HAL open science

Sur les statistiques d'accidents mortels de cyclistes de 2009 à 2022 en France

Jérôme Dedecker, Emmanuel Rio

▶ **To cite this version:**

Jérôme Dedecker, Emmanuel Rio. Sur les statistiques d'accidents mortels de cyclistes de 2009 à 2022 en France. 2023. hal-04078609v5

HAL Id: hal-04078609

https://hal.science/hal-04078609v5

Preprint submitted on 9 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Sur les statistiques d'accidents mortels de cyclistes de 2009 à 2022 en France

Jérôme Dedecker* and Emmanuel Rio †

March 9, 2024

Résumé. Dans cette prépublication, nous donnons une méthode probabiliste pour séparer les cyclistes traditionnels et les cyclistes en VAE dans les statistiques d'accidents mortels. Nous obtenons des estimations du nombre de cyclistes tués à bicyclette et du nombre de cyclistes tués en VAE depuis 2016. Nos résultats donnent une baisse de plus de 10% de la mortalité annuelle moyenne en bicyclette non motorisée sur les quatre années 2018-2019-2021-2022 par rapport à la mortalité annuelle moyenne pour la période 2010-2013 ainsi qu'une hausse continue du nombre de cyclistes tués en VAE depuis 2016 avec un nombre de tués en VAE sur la seule année 2022 sans doute supérieur à cent. Notre étude indique que le kilométrage total à bicyclette est stable ou en légère baisse alors que le kilométrage total en VAE en 2022 a été à peu près égal à 25% du kilométrage total des deux catégories. Nos évaluations indiquent aussi que, si les vélos à assistance électrique n'existaient pas, le nombre de tués en 2022 pour le même kilométrage total aurait été proche de 161, au lieu de 245. Nous estimons donc la surmortalité due à la dangerosité du VAE à de plus 80 tués en 2022. Enfin nous donnons des recommandations sur la vitesse d'arrêt de l'assistance pour rendre les VAE plus sûrs.

Abstract. In this prepublication, we give a probabilistic method for separating cyclists and e-cyclists in fatal crash statistics. We obtain estimates of the number of fatalities of non-motorized cyclists and the number of fatalities of e-cyclists since 2016. Our results show a decrease of more than 10% in average annual mortality for non-motorized bicycle over the four years 2018-2019-2021-2022 compared to the average annual mortality for the period 2010-2013 as well as a continued increase of e-cyclists fatalities since 2016 with a number of e-cyclists fatalities for 2022 alone likely to be over 100. Our paper indicates that total non-motorized bicycle mileage is stable or in slow decline while total

*Jérôme Dedecker, Université Paris Cité, CNRS, MAP5, UMR 8145, 45 rue des Saints-Pères, F-75006 Paris, France.

†Emmanuel Rio, Université de Versailles, LMV UMR 8100 CNRS, 45 avenue des Etats-Unis, F-78035 Versailles, France.

e-bikes mileage in 2022 is approximately 25% of total bicycles and e-bikes mileage. Our evaluations also indicate that, if electrically assisted bicycles did not exist, the number of fatalities in 2022 for the same total mileage would have been nearly 161, instead of 245. We therefore estimate the excess of fatalities due to motorized bicycles to be over 80 in 2022. Finally we give recommendations on the limiting speed of electric assistance to make e-bicycles more safe in the future.

Mathematics Subject Classification (2020). Primary 62J99, Secondary 60E15.

Keywords. Regression, Poisson distribution, Prediction, Cycling fatalities, Single bicycle crash.

1 Introduction

Dans toute la suite bicyclette désigne un vélo sans moteur et VAE un vélo à assistance électrique conforme à la norme européenne (arrêt de l'assistance à 25 km/h et puissance nominale limitée à 250 Watts). Le propos de cette prépublication est de tenter d'expliquer l'augmentation de la mortalité cycliste en France depuis 2015 ou 2016. Rappelons que les cyclistes sont la seule catégorie pour laquelle la mortalité est en hausse continue sur les sept dernières années. Pour mesurer l'ampleur de la hausse, voici, dans les deux tableaux ci-dessous les statistiques de mortalité cycliste en France métropolitaine de 2009 à 2021. Le premier tableau concerne la période 2009-2016, où peu de VAE étaient en circulation en France et le second la période 2017-2021, pendant laquelle les ventes et la circulation de VAE ont explosé (voir le rapport 2019 de l'observatoire du cycle à ce propos). Sont indiqués, l'année, le nombre total de cyclistes tués ainsi que le nombre de cyclistes tués sans tiers (SVC), le pourcentage de tués sans tiers et le nombre de cyclistes tués avec tiers (BMV) ainsi que le nombre total de tués et les moyennes sur ces deux périodes. Dans le second tableau, les enregistrements officiels des tués en VAE (tués VAE) ainsi que la répartition officielle, sans tiers (SVC VAE) ou avec tiers (BMV VAE) sont aussi donnés.

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Moyennes
Tués	162	147	141	164	147	159	149	162	153,875
SVC	23	18	17	25	19	19	24	23	21
SVC(%)	14,2	12,2	12,1	15,2	12.9	11,9	16,1	14,2	13,6
BMV	139	129	124	139	128	140	125	139	132,875

Année	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Moyennes
Tués	173	175	187	178	227	245	197,50
SVC	38	38	43	56	71	85	55,17
SVC(%)	22,5	21,7	23,5	32,0	31,3	34,7	27,93
BMV	135	137	144	122	156	160	142,33
Tués VAE	-	-	15	16	25	43	-
SVC VAE	-	-	5	4	8	10	-
BMV VAE	-	-	10	12	17	33	-

Ces statistiques sont extraites des bilans de L'ONISR allant de 2009 à 2022, intitulés "La sécurité routière en France. Bilan de l'accidentalité de l'année 20xy". Ci-dessous un avertissement concernant les méthodes de comptage pour les tués à vélo en France.

Avertissement (version 5). Dans ces bilans, sont comptabilisés certains accidents mortels qui ont eu lieu sur de simples sentes ou layons, hors réseau routier, piste cyclable, voie verte ou chemin ouvert à la circulation. Sont comptés aussi des accidents ayant eu lieu lors de courses cyclistes amateurs sur route ainsi que des accidents sans tiers pour lesquels la chute du cycliste ne semble pas être la cause du décès. Voir le matériel supplémentaire, après les références, pour plus de détails.

Pour le VAE, les statistiques de l'ONISR donnent 99 tués sur la période $2019-2022$, soit 11.83% des cyclistes tués. On peut noter une augmentation continue du nombre de tués depuis 2016 (sauf en 2020, en raison des restrictions de circulation). De plus le pourcentage de cyclistes tués sans tiers est en augmentation rapide depuis 2016, et le nombre de tués sans tiers aussi. Pourtant, le pourcentage de cyclistes tués sous l'emprise de l'alcool ou de stupéfiants (tués plus souvent sans tiers) reste très faible (autour de 2% en 2021 d'après le tableau, page 81, du bilan 2021 de l'ONISR), et ne peut donc expliquer une telle hausse. Enfin le nombre de cyclistes tués avec tiers augmente beaucoup moins vite. Pour illustrer ceci, considèrons les rapports

$R_0 =$ (tués sans tiers en 2022)/ (nombre moyen de tués sans tiers de 2009 à 2016) ,

$R_1 =$ (tués avec tiers en 2022)/ (nombre moyen de tués avec tiers de 2009 à 2016) .

Le calcul donne $R_0 = 4.048$, puis $R_1 = 1.204$. On peut noter que $(R_0/R_1) = 3.36$. Par conséquent l'augmentation du nombre de crashes mortels sans tiers constitue une grande partie de la hausse.

De 2009 à 2016, la mortalité cycliste se caractérise par la faible proportion de cyclistes tués sans tiers $(13,6\%)$. Pour toutes les autres catégories de véhicules, la proportion de tués sans tiers est beaucoup plus importante. Par exemple, pour les deux roues les plus proches en terme de vitesse, les cyclomoteurs (catégorie des moins de 50 cm^3), sur la période 2011-2016, un calcul à l'aide des outils statistiques de l'ONISR donne environ

41% de cyclomotoristes tués sans tiers. Sur les trois années 2017, 2019 et 2020, le même outil statistique donne, après calcul, environ 39% de cyclomotoristes tués sans tiers. Le pourcentage de cyclomotoristes tués sans tiers est donc quasiment constant sur la période 2009-2021, et se situe autour de 40%. Il en va de même pour les motocyclistes.

Dès lors, la question est de comprendre le comment et le pourquoi de cette évolution singulière de la catégorie vélos. Or la seule nouveauté réelle de la dernière décade est l'apparition du vélo électrique (VAE). On peut aussi noter que la hausse du nombre de tués sans tiers en vélo et l'explosion des ventes de VAE sont simultanées, le tournant se situant en 2015 ou 2016. Dans la section 2, nous utilisons des méthodes de régression pour donner la forme de la tendance et prédire le nombre de cyclistes tués pour 2023 et 2024. Dans la section 3, nous faisons un point sur l'évolution du vélo ces dernières années. Dans la section 4, nous regardons le nombre de cyclistes tués sans tiers dans le Finistère et le Morbihan de 2011 à 2020 ainsi que tous les accidents mortels de cyclistes en 2020 dans ces deux départements, afin de mieux comprendre les différences de contexte entre ces deux types d'accidents mortels. Dans la section 5, nous regardons l'évolution du nombre de cyclistes tués sans tiers dans vingt départements, dix départements de l'ouest de la France peu montagneux et dix département plus au sud avec un relief marqué. Dans les dix départements de l'ouest une explosion du nombre de tués sans tiers est observée: nous donnons des bornes probabilistes pour le nombre de tués sans tiers en VAE dans ces dix départements. Dans les dix départements avec un relief marqué, on observe une diminution globale du nombre de tués sans tiers mais aussi une forte augmentation du nombre de tués sans tiers de plus de 75 ans. Dans la section 6, nous étudions les tués sans tiers sur toute la France et nous donnons des estimations du nombre de tués sans tiers à bicyclette (sans moteur). Nous proposons aussi des chiffres de mortalité pour les deux catégories, bicyclette et VAE. Dans la section 7, nous regardons les données belges et nous les comparons aux données de la France. Dans la section 8, nous regardons les questions de responsabilité en séparant les tués sans tiers des tués lors de collisions. Dans la section 9, nous évaluons les performances et le niveau de sécurité des VAE. La section 10 donne des prédictions de mortalité cycliste pour les deux catégories pour la période 2023-2027, ainsi que les pertes possibles si la vitesse est relevée à 90 km/h sur route et les gains possibles avec le casque ou une amélioration du routage. Dans la section 11, nous partons d'un travail de G. Nilsson (2004) pour évaluer les risques en VAE urbain en fonction de la vitesse maximale autorisée pour l'assistance, puis nous regardons l'efficacité du casque en cas de chute. Nous donnons aussi des recommandations pour les réglementations futures. Dans la section 12, nous faisons un essai de modélisation de la gravité des blessures en cas de chute sans tiers ainsi qu'une évaluation des coûts hospitaliers correspondants. Dans la section 13, nous donnons une seconde méthode fondée sur l'âge des cyclistes tués pour estimer le nombre de tués en VAE. En effet, les

statistiques officielles donnent un âge moyen bien plus élevé pour les tués en VAE, ceci même à l'intérieur de la catégorie 15 ans et plus. Nous nous servons de ce fait pour donner des estimations du nombre de cyclistes tués en VAE faussement enregistrés dans la catégorie bicyclette (non motorisée). Les chiffres obtenus sont similaires à ceux de la section 6. L'annexe A donne des indications sur les risques en fonction du bridage pour les VAE, l'annexe B des distances de freinage pour les cyclistes en fonction de la position, l'annexe C des propositions pour améliorer la sûreté des flottes de vélos de location, et l'annexe D des comparaisons des progrès réalisés en Suède, en Norvège et en France sur la sécurité routière dans son ensemble. Enfin l'annexe E donne un cas d'erreur d'enregistrement certaine: le cycliste tué a été enregistré dans la catégorie bicyclette alors qu'il roulait en VAE.

2 Régression pour les cyclistes tués et prédictions

On note $N_9, N_{10}, \ldots, N_{22}$ le nombre de cyclistes tués en France en 2009, 2010, ..., 2022. On suppose que ces variables sont indépendantes et de loi de Poisson (ou de loi plus concentrée autour de sa moyenne qu'une loi de Poisson). Notre hypothèse sera la suivante: pour des coefficients a_0, a_1 et a_2 à estimer, la variables N_i a pour loi la loi de Poisson $P(h_i)$ avec $h_i = a_0 + a_1 i + a_2 i^2$. Pour estimer a_0, a_1 et a_2, nous procédons par une méthode de maximum de vraisemblance approché. La différentielle D_n du logarithme de la vraisemblance est $D_n = \sum_{i=9}^{22} h_i^{-1}(N_i - h_i)dh_i$. Pour estimer les coefficients a_0, a_1 et a_2, nous allons remplacer D_n par une quantité proche. Comme $\mathbb{E}(N_i) = h_i$ et comme les valeurs de N_i sont assez grandes (pas de valeur en-dessous de 140), on remplace D_n par la quantité $\tilde{D}_n = \sum_{i=9}^{22} N_i^{-1}(N_i - h_i)dh_i$. On note alors que $\tilde{D}_n$ est la différentielle de $-\frac{1}{2}M_n$, avec

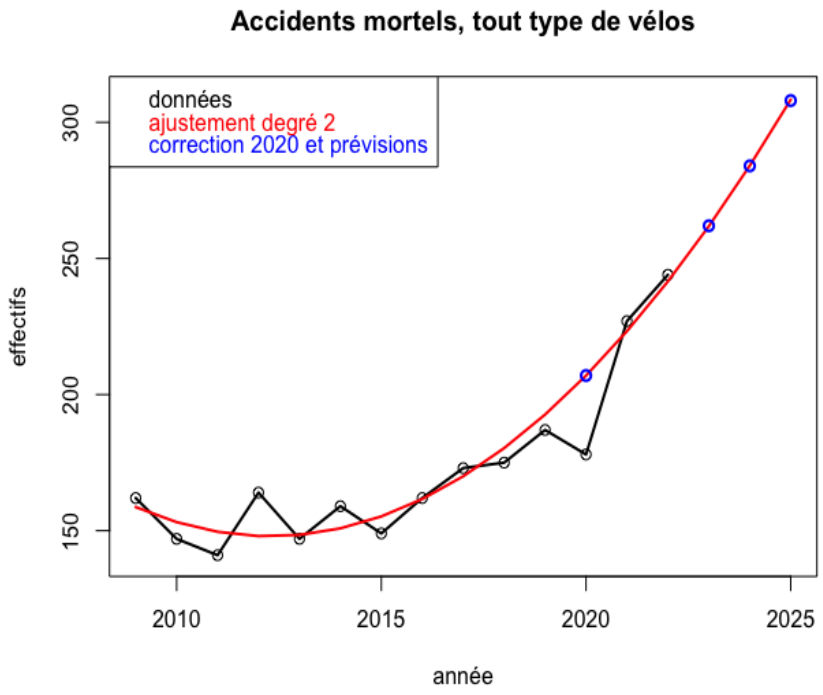
$$M_n = \sum_{i=9}^{22} N_i^{-1}(N_i - h_i)^2.$$

Pour 2020, le nombre de tués étant plus faible en raison des confinements, nous remplacerons la valeur 178 par la moyenne des années 2019 et 2021, qui vaut 207. La valeur pour 2022 est 245, valeur définitive publiée le 31 mai 2023. Les valeurs de a_0, a_1 et a_2 sont estimées en minimisant M_n, ce qui donne

$$\hat{a}_0 = 299.189,\ \hat{a}_1 = -24.603 \ \text{ et } \hat{a}_2 = 1.000. \tag{2.1}$$

Pour ces valeurs estimées, nous obtenons les prédictions suivantes pour 2023 et 2024: 262 tués pour 2023, 285 tués pour 2024, et 309 tués pour 2025. Ci-dessous le graphique.

Ajout à la version 4, après publication du nombre de tués en 2023.
Le problème de la prédiction ci-dessus est qu'elle ne prend pas compte les conditions



météorologiques. Or, après une année 2022 de très grande sécheresse les conditions météorologiques ont été assez mauvaises en 2023, pour la première fois depuis 2016. Les mois de mauvais temps ont vu une baisse du nombre de tués par rapport à 2022. Pour 2023, le bilan provisoire au 31 janvier 2024 est de 226 tués dans la catégorie vélos (qui contient les bicyclettes et les VAE), soit 19 tués de moins qu'en 2022. Dans cette version 5, nous donnons une autre méthode prenant en compte les conditions météorologiques. En contrepartie les prévisions sont faites pour une période de 4 ans.

Dans la version 4, nous avons introduit, dans la section 13 sur l'âge des cyclistes tués, des indications sur les conditions météorologiques de l'année. Il est montré, dans cette section, que le nombre de cyclistes âgés tués est nettement plus grand les années de sécheresse et aussi nettement plus petit les années pluvieuses. De plus, en section 13, nous montrons que, pour réduire l'influence des conditions météorologiques, il faut considérer des périodes de quatre ans, et non regarder année par année.

Nous allons donc considérer les trois périodes de quatre ans suivantes: 2010-2013, 2014-2017 et 2018-2021. Ces périodes commencent par une année de sécheresse et comportent une année de temps médiocre, sauf la dernière période. En effet l'été a été médiocre en 2011. En 2016, le printemps a été très pluvieux, avec une crue de la seine très tardive en juin, et le temps à nouveau mauvais dès le mois d'octobre. Par contre pour la dernière période, il y a eu peu de périodes pluvieuses à la belle saison. En particulier, le temps a été clément en 2019 et 2020. Pour cette raison, il existe sans doute une surmortalité due à un temps clément sur la période 2018-2021. On peut considérer

que le confinement compense à peu près cette surmortalité. Pour cette raison, nous ne ferons pas de correction pour l'année 2020. Ci-dessous les chiffres (T= tués).

$$2010-2013: \ 599T. \quad 2014-2017: \ 643T. \quad 2018-2021 = \ 767T. \tag{2.2}$$

Pour faire la prédiction, nous calculons le polynôme d'interpolation de Lagrange, en prenant $x = 0$ pour 2010-2013, $x = 1$ pour 2014-2017 et $x = 2$ pour 2018-2021. Après calcul, on obtient

$$P(x) = 599 + 4x + 40x^2. \tag{2.3}$$

La période 2022-2025 correspond à $x = 3$. La prédiction pour cette période est

$$P(3) = 599 + 12 + 360 = 971T. \tag{2.4}$$

En retirant le nombre de cyclistes tués en 2022, nous obtenons une prédiction de 726 tués pour la période 2023-2025 avec (2.4), contre 856 tués avec l'estimation ci-dessus et 850 tués avec l'estimation de la section 10A, qui ne tiennent pas compte des conditions météorologiques passées.

