression analysis of interrupted time series data to assess outcomes of a South American road traffic alcohol policy change. *Public Health*, 150, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.04.025>

OECD/ITF. (2018). *Safer Roads With Automated Vehicles?*

Otero, S., & Rau, T. (2017). The effects of drinking and driving laws on car crashes, injuries, and deaths: Evidence from Chile. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.031>

Pérez, K., Marí-Dell'Olmo, M., Tobias, A., & Borrell, C. (2007). Reducing Road Traffic Injuries: Effectiveness of Speed Cameras in an Urban Setting. *American Journal of Public Health*, 97(9), 1632-1637. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2006.093195>

Qiu, L., & Nixon, W. A. (2008). Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2055(1), 139-146. <https://doi.org/10.3141/2055-16>

Rebollo-Sanz, Y., Rodríguez-López, J., & Rodríguez-Planas, N. (2021). Penalty-point system, deterrence and road safety: A quasi-experimental analysis. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 190, 408-433. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2021.08.007>

Rocco, L., & Sampaio, B. (2016). Are handheld cell phone and texting bans really effective in reducing fatalities? *Empirical Economics*, 51(2), 853-876. <https://doi.org/10.1007/s00181-015-1018-8>

Rosenbaum, P. R., & Rubin, D. B. (1983). The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, 70(1), 41-55. <https://doi.org/10.1093/biomet/70.1.41>

Rossi, P. H., Lipsey, M. W., & Freeman, H. E. (2004). *Evaluation: A systematic approach* (7th ed). Sage.

- Roth, J. (2022). Pretest with Caution : Event-Study Estimates after Testing for Parallel Trends. *American Economic Review: Insights*, 4(3), 305-322. <https://doi.org/10.1257/aeri.20210236>
- Roy, S. (2021). Theory of Social Proof and Legal Compliance : A Socio-Cognitive Explanation for Regulatory (Non) Compliance. *German Law Journal*, 22(2), 238-255. <https://doi.org/10.1017/glj.2021.5>
- Royal Meteorological Institute of Belgium. (1995). *Automatic Weather Station (AWS) daily observations* [Jeu de données].
https://opendata.meteo.be/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/RMI_DATASET_AWS_1DAY
- Rubin, D. B. (1974). Estimating causal effects of treatments in randomized and nonrandomized studies. *Journal of Educational Psychology*, 66(5), 688-701. <https://doi.org/10.1037/h0037350>
- Sasidharan, L., & Donnell, E. T. (2013). Application of propensity scores and potential outcomes to estimate effectiveness of traffic safety countermeasures : Exploratory analysis using intersection lighting data. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 539-553. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.05.036>
- Schiff, A., Wright, L., & Denne, T. (2017). *Ex-post evaluation of transport interventions using causal inference methods*. NZ Transport Agency.
- Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). *Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference* (Nachdr.). Wadsworth Cengage Learning.
- Shichman, I., Shaked, O., Factor, S., Weiss-Meilik, A., & Khoury, A. (2022). Emergency department electric scooter injuries after the introduction of shared e-scooter services : A retrospective review of 3,331 cases. *World Journal of Emergency Medicine*, 13(1), 5. <https://doi.org/10.5847/wjem.j.1920-8642.2022.002>
- Silverans, P., Nieuwkamp, R., & Van den Berghe, W. (2018). *Effets attendus des systèmes à points et des autres mesures en matière de récidive au volant* (Nos. 2018-R-07-FR). Vias Institute.
- Slootmans, F. (2024). *Briefing—Les trottinettes électriques et la sécurité routière*. Institut Vias.
- SPF Mobilité et Transports. (2020). *La Micromobilité en Belgique* (D/2020/13.831/7).
- Störmann, P., Klug, A., Nau, C., Verboket, R. D., Leiblein, M., Müller, D., Schweigkofler, U., Hoffmann, R., Marzi, I., & Lustenberger, T. (2020). Characteristics and Injury Patterns in Electric-Scooter Related Accidents—A Prospective Two-Center Report from Germany. *Journal of Clinical Medicine*, 9(5), 1569. <https://doi.org/10.3390/jcm9051569>