3 Sur l'évolution des vélos et du matériel

3A. Vélos de course, de cyclo-cross et de gravel. Pour les vélos de course, la principale évolution est l'apparition, puis la généralisation des freins à disque hydrauliques. Les poids des vélos varient entre sept et onze kilos. Ces freins sont plus puissants que les freins sur jante, même si les freins à double pivot avaient, dans les années 90, bien amélioré le freinage. Les freins à disque sont peu sensibles aux conditions météo et au voile (ou saut) des roues. De plus la largeur des pneus a augmenté, passant de 23mm de largeur à 25mm ou 28mm de largeur, améliorant ainsi l'adhérence au sol. Les cyclistes qui ont encore des freins sur jante utilisent des roues montées avec contrôle de la tension des rayons au tensiomètre. Ces roues se voilent rarement. Elles assurent un freinage régulier et progressif. Une nouvelle catégorie de vélos avec des guidons de course est apparue, celle des vélos de gravel. Il s'agit de vélos assez proches des vélos de cyclo-cross équipés de pneus de 700x35, 700x40 ou 650x47 adaptés aux chemins peu boueux, aussi sûrs que les vélos de route. Enfin, les vélos de course sont aussi déclinés en vélos à assistance électrique (VAE) par les grandes marques. La grande majorité des cyclistes équipés de vélos de course atteint facilement 25 km/h sur le plat, et l'assistance sert donc essentiellement dans des conditions défavorables (montée, fort vent de face...). Les poids sont modérés (entre 12 et 15 kilos pour la pluspart), et le matériel similaire à celui des vélos de course. Les ventes de VAE de course sont faibles (clientèle de cyclistes souvent

âgés ayant une expérience du vélo de course), et en décroissance: en 2021, 15.000 VAE route (course) ont été vendus en Fance, contre 27.000 en 2020 (voir F. Pondevie (2022) à ce propos).

3B. Vélos tout terrain (VTT), et VAE tout terrain. Ils roulent moins sur route! Ils sont munis de freins à disque hydrauliques très efficaces. Les pilotes savent se reculer immédiatement sur le vélo pour mieux freiner (c'est la base en VTT) Le vélo électrique se décline aussi en version tout terrain, avec le même type de freins. La vitesse des VAE tout terrain sur le plat (25 km/h avec assistance) est plus élevée que celle des VTT non motorisés (20 km/h pour le cycliste en VTT moyen).

3C. Vélos urbains et vélos de trekking. Il s'agit de la catégorie la plus utilisée en ville. Dans le cas de freins sur jante, le montage des roues par des machines, sans contrôle de qualité sérieux, fait que la roue prend souvent du voile ou du saut (irrégularité verticale). Le vélo freine alors beaucoup moins bien. La tenue de route à vitesse élevée est souvent médiocre, en raison du manque de rigidité du cadre.

Les VAE urbains et VAE de trekking sont les VAE les plus vendus. Pour les vélos avec freins sur jante, les freins et les roues sont souvent médiocres. Le moteur est assez puissant pour entraîner le vélo à 25 km/h, alors que les cyclistes urbains non motorisés roulent autour de 18 km/h sur le plat, soit 7 km/h de différence. Les vélos sont plus lourds (25 kg contre 17 kg pour les vélos classiques). Voici l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique d'un cycliste pesant 74 kg avec son équipement, suivant les cas. Si E_0 est son énergie cinétique avec un vélo classique de 17 kg roulant à 18 km/h et E_1 son énergie cinétique avec un VAE de 25 kg roulant à 25 km/h, alors $E_0 = 1137$, $E_1 = 2387$ et $(E_1/E_0) = 2.10$. L'énergie cinétique est plus que doublée. La tenue de route est souvent insuffisante pour les vitesses pratiquées, en raison du manque de rigidité du cadre et de la faible maniabilité.

3D. Evolution des ventes et du kilométrage annuel. Pour les vélos classiques les ventent stagnent depuis plus de quinze ans (voir le rapport 2019 de l'observatoire du cycle). Ci-dessous un tableau des ventes depuis 2019, la ligne ventes BI correspondant aux ventes de bicyclettes et la ligne ventes VAE à celles de VAE. Les chiffres sont extraits de la revue Le Cycle, numéros 520, 531, 543 et 555.

Année	2019	2020	2021	2022
Ventes VAE	388.000	515.000	660.000	738.000
Ventes BI	2.262.000	2.170.000	2.129.000	1.858.000

On constate que les ventes de VAE ont presque doublé entre 2019 et 2022 (augmentation de 90%) alors que sur la même période, les ventes de bicyclettes sont descendues à moins de deux millions d'unité (baisse de 18%).

Avant l'explosion des ventes de VAE, le kilométrage par an parcouru par les cyclistes à bicyclette est resté à peu près constant. Les ventes de bicyclette baissant, on peut donc légitimement considérer que le kilométrage effectué par les cyclistes à bicyclette est constant ou en légère baisse. Le nombre de novices étant faible et les vélos pilotés en général en adéquation avec les moyens physiques du cycliste, ceci nous amène à formuler l'hypothèse fondamentale de cette prépublication: le nombre de cyclistes non motorisés tués sans tiers chaque année est une variable aléatoire stationnaire en loi (noter que les modifications du code de la route et des limitations de vitesse ne peuvent pas avoir de conséquences pour les cyclistes tués sans tiers).

4 Tués sans tiers ou avec piéton: Finistère et Morbihan, 2011-2020

Dans cette section, nous étudions les crashes de cylistes sans tiers motorisé dans le Morbihan de 2011 à 2020. Cette étude est basée sur les outils statistiques de l'ONISR. L'année 2018 est absente des données. Les sélections effectuées sont les suivantes: accident mortel, un seul véhicule, sans piéton ou avec piéton, vélos et VAE. En fin de section, nous analysons les autres accidents mortels de vélos en 2020 dans ces deux départements.

On constate immédiatement qu'il n'y a aucun accident mortel de 2011 et 2016 sans tiers ou avec piéton, puis 2 accidents mortels sans tiers en 2017, 1 accident mortel avec piéton indemne en 2019 et 6 accidents mortels sans tiers en 2020, tous de jour. La chaussée est sèche dans au moins 6 cas sur 9. Quatre accidents sur neuf ont eu lieu en agglomération. Dans tous les accidents le cycliste est le seul tué et n'a pas de passager. Un seul accident a eu lieu en hiver, les dates des autres accidents se situent entre le 20 mai et le 20 août. La saisonnalité est donc très marquée. Les victimes étaient deux femmes et sept hommes, les hommes âgés de 56 à 71 ans, sauf un de moins de 40 ans, les deux femmes ayant l'une moins de 40 ans et l'autre plus de 70 ans. Ci-dessous une étude de chaque accident. L'accident 9 est celui avec piéton. Les informations dont nous disposons concernant le déroulement de l'accident sont extraites des journaux Ouest-France, Le Télégramme et ActuMorbihan. Les informations sur l'état de la chaussée proviennent du site de l'ONISR.

Accident 1. 21 mai 2017, Mespaul, 29148. L'accident a eu lieu sur une route communale peu fréquentée en ligne droite, avec une déclivité nulle ou faible (moins de 2%) et un revêtement correct d'après les images de google maps datant de 2013.

Accident 2. 19 juillet 2017, Locmaria, 56114. L'accident a eu lieu sur une route départementale à deux voies, en ligne droite (pas de virage à moins de 100 mètres), en pente (déclivité d'environ 6%), avec un revêtement correct. Une glissière en bois est

présente à un mètre du bord de la chaussée, dans le sens de la montée.

Accident 3. 02 Janvier 2020, Guidel, 56078. L'accident a eu lieu sur une route communale légèrement en courbe, avec une bonne visibilité, une pente assez faible (déclivité d'environ 3%) et un revêtement correct. La largeur permet de croiser un véhicule léger en toute sécurité.

Accident 4. 20 mai 2020, Pluneret, 56176. L'accident a eu lieu sur une route départementale assez peu fréquentée, large, en ligne droite, avec une déclivité nulle ou faible (moins de 2%) et un revêtement correct.

Accident 5. 18 juin 2020, Saint Martin des Champs, 29254, en agglomération. L'accident a eu lieu à une heure de faible circulation (20h50) sur une route communale en ligne droite avec une pente assez faible (déclivité d'environ 4%) et un revêtement correct. Cette route descend vers la rivière de Morlaix. Il y a une étroite bande cyclable sur le côté gauche (en descendant), séparée de la route par une glissière. Le crash est indiqué plutôt du côté de la bande cyclable. Il n'est pas possible de savoir si le cycliste était dans le sens de la montée ou dans le sens de la descente. Enfin la chaussée était légèrement mouillée.

Accident 6. 24 juin 2020, Bignan, 56017, en agglomération. L'accident se situe à l'intersection entre une route départementale et une voie sans issue de la commune de Bignan, menant à un foyer médicalisé. La route départementale est protégée par un Stop. La route est plate et sans virage au niveau de l'intersection. Contrairement à ce qui est indiqué, le crash a eu lieu en agglomération (la pancarte de fin d'agglomération se situe après l'intersection en X et la vitesse indiquée sur le site de l'ONISR (80 km/h) est donc fausse. La vitesse limite est 50 km/h. La roue avant du cycliste a heurté un trottoir, et le cycliste a alors chuté sur la tête.

Accident 7. 16 août 2020, Crozon, 29042. L'accident se situe sur une voie communale en ligne droite, avec une pente modérée (déclivité d'environ 5%). La visibilité est bonne en descente. La chaussée est étroite (en 2019), légèrement bombée, avec des rives de mauvaise qualité. C'est le seul accident pour lequel il est indiqué que le vélo était un VAE.

Accident 8. 20 août 2020, Plouegat-Moysan, 29183, en agglomération. Accident en agglomération, hors intersection, sur une voie communale à faible déclivité (moins de 2%). La voie est presque en ligne droite, le revêtement à peu près correct, et le cycliste tué a moins de 60 ans.

Accident 9. 15 mai 2019, Pluvigner, 56330, en agglomération. Le cycliste n'a pas blessé le piéton, mais a été tué. L'accident se situe dans un virage à plat (pas de pente) à angle droit, la position semblant indiquer que le cycliste s'éloignait du centre

ville, auquel cas le virage est situé juste après un passage étroit sous une voie ferrée. L'accident se situe en zone 30 (et non 50, comme indiqué sur le site de l'ONISR). Notons qu'il n'y a pas de trottoir à cet endroit.

Sur les neuf tués sans tiers ou avec piéton en 2017, 2019 et 2020. Aucune courbe dangereuse, aucun descente avec une pente supérieure à 7%. Pour le revêtement, il est impossible de savoir si la route était gravillonnée au moment des accidents. Cependant les virages sont si peu serrés que n'importe cycliste à bicyclette serait passé sans encombre sur les neuf lieux des accidents sans tiers, même en présence de gravillons. La seule portion un peu dangereuse est celle de l'accident 5, si le cycliste a emprunté la bande cyclable. C'est aussi le seul accident pour lequel la chaussée était mouillée. Cinq accidents sur neuf ont eu lieu hors agglomération, soit la majorité. Enfin le nombre total de cyclistes tués sur les trois années en question est égal à 18, dont 10 avec tiers et 8 sans tiers, soit 44% de tués sans tiers dans ces deux départements sur ces trois années. Si l'on considère les accidents sans tiers motorisés, la proportion passe à 50%. Sur la période 2011-2016, il y avait eu 20 cyclistes tués, tous avec tiers motorisé, soit 10 par période de trois ans, ce qui est exactement le nombre de tués avec tiers sur les trois années 2017, 2019 et 2020. Dans ces deux départements, l'augmentation du nombre de tués par an vient donc des tués sans tiers.

Analyse des trois accidents mortels avec tiers en 2020. Rappelons que six cyclistes se sont tués sans tiers en 2020, dans le Finistère et le Morbihan, dont trois en agglomération. Trois cyclistes ont été tués dans des accidents avec tiers dans ces deux départements. Donc six tués sans tiers (67%) et trois tués avec tiers en 2020. Ci-dessous l'analyse des accidents (genre et age non indiqués). Tous ces accidents ont eu lieu pendant l'hiver météorologique.

Accident 1bis. 4 décembre 2020, 06h30, Caudan, 56036. L'accident a eu lieu sur une bretelle d'accès à la route nationale à quatre voies (interdite aux vélos) allant de Nantes à Brest. Le cycliste a été heurté par un véhicule de tourisme. Le point d'impact au sol est situé du côté droit de la bretelle. L'appel au 17 a été reçu à 06h34 du matin d'après ActuMorbihan. Si cette information est exacte, l'accident a eu lieu de nuit, et non de jour, comme indiqué sur le fichier de l'ONISR.

Accident 2bis. 26 février 2020, Logonna-Daoulas, 29137. Le cycliste, portant un casque, circulait de jour sur une route départementale assez circulante, plate et sans virage, dans une zone limitée à 70 km/h. Un véhicule de tourisme venant de l'arrière ne s'est pas écarté lors du dépassement et son rétroviseur droit a heurté le cycliste, qui a chuté et tapé tête la première sur la chaussée. Le conducteur du véhicule de tourisme avait plus de 90 ans.

Accident 3bis. Samedi 8 février 2020, Lannédern, 29115. L'accident a eu lieu

sur une route départementale, à proximité d'une intersection avec un Stop. A la suite d'une chute, le cycliste s'est retrouvé à terre du côté gauche de la route et est passé sous les roues d'un tracteur arrivant en sens inverse.

5 Tués sans tiers : évolution sur 27 départements

Dans cette section nous étudions l'évolution du nombre de tués sans tiers dans dix départements de l'ouest de le France suivants: départements $16 - 17 - 22 - 29 - 49 - 50 - 53 - 56 - 79 - 85$ ainsi que dans 17 départements à risque pour la bicyclette, car ayant un relief marqué et une population importante: départements $4 - 5 - 6 - 7 - 13 - 15 - 26 - 30 - 38 - 42 - 43 - 63 - 69 - 73 - 74 - 83 - 84$. Ces départements correspondent exactement au sud-est de la France, avec en plus la partie la plus haute du massif central. Nous commencerons par les départements de l'ouest de la France en section 5A, puis nous donnerons des intervalles de confiance en section 5B pour le nombre de tués sans tiers sur la période 2020-2022. Nous donnerons ensuite une analyse déterministe de l'évolution du nombre de tués sans tiers dans les 17 départements à risque ainsi qu'une analyse pour les 79 autres départements (incluant les dix départements de l'ouest de la France).

5A. Données pour les départements 16, 17, 22, 29, 49, 50, 53, 56, 79, 85. Ces départements sont peu concernés par le gel et comportent peu de descentes dangereuses, sources majeures de tués sans tiers en cyclisme. Le nombre total d'habitants dans ces départements est proche de six millions. Les départements ayant une agglomération de plus de 300.000 habitants ne sont pas présents, ce qui explique l'absence du 35 (comprenant Rennes) et du 44 (comprenant Nantes), afin que le développement du cyclisme urbain dans les grandes agglomérations n'interfère pas. Nous pouvons donc considérer que le cyclisme non motorisé dans ces départements est stable ou en baisse (pas d'augmentation des ventes, pas d'augmentation des effectifs des clubs de cyclisme). Le tableau ci-dessous donne le nombre de tués sans tiers en fonction de l'année (11= 2011 etc).

Année	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SVC Bi+VAE	1	2	0	2	0	4	8	8	6	12	12	13
SVC VAE	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	0	1

Tous les tués étaient majeurs. Sur les données, on constate un changement très net après 2016. Entre 2011 et 2015, en cinq ans, il y a eu 5 tués sans tiers, contre 51 tués sans tiers sur les cinq années 2018, 2019, 2020, 2021 et 2022, soit une multiplication par 10.2 du nombre de tués sans tiers dans ces départements. L'estimateur sans biais de la variance pour les cinq années allant de 2011 à 2015 a pour valeur 1.00 et est donc égal au nombre moyen de tués sans tiers sur ces années (un tué par an en moyenne de 2011

à 2015). Cette variance empirique est donc compatible avec des données ayant une loi de Poisson (rappelons que, pour la loi de Poisson, l'espérance et la variance sont égales). Depuis 2019, les VAE sont enregistrés. Le nombre de VAE enregistrés est donné dans la dernière ligne du tableau.

5B. Modélisation. En sécurité routière, le nombre d'accidents est souvent modélisé par la loi de Poisson (voir Nilsson (2004), par exemple). Le cyclisme non motorisé stagnant partout sauf dans les grandes agglomérations, nous supposerons que le nombre X_i de cyclistes non motorisés tués sans tiers l'année i suit une loi de Poisson de paramètre a constant, sauf pour l'année 2020.

Année 2020. En raison des restrictions de circulation et de l'interdiction quasi-totale du cyclisme de loisir pendant six semaines, le nombre de kilomètres parcouru a été nettement réduit. La mortalité totale (178 tués) est d'ailleurs inférieure à celle de 2019 (187 tués) et 2021 (227 tués). Nous prendrons pour loi de X_{20} la loi $P(0.95a)$ (moyenne de la loi réduite de 5%). Cette hypothèse sera justifiée dans la section suivante.

Nous noterons Z_i le nombre de tués en VAE sans tiers l'année i (on prendra $i = 11$ pour 2011 etc...). Nous supposerons que Z_i suit la loi de Poisson $P(b_i)$. La suite $(b_i)_{i\geq 11}$ est supposée croissante (augmentation de la circulation en VAE). Toutes ces variables aléatoires sont supposées indépendantes.

Notation 5.1. On note S_0 le nombre total de tués sans tiers à bicyclette de 2011 à 2015 (dans ces dix départements) et T_0 le nombre de tués sans tiers à bicyclette en 2020, 2021 et 2022. On note S_1 le nombre total de tués sans tiers en VAE de 2011 à 2015 (dans ces dix départements), et T_1 le vrai nombre de tués sans tiers en VAE en 2020, 2021 et 2022.

Regardons d'abord si l'hypothèse de stationnarité en loi pour les tués sans tiers à bicyclette est compatible avec les données. On suppose ici que la circulation en VAE est marginale de 2011 à 2015. Pour cette période, la droite de régression a pour équation $y = 2.30 - 0.10x$. La pente est faiblement négative, et donc compatible avec la stationnarité en loi de la suite (X_i).

Sous les hypothèses ci-dessus, S_0 suit une loi de Poisson $P(5a)$ et la variable aléatoire T_0 une loi de Poisson $P(2.95\,a)$ ($2.95a$ au lieu de $3a$ étant dû à la correction pour l'année 2020). Construisons d'abord un intervalle de confiance pour a, à l'aide de S_0.

$$\mathbb{P}_a(S_0 \leq 5) = e^{-5a} \sum_{k=0}^{5} \frac{(5a)^k}{k!}. \tag{5.1}$$

L'expression ci-dessus est décroissante en a, et $e^{-5a} \sum_{k=0}^{5} \frac{(5a)^k}{k!} = 2.00\,10^{-2}$ pour $a = a_0 = 2.406$. Puisque $S_0 + S_1 = 5$, $S_0 \leq 5$, et donc l'intervalle $I_0 = [0, 2.406]$ est un intervalle de confiance de niveau de confiance 98% pour a.

Regardons maintenant le comportement en loi de la variable T_0 quand a est dans l'intervalle de confiance I_0. Dans ce cas T_0 a pour loi la loi de Poisson $P(2.95\,a)$ avec $a \leq a_0$. La loi de T_0 est donc stochastiquement majorée par la loi de Poisson $P(b_0)$, avec $b_0 = 2.95a_0 = 7.098$. Pour tout entier naturel j, si a est dans l'intervalle de confiance I_0, alors

$$\mathbb{P}_a(T_0 \leq j) \geq e^{-b_0} \sum_{k=0}^{j} \frac{b_0^j}{j!} := p_j. \tag{5.2}$$

Dans le tableau ci-dessous nous donnons les valeurs numériques de p_j pour j entre 8 et 13.

Valeur de j	8	9	10	11	12	13
Valeur de p_j	0.716	0.820	0.894	0.942	0.970	0.986

Rappelons maintenant les données. En 2020, 2021 et 2022 il y a eu au total 37 cyclistes tués sans tiers. Donc $T_0 + T_1 = 37$. Par conséquent, $T_0 \leq j$ si et seulement si $T_1 \geq 37 - j$. Nous pouvons donc affirmer à l'aide du tableau que, avec un niveau de confiance de 98%,

$$\mathbb{P}(T_1 \geq 24) \geq 0.986,\ \mathbb{P}(T_1 \geq 25) \geq 0.970,\ \mathbb{P}(T_1 \geq 26) \geq 0.942.$$

Or les statistiques officielles (voir tableau, Section 5A) donnent trois tués sans tiers en VAE sur ces trois ans dans ces dix départements.

Conclusion. Sous l'hypothèse de stationnarité en loi du nombre annuel des tués sans tiers à bicyclette, avec une niveau de confiance de 98%, nous pouvons affirmer que, avec une probabilité supérieure à 0.986, il y a eu au moins 21 vélos électriques faussement enregistrés comme bicyclettes sans moteur sur la période $2020 - 2022$ dans ces dix départements.

Remarques sur l'enregistrement. Qui peut croire que, sur ces dix départements, où il y avait en moyenne un cycliste non motorisé tué sans tiers entre 2011 et 2015, le nombre de cyclistes non motorisés tués sans tiers a dépassé dix en 2020, 2021 et 2022, soit une multiplication par dix? Pour que ce soit possible, il aurait fallu une augmentation considérable du kilométrage parcouru à bicyclette dans ces départements sans grandes agglomérations, ce qui n'est pas le cas. L'intervalle de confiance et les bornes probabilistes ci-dessus confirment cette intuition.

La Belgique, qui enregistre les VAE depuis 2014 (soit cinq ans d'avance sur le France) avait encore il y a peu des problèmes d'enregistrement sur les blessés hospitalisés. Voir Section 7 pour les données belges et leur comparaison avec les données de la France. Enfin l'union cycliste internationale (UCI) a fixé des règles imparables pour déterminer si le vélo est motorisé ou non. En particulier les méthodes proposées (contrôle par rayons X) permettent de savoir si un moteur et une batterie sont cachés dans les tubes

du vélo, comme par exemple le système Vivax-Assist, invisible de l'extérieur (moteur de 200 Watts), ou des moteurs miniaturisés (puissance nominale 20 à 40 Watts). Pour ces moteurs, il n'y a pas d'arrêt de l'assistance à 25 km/h, et donc le cycliste sur un vélo de course peut atteindre des vitesses très élevées. En cas d'accident mortel, il faudrait sans doute suivre ces règles en France et en Europe, afin d'éviter les erreurs d'enregistrement. Une autre possibilité est de faire expertiser le vélo par un vélociste qualifié en cas d'accident mortel, ce qui pourrait permettre aussi de détecter un problème sur le vélo ayant pu causer l'accident.

5C. Evolution pour les 17 départements du sud-est Dans cette section nous regardons l'évolution du nombre tués sans tiers dans les départements 4, 5, 6, 7, 13, 15, 26, 30, 38, 42, 43, 63, 69, 73, 74, 83, 84 entre la période 2013-2015 et la période 2020-2022. Cette sélection de départements comporte tous les départements du sud-est jusqu'au département 69 et les deux départements les plus hauts du massif central. La population totale de ces départements est de 12.830.000 d'habitants. Nous regarderons uniquement les cyclistes tués sans tiers ayant au moins 13 ans. En effet, les cyclistes de douze ans au plus ne sont pas concernés par le VAE, et d'autre part le nombre de tués sans tiers dans cette tranche d'âge semble stable en France métropolitaine: de 2013 à 2015, les relevés donnent un tué sans tiers de douze ans au plus, et, pour la période 2020-2022 aussi, un tué sans tiers. Nous voyons ici que le vélo est très sûr pour les enfants (très peu de SCV mortels).

Nous allons commencer par une étude de la période 2013-2015. Sur cette période, il y a eu 61 cyclistes de 13 ans et plus tués sans tiers en France métropolitaine, dont 32 sur ces 17 départements, soit 52.5% des tués sans tiers de 13 ans et plus, alors que ces départements représentent 20.3% de la population de la France métropolitaine. Ces départements sont donc à risque. Sur toute la France, le plus âgé de ces cyclistes tués sans tiers avait 79 ans.

Parmi les 61 cyclistes de plus de 13 ans tués sans tiers en France métropolitaine, 36 (59.0%) se sont tués hors agglomération et 25 en agglomération. Parmi les 32 tués sans tiers dans ces 17 départements, 23 (71.9%) se sont tués hors agglomération et 9 en agglomération. Malgré une urbanisation assez forte (plusieurs grandes métropoles), la proportion de tués sans tiers est plus importante que la moyenne nationale, car ces départements comptent de nombreuses descentes dangereuses. Ci-dessous un tableau avec des classes d'âge (aucun mineur tué).

13-15 âges	[18, 59]	[60,74]	[75, 89]
SVC Agglo	5	4	0
SVC Hors Agglo	7	13	3

La moyenne des âges des tués hors agglomération sur la période 2013-2015 est de 60.7

ans, alors que les tués en agglomération sont plus jeunes: moyenne 52.2 ans en moyenne, soit 8.5 ans de moins.

Regardons maintenant la période 2020-2022 pour la France métropolitaine. De 2020 à 2022, selon les statistiques officielles, il y a eu 189 tués sans tiers à bicyclette non motorisée et 22 tués sans tiers en VAE de 13 ans et plus. Sur les 189 tués sans tiers enregistrés dans la catégorie bicyclette, les relevés donnent 82 tués en agglomération et 107 hors agglomération. Cependant, l'analyse faite de l'accident 6 en section 3 montre une erreur d'attribution: d'une part la localisation est en agglomération et d'autre part, dans le commune de Bignan, il n'y a pas de trottoir hors agglomération: l'accident est enregistré hors agglomération par erreur. Les données avec cette correction sont de 83 tués en agglomération et 106 tués (56.1%) hors agglomération.

Dans les 17 départements du sud-est, on observe 34 tués sans tiers à bicyclette selon les statistiques officielles (+2 par rapport à 2013-2015). Par contre la répartition entre agglomération et hors agglomération a changé: 19 se sont tués hors agglomération (-4 par rapport à 2013-2015) et 15 en agglomération (+6). Ci-dessous le tableau avec les mêmes classes d'âge (aucun tué entre 13 et 17 ans).

20-22	âges	[18, 59]	[60,74]	[75, 89]
SVC	Agglo	5	4	6
SVC	Hors Agglo	9	8	2

La moyenne des âges des tués hors agglomération sur la période 2020-2022 est de 59.0 ans (en baisse de 1.5 ans par rapport à 2013-2015), alors que les tués en agglomération sont beaucoup plus âgés: 64.2 de moyenne des âges, en hausse de 12.0 ans ans en moyenne par rapport à 2013-2015. Si les chiffres des tués hors agglomération sont vraisemblables, il n'en va pas de même pour la répartition des âges des tués en agglomération. En effet parmi les 15 tués en agglomération, 6 ont 77 ans et plus (77, 77, 78, 79, 85 et 86 ans) alors que le plus âgé des tués sans tiers en agglomération sur la période 2013-1015 avait 71 ans. Pour le cycliste de 86 ans, l'erreur d'enregistrement est manifeste (voir Annexe E).

Regardons maintenant les tués sans tiers en VAE dans ces 17 départements sur la période 2020-2022 selon les relevés officiels. Ils sont au nombre de huit, dont trois en agglomération (73, 77 et 88 ans), et cinq hors agglomération (66, 73, 74, 76 et 89 ans). La moyenne des âges est de 77.0 ans.

Pour voir si le cyclisme non motorisé était en hausse chez les personnes âgées avant l'apparition du VAE, nous allons maintenant regarder la période 2006-2015 pour les cyclistes 75 ans et plus. Regardons d'abord les conditions de sécurité sur cette période. A partir de 2007, la mortalité totale est plus faible, ceci jusqu'en 2015. En ce qui concerne 2006, la sécheresse (voir section 13) a favorisé une forte activité cycliste des

plus de 55 ans, induisant une mortalité plus élevée. Cependant pour la tranche des 0-54 ans, la mortalité en 2006 a été de 77 tués, et pour les trois années suivantes, de 80, 74 et 77 tués, soit exactement 77 tués en moyenne: on peut donc considérer les conditions de sécurité aussi bonnes en 2006. Afin de réduire les fluctuations dues aux conditions météorologiques (voir section 13 pour plus de détails), nous allons regrouper les données par paquets de deux ans.

Période	[6,7]	[8,9]	[10,11]	[12,13]	[14,15]
Tués 75+	62	49	45	47	59

Aucune hausse n'est observée. La droite de régression des moindres carrés pour le nombre de tués par an (deux fois moins) a pour équation (k désigne l'année).

$$y(k) = 28.30 - 0.20\,k. \tag{5.3}$$

Cette droite a une pente négative. Nous en déduisons que le cyclisme non motorisé pour les plus de 75 ans n'est pas en hausse.

Les conclusions pour ces 17 départements. Les statistiques officielles indiquent une génération spontanée de cyclistes non motorisés âgés (75 ans et plus) se tuant sans tiers en ville. Leur tranche d'âge est proche de celle des cycliste en VAE tués sans tiers. Or le cyclisme non motorisé à plus de 75 ans stagne depuis des années. Les statistiques officielles sont donc peu vraisemblables. A notre avis, il y a au moins trois erreurs d'enregistrements dans les six tués en agglomération de 77 ans et plus (une est certaine: voir Annexe E), et par conséquent le nombre réel de tués sans tiers à bicyclette n'est pas en hausse.

L'augmentation pour les autres départements. Sur les 79 autres départements de la France métropolitaine, il y a eu 29 tués sans tiers de 13 ans et plus entre 2013 et 2015 à bicyclette, dont 16 en agglomération et 13 (44.8%) hors agglomération, et toujours selon les statistiques officielles, 155 tués sans tiers de 13 ans et plus à bicyclette de 2020 à 2022, dont 68 en agglomération et 87 (57.1%) hors agglomération. Pour le VAE, les relevés officiels dans ces 79 départements donnent 7 tués sans tiers en agglomération et 7 tués sans tiers hors agglomération (50%), soit 14 au total (onze fois moins de tués sans tiers que pour les bicyclettes). Le nombre total officiel de tués sans tiers à bicyclette sur ces 79 départements a été multiplié par 5.34 entre la première période et la seconde période. Pour les tués sans tiers hors agglomération à bicyclette selon les enregistrements officiels, leur nombre est passé de 13 à 87, soit une multiplication par 6.69, facteur encore plus grand. Or aucune augmentation de l'alcoolisme à vélo n'est constatée et le trafic a augmenté au plus d'un tiers. Pour enregistrer une telle hausse, il aurait fallu que le kilométrage à bicyclette soit multiplié au moins par trois. Par conséquent toutes les observations qui concernent la mortalité par catégorie (bicyclette ou VAE) faites dans

les bilans officiels de l'ONISR sont fausses, et en particulier les observations concernant la présence des VAE hors agglomération, très fortement sous-estimée. Il est plus que probable que l'essor des ventes de VAE est dû principalement aux personnes âgées, pour lesquelles il est un loisir à la belle saison. Et ce loisir est souvent pratiqué sur des routes tranquilles hors agglomération ou sur des routes proches du littoral de l'océan atlantique ou de la manche.

6 Modélisation par régression du nombre annuel de cyclistes tués sans tiers

En sécurité routière, le nombre d'accidents est souvent modélisé par la loi de Poisson. Nous supposerons donc que le nombre de tués sans tiers par an en France suit une loi de Poisson dont le paramètre dépend de l'année. Les variables aléatoires sont supposées indépendantes. Nous reprenons le modèle statistique de la section 5 sauf pour l'année 2020, pour laquelle nous allons regarder en détail le nombre de tués sans tiers en fonction des mois de l'année.

6A. Correction pour l'année 2020. Nous allons séparer l'année en deux parties: les mois sans confinement, et les mois comportant une période de confinement. Compte tenu des dates des deux confinements, il y a cinq mois incluant des périodes de confinement: les mois de mars, avril, mai, novembre et décembre. Sur les huit années 2012 à 2019, les fichiers de l'ONISR donnent 76 cyclistes tués sans tiers sur ces cinq mois pour 153 tués sans tiers sur les sept autres mois. Pour l'année 2020, il y a exactement 17 tués sans tiers sur les cinq mois incluant des périodes de confinement, pour 39 tués sur les sept autres mois. En faisant une règle de trois, nous pouvons estimer que le nombre de tués sans tiers a été réduit de 3 environ pendant les mois avec confinement, soit une baisse de 5% du paramètre.

6B. Modèle statistique. On suppose que $Y_9, Y_{10}, \ldots, Y_{21}$ est une suite de variables aléatoires indépendantes.

Notation 6.1. On note $Y_9, Y_{10}, \ldots, Y_{21}$ le nombre total de cyclistes tués sans tiers en France en 2009, 2010, ..., 2021.

nous supposerons que le nombre X_i de cyclistes à bicyclette tués sans tiers l'année i suit une loi de Poisson $P(a_i)$. Nous noterons Z_i le nombre de tués en VAE sans tiers l'année i. Nous prendrons $Z_i = 0$ pour $i \leq 15$ (peu de VAE en circulation jusqu'en 2015). Pour $i \geq 16$, nous supposerons que Z_i suit la loi de Poisson $P(b_i)$. La suite $(b_i)_{i \geq 16}$ est supposée croissante Toutes les variables aléatoires ci-dessus sont supposées indépendantes. Par définition $Y_i = X_i + Z_i$.

Regardons d'abord les données de 2009 à 2015. Soit $\bar{Y}_{[9,15]}$ la moyenne des Y sur la période 2009-2015 et $s^2_{Y,[9,15]}$ l'estimateur sans biais de la variance.

$$\bar{Y}_{[9,15]} = (145/7) = 20.71 \quad \text{et } s^2_{Y,[9,15]} = \frac{1}{6}\sum_{i=9}^{15}(Y_i - \bar{Y}_{[9,15]})^2 = 10.24 < 20.71.$$

Les données sont compatibles avec la loi de Poisson ou avec une loi plus concentrée autour de sa moyenne.

Les données concernant les tués sans tiers présentent une rupture de pente marquée vers 2016. La pente semble à peu près constante sur la période 2016-2021, ce qui conduit à l'hypothèse paramétrique ci-dessous. En supposant que le paramètre de la loi a été réduit de 5% en 2020 en raison du confinement, ceci conduit à l'hypothèse suivante.

Hypothèse sur a_i et b_i. Il existe des constantes positives a, c et t telles que

$$a_i = a,\ b_i = c\max(i-t,0) \ \text{ pour } i \neq 20,\ a_{20} = 0.95\,a,\ b_{20} = 0.95\max(20-t,0).$$

Sous les hypothèses, les observations sont $Y_9, \ldots, Y_{21}$ sont indépendantes de loi de Poisson $P(f_i)$ avec

$$f_i = \lambda_i(a + c\max(i-t,0)) \text{ avec } \lambda_i = 1 \ \text{ si } i \neq 20 \ \text{ et } \lambda_{20} = 0.95. \tag{6.1}$$

Pour estimer a, b et c, nous procédons par une méthode de maximum de vraisemblance approché. La différentielle D_n du logarithme de la vraisemblance est

$$D_n = \sum_{i=9}^{21} f_i^{-1}(Y_i - f_i)df_i.$$

Pour estimer les coefficients a, t et c, nous allons remplacer D_n par une quantité proche. Comme $\mathbb{E}(Y_i) = f_i$ et comme les valeurs de Y_i sont assez grandes (pas de valeur en-dessous de 18), on remplace D_n par

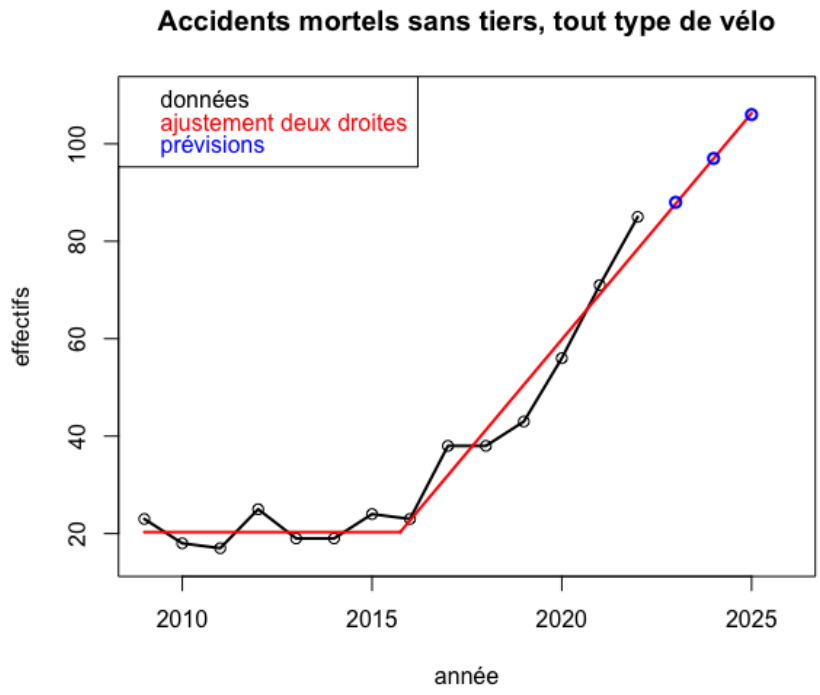
$$\tilde{D}_n = \sum_{i=9}^{21} Y_i^{-1}(Y_i - f_i)df_i.$$

On note alors que $\tilde{D}_n$ est la différentielle de $-\frac{1}{2}M_n$, avec

$$M_n = \sum_{i=9}^{21} Y_i^{-1}(Y_i - f_i)^2.$$

Les valeurs de a, c et t sont estimées en minimisant M_n, ce qui donne

$$\hat{a} = 20.30,\ \hat{c} = 9.286 \ \text{ et } \hat{t} = 15.74. \tag{6.2}$$



On voit ici que $\hat{t} = 15.74$. Or on observe dans les ventes de VAE une rupture de pente dans le chiffre d'affaire des ventes de VAE en France (voir le rapport 2019 de l'observatoire du cycle) et aussi dans les ventes de VAE dans la communauté européennes (voir page Wikipedia sur le vélo électrique) exactement entre 2015 et 2016, donc exactement à la même époque. Le graphique de l'ajustement par les deux droites est donné ci-dessous.