- Sun, L., & Abraham, S. (2021). Estimating dynamic treatment effects in event studies with heterogeneous treatment effects. *Journal of Econometrics*, *225*(2), 175-199.
<https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2020.09.006>
- Taljaard, M., McKenzie, J. E., Ramsay, C. R., & Grimshaw, J. M. (2014). The use of segmented regression in analysing interrupted time series studies : An example in pre-hospital ambulance care. *Implementation Science*, *9*(1), 77. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-9-77>
- Upton, G. J. G., & Cook, I. (2011). *A dictionary of statistics : The invaluable guide to all aspects of statistics* (2. ed. rev., reprinted with corr). Oxford Univ. Press.
- Van Rooij, B. (2021). Do People Know the Law? Empirical Evidence about Legal Knowledge and Its Implications for Compliance. In B. Van Rooij & D. D. Sokol (Éds.), *The Cambridge Handbook of Compliance* (1^{re} éd., p. 467-488). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108759458.032>
- Vandael Schreurs, K., Ben Messaoud, Y., Dons, E., Wrzesinska, D., & Deleuze, J. (2023). *Le rôle des trottinettes électriques dans le mix de mobilité* (Ben Messaoud).
- Vias Institute. (2023). *What is the modal split in Belgium?* <https://www.vias-modalsplit.be/en/>
- Wagner, A. K., Soumerai, S. B., Zhang, F., & Ross-Degnan, D. (2002). Segmented regression analysis of interrupted time series studies in medication use research. *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*, *27*(4), 299-309. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2710.2002.00430.x>
- Wegman, F., & Aarts, L. (Éds.). (2006). *Advancing sustainable safety : National road safety outlook for 2005 - 2020*. SWOV.
- Weiss, C. H. (1998). *Evaluation : Methods for studying programs and policies* (2. ed). Prentice Hall.
- Willardsen, K. (2021). Effects of Speed Cameras on Intersection Accidents : Evidence from Dayton. *Review of Regional Studies*, *51*(3). <https://doi.org/10.52324/001c.30972>
- Wilson, C., Willis, C., Hendrikz, J. K., Le Brocque, R., & Bellamy, N. (2010). Speed cameras for the prevention of road traffic injuries and deaths. In The Cochrane Collaboration (Éd.), *Cochrane Database of Systematic Reviews* (p. CD004607.pub3). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD004607.pub3>
- Wing, C., Simon, K., & Bello-Gomez, R. A. (2018). Designing Difference in Difference Studies : Best Practices for Public Health Policy Research. *Annual Review of Public Health*, *39*(1), 453-469.
<https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040617-013507>

Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data* (2^e éd.). MIT Press.

World Health Organization. (2019). *Global Status Report on Road Safety 2018*. World Health Organization.

Wright, N. A., & Lee, L.-T. (2021). Alcohol-related traffic laws and drunk-driving fatal accidents. *Accident Analysis & Prevention*, *161*, 106358. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106358>

Yang, H., Huo, J., Bao, Y., Li, X., Yang, L., & Cherry, C. R. (2021). Impact of e-scooter sharing on bike sharing in Chicago. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *154*, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.09.012>

Yu, B., & Kaffine, D. T. (2011). *Blue Laws, DUIs and Alcohol-Related Accidents : Regression Discontinuity Evidence from Colorado*. (1).

Annexe

Annexe 1: Cas d'usage 1

Annexe 1.A: Vérifications supplémentaires

Tableau 9 Résultats du modèle DiD saturé de Poisson.

	DiD saturé de Poisson
Véhicule étranger	-2.41 (0.0002)
étranger * post_cbe	-0.028 (0.108)
Effets fixes provinciaux	Effets fixes province × mois
Effets fixes mensuels	Effets fixes province × mois
observations	1584
Pseudo R ² ajusté	0.9421

Variable dépendante :	placebo_2011 part_étrangère	placebo_2012 part_étrangère	placebo_2013 part_étrangère	placebo_2014 part_étrangère	placebo_2016 part_étrangère
Post (seuil placebo)	-0.0016 (0.0025)	-0.0018 (0.0025)	-0.0031 (0.0022)	-0.0062* (0.0024)	-0.0015 (0.0020)
temp_moy	-0.0009* (0.0003)	-0.0009* (0.0004)	-0.0007* (0.0003)	-0.0006 (0.0003)	-0.0009* (0.0004)
prec_moy	-0.0002 (0.0003)	-0.0002 (0.0003)	-0.0002 (0.0003)	-0.0001 (0.0003)	-0.0003 (0.0002)
Effets fixes :					
province	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
mois	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
E.T. : groupées par province					
Observations	1,584	1,584	1,584	1,584	1,584
R2	0.80865	0.80873	0.80919	0.81154	0.80863
Codes de significativité :	0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				

Figure 11 Tests *placebo* utilisant des modèles complémentaires basés sur des parts.

did_share_all	
Variable dépendante : part_étrangère	
Post (CBE réel)	-0.0036. (0.0018)
temp_moy	-0.0001 (0.0006)
prec_moy	-0.0022 (0.0018)
Effets fixes :	
province	Oui
mois	Oui
E.T. : groupées par province	
Observations	924
R2	0.81151

Figure 12 Résultats des modèles basés sur des parts excluant le Royaume-Uni, l'Irlande et le Danemark.