On peut aussi envisager, comme en section 2, d'ajuster un polynôme Q de degré 2 par moindre carrés pondérés, à l'aide du critère M_n appliqué à la fonction

$$h_i = \lambda_i Q(i) \text{ avec } \lambda_i = 1 \text{ si } i \neq 20 \text{ et } \lambda_{20} = 0.95.$$

On trouve alors $\hat{Q}(i) = 17.43 + 0.641(i - 12.05)^2$.

Les deux modèles ayant le même nombre de paramètres à estimer, on peut les comparer en utilisant l'erreur d'ajustement, c'est à dire la somme des carrés des résidus (SCR) calculés à partir de M_n avec les fonctions estimées $\hat{f}_i$ et $\hat{h}_i$. On trouve

$$SCR(\hat{f}_i) = 6.02 \quad \text{et} \quad SCR(\hat{h}_i) = 5.31.$$

La qualité de l'ajustement des deux modèles est assez proche. Nous choisirons le modèle avec deux droites, parce que la rupture de pente en 2016 est très marquée.

Dans la suite, on pose

$$f_0(i) = 20.30 \quad \text{et} \quad f_1(i) = 20.30 + 9.286(i - 15.74). \tag{6.3}$$

En reprenant l'hypothèse faite en fin de section 2 (stationnarité des tués sans tiers parmi les cyclistes non motorisés ainsi que nombre de tués sans tiers en VAE très faible jusqu'en 2015), ceci nous conduit à la modélisation qui suit.

Modélisation. Le nombre de tués à bicyclette sans tiers l'année i suit une loi de Poisson de paramètre $f_0(i)$ pour tout i dans $[9, 21]$. Le nombre de tués en VAE sans tiers l'année i suit une loi de Poisson de paramètre $f_1(i) - f_0(i)$ pour tout i dans $[16, 21]$. Toutes ces variables aléatoires sont indépendantes dans leur ensemble.

Avec ces notations et la modélisation faite $Z_i = 0$ pour $i \leq 15$, et alors $X_i = Y_i$. Pour $i \geq 16$, X_i et Z_i sont indépendantes et de lois de Poisson respectives $P(\lambda_i f_0(i))$ et $P(\lambda_i(f_1(i) - f_0(i)))$. Par conséquent la loi de X_i sachant $(Y_i = m)$ est la loi binomiale $B(m, f_0(i)/f_1(i))$. Il. en résulte que

$$\mathbb{E}(X_i \mid Y_i = m) = m f_0(i)/f_1(i) \text{ et } \mathbb{E}(Z_i \mid Y_i = m) = m(f_1(i) - f_0(i))/f_1(i). \tag{6.4}$$

Ci-dessous nous donnons un tableau avec les prédictions de tués sans tiers dans les deux catégories effectuées à l'aide de (6.4) à partir de 2016. Les chiffres sont arrondis à l'entier le plus proche. Nous donnons aussi une estimation du nombre total de tués en VAE et en bicyclette, en faisant l'hypothèse suivante: sauf en 2020, 50% des cyclistes en VAE ont été tués sans tiers. Cette hypothèse est fondée en partie sur un rapport de Uhr et Hertach (2017) sur les accidents de vélos sans tiers en Suisse. Le tableau 15, page 48, donne en effet une proportion d'accidents graves sans tiers de 49% pour les VAE (langsames E-bikes), contre 39% pour les bicyclettes (farrhad), soit 10% de plus. On sait que le casque limite la gravité des blessures à la tête dans les crashes sans tiers. Le tableau 23, page 52 dans Uhr et Hertach (2017) indique le taux du port du casque pour les deux catégories parmi tous les blessés. Pour les bicyclettes, il est de 43%, et pour les VAE de 50%. Donc on ne peut pas expliquer cette différence par un moindre port du casque. Afin de ne pas sous estimer le pourcentage d'accidents mortels sans tiers, nous supposerons que celui-ci est de 50% en France, soit 10% de plus que les 40% de tués sans tiers des deux roues motorisés (cyclomoteurs ou motocyclettes), catégories dans lesquelles le pourcentage de tués sans tiers est stable et autour de 40%.

Sous cette hypothèse de 50% de tués sans tiers en VAE (sauf en 2020) nous obtenons les estimations suivantes sur la période 2016-2021. Pour 2020, comme le nombre de tués avec tiers a été réduit grâce au confinement des voitures, nous complèterons le tableau avec l'interpolation suivante pour le nombre de tués avec tiers en VAE: Pour obtenir la proportion de tués lors de collisions en VAE, nous multiplierons le nombre total de cyclistes tués lors de collisions en 2020 par un coefficient β calculé sur 2019 et 2021 ainsi:

$$\beta = (BMVvae(19) + BMVvae(21))/(BMV(19) + BMV(21)) = 76/300 = 0.2533.$$

Ceci donne le tableau suivant:

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
SVC (bi)	21	24	19	17	20	21	22
SVC (vae)	2	14	19	26	36	50	63
BMV (vae)	2	14	19	26	31	50	63
BMV (bi)	137	121	118	118	91	106	97

Pour finir, voici une prédiction du nombre total de tués dans chaque catégorie, sous l'hypothèse que 50% des cyclistes en VAE se tuent sans tiers.

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Somme
Tués (bi)	158	145	137	135	111	127	119	932
Tués (vae)	4	28	38	52	67	100	126	415

On observe une baisse du nombre de tués à bicyclette à partir de 2018 (ici 2020 n'est pas considéré), qui est sans doute due à la limitation à 80 km/h sur route. La mortalité en bicyclette non motorisée était de 153 tués par an en moyenne sur la période 2009-2017. Elle descend sous les 137 tués à partir de 2018. Nous constatons que la limitation de vitesse à 80 km/h sur route sauve, à bicyclette, environ 14 vies par an en moyenne. Remarquons ici que les pays qui enregistrent correctement les deux types de vélo observent aussi une baisse pour la catégorie bicyclette (vélo sans moteur). La nouveauté est l'explosion du nombre de tués en VAE. Nos estimations donnent 345 tués en VAE sur les 837 cyclistes tués, de 2019 à 2022. Les cyclistes tués en VAE représentent donc 41.22% des cyclistes tués sur ces trois années, selon nos estimations. Pour 2022, nos chiffres donnent 119 tués à bicyclette: les statistiques officielles en donnent 202. Donc, d'après nos estimations, 83 tués en VAE ont été faussement enregistrés comme tués à bicyclette en 2022. Dans la section suivante, nous comparons ces estimations avec les statistiques de la mortalité cycliste en Belgique.

Conditions météorologiques et tués sans tiers (version 5). Si les conditions météorologiques semblent avoir une influence sur le nombre de tués à bicyclette (voir section 13 pour plus de détails), avec, en particulier, plus de cyclistes âgés tués les années de beau temps, et moins de cycliste âgés tués les années de mauvais temps, l'influence sur les tués semble faible. Sur la période 2009-2015, les années 2009-2010 et 2013-2014 ont été les années de beau temps, avec pour bilan 23 tués sans tiers en 2009, 18 en 2010, 19 en 2013 et 2014, soit moins de 20 en moyenne. Par conséquent, pour les cyclistes non motorisés, le chiffre de 22 tués sans tiers à bicyclette en 2022 (année de beau temps) est vraisemblable. Les estimations ne sont donc pas remises en cause par les conditions météorologiques.

7 Mortalité cycliste en Belgique, comparaisons

Dans cette section, nous donnons les statistiques de mortalité cycliste en Belgique dans les deux catégories de vélos. Ci-dessous deux tableaux. Le premier concerne la période 2010-2014, avec non enregistrement des VAE et le second la période 2015-2021. Ces statistiques sont extraites des rapports sur les accidents de la route en Belgique. Voir les références VIAS (2020, 2021 et 2022).

Année	2010	2011	2012	2013	2014
Tués	73	74	84	83	82

Année	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Tués (bi)	76	68	53	67	67	55	44	61
Tués (vae)	14	13	22	21	27	30	39	38
Tués (total)	90	81	75	88	94	85	83	99

De 2017 à 2019, on constate une hausse continue du nombre total de tués, puis une baisse en 2020 et un chiffre 2021 proche de celui de 2020. Sur la période 2019-2022, les statistiques belges donnent 134 tués en VAE, soit 37.12% du nombre total de cyclistes tués (361) sur la même période. Pour la France, les statistiques de l'ONISR donnent 11.83% de tués en VAE (99 tués en VAE pour 837 tués au total) sur la même période.

La loi belge du 21 mai 2019. Cette loi améliore la protection des cyclistes, des engins de déplacement personnel (edp) et des piétons. Elle n'impose pas aux cyclistes de nouveaux équipements. Elle est entrée en vigueur le 31 mai 2019. Son effet est important pour les cyclistes à bicyclette (baisse du nombre de tués de un tiers en deux ans) mais elle semble peu efficace pour les VAE (augmentation de 50% du nombre de tués en deux ans), ce qui conforte l'idée qu'une proportion importante de cyclistes en VAE se tuent sans tiers.

La gravité spécifique. Les rapports donnent aussi la gravité spécifique des accidents, définie comme le nombre moyen de décès de l'usager en question impliqué dans l'accident pour mille accidents enregistrés. Ci-dessous les résultats pour la période 2018-2021, pour les deux catégories de cyclistes. Les piétons sont inclus, pour comparaison avec les cyclistes.

Année	2017	2018	2019	2020	2021
Bicyclettes	6,4	7,6	7,8	6,9	5,5
VAE	22,2	14,4	13,7	14,9	16,1
Piétons	20,4	16,0	19.5	19.8	19.6

On note immédiatement que les blessures des piétons sont en moyenne plus graves et conduisent plus souvent au décès. Un document de 1999 de l'union europénne (voir Nilsson, 2004, page 11) indique d'ailleurs que le risque d'être tué par kilomètre parcouru pour les piétons est supérieur d'environ 20% à celui des cyclistes. Le fait d'être à bicyclette protège en cas de collision avec un véhicule motorisé, surtout en ville (voir Peng, Chen Yang, Otte et Willinger (2012) pour une comparaison des blessures à pied et à bicyclette). Il est possible que la maniabilité de la bicyclette et sa vitesse souvent plus faible que celle des VAE permette de changer de direction au dernier moment pour limiter la violence du choc. Par contre les résultats pour le VAE sont très mauvais: la gravité spécifique est le double de celle des bicyclettes. Nous renvoyons au matériel supplémentaire, section M3, après les références, pour des compléments.

Comparaison des ventes de VAE et des tués en Belgique et en France. Le volume des ventes donne un ordre de grandeur du nombre de VAE en circulation. En France, le volume des ventes a été de 388.000 unités en 2019, contre 251.000 en Belgique. Sur la période 2019-2022, il y a eu 134 tués enregistrés en VAE en Belgique, et, en France, 99 tués enregistrés en VAE. Le chiffre obtenu en France est peu crédible, puisque les ventes sont beaucoup plus importantes en France. Si, en l'absence d'enregistrement en France, on avait fait une règle de trois avec le rapport des ventes, on aurait obtenu pour nombre N de tués en VAE,

$$N = 134 \times (388/251) \simeq 207 \text{ tués en VAE.} \tag{7.1}$$

Ce calcul, fondé uniquement sur les ventes est cependant peu satisfaisant car les conditions de sécurité des cyclistes sont bien meilleures en Belgique. Ci-dessous une autre tentative de calcul.

Interpolation à l'aide des données belges. Nous supposerons ici que les proportions de cyclistes en VAE sont proches dans les deux pays. Nous allons faire la règle de trois suivante. Soit R le rapport entre le nombre de cyclistes tués en France de 2010 à 2022 et le nombre de cyclistes tués en Belgique de 2010 à 2022. On estime alors le nombre N de tués en VAE de 2019 à 2022 par

$$N = 134 \times R = 134 \times (2254/1091) \simeq 277 \text{ tués en VAE.} \tag{7.2}$$

Le chiffre obtenu est, somme toute, assez proche des prédictions faites en fin de section 6 (qui donnent 345 tués en VAE de 2019 à 2022).

8 Les responsabilités présumées des uns et des autres

Le bilan de la sécurité routière 2014 indique un taux de 35% de cyclistes responsables dans les accidents mortels. Depuis ce taux s'est accru considérablement. Regardons le

bilan 2021. Il y a eu 227 tués au total, dont 71 sans tiers, soit 156 tués avec tiers. Le bilan donne 56% de responsables parmi les cyclistes, soit 127 cyclistes responsables. Si on enlève les 71 tués sans tiers, il reste exactement 56 cyclistes tués avec tiers responsables sur 156 tués avec tiers, soit 36% de cyclistes responsables. Le véhicule motorisé impliqué dans la collision est donc responsable dans 64% des cas, soit près de deux cas sur trois. En conséquence, une action de formation des cyclistes sera beaucoup moins efficace qu'une action de formation des conducteurs de véhicules motorisés.

Pour les tués sans tiers en VAE, il faut étudier le lien entre le cycliste et sa machine plus précisément. On pourra consulter l'article de Hertach et al (2018) à ce propos. Il semblerait que la conduite des VAE soit spécifique. Le nombre de crashes sans tiers, beaucoup trop élevé, pose des questions. Pour les tués sans tiers en bicyclette classique, l'apprentissage de la conduite est essentiel. Par exemple, il n'y a eu aucun cycliste tué sans tiers et aucune collision mortelle avec un piéton entre 2011 et 2016 dans le Morbihan et le Finistère, qui sont des régions où les clubs sont actifs. Ceci montre que la bicyclette non motorisée est un moyen de transport sûr sur route, en l'absence de choc avec un véhicule motorisé. Le risque dépend donc du parcours choisi.

9 Performances et sécurité des vélos à assistance électrique

9A. Puissance fournie et vitesse suivant le type de vélo. Tout d'abord, pour fixer les idées du lecteur, nous allons donner un ordre de grandeur de la puissance nécessaire pour emmener une bicyclette à une vitesse donnée avec vent nul et chaussée ayant un bon rendement, par une température de 17 degrés Celsius. Nous prendrons deux catégories de bicyclettes (non motorisées): les vélos de course sans garde-boue avec pneus fins et les vélos de ville avec garde-boue ou VAE de ville. Ce calcul étant approximatif, la perte de rendement due à la transmission sera négligée. Les masses prises seront les suivantes: Le cycliste équipé aura ue masse de 63 kg, le vélo de course une masse de 9 kg, la bicyclette de ville une masse de 17 kg et le VAE une masse de 25 kg.

Puissance dépensée pour vaincre la pente. Elle est proportionnelle à la pente fois la masse totale. Si p est la pente est v la vitesse exprimée en km/h, elle est égale à $200pv$ pour le vélo de course, $222pv$ pour la bicyclette de ville et $244pv$ pour le VAE.

Puissance dépensée pour le roulement. Pour un vélo de course avec avec des pneus de 700x25, nous prendrons 1 Watt par km/h, soit 25 Watts à 25km/h. Pour un vélo de ville avec des pneus de 700x40, nous prendrons 2 Watts par km/h, soit 50 Watts à 25 km/h, et pour le VAE, qui a un poids total roulant supérieur, 2.2 Watts par km/h.

Puissance dépensée pour le frein aérodynamique. En partant de l'article de

Pigeau (2022) sur le frein aérodynamique, nous prendrons 108 Watts à 30 km/h pour un vélo de course. Ce frein est celui obtenu lors d'essais en soufflerie avec un cycliste homme de gabarit légèrement sous la moyenne, pouvant correspondre au poids choisi. Pour un vélo de ville ou un VAE de ville, nous prendrons 180 Watts pour le même gabarit. La puissance à développer pour vaincre le frein aérodynamique est proportionnelle au cube de la vitesse.

Ceci nous conduit aux formules suivantes. Si $P_0(v)$ est la puissance demandée sur un vélo de course pour rouler à la vitesse v (exprimée en km/h), $P_1(v)$ celle demandée pour un vélo de ville et $P_2(v)$ celle demandée pour un VAE,

$$(9.1)\quad P_0(v) = (1+200p)v+\frac{v^3}{250},\ P_1(v) = (2+222p)v+\frac{v^3}{150},\ P_2(v) = P_1(v)+(0.2+22p)v.$$

Ci-dessous un tableau donnant les puissances à développer en fonction de la vitesse sur terrain plat ou dans une montée avec une pente de 10%, pour chaque type de vélo. Sur la première ligne, sont indiquées le couple (vitesse, pente), la pente étant exprimée en % et la vitesse en km/h. Les puissances à fournir sont exprimées en Watts.

(v;p)	10;0	15;0	20;0	25;0	30;0	10;10	15;10	20;10	25;10
C63	14	28,5	52	87,5	138	214	328,5	452	587,5
V63	26,7	52,5	93,3	154,2	240	248,7	385,5	537,7	709,2
VAE63	28,7	55,5	97,3	159,2	246	272,7	421,5	585,7	769,2

Le tableau ci-dessus indique que, sur le plat, une bicyclette de course roule 5 km/h plus vite à effort égal. En particulier, la vitesse de 25 km/h reste accessible à des cyclistes de 70 ans et 30 km/h reste possible pour des hommes de 60 ans. Par contre sur une pente de 10%, rouler à 10 km/h demande autant d'effort que rouler à 35 km/h sur le plat, ceci avec une bicyclette assez légère et un cycliste sans surpoids. Quand aux vélos de ville, leur vitesse se situe entre 10 km/h et 20 km/h sur le plat, en fonction de l'âge du cycliste. Pour des cyclistes urbains jeunes, une vitesse souvent mesurée est 18 km/h.

Nous allons maintenant regarder les types de motorisation des VAE les plus fréquentes.

VAE à moteur dans le moyeu arrière. Le moteur ne bénéficie pas du système de changements de vitesse. En montée, si le cycliste ralentit trop, le moteur peine et le vélo risque de s'arrêter. Ce type de système force donc à rouler assez vite en montée, au moins 15 km/h, afin que le moteur travaille dans de bonnes conditions. La puissance fournie par le moteur se situe alors entre 360 Watts et 540 Watts, ce qui peut engendrer des problèmes de chauffe du moteur. Pour cette raison, le moteur a souvent une puissance nominale de 350 Watts. La tension est souvent de 36 Watts. Le bridage concerne l'intensité maximale du courant, qui est limitée à 20 Ampères, et donc la consommation

maximale en Watts est de 720 Watts. Le rendement est proche de 75% et, sur une période assez courte, le moteur peut développer 540 Watts.

VAE à moteur pédalier. Dans ce cas, le moteur est dans le pédalier. La transmission étant en aval, le moteur bénéficie du système de changements de vitesse du vélo. Le couple maximal se situe autour de 40 Nm, ce qui donne une puissance de 252 Watts à 60 tours/mn. Ce couple est très élevé, et sollicite donc fortement la transmission.