did_share_all
 Variable dépendante : part_étrangère

Post (CBE réel)	-0.0022 (0.0021)
temp_moy	-0.0006 (0.0008)
prec_moy	-0.0028 (0.0023)

Effets fixes :

province	Oui
mois	Oui

E.T. : groupées par province

Observations	924
R2	0.76034

Figure 13 Résultats des modèles fondés sur des parts pour les victimes.

	placebo_2011	placebo_2012	placebo_2013	placebo_2014	placebo_2016
Variable dépendante : part_étrangère	part_étrangère	part_étrangère	part_étrangère	part_étrangère	part_étrangère
Post (seuil placebo)	0.0010 (0.0030)	-0.0007 (0.0032)	-0.0019 (0.0028)	-0.0048 (0.0029)	-0.0003 (0.0024)
temp_moy	-0.0014* (0.0005)	-0.0013* (0.0004)	-0.0012* (0.0004)	-0.0010* (0.0004)	-0.0014* (0.0005)
prec_moy	-0.0008 (0.0006)	-0.0007 (0.0006)	-0.0008 (0.0006)	-0.0007 (0.0006)	-0.0008 (0.0005)
Effets fixes :					
province	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
mois	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
E.T. : groupées par province					
Observations	1,584	1,584	1,584	1,584	1,584
R2	0.75966	0.75964	0.75981	0.76094	0.75962

Codes de significativité : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

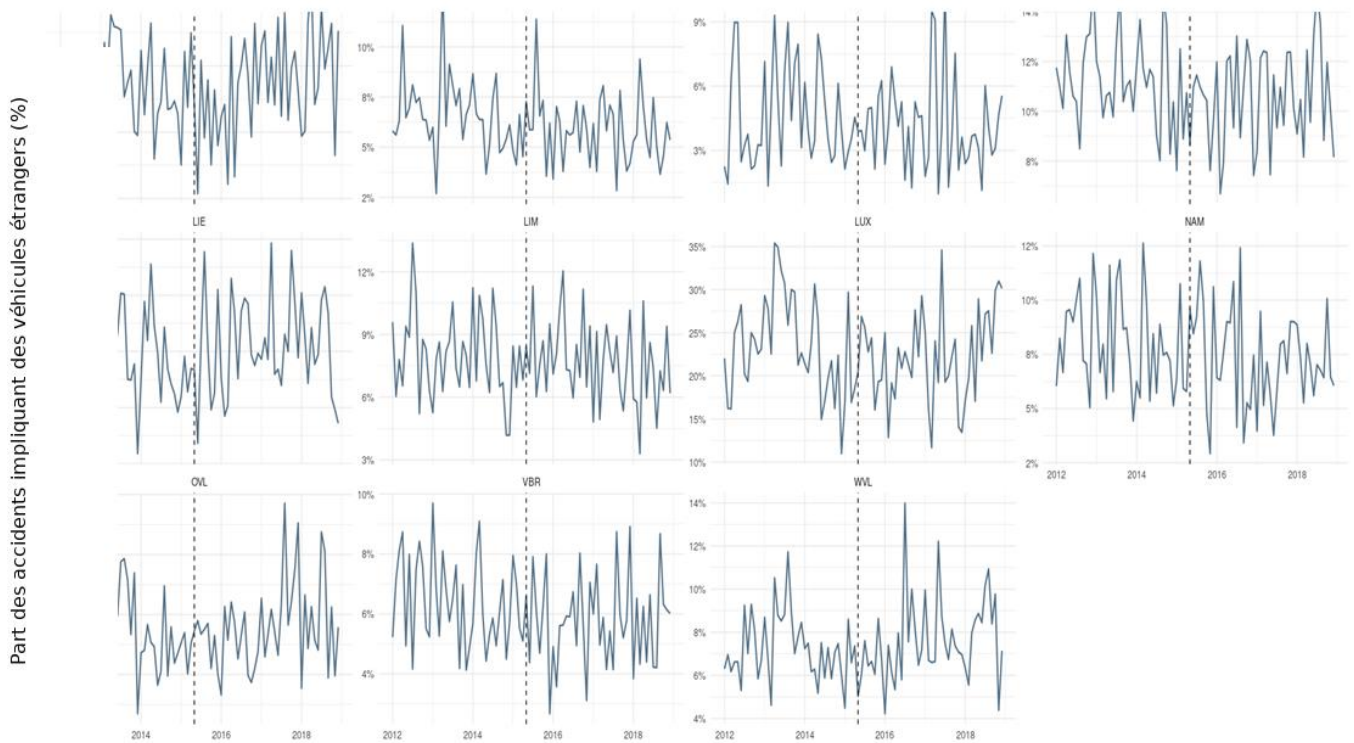
Figure 14 Tests *placebo* sur les victimes.

Annexe 1.A.1 : Figures descriptives / pré-diagnostiques pour les valeurs absolues

Annexe 1.A.1.1 : Accidents

Part des accidents impliquant des véhicules étrangers par province

Évolution mensuelle (2012–2018)



Monthly crashes involving Belgian and foreign registered vehicles - All vehicles

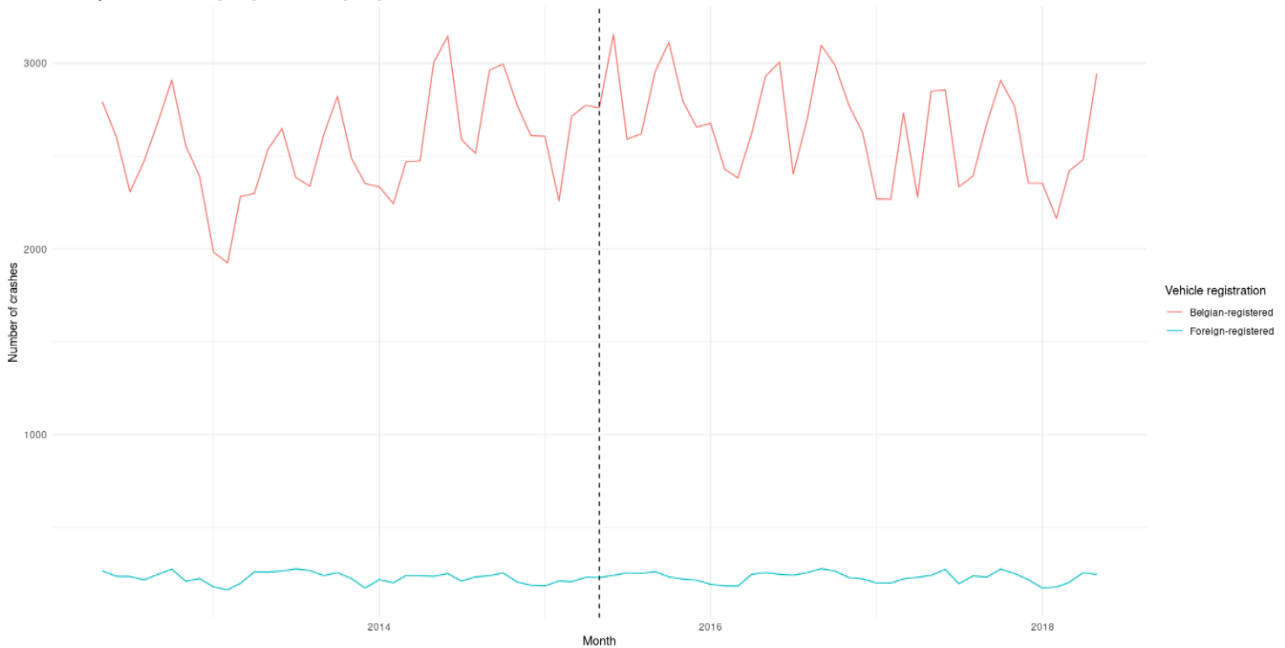


Figure 15 Accidents mensuels impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger, tous types de véhicules confondus.

Annexe 1.A.1.2 : Victimes

Victimes mensuelles impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger - Tous les véhicules