Comparons le couple d'un moteur pédalier à celui d'un cycliste sportif: la cadence de pédalage se situe autour de 90 tours/mn sur le plat. Avec un couple de 20 Nm, la puissance développée est égale à 188 Watts, ce qui permet de rouler à 33 km/h. On voit ici que le couple du moteur pédalier est deux fois plus élevé que celui d'un cycliste sportif encore assez jeune. En montée, assis, le cycliste peut ralentir la cadence de pédalage jusqu'à 70 tours/mn et augmenter son couple de pédalage pour atteindre 30 Nm. Il sera difficile de soutenir un effort supérieur longtemps. On voit ici que la puissance et le couple fournis par le moteur dépassent nettement ceux du cycliste sportif.

Dérapage de la roue arrière. Si le développement choisi est inadapté, cette puissance excessive peut facilement faire décrocher la roue arrière. Pour information, sur une chaussée un peu lisse et humide, le glissement de la roue arrière peut intervenir dès 250 Watts. Sur des gravillons et un terrain plat, le décrochage peut intervenir à moins de 100 Watts.

Puissance développée par un cycliste urbain. Ces cyclistes ne suivent pas un entraînement spécifique destiné à augmenter la puissance maximale aérobie. Ils développent en général 75 Watts en foncier (puissance que l'on peut maintenir sans limite de durée) et autour de 115 Watts en intensité (effort aerobie intense, possible pendant 20 mn). C'est deux fois moins qu'un cycliste sportif. La puissance de 75 Watts permet d'atteindre 18 km/h sur terrain plat, et 115 Watts permettent d'atteindre 22 km/h. Le cycliste roulera rarement au-dessus de cette vitesse. Le tableau montre que le moteur fournit plus d'effort que le cycliste sur le plat à 25 km/h (le moteur fournit 84 Watts si le cycliste en fournit 75). Sur une pente de 10% montée à 10 km/h, le moteur doit fournir 198 Watts si le cycliste en fournit 75. C'est donc le cycliste qui aide le moteur et non l'inverse. Il n'y a plus de lien réel entre le pédalage et l'adhérence, puisque le moteur fournit plus de 70% de la puissance. Les sensations, essentielles en bicyclette, sont totalement bouleversées. De plus le VAE, beaucoup trop lourd, ne permet pas vraiment de rattraper un dérapage et les vitesses pratiquées sont plus élevées.

En conclusion, l'impression donnée par le VAE est celle d'un véhicule plus technique que ce qu'on pourrait penser, moins maniable qu'une bicyclette, et souffrant sans doute de problèmes de tenue de route quand on sollicite trop le moteur.

9B. Evaluation de la dangerosité du VAE.

Nous ferons cette évaluation en nous servant des rapports Vias de 2019 à 2021 (voir Slootmans) sur les accidents de la route en Belgique et d'un article qui donne les nombre de crashes par kilomètre parcouru en fonction du type de vélo. Pour les VAE, nous prendrons la période 2018-2021, pour laquelle les enregistrements sont fiables et le rapport entre le nombre de tués et le nombre de blessés hosptialisés stable. Pour la bicyclette, comme la loi belge du 21 mai 2019 a amélioré les conditions de circulation pour les cyclistes, nous prendrons la période 2015-2019, moins sûre pour les vélos, et pour laquelle le rapport entre le nombre de tués et le nombre de blessés hosptialisés est stable. Le calcul ci-dessous n'avantage donc pas les bicyclettes.

Les chiffres sont les suivants: sur les 43532 cyclistes à bicyclette hospitalisés en urgence après accident pendant la période 2015-2019, 331 sont décédés, soit environ un tué pour 132 blessés hospitalisés. Sur les 7614 cyclistes en VAE hospitalisés en urgence après accident pendant la période 2018-2021, 117 sont décédés, soit environ un tué pour 65 blessés hospitalisés. Le rapport exact R vaut

$$R = \frac{43532 \times 117}{7614 \times 331} = 2.0209 > 2.00\,. \tag{9.2}$$

Regardons maintenant le nombre de cyclistes hospitalisés par kilomètre parcouru, en fonction de la catégorie. L'article de Schepers et al (2020) donne le taux d'hospitalisation par kilomètre parcouru en fonction de la catégorie. Les données proviennent de 13 hopitaux néerlandais. La table 4, page 6, prédit 1.63 fois plus de crashes avec hospitalisation pour les cyclistes en VAE par rapport aux cyclistes en bicyclette, avec un intervalle de confiance $I = [1.12; 2.36]$. La sévérité des crashes est, comme dans les statistiques belges, bien plus grande: 2.13 fois plus de blessés graves pour les cyclistes en VAE (c'est à dire avec une blessure dont l'AIS est au moins 2) que pour les cyclistes à bicylette (voir table 4 dans Schepers et al.).

Comme les données des rapports Vias concernent 7614 VAE au lieu de 292 dans l'article de Shepers et al (2020), nous prendrons le rapport R obtenu dans (9.2) pour les calculs. Soit R_1 le rapport entre le nombre de tués par kilomètre parcouru en VAE et le nombre de tués par kilomètre parcouru à bicyclette. Nous obtenons, comme valeur la plus vraissemblable de R_1, $R_1 = 1.63 \times R_0 = 3.26$. Comme intervalle de confiance I_1 pour R_1, nous obtenons $I_1 = [1.12\,R_0, 2.36\,R_0] = [2.24; 4.72]$.

En conclusion, le VAE est a priori plus de trois fois plus dangereux que la bicyclette, au mieux deux fois plus dangereux et, au pire, cinq fois plus dangereux. Nous allons maintenant nous intéresser aux accidents sans tiers. Pour cela, nous allons définir la dangerosité intrinsèque d'un véhicule.

Définition 9.1. Le risque intrinsèque mortel (RIM) par kilomètre est la probabilité de se tuer sans tiers par kilomètre parcouru. Le risque extrinsèque mortel (REM) par

kilomètre est la probabilité d'être tué avec tiers par kilomètre parcouru. Le risque global mortel (RGM) par kilomètre est la probabilité de se tuer avec ou sans tiers par kilomètre parcouru.

Comparons les risques relatifs mortels de la bicyclette et du VAE en prenant un risque mortel global du VAE égal à 3.20 fois celui de la bicyclette, avec les taux de port du casque suivants pour chaque catégorie: 66% pour les bicyclettes et 50% pour les VAE. Ces taux seront justifiés en section 10B pour la France. Nous supposons ici que les taux de port du casque en France et en Belgique sont proches dans chaque catégorie. Pour la bicyclette, le pourcentage de tués sans tiers calculé sur les quatre années 2018-2019-2020-2021 en partant du tableau de la section 6 se situe entre 15% et 16%. Nous prendrons 16% pour les calculs. Pour le VAE, le pourcentage de tués sans tiers est de 50%, par hypothèse. Le tableau ci-dessous donne les différents risques, sur une base de 1.00 pour les tués sans tiers à bicylette.

Risques par km	RIM	REM	RGM
Bicyclette	1.00	5.25	6.25
VAE	10.00	10.00	20.00

Le tableau montre qu'en l'absence de véhicules motorisés, le VAE est presque dix fois plus dangereux que la bicyclette. Regardons maintenant les risques relatifs par minute pour la catégorie des vélos urbains ou de trekking avec position assez droite. Pour ces vélos, le site https://www.commeunvelo.com/vitesse-velo/ donne une évaluation réaliste de la vitesse moyenne sur un parcours (arrêts non comptés). La vitesse moyenne est d'environ 15 km/h pour les bicyclettes urbaines et 19 km/h pour les VAE urbains. En supposant que les cyclistes en bicyclette de ville et ceux en bicyclette de course ont les mêmes risques, ceci conduit aux risques relatifs horaires suivants, sur une base de 1.00 pour la bicyclette de ville.

Risques horaires	RIM	REM	RGM
Bicyclette	1.00	5.25	6.25
VAE	12.66	12.66	25.32

Toujours en prenant un facteur 3.20 pour le rapport entre le RGM en VAE et le RGM en bicyclette, donnons maintenant la part du trafic et le pourcentage de tués par catégorie. Dans le tableau ci-dessous, sont indiqués le pourcentage du kilométrage effectué pour chaque catégorie ainsi que le pourcentage de tués pour l'année 2022.

Année 2022	Kilométrage (%)	Tués (%)
Bicyclette	75.14%	48.57%
VAE	24.86%	51.43%

Comme nous l'avons indiqué dans la Section 3D, le kilométrage effectué à bicyclette semble stable. Pour les vélos de course roulant uniquement sur route, il est possible qu'il y ait une légère baisse, mais cette baisse est, à notre avis, compensée par l'augmentation des ventes de vélos dits de gravel (proches des vélos de cyclo-cross), plus polyvalents. Le trafic engendré par ces vélos est très difficile à mesurer, car ils roulent souvent sur des routes communales ou sur des chemins ruraux sur lesquelles il n'y a pas de mesures, et beaucoup moins sur les pistes cyclables ou les routes départementales. Pour donner un ordre d'idée de la faiblesse des comptages sur le réseau secondaire, nous renvoyons à la carte des comptages routiers dans le Gers en 2019 (voir https://www.gers.fr/...). Sur cette carte, on peut constater qu'il n'y a eu aucun comptage sur la voirie communale.

D'après le tableau ci-dessus le kilométrage effectué en VAE représente environ 33% de celui effectué à bicyclette. Si le niveau de sécurité du VAE était identique à celui de la bicyclette, il y aurait eu en 2022 environ 39 tués en VAE, soit au total 158 tués au lieu de 245 tués. La surmortalité due au VAE dépasse donc 80 tués.

10 Prédictions pour la période 2023-2027

Avertissement (version 5). Les prédictions ci-dessous sont celles de la version 4. La méthode de prédiction ci-dessous ne tient pas compte des conditions météorologiques.

10A. Prédictions. Pour ces prédictions, nous supposerons que les départements ne continuent pas à relever les vitesses sur route à 90 km/h sur des routes départementales. Nous nous baserons sur le chiffre de 130 tués pour les cyclistes à bicyclette, valeur moyenne de nos estimations sur les quatres ans 2018,2019, 2021 et 2022. donc que les augmentations de vitesse décidées par les départements ne tuent que trois cyclistes. Le nombre de tués en VAE est estimé en considérant que l'augmentation du kilométrage effectué en VAE reste linéaire. Le nombre T_i de tués en VAE pour $i \geq 23$ est estimé avec la prédiction

$$\mathbb{E}(T_i) = \mathbb{E}(Z_i)/0.50 = (f_1(i) - f_0(i))/0.50 = 18.572(i - 15.74),$$

ce qui donne le tableau suivant:

Année	2023	2024	2025	2026	2027
Tués (bi)	130	130	130	130	130
Tués (vae)	135	153	172	191	209
Total	265	283	302	321	339

Si la vitesse était relevée à 90 km/h, conformément aux souhaits de certains élus, le nombre de tués à bicyclette reviendrait à 153 tués par an en moyenne, en raison d'une

augmentation de 12% du nombre de tués avec tiers. Le nombre de tués avec tiers en VAE augmenterait lui aussi, sans doute un peu moins car les VAE sont plus présents en agglomération. On peut estimer cette hausse à 10%, ce qui conduirait à une augmentation de 5% sur la catégorie VAE. Ci-dessous les projections correspondantes.

Année	2024	2025	2026	2027
Tués (90bi)	143	143	143	143
Tués (90vae)	161	181	201	219
Total (90)	304	324	344	358

Une question naturelle est de savoir si le port du casque obligatoire pour tout engin motorisé pourrait enrayer cette hausse.

10B. Influence du port du casque sur la mortalité.

Commençons par une mise en garde: ce qui suit concerne uniquement les accidents mortels. Nous nous fonderons sur l'article de Bíl et al (2018), qui répond à la question suivante: parmi les tués à bicyclette, combien au plus auraient été sauvés par le port du casque? Cet article est fondé sur un protocole d'autopsie rigoureux de chaque tué. Les résultats obtenus sont assez encourageants dans le cas des tués sans tiers ou des collisions à une intersection. En France, hors agglomération, seuls 16% des chocs mortels ont lieu dans une intersection. On peut donc considérer que ces collisions à des intersections ont lieu principalement en ville, et donc que les vitesses sont plus faibles. Voici un court résumé des résultats de Bíl et al (2018).

Tués sans tiers. En enlevant les chutes dans un torrent ou une rivière, 25 tués. Pour 12 tués, le casque n'aurait pas pu leur sauver la vie.

Tués en intersection. Il y a 33 tués dans cette catégorie, dont 16 n'auraient pas pu être sauvés par le port du casque.

Tués hors intersection. Il y a 50 tués dans cette catégorie, dont 38 n'auraient pas pu être sauvés par le port du casque.

Pour les tués sans tiers et les tués avec tiers en intersection (qui ont sans doute été tués en ville), le casque aurait pu aider à la survie dans 52% des cas, mais pour les tués avec tiers hors intersection, seulement dans 24% des cas. Pour donner un ordre de grandeur du bénéfice apporté par le casque, il faut encore donner un taux d'efficacité du casque vélo. Sur le site Certimoov de l'Unistra, les casques sont testés et obtiennent une note sur 5. Nous supposerons que le taux d'efficacité du casque est égal à $N/5$, si N est la note obtenue lors du test. Le nombre de casques testés au 21 Février 2023 est égal à 183. La note médiane est de 3/5, ce qui conduit aux estimations suivantes:

- Sans tiers ou avec tiers en intersection, avec un casque noté $N/5$, le casque sauverait la vie dans $(N/5) \times 52\%$ des cas, soit, avec un casque noté 3/5, dans 31.2% des cas.

- Avec tiers et hors intersection, avec un casque noté $N/5$, le casque sauverait la vie dans $(N/5) \times 24\%$ des cas, soit, avec un casque noté 3/5, dans 14.4% des cas.

Nous sommes maintenant en mesure de donner une estimation suivant la catégorie.
- Pour les bicyclettes, nous prendrons 16% de tués sans tiers, 36% de tués avec tiers en intersection et 48% de tués avec tiers hors intersection, ce qui conduit à un pourcentage de sauvés égal à $(N/5) \times 38.6\%$, soit, avec un casque noté 3/5, 23.2%.
- Pour les VAE, qui roulent un peu plus en ville (les intersections sont plus nombreuses en ville), nous prendrons 50% de tués sans tiers, 26% de tués avec tiers en intersection et 24% de tués avec tiers hors intersection, ce qui conduit à un pourcentage de sauvés égal à $(N/5) \times 45.3\%$, soit, pour un casque noté 3/5, 27.2%.

Regardons maintenant le taux de port du casque en fonction de la catégorie. Pour les bicyclettes de course, le port du casque s'est généralisé progressivement, avec une forte augmentation après le décès de A. Kivilev en 2003, à la suite duquel l'UCI a imposé le casque en compétition sur route pour les professionnels (pour les amateurs, cette obligation existait depuis au moins dix ans). Depuis, presque tous les cyclistes sportifs portent un casque. Le pourcentage de non port du casque constaté pour les tués à bicyclette n'a d'ailleurs pas dépassé 40% entre 2012 et 2016 (voir bilans ONISR). Pour les VAE, le taux kilométrique de port du casque (pourcentage de kilomètres effectués avec casque) se situe peut-être aux environs de 50%, comme en Suisse (voir Uhr et Hertach (2017), tableau 23, page 52). On note, en effet, dans les derniers bilans de la sécurité routière (de 2019 à 2021), que plus de 50% des tués portaient un casque. Ce chiffre est en augmentation constante, mais cela ne suffit pas à enrayer la hausse de la mortalité cycliste.

Nous sommes maintenant en mesure de donner une estimation pour chaque catégorie. Nous prendrons deux configurations: tous sans casque ou tous avec casque et nous les comparerons avec la situation actuelle. Calculons d'abord le taux kilométrique de port du casque dans chaque catégorie, c'est à dire le pourcentage de kilomètres effectués avec casque. Pour les VAE, nous prendrons le taux de la Suisse, soit $\tau_{vae} = 50\%$. Pour la bicyclette, le pourcentage de tués portant un casque est de 60%, l'efficacité du casque de 23.2%, et donc les taux kilométriques sont à peu près

$$\tau_{bi} = 60/(100 - 40 \times 0.232) \simeq (66/100) \quad \text{et } \tau_{vae} = (50/100).$$

Le taux de port du casque à bicyclette peut sembler élevé par rapport aux mesures effectuées en France en ville qui donnent un taux de 30% environ. Cependant ces mesures sont presque toutes faites dans des grandes villes, avec de nombreux cyclistes urbains. Les cyclistes sportifs, sur des bicyclettes de course, de cyclocross de gravel ou des VTT contribuent pour environ 60% du kilométrage à bicyclette (les cyclistes roulant plus de 10.000 km par an ne sont pas rares), avec un taux de port du casque de 90% (constaté

lors de nos sorties en milieu rural). Nous obtenons, avec ces hypothèses

$$\tau_{bi} = 0.30 \times 0.40 + 0.90 \times 0.60 = 0.66,$$

ce qui est le taux proposé. Dans le matériel supplémentaire M4, nous revenons sur les effets du port du casque à bicyclette pour la période 2009-2014 et nous montrons que les effets ne peuvent pas être évalués correctement si les vitesses ne sont pas prises en compte.

Nous sommes maintenant en mesure de donner les gains ou les pertes possibles par rapport à la situation actuelle. Ci-dessous un tableau donnant les coefficients multiplicateurs à appliquer avec comme base 1.00 pour la situation actuelle, en prenant les taux de port du casque ci-dessus, et une efficacité de $23,2\%$ pour la bicyclette et $27,2\%$ pour le VAE (plus présent en ville).

Port du casque	réel	0%	100%
Bicyclette	1.00	1.199	0.921
VAE	1.00	1.187	0.864

Nous pouvons observer que, dans les deux catégories, tous sans casque augmenterait de 20% environ le nombre de tués. Si le port du casque devenait obligatoire en 2024, pour les bicyclettes, le nombre de vies sauvées en 2024 serait $130 \times 0.079 = 10$ vies, soit moins que le gain de 14 vies environ obtenu depuis 2018 grâce à la limitation à 80 km/h. Si le casque devient obligatoire en VAE. en 2024, le gain pourrait être de $153 \times 0.136 = 21$ vies. Nous pouvons noter ici que, pour les cyclistes sportifs ayant des vélos de course, les gains ont eu lieu dans les années 2000.

Ci-dessous le tableau donnant les prédictions si le casque est rendu obligatoire en VAE au 01 Janvier 2024 et si les conditions actuelles sont maintenues (arrêt des relèvements de vitesse à 90 km/h). Nous supposons ici que cette mesure n'a aucun impact sur les kilométrages effectués dans chaque catégorie. Dans ce tableau, est aussi incluse une prédiction pour 2030 si le plan vélo 2022 réussit et si son succès est fondé sur l'essor du VAE, ainsi qu'une prédiction si le taux de port du casque à bicyclette est de 100% (cette hypothèse est notée 2030C dans le tableau) et une prédiction si tous les cyclistes à bicyclette roulent sans casque (2030S). Par succès du plan vélo, nous entendons la multiplication par deux du kilométrage effectué à vélo. Nous supposons pour 2030 que le kilométrage à bicyclette stagne et que le kilométrage effectué en VAE est égal à celui effectué à bicyclette.