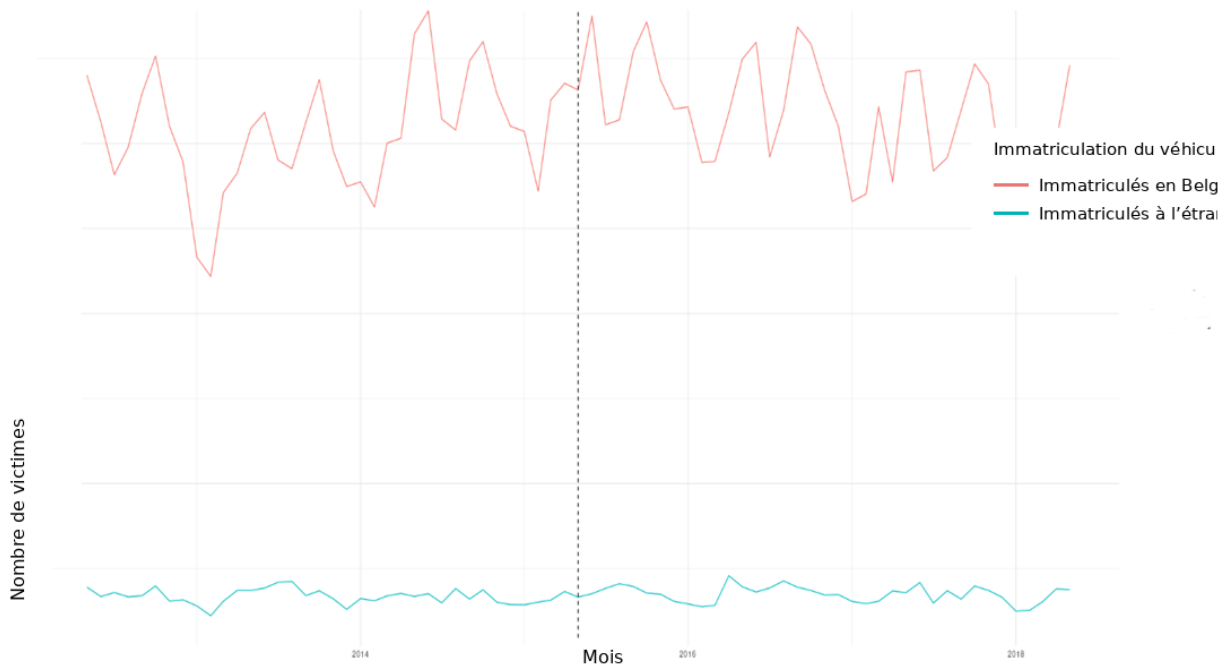


Figure 16 Victimes mensuelles impliquant des véhicules immatriculés en Belgique et à l'étranger – tous types de véhicules.

Part des véhicules immatriculés à l'étranger parmi toutes les victimes - Tous les véhicules

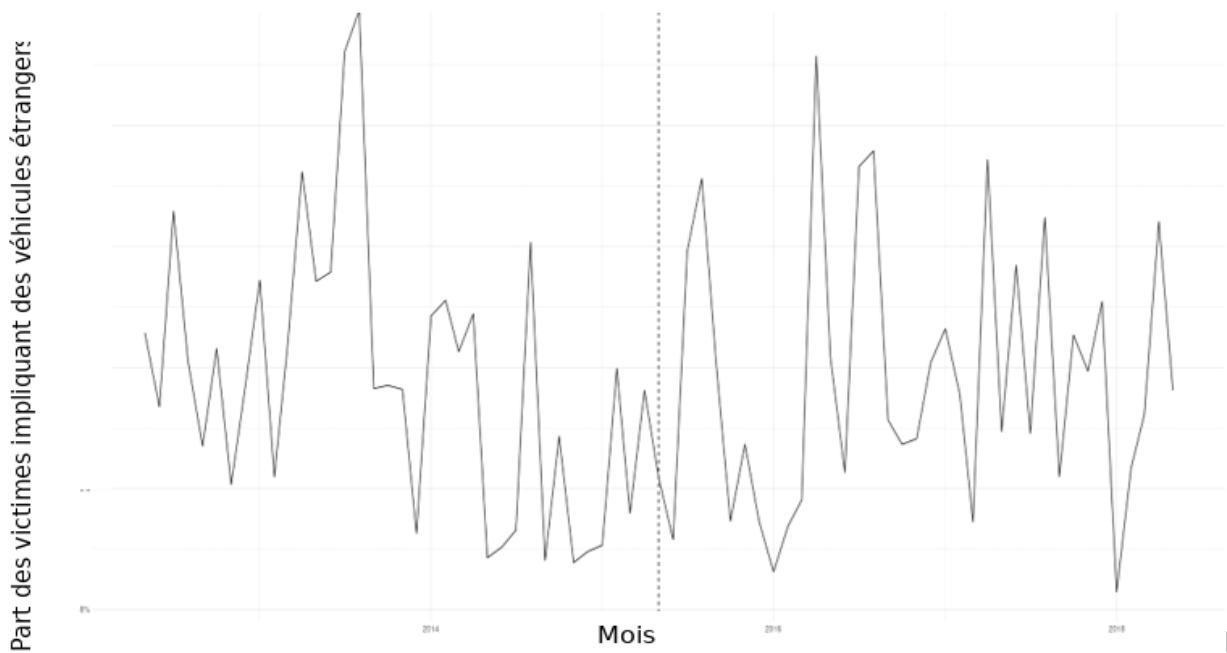


Figure 17 Part des véhicules immatriculés à l'étranger dans l'ensemble des victimes au fil du temps – tous types de véhicules.

Victimes par statut d'immatriculation et province dans le temps – Tous les véhicules

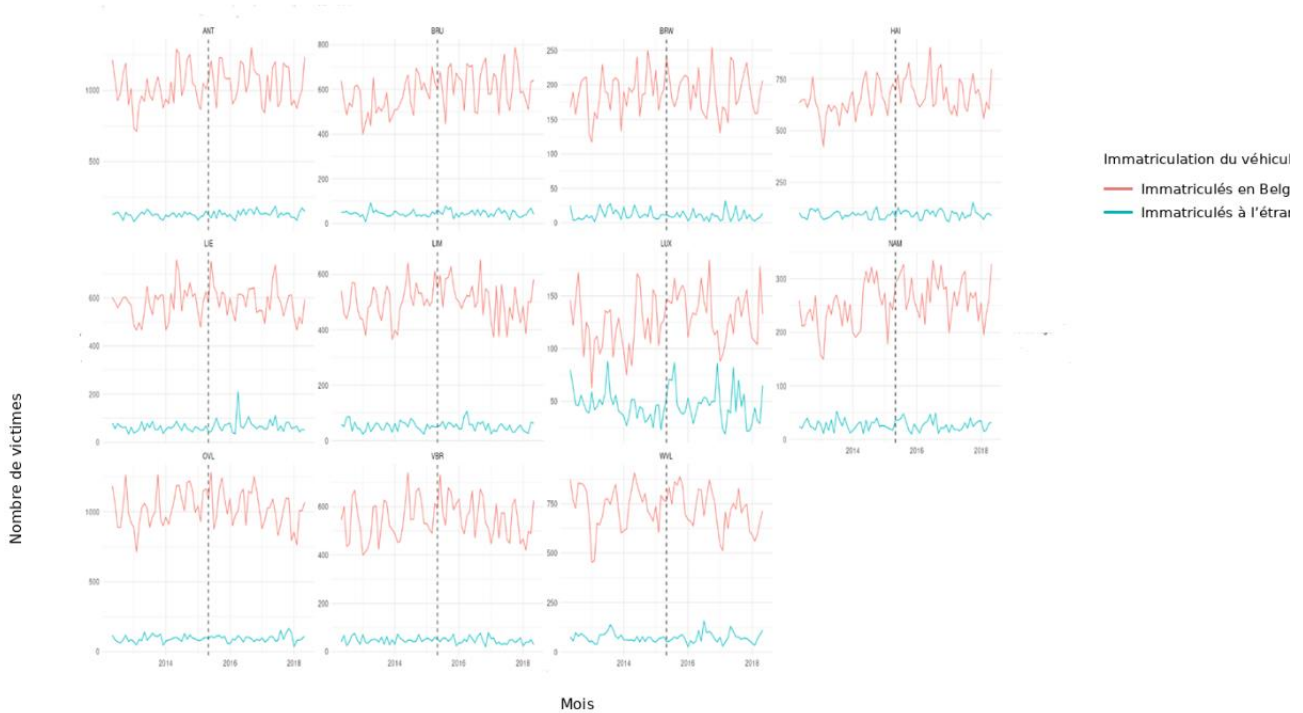


Figure 18 Victimes selon le statut d'immatriculation et la province au fil du temps – tous types de véhicules.

Annexe 1.B : Modèle de doubles différences (DiD) pour les nombres absolus d'accidents

Annexe 1.B.1 : Modèle

Le modèle évalue si le groupe traité a connu un changement en terme d'implication dans les accidents après la directive:

$$accidents_{ipt} = \beta_0 + \beta_1 post_t + \beta_2 treatment_i + \beta_3 (post_t * treatment_i) + \gamma X_{pt} + \alpha_p + \varepsilon_{ipt}$$

Où:

- $accidents_{ipt}$: nombre mensuel d'accidents impliquant un véhicule enregistré à l'étranger ou en Belgique pour la province p au temps t
- $post_t$: égal à 1 après mai 2015
- $treatment_i$: égal à 1 pour les véhicules enregistrés à l'étranger
- $post_t * treatment_i$: Estimateur DiD capturant l'effet de la directive CBE
- X_{pt} : contrôles météorologiques mensuels (température et précipitations)
- α_p : Effets fixes de la province (pour contrôler les différences stable dans le temps entre les provinces)
- ε_{ipt} : Erreurs Standards: agrégées au niveau de la province

Le coefficient d'intérêt, β_3 , mesure le changement relatif des accidents impliquant un véhicule enregistré à l'étranger après l'application de la directive CBE.

Le modèle de référence est estimé séparément pour l'ensemble des véhicules (à l'exception des cyclomoteurs) et pour chaque type de véhicules séparément (voitures, camions, camionnettes, motocyclettes).

Modèle de doubles différences ajusté sur la tendance pour le nombre absolu d'accidents

Lorsque les différences pré-traitement ne sont pas stable, l'estimateur DiD standard peut confondre l'effet de la directive avec des divergences préexistantes. Dans de tels cas, une tendance temporelle linéaire et spécifique à chaque groupe est ajoutée :

$$accidents_{ipt} = \beta_0 + \beta_1 post_t + \beta_2 treatment_i + \beta_3 (post_t * treatment_i) + \beta_4 (treatment_i * time_t) + \gamma X_{pt} + \alpha_p + \varepsilon_{ipt}$$

Où:

- $time_t$: est l'index de temps en mois
- L'interaction $treatment_i * time_t$ capture les divergences pré-intervention systématiques
- Le coefficient β_3 mesure l'effet de traitement net en tenant compte de cette divergence préexistante.