Année	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2030C	2030S
Bicyclette	130	130	130	130	130	130	120	156
VAE (C 2024)	135	132	149	165	181	359	359	359
Total	265	262	279	295	311	489	479	515

Ce tableau montre une hausse de la mortalité stoppée en 2024, mais reprenant dès 2025, avec un franchissement de la barre des 300 tués en 2027. Si le succès du plan vélo a lieu et est dû seulement au VAE, alors le nombre de cyclistes tués en 2030 sera supérieur au nombre de piétons tués. Notons enfin que d'après la colonne 2030C, le VAE avec casque est exactement trois fois plus dangereux que la bicyclette avec casque, et, d'après la colonne 2030S, le VAE avec casque reste 2.30 fois plus dangereux que la bicyclette sans casque. Ces chiffres sont cependant à prendre avec précaution, car ils ne tiennent pas compte du type de vélo (course, VTT ou ville) pour les bicyclettes.

10C. Gains possibles à bicyclette avec un routage performant. Nous regarderons ici uniquement les bicyclettes. Pour les VAE, les accidents mortels sans tiers présumé sur des routes à faible gabarit et faible circulation sont nombreux (voir section 3), et donc les prévisions seraient différentes.

On peut estimer que le risque kilométrique d'être tué avec tiers hors agglomération et en agglomération est directement proportionnel au trafic. Nous regardons ici uniquement les trajets de loisir, qui représentent environ 75% des tués. Si un routage accessible à tous permettait de réduire en moyenne de 20% le trafic rencontré par un cycliste sur un trajet de loisirs, le gain serait de $120 \times 0.75 \times 0.2 = 18$ vies. On pourrait donc sauver environ 18 vies par an. C'est plus que le potentiel résiduel du casque pour la bicyclette, dont nous avons estimé qu'il se situait autour de 11 vies. Puisque ce routage n'existe pas vraiment, car les données de trafic sont peu accessibles, il est essentiel de planifier son voyage avec des cartes précises et en évitant soigneusement les zones à fort trafic.

11 Risque et vitesse pour les VAE

Commençons par la question suivante.

11A. Quelle est la vitesse moyenne à bicyclette en ville ou en balade? On peut trouver assez facilement des réponses de cyclistes amateurs à cette question. Par exemple, sur https://www.commeunvelo.com/vitesse-velo/, l'auteur du site se pose cette question.

Avec un vélo de ville ou un VTC, ou vélo de trekking, les vitesses moyennes sont assez proches: autour de 15 km/h pour aller au travail en ville, mais aussi 15 km/h en balade sur des petites routes pour une personne seule. En famille ou en couple, la vitesse se situe plutôt autour de 13 km/h. Ces vitesses moyennes sont obtenues à l'aide d'un compteur de vitesse pour vélo. La vitesse moyenne V_m se calcule avec la formule:

$$V_m = \text{ (distance totale parcourue / temps de roulage).}$$

Les arrêts (aux feux, à une intersection, pour faire une pause...) ne sont donc pas comptés. La vitesse instantannée n'est pas constante, mais varie entre 10 km/h et 18

km/h, sauf dans les descentes ou les côtes. Or un VAE peut rouler à 25 km/h sur presque tout le trajet. Il est évident que le risque en VAE sera majoré.

Dans ce qui suit, nous regarderons uniquement le risque de crash sans tiers.

11B. Le modèle puissance de Nilsson (2004). Le modèle puissance de Nilsson, introduit par Nilsson en 1982 après quinze ans de travail donne une dépendance très simple entre les crashes sans tiers et la vitesse, qui se résume ainsi: pour les crashes sans tiers, si v est la vitesse du cycliste

(i) Le risque kilométrique de crash avec blessures légères, graves ou mortelles est proportionnel à v^2.

(ii) Le risque kilométrique de crash avec blessures graves ou mortelles est proportionnel à v^3.

(iii) Le risque kilométrique de crash mortel est proportionnel à $v^{4.30}$.

L'exposant initial pour le risque de crash mortel était égal à 4.00. Il a été revu à la hausse après application aux données. Le fondement du modèle est dû aux limitations de vitesse imposées lors du passage de la conduite à gauche à la conduite à droite, qui a été accompagnée de limitations de vitesses temporaires. Les responsables de la sécurité routière ont observé une baisse, bien plus importante que prévu, du nombre de tués lors de ces périodes de limitation temporaire des vitesses, ce qui les a amenés à remettre en cause les modèles antérieurs.

Ce modèle fonctionne pour certaines vitesses pour les véhicules de tourisme et les deux roues motorisés. Il a été révisé par Elvik (2009). Pour les véhicules motorisés, il ne fonctionne pas parfaitement dans les zones résidentielles, sans doute en raison du fait que la vitesse est inférieure à 45 km/h dans ces zones. En effet, Elvik (2009, page 53) donne comme intervalle de vitesses pour sa validité l'intervalle $[12, 24]$ en m/s, ce qui correspond à $[43, 86]$ en km/h.

Pour les cyclistes, le niveau de protection passive est très faible. On peut donc penser que le modèle de Nilsson est correct à partir de 3.5 m/s, vitesse à partir de laquelle les fractures sont possibles. Rappelons ici que le cycliste chute souvent sur la chaussée, plus basse, ce qui aggrave les blessures. Ceci amène à penser que le modèle de Nilsson est valide dans l'intervalle de vitesses $[3.50, 7.00]$ en m/s, c'est à dire $[12.6, 25.2]$ en km/h.

Supposons le modèle de Nilsson vrai pour les crashes sans tiers de VAE, que ce soit avec casque ou sans casque. Prenons comme vitesse de base en VAE la vitesse $v_0 = 25$ km/h et déterminons la vitesse v_1 pour laquelle le risque de crash mortel sans tiers est identique à celui d'un cycliste à bicyclette. Notons $R(v)$ le RIM à la vitesse v. D'après le tableau de la section 9B donnant les RIM,

$$R(v_1) = 10.00(v_1/v_0)^{4.30} = 1.00 \quad \text{si } v_1 = 0.562 \times v_0 = 14.635 \text{ km/h}. \tag{11.1}$$

Quand au nombre de blessés graves hospitalisés, si N_0 est le nombre correspondant à la vitesse v_0 et N_1 le nombre correspondant à v_1, alors

$$N_1 = N_0(v_1/v_0)^3 = 0.2006 \times N_0. \tag{11.2}$$

On réduirait donc le nombre de blessés graves de 80% en limitant la vitesse maximale de l'assistance à une vitesse proche de v_1. Revenons maintenant sur les chiffres de la sécurité routière belge. Pour les crashes sans tiers sans blessures ou avec blessures légères (blessures AIS 1 sur l'échelle AIS), le cycliste rentre le plus souvent chez lui par ses propres moyens. Donc il est légitime de penser que seuls sont enregistrés les accidents sans tiers de cyclistes avec au moins une blessure dont l'AIS est au moins 2, c'est à dire les blessés graves (seriously injured). D'après le modèle de Nilsson, le risque de blessures graves est proportionnel à v^3, et donc la formule (11.2) s'applique. Si nous reprenons les chiffres des autorités belges, en admettant que la proportion de tués sans tiers parmi les accidentés sans tiers enregistrés est la même que la proportion globale, soit 1/65, et que les blessures graves sont dues à l'utilisation maximale de l'assistance, le passage à la vitesse v_1 permettrait, d'après le modèle de Nilsson, de passer à une proportion de $1/(65 \times 10 \times 0.2006) = 1/130$ tués. Ce taux redevient celui des cyclistes à bicyclette qui est de 1/132 (voir sous-section 9B).

Quelle vitesse maximale pour l'assistance? Remarquons d'abord que la vitesse v_1 obtenue est celle d'un cycliste avec vélo de ville en balade. Cette vitesse est très proche de 15 km/h. Or la vitesse de 15 km/h est largement suffisante en côte. Par exemple, si la pente est de 10%, la puissance nécessaire pour emmener le VAE à 15 km/h est de 420 Watts, et dépasse donc largement la puissance nominale continue, qui est de 250 Watts. Sur une côte un peu longue, même avec une pente plus faible, comme par exemple la côte de l'Hautil à Triel sur Seine (2.5 km pour 145 mètres de dénivelé), les vitesses moyennes observées pour les vélos de course non motorisés sont de l'ordre de 15 km/h. Donc, limiter l'assistance à 15 km/h est suffisant pour monter des côtes ou éventuellement des cols.

11C. Chutes tête la première et casque. Sauf choc violent, il semble peu probable de se tuer sans que la tête ait heurté le sol. De là vient l'idée d'étudier les chutes sans tiers tête la première, qui ont le plus souvent lieu quand le cycliste passe par dessus son guidon (l'expression consacrée est "faire un soleil"). Dans l'article de Hertach et al (2018) consacré aux crashes sans tiers, un questionnaire (voir tableau 4) rempli par 638 cyclistes en vélo électrique (dont 55% de VAE et 45% de vélomoteurs limités à 45 km/h) a donné les résultats suivants: les réponses multiples étant autorisées, 219 cyclistes (34%) ont mentionné une perte d'équilibre, 165 cyclistes (26%) un freinage excessif, 144 une route en mauvais état (23%), 17 participants (2.7%) un problème de santé. Pour les blessures sévères, le sur-risque de ceux qui mentionnent un problème de santé est important (voir

table 5), mais cependant les blessés graves en raison de problèmes de santé constituent moins de 9% des blessés graves.

Le questionnaire comporte de nombreuses autres questions. A priori la perte d'équilibre provoque plutôt une chute latérale. Dans ce cas l'épaule touche avant la tête. L'usage du seul frein arrière ne peut pas provoquer de chute tête la première. La perte d'adhérence de la roue arrière conduit dans ce cas encore à une chute latérale. Par contre le passage de la roue avant dans un trou ou sur un caillou, sur un animal, ainsi que la percussion d'un obstacle tel qu'une bordure de trottoir, un plot par la roue avant ou un mauvais dosage du frein avant peuvent conduire à une chute tête la première. Compte tenu du nombre élevé de réponses au questionnaire mentionnant un freinage excessif ou un mauvais état de la chaussée, il semble naturel de penser que de telles chutes existent en VAE. Enfin le poids du VAE empêche de décoller la roue avant en dernier recours quand on n'a pas vu le trou et sa faible maniabilité limite la possibilité d'éviter le trou à la dernière seconde. Un exemple d'accident grave est mentionnée dans LADEPECHE.fr. Le vélo impliqué dans l'accident était un VAE avec roues de 20 pouces, moteur dans le moyeu avant et batterie sur le porte-bagages arrière, avec freins sur jante de type V-brakes. Le faible diamètre des roues rend ce type de VAE très instable en cas de passage dans un trou. De plus le poids élevé à l'avant ne permet pas de décoller la roue avant. Le cycliste a mentionné la présence de trous dans la chaussée et pense avoir chuté lorsque sa roue avant est passée dans un trou. Il indique aussi avoir fait un soleil.

Commençons par les chutes libres tête la première. L'expérience est la suivante. La personne est lachée en position verticale tête en bas, la tête à une distance h de la surface à l'instant $t = 0$. Si $z(t)$ est la distance de la tête à la surface à l'instant t, alors, en prenant $g = 10$,

$$z(t) = h - 5t^2, \quad \text{donc } z(t) = 0 \ \text{ si } t = t_0 := \sqrt{h/5}, \quad \text{et } v(t_0) = 10t_0 = \sqrt{20h}. \tag{11.5}$$

Les vitesses sont ici exprimées en mètres par seconde. Inversement, la hauteur $h(v)$ correspondant à une vitesse d'impact égale à v vaut $v^2/20$. Dans le tableau ci-dessous, nous donnons les hauteurs pour des vitesses d'impact en lien avec la résistance du corps humain.

vitesse	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
hauteur	0.61	0.80	1.01	1.25	1.51	1.80	2.11	2.45	2.81

La limite sans casque se situe autour de 3.0 m/s: elle correspond à une hauteur de 45 cm. Il est admis que le casque offre une protection sûre jusqu'à 5.5 m/s lors d'un choc non oblique (plongeon vertical), ce qui correspond à une hauteur de 151 cm. Au dessus, l'efficacité diminue progressivement. Les casques sont souvent testés pour une chute verticale d'une hauteur de 2.00 mètres. Contrairement à certaines affirmations, ils ne

sont pas testés avec une vitesse d'impact de 7 m/s, qui correspond à une hauteur de 2.45 m et non 2.00 mètres.

Dans les chutes à vélo, la composante horizontale de la vitesse intervient aussi, même si le casque glisse plus ou moins sur le sol. En fait le choc est oblique, et la vitesse v_c d'impact lors d'un choc vaut

$$v_c = \sqrt{v_z^2 + v_x^2}, \tag{11.6}$$

formule dans laquelle v_x est la composante horizontale et v_z la composante verticale lors du choc sur le sol. Nous prendrons ensuite, pour simplifier encore le modèle,

$$v_z = \sqrt{10h} \ \text{ et } v_x = v, \tag{11.7}$$

avec comme valeur de h, la hauteur maximale de la tête quand le cycliste fait soleil et v la vitesse du vélo au moment de la chute. Soit alors h_e la hauteur correspondant à v_e pour un plongeon vertical tête la première. En partant de (11.6) et (11.7), nous obtenons

$$v_c = \sqrt{20h + v^2} \ \text{ et } \ h_c = h + 0.05 \times v^2, \tag{11.8}$$

avec un angle de choc θ défini par

$$\tan\theta = (20h)^{-1/2} v. \tag{11.9}$$

Pour la hauteur maximale de la tête quand le cycliste fait soleil, nous nous fonderons sur la position du cycliste montrée sur le site officiel du gouvernement français
https://www.securite-routiere.gouv.fr/reglementation-liee-aux-modes-de-deplacements/velo/equipements-obligatoires-velo
pour les cyclistes urbains, et sur des photographies de coureurs pour les vélos de course. En cas de bascule la hauteur maximale de la tête est obtenue quand la tête passe à la verticale de l'axe de la roue avant. Si le cycliste ne fléchit pas les bras (ou reste bras presque tendus, comme sur le site officiel), cette hauteur est égale à la distance initiale de la tête à l'axe de la roue avant plus le demi-diamètre du pneu. Nous obtenons ainsi, comme hauteur h_u pour un(e) cycliste urbain d'une taille d'environ 172 cm,

$$h_u = 1.55 + 0.35 = 1.90\, m \tag{11.10}$$

Pour un cycliste sur un vélo de course, nous noterons h_{cb} la hauteur obtenue par le même calcul (pas de flexion des bras lors de la chute) avec mains en bas du guidon et h_{ch} la hauteur obtenue avec les mains en haut sur les leviers de freins. Nous obtenons ainsi

$$h_{cb} = 0.95 + 0.35 = 1.30\, m \ \text{ et } h_{ch} = 1.05 + 0.35 = 1.40\, m. \tag{11.11}$$

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons les vitesses d'impact et les angles d'impact (l'angle nul correspond à un plongeon vertical sur une surface horizontale) en fonction

de la vitesse v du cycliste pour chaque hauteur. Dans les cases du tableau, sont données les couples $(v_c\,;\,\theta)$.

v	0	3	6	9	12
h_u	(6.2 ; 0)	(6.9 ; 26)	(8.6 ; 44)	(10.9 ; 56)	(13.5 ; 63)
h_{ch}	(5.3 ; 0)	(6.1 ; 30)	(8.0 ; 49)	(10.4 ; 60)	(13.1 ; 66)
h_{cb}	(5.10 ; 0)	(5.9 ; 30)	(7.9 ; 50)	(10.3 ; 60)	(13.0 ; 67)

Le casque protège indiscutablement des fractures craniennes et est donc indispensable. Cependant la protection pour les commotions cérébrales est beaucoup moins bonne. D'après Bliven et al. (2019), le casque fonctionne correctement pour les commotions aux vitesses inférieures à 5 m/s. sous tous les angles de 0 à 30 degrés (voir Bliven et al. pour d'autres références sur ce sujet). Mais, avec une vitesse de choc de 6.2 m/s et un angle de 45 degrés, pour la plupart des casques homologués, la probabilité de commotion cérébrale est de 0.59 (voir Bliven et al. (2019), abstract). Cette vitesse de 6.2 m/s correspond à une hauteur de chute de 1.92 m. Nous pouvons observer que les vélos de course sont mieux adaptés aux chutes et donnent de bonnes chances d'éviter la commotion cérébrale jusqu'à 3 m/s. Pour un vélo urbain, cette chute est une mauvaise chute avec rique élevé de commotion cérébrale dans tous les cas. C'est la chute à éviter à tout prix.

Regardons maintenant le cas d'un VAE de ville. Si le cycliste fait soleil à 6 m/s, ce qui correspond à 21.6 km/h, la vitesse d'impact v_c est $v_c = 8.60$ m/s et correspond à $h_c = 3.70$ m. L'angle est de 44 degrés. La plus mauvaise configuration est celle d'un choc frontal sur l'avant du crane (voir Bliven et al. (2019), figure 3), car, dans ce cas, le cycliste a peu de chances de faire un tour complet. Avec une telle vitesse et cette orientation de la tête, le risque mortel est très élevé, même avec casque.

Pour conclure, notons que le risque de faire soleil à une vitesse moindre que 3.5 m/s est très faible, car, à cette vitesse la roue ne fait pas plus d'un tour complet lors du freinage (voir Annexe B sur le freinage). Sur cet exemple de la chute par dessus le guidon, nous observons donc une croissance très forte du risque mortel quand la vitesse passe de 3.5 m/s à 7.00 m/s. Le risque de faire soleil augmente fortement, et le risque d'une blessure mortelle à la tête encore plus.

11D. Bascule vers l'avant en biais. Dans cette sous-section, nour regardons le cas un peu plus favorable d'une bascule en biais par dessus le guidon. Si la tête touche en premier l'impact est plutôt sur le côté du casque. Dans ce cas, des systèmes anti-rotation comme le système MIPS, peuvent réduire la composante horizontale de la décélération. Nous supposerons ici que la composante horizontale de la décélération est divisée par deux. Pour les hauteurs, nous prendrons trois hauteurs différentes. Pour un vélo de course avec un cycliste de taille moyenne (la taille prise est 172 cm), $h_c = 1.35\,m$, pour

un cycliste urbain de taille moyenne $h_u = 1.80$, et pour un cycliste de grande taille $h_{ug} = 2.00\,m$ (la taille prise est 192 cm). Ici nous ne calculerons pas les angles, et nous prendrons comme base de calcul pour la décélération, avec v comme vitesse du cycliste,

$$v_a^2 = 20h + (v^2/2) \text{ et } h_a = 0.05v_a^2. \tag{11.12}$$

Ci-dessous le tableau donnant les valeurs de h_a en fonction de v et de h.