Les autres coefficients ont la même interprétation que précédemment. Cette spécification est uniquement utilisée quand le diagnostic de l'étude d'évènements le justifie.

Cette application restreinte de modèles ajustés suit les meilleurs pratiques en recherches DiD appliquées.

Annexe 1.B.2 : Résultats complets des régressions

Annexe 1.B.2.1 : Accidents

Cars		
Dependent Var.:	did_model accidents	did_trend accidents
Post-policy	7.941* (3.120)	7.940* (3.121)
Foreign-registered vehicle	-193.22*** (31.15)	-214.1*** (44.44)
Average temperature	0.7587*** (0.1796)	0.7658*** (0.1842)
Average precipitation	0.7971** (0.2225)	0.8145** (0.2273)
Foreign × Post (CBE effect)	-8.259* (2.976)	-9.715* (3.086)
Foreign × Time trend	---	0.0013 (0.0010)
Fixed-Effects:		
prov	Yes	Yes
S.E.: Clustered	by: prov	by: prov
Observations	1,606	1,606
R2	0.81831	0.81831
Within R2	0.77140	0.77141
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		

Figure 19 Résultats DiD pour les voitures – nombre d'accidents.

Camions		
Variable dépendante :	did_model accidents	did_trend accidents
Post-politique	0.0421 (0.3967)	0.0417 (0.3966)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-4.995*** (1.082)	-12.85 (7.312)
Température moyenne	0.0621** (0.0145)	0.0648*** (0.0160)
Précipitations moyennes	0.0242 (0.0608)	0.0307 (0.0630)
Étranger × Post (effet CBE)	0.2554 (0.3502)	-0.2904 (0.6994)
Étranger × tendance temporelle	---	0.0005 (0.0004)
Effets fixes :		
prov	Oui	Oui
E.T. : groupées	par : prov	par : prov
Observations	1,606	1,606
R2	0.74534	0.74561
R2 intra	0.34526	0.34595
Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		

Figure 20 Résultats DiD pour les camions – Nombre d'accidents.

Vans

Variable dépendante :	did_model accidents	did_trend accidents
Post-politique	1.319* (0.4906)	1.319* (0.4908)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-19.77*** (4.106)	-27.68** (6.228)
Température moyenne	0.0819** (0.0261)	0.0845** (0.0266)
Précipitations moyennes	0.0830 (0.1209)	0.0896 (0.1205)
Étranger × Post (effet CBE)	-0.9326 (0.4579)	-1.482* (0.5008)
Étranger × tendance temporelle ---		0.0005* (0.0002)
Effets fixes :		
prov	Oui	Oui
E.T. : groupées		
	par : prov	par : prov
Observations	1,606	1,606
R2	0.74139	0.74144
R2 intra	0.63765	0.63773
Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		

Figure 21 Résultats DiD pour les camionnettes – nombre d'accidents.

Motos

Variable dépendante :	did_model accidents	did_trend accidents
Post-politique	-0.1220 (0.4610)	-0.1232 (0.4611)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-19.05*** (2.990)	-42.14*** (7.476)
Température moyenne	0.7029*** (0.0716)	0.7108*** (0.0726)
Précipitations moyennes	-1.031*** (0.1520)	-1.012*** (0.1520)
Étranger × Post (effet CBE)	-0.3082 (0.3829)	-1.912** (0.6031)
Étranger × tendance temporelle ---		0.0014** (0.0003)
Effets fixes :		
prov	Oui	Oui
E.T. : groupées		
	par : prov	par : prov
Observations	1,606	1,606
R2	0.70804	0.70859
R2 intra	0.66073	0.66137
Codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		

Figure 22 Résultats DiD pour les motos – nombre d'accidents.

Annexe 1.B.2.2 : Victimes

Tous les véhicules	did_model
Variable dépendante :	victimes_totales
Après la politique	19.02* (7.721)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-496.7*** (82.23)
Température moyenne	3.156*** (0.6192)
Précipitations moyennes	1.077. (0.5907)
Étranger × Après (effet CB)	-18.20* (7.181)
Étranger × Tendence temporelle	
Effets fixes :	
prov	Oui

E.T. : Regroupées par : prov	
Observations	1,606
R2	0.81623
R2 intra	0.76214

Codes signif. :	0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figure 23 Résultats DiD pour l'ensemble des véhicules – nombre de victimes.