$h \setminus v$	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
1.35	1.75	1.86	1.98	2.11	2.25	2.41	2.58
1.80	2.20	2.31	2.43	2.56	2.70	2.86	3.03
2.00	2.40	2.51	2.63	2.76	2.90	3.06	3.23

Pour que h_a reste inférieur à 2.45 m, la vitesse maximale est d'environ 15 km/h pour un cycliste urbain de grande taille, de 18 km/h pour un cycliste urbain de taille moyenne et de 24 km/h pour un vélo de course avec un cycliste de taille moyenne. Nous pouvons ici remarquer que la protection apportée par le casque est insuffisante en VAE urbain: dès 5.5 m/s, c'est à dire à peine 20 km/h, le risque mortel existe. Enfin, pour une percussion d'un obstacle vertical tel qu'un arbre ou un poteau tête la première, le risque mortel existe dès 25 km/h. Entre 20 et 25 km/h des lésions cérébrales peuvent survenir, même avec casque.

En résumé le vélo de course offre un net avantage en cas de chute, même si les vitesses supérieures à 24 km/h peuvent poser problème. Pour les cyclistes urbains, la taille est un facteur de risque pour les fractures et les chocs à la tête. La situation est particulièrement défavorable pour les hommes de grande taille avec une position droite, avec un risque élevé dès 15 km/h. Enfin, à partir de 15 km/h, il faut rester au moins à un mètre de tous les obstacles verticaux pour ne pas les percuter en cas de chute.

L'harmonie naturelle à bicyclette, rompue par le VAE de villle. Comparons les vélos de course et les vélos de ville à l'aide du tableau ci-dessus et du tableau de la section 8 sur la relation entre puissance et vitesse. Le tableau de la section 9A montre que, sur terrain plat, à effort égal, un vélo de course a une vitesse supérieure d'un peu plus de 5 km/h par rapport à un vélo de ville, soit 1.5 m/s. Le tableau ci-dessus donne, par exemple, $h_a = 2.41$ m pour un vélo de course roulant à 6.5 m/s (ou 23.4 km/h) et $h_a = 2.43$ m pour un vélo de ville roulant à 5 m/s (ou 18.0 km/h). Le niveau de protection est exactement le même à effort égal. Mais pour un VAE de ville roulant à 6.5 m/s, $h_a = 2.86$ m, hauteur de chute supérieure à un étage et donc potentiellement mortelle.

11E. Réduire les risques du VAE. Le problème majeur est qu'aucun cycliste en VAE ne croira qu'une vitesse de 25 km/h sur un terrain presque plat est excessive. En effet, les conducteurs sous-estiment presque toujours les effets de la vitesse sur le risque de

blessure. De plus ils n'ont aucune idée du fait que le risque d'être tué augmente plus avec la vitesse que le risque d'être blessé (voir Elvik (2009), sous-section 6.4.2 pour plus de détails). Pour le VAE, qui est le plus lent des véhicules motorisés, il est fort probable que le risque soit encore beaucoup plus sous-estimé. Donc le e-cycliste aura tendance à rouler à la vitesse maximale permise par l'assistance, sans penser qu'il peut se tuer sans tiers. Toute campagne de responsabilisation lui enjoignant de faire attention aux autres n'aura pas d'effet sur les accidents mortels sans tiers, beaucoup plus nombreux qu'à bicyclette.

Pour comprendre la mesure de cette perversion des esprits par la vitesse, il faut remonter à la circulaire du 22 février 1896, adressée aux prefets: "Le cycliste doit rouler à une allure modérée dans les agglomérations, aux carrefours et tournants. L'allure modérée doit être entendue d'une vitesse telle que le cycliste puisse au besoin arrêter sa machine dans l'espace de 4 à 5 mètres". Cette distance d'arrêt était destinée à protéger les piétons. En 1896, on estimait à 10 km/h la vitesse maximale permettant cette distance d'arrêt. Notons que, en 1896, la vitesse limite pour les automobiles était de 12 km/h à Paris.

Regardons la distance d'arrêt d'un vélo moderne, avec un cycliste dans une position non optimale (pas de recul pour améliorer le freinage). Dans ce cas la décélération maximale lors du freinage est d'environ $0.30g$. En prenant $g = 10$ et un temps de réaction de 0.50 seconde, nous obtenons un distance d'arrêt $d = 4.98$ mètres à la vitesse de 15 km/h. Comme les piétons n'entendent souvent pas les cyclistes arriver, cette vitesse de 15 km/h doit aussi être retenue pour la sécurité des piétons. Cependant, aucun cycliste en VAE ne pensera à réduire sa vitesse, puisque les véhicules motorisés roulent plus vite.

En l'absence de limitation du développement, la seule possibilité pour réduire le risque mortel en VAE et limiter les accidents avec les piétons est de brider les VAE à 15 km/h. Dans un second temps, il sera possible de brider les VAE existants en reprogrammant l'électronique. Si la réglementation européenne avait limité l'assistance à 15 km/h, le nombre de morts en VAE pour l'UE aurait été divisé par trois. Par exemple, en France, d'après notre estimation, au lieu de 408 tués sur la période 2016-2022 (voir section 6), il y aurait eu moins de 150 tués, soit plus de 250 vies sauvées. Sur toute l'UE, au moins mille vies auraient été sauvées.

12 Modélisation des risques intrinsèques

Dans cette section, nous faisons une tentative de modélisation de la gravité moyenne des blessures en fonction de la vitesse et de la position du cycliste.

D'abord nous allons donner une formule pour le nombres de chutes sans tiers. Rappelons que, dans le modèle de Nilsson (2004), le risque de chute sans tiers est proportionnel à v^2. Rappelons que, pour une chute libre d'une hauteur h, la vitesse d'impact v satisfait $v^2 = 20h$. Soit R_0 le risque de chute. Nous prendrons

$$R_0 = cv^2, \tag{12.1}$$

la constante c dépendant du type de vélo. et de la position du cycliste. Pour un cycliste urbain, quand la vitesse passe de 15 km/h (vitesse moyenne d'une bicyclette de ville) à 19 km/h (vitesse moyenne d'un VAE), le risque de chute par km est multiplié par 1.60, ce qui est compatible avec la différence observée dans Shepers et al. (2020), entre les bicyclettes et les VAE (rapport observé de 1.63).

Regardons maintenant la gravité de la chute. On note $\mathbb{I}_C$ la fonction qui vaut 1 si le cycliste porte un casque et 0 sinon. Si A_t est la valeur dans l'AIS (Abbreviated Injury Scale) d'une blessure à la tête, nous prendrons

$$\mathbb{E}(A_t^2) = \beta(h + 0.05v^2 - 1.50\,\mathbb{I}_C). \tag{12.2}$$

pour $h \geq 1.30$ et $v \geq 2$ (le casque protégeant bien jusqu'à une hauteur de chute de 1.50 m, nous retranchons cette valeur en cas de port du casque).

Le score ISS (injury severity score) est fondé sur la formule $S = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2$, les nombres A_1, A_2 et A_3 correspondant aux trois blessures les plus graves, mesurées avec l'AIS (abbreviated injury scale). A titre d'exemple, une fracture du fémur et une fracture à l'épaule simple donnent un score ISS égal à $3^2 + 2^2 = 13$. Pour le score ISS moyen, que nous noterons J, nous supposerons que, dans le cas d'un cycliste sans casque roulant à 6 m/s, la tête contribue pour la moitié au score ISS, et que pour l'autre moitié le score est proportionnel au carré de la vitesse, c'est à dire

$$J = \beta G, \text{ si } G = G_1 + G_2 \text{ avec } G_1 = \beta(h + 0.05v^2),\ G_2 = \gamma v^2$$

et $G_1 = G_2$ si $v = 6.00$. Après calcul, nous obtenons ainsi $\gamma = 0.10\,v^2$, ce qui conduit à la formule

$$G = h + 0.15v^2 - 1.50\mathbb{I}_C. \tag{12.3}$$

La quantité G sera nommée gravité moyenne des blessures. Nous donnons ci-dessous les valeurs de G., en fonction de la vitesse et du port du casque. Dans le tableau ci-dessous G_s est la gravité moyenne sans casque, et G_c la gravité moyenne avec casque, toujours pour un cycliste urbain avec une position redressée ($h = 1.80$ m).

v	15 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
G_s	4.40	4.76	5.55	6.43	9.03
G_c	2.90	3.26	4.05	4.93	7.53

Nous observons ici que passer de 15 km/h à 20 km/h, à réflexes et qualité de conduite égaux, augmente considérablement la gravité des blessures. De plus le nombre de chutes augmente considérablement, ce qui conduit à encore plus d'hospitalisations. Définissons maintenant le facteur H d'hospitalisation ou de coût hospitalier par

$$H = c_0 R_0 G. \tag{12.4}$$

Dans le tableau ci-dessous, H_s désigne ce facteur en cas de non port du casque et H_c ce facteur en cas de port du casque, toujours sur un vélo urbain ou un VAE urbain avec $h = 1.80$ m. Nous donnons les facteurs H kilométriques $H/km.$ et les facteurs H horaires par heure de vélo H/he, sur une base de 1.00 pour une vitesse de 15 km/h sans casque.

Vitesse	15 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
H_s/km	1.00	1.23	1.81	2.60	5.70
H_c/km	0.66	0.84	1.32	1.99	4.75
H_s/he	1.00	1.31	2.17	3.47	9.50
H_c/he	0.66	0.90	1.58	2.65	7.92

Nous pouvons observer que les hospitalisations augmentent rapidement avec la vitesse ainsi que la gravité des blessures, ceci même avec le casque. Cette étude concerne cependant uniquement les cyclistes urbains.

13 Evolution de l'âge des cyclistes tués et VAE

Dans cette section nous séparons les cyclistes tués en deux catégories d'âge: la catégorie 54 ans et moins et la catégorie 55 ans et plus. De 2001 à 2008 les documents de travail de l'ONISR, scannés et mis en ligne sur le site de de l'ONISR, donnent le nombre de cyclistes tués par catégorie d'âge. A partir de 2009, ces chiffres sont donnés dans les bilans de l'année. Nous noterons T_0 le nombre de tués dans la tranche d'âge $[0, 14]$ ans T_1 le nombre de tués dans la tranche $[15, 54]$ et T_2 le nombre de tués de 55 ans au moins. Le nombre I est le nombre de tués dont l'âge est inconnu. Une indication métérologique sur la belle saison est ajoutée en bas de tableau. C désigne une ou des canicules, S une sécheresse marquée, P une belle saison pluvieuse, V des vents élevés et Ins un temps instable. Nous noterons aussi B un bel été. On pose

$$R = T_2/T_1. \tag{13.1}$$

Ci-dessous les tableaux donnant les valeurs de T_1, T_2, I et R pour la période $2001-2018$, le premier pour 2001-2009,

An	01	02	03	04	05	06	07	08	09
T_0	22	21	20	21	12	14	11	16	13
T_1	94	76	77	75	75	63	69	58	64
T_2	124	110	89	71	93	103	61	74	85
I	2	4	4	0	0	1	1	0	0
R	1,319	1,447	1,156	0,947	1,240	1,635	0,884	1,276	1,484
Mét.	-	S	C	Ins+V	-	S	P	-	B

et le second pour 2010-2018 ($I = 0$ à partir de 2008).

An	10	11	12	13	14	15	16	17	18
T_0	12	13	11	10	16	6	10	5	9
T_1	53	60	68	53	52	57	59	68	56
T_2	82	68	85	84	91	86	93	100	110
R	1,547	1,133	1,250	1,585	1,750	1,509	1,576	1,471	1,964
Mét.	S	P	-	B	S	-	-	-	S

On constate que T_1 baisse assez régulièment, avec des fluctuations assez faibles, alors que T_2 baisse dans un premier temps puis remonte fortement en fin de période, avec des fluctuations assez fortes en début et milieu de période. La plus forte variation de T_2 se situe entre 2006 et 2007, avec une baisse de 46%. Comme conséquence le rapport R fluctue beaucoup jusqu'en 2013, puis monte ensuite anormalement, jusqu'à atteindre 1.964 en 2018, valeur jamais atteinte auparavant.

Cyclistes âgés et conditions météorologiques. Pour les 55 ans et plus, le cyclisme de loisir domine très largement. De plus, pour les retraités la gestion du temps est différente, leur permettant de rouler durant toute la belle saison (de mai à septembre principalement). Se pose alors la question de l'influence de conditions métérologiques défavorables sur le kilométrage effectué par cette catégorie. Par conditions météorologiques défavorables, nous entendons la pluie, des vents trop forts, ou une chaleur excessive, plus difficile à supporter pour les cyclistes de 55 ans et plus. Nous renvoyons à meteo-paris.com pour les indications ci-dessous. Après un été trop chaud en 2003, la saison 2004 a été marquée par un temps instable et venteux, avec peu d'épisodes de beau temps: même si les températures de l'été 2004 sont dans la moyenne, les conditions furent mauvaises pour le cyclisme. A l'opposé, 2006, 2010, 2014 et 2018 ont été des années de grande sécheresse très favorables à la pratique du cyclisme. On constate immédiatement que les années de sécheresse à la belle saison correspondent à des maximas locaux de R, alors que celles où l'éte a été mauvais correspondent à des minimas locaux de R. De plus les années de

sécheresse reviennent tous les 4 ans. De même, sur une période de 4 ans, on trouve un été médiocre. Il semble donc judicieux de regrouper 4 années consécutives, pour supprimer les fluctuations dues aux condition météorologiques.

Ci-dessous les tableaux correspondants, avec les effectifs sur quatre ans et la valeur de R associée. Nous limiterons les dates à 2013, dernière année avec peu de VAE.

Ans	[1,4]	[5,8]	[9,12]	[2,5]	[6,9]	[10,13]
T_0	84	53	49	74	54	46
T_1	322	265	245	303	254	234
T_2	394	331	320	363	323	319
R	1,224	1,249	1,306	1,198	1,272	1,363

Pour tous les choix de période le rapport R est croissant. On note cependant que la seconde valeur est inférieure à la moyenne des deux autres, ceci étant plus marqué pour la période $[1, 12]$. Les trois points de la période $[2, 13]$ sont mieux alignés, avec une pente moyenne plus forte. En choisissant la période allant de 2002 à 2013, la droite des moindres carrés construite sur les trois valeurs correspondantes a pour équation

$$\hat{R}(k) = 1.4635 + 0.0207(k - 16.50). \tag{13.2}$$

Regardons maintenant les valeurs de R pour les enregistrements faits sur les VAE. Seules les données 2021-2022 sont exploitables, en raison de la non séparation faite en 2019-2020 pour les tranches d'âge, entre bicyclette, VAE et EDP. Dans le tableau ci-dessus les tués par classe d'âge en VAE, et le rapport empirique R égal au nombre de tués de 55 ans et plus sur le nombre de tués dans la tranche 15-54 ans.

Année	[0,14]	[15, 54]	[55, 110]	R
21	0	5	20	4,000
22	1	9	33	3,667
21-22	1	14	53	3,786

On peut noter que le rapport R pour les VAE est au moins deux fois plus élevé que celui pour les bicyclettes sans moteur. Ceci traduit le fait que les cyclistes en VAE sont beaucoup plus âgés en moyenne que les cyclistes à bicyclette (sans moteur). Nous allons supposer que les enregistrements faits donnent un estimateur sans biais de l'âge des tués en VAE, pour les cyclistes de 15 ans et plus. Nous n'estimerons pas le nombre de tués dans la tranche 0-14 ans. Le modèle est le suivant. Soit N_1 le nombre de tués en VAE dans la tranche 15-54 ans et N_2 le nombre de tués en VAE dans la tranche 55 ans et plus. les variables N_1 et N_2 sont indépendantes et de lois de Poisson respectives $\mathcal{P}(\lambda_1)$ et $\mathcal{P}(\lambda_2)$, avec $\lambda_2 = R_{vae}\lambda_1$. Pour chaque VAE, la probabilité d'enregistrement comme bicyclette est égale à $1 - p$, ceci quelque soit l'âge du cycliste en VAE tué. Sous ces conditions, si

S_1 et S_2 sont les nombres de tués en VAE enregistrés pour les tranches d'âge respectives 15-54 ans et 55 ans et plus, alors les variables S_1 et S_2 sont indépendantes et de lois respectives $\mathcal{P}(p\lambda_1)$ et $\mathcal{P}(p\lambda_2)$. Il en résulte que la loi de S_1 sachant $(S_1 + S_2 = n)$ est la loi binomiale $B(n, \beta)$ avec $\beta = 1/(1 + R_{vae})$ (noter que $R_{vae} = (1 - \beta)/\beta$). Soit alors

$$\hat{\beta} = S_1/(S_1 + S_2). \tag{13.3}$$

Avec le modèle choisi, $\hat{\beta}$ est un estimateur sans biais de β. Sur les données disponibles correspondant aux deux années 2021 et 2022,

$$\hat{\beta} = 14/(14 + 53) = 14/67. \tag{13.4}$$

Nous allons maintenant donner des estimations du nombre de tués en VAE pour deux périodes: la période 2015-2018 et la période 2021-2022.

Période 2015-2018. Pour cette période, il n'y a pas d'enregistrements officiels. Soit alors Z_1 et Z_2 le nombre de cyclistes non motorisés tués sur cette période dans les tranches d'âge respectives 15-54 ans et 55 ans et plus, et N_1 et N_2 le nombre de cyclistes en VAE tués sur cette période dans les tranches d'âge respectives 15-54 ans et 55 ans et plus. Alors

$$Z_1 + N_1 = 240 \quad \text{et} \quad Z_2 + N_2 = 389. \tag{13.5}$$

Soit $Z = Z_1 + Z_2$ et $N = N_1 + N_2$. Nous supposons que Z_1, Z_2, N_1, N_2 sont indépendantes, et de lois de Poisson, Z_1 ayant pour distribution la loi $\mathcal{P}(\nu_1)$ et Z_2 la loi $\mathcal{P}(\nu_2)$, avec $\nu_2 = R_{bi}\nu_1$. sous les hypothèses ci-dessus, la loi de N_1 sachant $(N = n)$ est la loi binomiale $B(n, \beta)$. En remplaçant β par $\hat{\beta}$, et R_{bi} par la prédiction $\hat{R}(16.5) = 1.4635$ donnée par (13.2), on obtient alors l'équation

$$240 = Z_1 + N_1 = Z_1 + \hat{\beta}N \quad \text{et} \quad 389 = Z_2 + N_2 = \hat{R}(16.5)Z_1 + (1 - \hat{\beta})N \tag{13.6}$$

de laquelle on tire

$$N = \frac{389 - \hat{R}(16.5)240}{1 - (1 + \hat{R}(16,5))\hat{\beta}} = 77.81 \simeq 78. \tag{13.7}$$

Nos estimations donnent donc environ 78 tués en VAE sur cette période. La méthode de la section 6 donne 70 tués en VAE pour la période 2016-2018. Comme notre estimation fondée sur l'âge inclut les tués en VAE en 2015, les résultats obtenus sont parfaitement en adéquation avec ceux de la section 6 (fondés sur les tués sans tiers).