Voitures	did_model
Variable dépendante :	victimes_totales
Après la politique	16.55* (6.931)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-464.1*** (76.18)
Température moyenne	2.410*** (0.5225)
Précipitations moyennes	1.992** (0.5333)
Étranger × Après (effet CBE)	-16.67* (6.354)
Étranger × Tendence temporelle	
Effets fixes :	
prov	Oui

E.T. : Regroupées par : prov	
Observations	1,606
R2	0.81782
R2 intra	0.76581

Codes signif. :	0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figure 24 Résultats DiD pour les voitures – nombre de victimes.

Poids lourds	did_model
Variable dépendante :	victimes_totales
Après la politique	-0.0050 (0.8812)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-10.65** (2.399)
Température moyenne	0.2201** (0.0574)
Précipitations moyennes	0.1951 (0.2402)
Étranger × Après (effet CBE)	1.924. (0.9096)
Étranger × Tendence temporelle	
Effets fixes :	
prov	Oui

E.T. : Regroupées par : prov	
Observations	1,606
R2	0.69134
R2 intra	0.19839

Codes signif. : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1	

Figure 25 Résultats DiD pour les camions – Nombre de victimes

Vans / Fourgonnettes	did_model
Variable dépendante :	victimes_totales
Après la politique	3.051* (1.196)
Véhicule immatriculé à l'étranger	-50.79*** (10.66)
Température moyenne	0.2219* (0.0783)
Précipitations moyennes	0.2719 (0.3407)
Étranger × Après (effet CBE)	-1.453 (1.191)
Étranger × Tendence temporelle	
Effets fixes :	
prov	Oui

E.T. : Regroupées par : prov	
Observations	1,606
R2	0.73811
R2 intra	0.61986

Codes signif. : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1	

Figure 26 Résultats DiD pour les camionnettes – nombre de victimes.

```

Motocycles / Motos
Variable dépendante : did_model
victimes_totales

Après la politique -0.4388 (0.9719)
Véhicule immatriculé à l'étranger -39.24*** (6.295)
Température moyenne 1.488*** (0.1533)
Précipitations moyennes -2.256*** (0.3194)
Étranger × Après (effet CBE) -0.4137 (0.8029)
Étranger × Tendence temporelle

Effets fixes :
prov Oui
-----
E.T. : Regroupées par : prov
Observations 1,606
R2 0.69377
R2 intra 0.64230
---
Codes signif. : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Figure 27 Résultats DiD pour les motos – nombre de victimes.

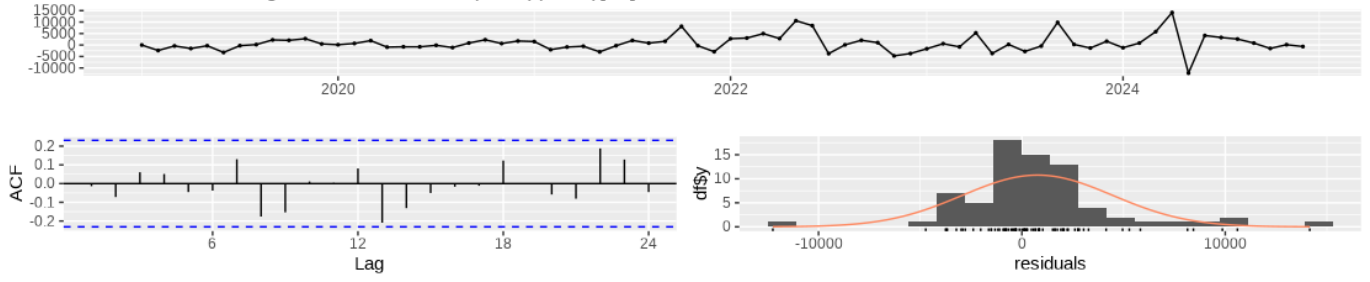
Annexe 2 : Cas d'usage 2

Annexe 2.A. Statistiques du modèle SARIMAX sur le nombre de trajets effectués en trottinettes électriques partagées à Bruxelles.

Statistique	Valeur
Sigma²	629.40
Log-likelihood	-690.59
AIC	1395.18
AICc	1396.96
BIC	1411.02

Paramètre	Estimation	Erreur standard	Valeur p
SAR(1)	0.750	0.232	0.001***
Température	588.631	135.641	0.001***
Précipitations	-56.426	433.858	0.89
Indice de confinement	-1987.949	1869.325	0.29
Changement de niveau	-10133.125	3542.185	0.004**
Changement de pente	-1877.498	1192.225	0.12

Residuals from Regression with ARIMA(0,1,0)(0,0,1)[12] errors





Institut Vias

Chaussée de Haecht 1405
1130 Bruxelles

+32 2 244 15 11

info@vias.be

www.vias.be