Période 2021-2022. Pour la période 2021-2022, les quantités N_1 et N_2 représentent les tués en VAE dans les tranches d'âge respectives 15-54 ans et 55 ans et plus enregistrés par erreur dans la catégorie bicyclette. et Z_1 et Z_2 le nombre de cyclistes non motorisés tués sur cette période dans les tranches d'âge respectives 15-54 ans et 55 ans et plus, comme pour la période 2015-2018. Pour 2021-2022,

$$Z_1 + N_1 = 122 \quad \text{et} \quad Z_2 + N_2 = 265. \tag{13.8}$$

On peut noter que le rapport R_{off} officiel correspondant vaut $R_{off} = 265/122 = 2.172$, rapport très élevé pour des cyclistes non motorisés, et donc peu crédible. En procédant comme pour 2015-2018, et en prenant pour prédiction de R_{bi} la valeur $\hat{R}(21.5) = 1.5670$, on obtient

$$N = \frac{265 - \hat{R}(21.5)122}{1 - (1 + \hat{R}(21.5))\hat{\beta}} = 159.24 \simeq 159.$$

Le calcul donne 159 tués en VAE enregistrés dans la catégorie bicyclette pour 2021 et 2022. En ajoutant les 68 tués enregistrés en VAE, nous obtenons comme estimation du nombre de tués en VAE sur ces deux années $T_{vae}([21, 22]) = 159 + 68 = 227$. La méthode de la section 6 donne 226 tués en VAE, ce qui est quasiment identique.

Risque en VAE et âge. Revenons sur les risques kilométriques mortels proposés dans la section 9B. Ces risques sont mesurés sans tenir compte de l'âge. Notons que, pour un cycliste non motorisé, la vitesse moyenne décroit avec l'âge, alors que, pour un cycliste en VAE, l'utilisation de l'assistance fait que la vitesse moyenne ne baisse quasiment plus avec l'âge. Par conséquent la différence de vitesse entre un cycliste non motorisé et le même cycliste en VAE augmente avec l'âge. D'après le modèle puissance de Nilsson (donné dans la section 11B), ceci implique que le surrisque lié au VAE est plus important pour un cycliste âgé. Ceci explique seulement en partie l'âge élevé des tués en VAE. L'autre part vient du fait qu'avoir un vélo motorisé devient plus tentant avec l'âge et donc que la proportion de cyclistes en VAE est plus importante chez les personnes âgées.

Comme les rapports de risques mortels calculés dans la section 9B ne tiennent pas compte de la catégorie d'âge et comme les cyclistes en VAE sont plus nombreux dans la catégorie des plus de 55 ans, nous pouvons en déduire que ces rapports de risques à l'intérieur de la catégorie des moins de 55 ans seraient un peu plus faibles si ils existaient. Pour les plus de 55 ans le surrisque est très fort, et donc le VAE déconseillé.

14 Annexes

Annexe A. Risque en VAE prédits par le modèle de Nilsson et casque

Dans cette annexe, nous donnons les risques prédits par le modèle de Nilsson pour les VAE urbains Nous comparons ici les risques du VAE avec moteur en marche aux risques du vélo avec moteur coupé, en supposant que son propriétaire roule à 15 km/h sans assistance.

Considérons d'abord les risques intrinsèques suivants: risque intrinsèque de chute avec blessure (RIB), risque intrinsèque de chute avec blessure grave (RIBG) et risque intrinsèque mortel (RIM). Ci-dessous les risques considérés sont des risques kilométriques. Les coefficients ci-dessous sont les rapports avec le risque correspondant à 15 km/h.

Rappelons que la vitesse de 15 km/h est celle d'un vélo de ville sans moteur. Ci-dessous le tableau correspondant, avec trois bridages différents, de 15 à 25 km/h (rappelons que les VAE sont bridés à 25 km/h).

$R \setminus v$	15 km/h	20 km/h	25 km/h
RIB	1.00	1.78	2.78
RIBG	1.00	2.37	4.63
RIM	1.00	3.45	8.99

L'effet de la vitesse est désastreux, dès la vitesse de 20 km/h, qui est la vitesse d'un propriétaire de VAE raisonnable. Le problème majeur de la réglementation actuelle est donc l'inadéquation entre le VAE de ville et sa vitesse, car les vélos de ville ne sont pas conçus pour rouler vite.

Regardons maintenant plus précisément le risque kilométrique d'accident mortel sans tiers, en fonction de la vitesse et du port du casque. Le RIM donne le risque sans casque. Le casque réduit ce risque d'environ 30%. En effet, comme le montre l'article de Bíl et al (2018), dans au moins 50% des cas, le cycliste tué avait une ou plusieurs blessures mortelles situées en dehors de la zone de protection du casque, et donc il n'aurait pas pu être sauvé par le port d'un casque, quelque soit la qualité de ce casque. Avec un niveau d'efficacité du casque de 60%, le RIM est donc réduit au plus de 30%. Nous donnons aussi le RIM avec casque (RIMc). D'après le modèle puissance de Nilsson, la fonction de risque est proportionnelle à $v^{4.30}$, si v est la vitesse. Les coefficients dans le tableau ci-dessous donnent le rapport avec le risque à 15 km/h sans casque.

$R \setminus v$	15 km/h	17 km/h	20 km/h	22 km/h	25 km/h
RIM	1.00	1.71	3.45	5.19	8.99
RIMc	0.70	1.20	2.41	3.63	6.30

Le tableau ci-dessus indique clairement que le casque ne compense pas une augmentation de vitesse de 2 km/h. Regardons maintenant la réglementation allemande. Les cyclistes en VAE sont dispensés de casque si l'assistance est bridée à 20 km/h, mais le casque est obligatoire pour les VAE bridés à 25 km/h. Les risques relatifs correspondants valent 3.45 et 6.30: sur une route sans trafic, rouler avec casque à 25 km/h est presque deux fois plus dangereux que rouler sans casque à 20 km/h. Donc le choix fait par les autorités allemandes de faire une catégorie plus lente, mais sans obligation de casque, est un choix qui sauve des vies.

Supposons à présent que le propriétaire fasse une promenade sur une route de campagne peu fréquentée sur laquelle le risque intrinsèque mortel par heure de promenade (RIMH) est le suivant, en fonction de la vitesse choisie. Les coefficients dans le tableau ci-dessous donnent le rapport avec le risque à 15 km/h sans casque, vitesse

avant électrification. Le RIMH donne le risque sans casque. Le casque réduit ce risque d'environ 30%. Nous donnons aussi le RIMH avec casque (RIMHc). D'après le modèle puissance de Nilsson, la fonction de risque est proportionnelle à $v^{5.30}$, si v est la vitesse, car la distance parcourue en une heure est proportionnelle à la vitesse.

$R \setminus v$	15 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
RIMH	1.00	1.41	2.63	4.59	14.99
RIMHc	0.70	0.99	1.84	3.22	10.49

Pour conclure cette section, il est cependant possible que les résultats soient un peu meilleurs que ceux proposés ci-dessus jusqu'à 20 km/h. En effet si un choc de la tête à 3 m/s sans casque est déjà dangereux, le casque offre une bonne protection jusqu'à 5.5 m/s, ce qui correspond à 20 km/h. Au dessus des traumatismes craniens graves sont possibles, même avec casque. Si la tête tape en premier sur le sol, la sécurité n'est plus garantie sur un vélo de ville, car la tête est beaucoup trop haute (voir sous-sections 11C et 11D). A vitesse élevée, avoir une bicyclette sûre est essentiel, et la sécurité passe par une bonne position du pilote: en particulier, à partir de 20 km/h, le buste ne doit jamais être vertical, comme sur un vélo de ville, le pilote doit avoir ses épaules dans l'axe de la colonne de direction (ou douille), les bras doivent être fléchis, et la tête pas trop haute (moins de 1.50 m) afin de renforcer l'efficacité du casque. L'âge, qui augmente la raideur, est donc un facteur mécanique de risque, puisque le cycliste âgé adopte une position plus redressée, et donc avec une tête plus haute. Enfin, en ville, grande génératrice d'accidents mortels évitables, le cycliste doit veiller à placer ses roues assez loin du trottoir, des poteaux et du mobilier urbain, sources d'accidents graves en cas de choc.

Annexe B. Le freinage à bicyclette

Cette courte annexe donne un ordre de grandeur des distances d'arrêt d'une bicyclette en fonction de la position adoptée. Donnons d'abord des indications sur les empattements des divers types de bicyclette, pour un cycliste d'une taille de 172 cm.

Bicyclette de ville. L'empattement est de 108 cm environ, la distance de l'axe du pédalier à l'axe de la roue avant est de 63 cm environ

Bicyclette course pour cyclotouriste. L'empattement est de 102 cm environ, la distance de l'axe du pédalier à l'axe de la roue avant est de 60 cm environ.

Vélo de compétition route. L'empattement est de 99 cm environ, la distance de l'axe du pédalier à l'axe de la roue avant est de 58 cm environ.

Nous voyons ici que, plus le cycliste est couché sur sa machine, plus la distance de l'axe du pédalier à l'axe de la roue avant est faible. Ceci s'explique par le fait que lors du freinage, le transfert de masse est moindre si le cycliste adopte une position basse.

Répartition des poids et transfert de poids lors du freinage. Sur un terrain plat, la roue arrière supporte environ 55% du poids et la roue avant 45%. En raison du faible poids de la bicyclette et du centre de gravité très haut du cycliste, le transfert de poids sur la roue avant est très important: il n'est pas possible d'avoir une décélération supérieure à $0.3\,g$ sans se reculer. On peut améliorer le freinage en se reculant et en descendant les épaules, à condition d'avoir le torse à l'horizontale (bicyclettes de course), et atteindre ainsi $0.4\,g$ (on prend $g = 10$).

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons des distances d'arrêt en fonction de la préparation au freinage, sur chaussée sèche. Nous donnons ici quatre configurations, le pilote d'une bicyclette de course devant être mains en bas du guidon.

Configuration C1. Le pilote n'a pas les mains sur les freins. Temps de réaction 1.00 s.

Configuration C2. Le pilote a les mains sur les freins, mais n'a pas rattrapé le jeu entre les patins et la jante (ou les plaquettes et le disque). Temps de réaction 0.50 s.

Configuration C3. Patins en contact avec la jante. Temps de réaction 0.25 s.

Configuration C4. Le pilote a les mains sur les freins et recule de 15 cm pendant le temps de réaction en descendant aussi le torse de 15 cm. Temps de réaction 0.50 s.

La configuration 4 est impossible sur une bicyclette de ville, en raison de la position. Ci-dessous les distances suivant la configuration. Le vent est supposé venir de l'arrière pour les vitesses les plus élevées. Les vitesses ci-dessous correspondent, en km/h, à 14.4 km/h, 21.6 km/h, 28.8 km/h, 36 km/h, 43.2 km/h et 50.4 km/h. Nous donnons aussi les distances de freinage d'un scooter 50cc (SC) bridé à 45 km/h avec une décélération de $0.5\,g$ et un temps de réaction de 0.50 s ainsi que d'une automobile (VT) ayant une décélération de $0.8\,g$ avec un temps de réaction de 1.00 s

Vitesse	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s
C1	6.67	12.00	18.67	26.67	36.00	46.67
C2	4.67	9.00	14.67	21.67	30.00	39.67
C3	3.67	7.50	12.67	19.17	27.00	36.17
C4	4.00	7.50	12.00	17.50	24.00	31.50
SC	3.60	6.60	10.40	15.00	20.40	-
VT	5.00	8.25	12.00	16.25	21.00	26.25

Le tableau montre que la préparation du freinage est essentielle. En particulier, dans les zones à forte densité de piétons, il est essentiel de rouler lentement et d'avoir les patins en contact avec la jante. Si la vitesse dépasse 25 km/h, il faut se reculer pour freiner plus court. Cependant la distance d'arrêt reste quand même élevée, en raison de la hauteur du centre de gravité et du faible empattement. Les cyclistes doivent en être conscients et apprendre à anticiper les dangers.

Regardons maintenant les distances de freinage dans une descente avec une pente de 10%. Dans ce cas le conducteur d'une automobile a le pied sur le frein, et son temps de réaction est alors de 0.50 seconde. La décélération reste très bonne, environ $0.75\,g$, en raison du grand empattement (environ 2.70 m). Par contre le centre de gravité haut du cycliste et de sa machine (0.95 m à peu près), dégrade beaucoup le freinage: la décélération est réduite de $0.1\,g$. Ci-dessous les distances de freinage pour les configurations C2, C4 et pour l'automobile (VT).

Vitesse	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s	14 m/s
C4	4.67	9.00	14.67	21.67	30.00	39.67
C2	6.00	12.00	20.00	30.00	42.00	56.00
VT	3.07	5.40	8.27	11.67	15.60	20.07

Nous pouvons constater que, compte tenu de la distance de freinage d'un vélo, si une voiture dépasse un cycliste en descente, elle ne doit pas se rabattre à moins de vingt mètres à trente mètres. Enfin le recul est essentiel à bicyclette en descente: à 50 km/h un bon recul permet de réduire la distance d'arrêt de plus de 16 mètres.

La formation au freinage à l'école primaire est impossible, car le transfert de masse est très différent (taille plus petite par rapport à l'empattement). Pourtant le freinage est fondamental pour la sécurité des piétons et aussi du cycliste. En ce qui concerne l'automobile, elle est dangereuse pour les piétons même dans les zones 20 km/h, si l'automobiliste n'a pas le pied sur le frein. Rappelons qu'un cycliste peut maintenir sa vitesse mains sur les freins, contrairement aux automobilistes. Cependant seuls les vélos de ville non motorisés conduits à allure modérée (moins de 15 km/h) et avec les mains sur les freins peuvent respecter les préconisations de la circulaire du 22 février 1896 (arrêt en moins de cinq mètres).

Annexe C. Rendre plus sûres les flottes de location.

Comment faire pour rendre plus sûrs les VAE de location pour leurs clients et aussi pour les piétons des grandes villes? Une première idée est de brider le VAE en supprimant l'assistance dès 15 km/h. Il existe cependant une seconde possibilité: limiter le développement, défini ci-dessous.

Définition du développement et du braquet. Le braquet R est le rapport entre le nombre de dents du plateau choisi (sur le pédalier) et du pignon choisi (sur le corps de roue libre qui est fixé sur la roue arrière). Pour un braquet donné, le développement D est la distance parcourue en un tour complet du pédalier, exprimée en mètres. La cadence de pédalage C, donnée en tours/mn, est le nombre de tours effectués en une minute.

Si P désigne le périmètre de la roue (corrigé en tenant compte de l'enfoncement du

pneu) et v la vitesse exprimée en km/h

$$D = RP \quad \text{et } v = 0.06 \times CRP.$$

En 1868, à Saint-Cloud, dans une des premières courses de vélos monotypes avec roue avant motrice à bandage dur de 1.00 mètre de diamètre et entrainement direct (R=1), le vainqueur a parcouru 1000 mètres en 155 secondes, ce qui correspond à une vitesse de 23.2 km/h et une cadence de pédalage de 123 trs/mn. Nous voyons ici que le développement $D = \pi$ est suffisant pour rouler en ville. Ci-dessous un tableau donnant la vitesse en fonction de la cadence de pédalage, pour le développement $D = \pi = 3.14159....$

Cadence (trs/mn)	20	40	60	80	100	120	140
Vitesse (km/h)	3.77	7.54	11.31	15.08	18.85	22.62	26.39

La cadence de 20 trs/mn est la cadence minimale pour rouler sans trop de problèmes d'équilibre. Pour le développement égal à π, la vitesse est celle d'un piéton à cette cadence. Lors du démarrage, la cadence de 60 trs/mn peut être atteinte très rapidement: elle correspond à une vitesse de 11.3 km/h, bien adaptée aux traversée d'intersections. Enfin, en route normale, une cadence de 80 trs/mn, facile à atteindre, permet de rouler à plus de 15 km/h. Les plus sportifs pourront rouler à 19 km/h, avec une cadence de 100 trs/mn. Ce développement nous semble donc parfait pour les grandes villes et leurs pistes cyclables.

En conséquence, pour une flotte de vélos électriques de location à moteur pédalier, une configuration sûre est d'imposer le monovitesse dans le cahier des charges, avec, par exemple, des roues de 700C chaussées de pneus de 700×47 et une valeur de $R = 10/7$ à peu près (ce qui correspond à 30/21 exactement, ou 34/24 pour une valeur proche avec un plateau avant de 34 dents). Le développement sera alors proche de 3.14 mètres. Le moteur assurera facilement sa partie du travail en côte, car ce développement est facile à emmener. La transmission ainsi que le moteur et la batterie s'useront moins que sur les VAE de location actuels.

Annexe D. Sécurité routière en Suède, en Norvège et en France.

Dans cette courte annexe, nous regardons l'évolution du nombre de tués par million d'habitants par an dans les accidents de la route. En 2008, la Suède comptait 51.4 tués pour un million d'habitants, et la France 75.1 tués pour un million d'habitants. En 2021, la Suède a compté 18 tués pour un million d'habitants, et la France 42 tués pour un million d'habitants. Par conséquent, la Suède a réduit de 65% le nombre de tués sur route en treize ans, et la France dans le même temps de 44% seulement. La Norvège a compté 80 tués en 2021 pour 5.5 millions d'habitants, soit 14.5 tués par million d'habitants. Nous constatons ici que l'effort fait en France depuis 2008 est très insuffisant. Notons que les réductions obtenues en Suède et en Norvège sont dues en grande partie à

l'utilisation de variantes du modèle de Nilsson, et à un principe de réduction des vitesses aux intersections (arrêt impératif de tous les véhicules motorisés aux carrefours).

Prenons l'exemple des giratoires modernes en France: la vitesse d'entrée et de circulation dans les giratoires semble en constante augmentation, et ceci pose un problème majeur aux cyclistes. En France, les giratoires sont considérés comme sûrs par la sécurité routière, alors que les piétons et les cyclistes se sentent en danger. Il existe pourtant une solution simple appliquée dans des pays du nord-ouest de l'Europe: mettre un Stop à chaque entrée pour les véhicules motorisés et laisser un Cédez le passage pour les bicyclettes, afin de favoriser leur insertion dans le giratoire. Cette mesure sauverait immédiatement cinq à dix vies de cyclistes et aussi des vies de piétons. Enfin, pour les limitations de vitesse, descendre de 10% toutes les vitesses réduirait considérablement le nombre de tués, d'après le modèle de Nilsson. Ceci permettrait aussi de réduire la surcharge hospitalière due aux accidents de la route.

Le coût financier des accidents de la route. Le rapport ONISR 2021 de la sécurité routière chiffre ce coût à plus de cinquante milliards d'Euros en France pour l'année 2021, avec les méthodes de calcul préconisées par l'UE, ce qui représente 750 Euros par habitant et par an. Pour la Suède, le coût est d'environ 325 Euros par habitant et par an. Pour une famille de quatre personnes, la charge est d'environ 3000 Euros en France, contre 1300 Euros en Suède, et 1100 Euros en Norvège, soit 1900 Euros de moins qu'en France. Si le niveau de sécurité était le même en France qu'en Norvège, la réduction des coûts serait de plus de 30 milliards d'Euros par an.

La réglementation sur le vélo en Norvège. Voici les règles principales données sur le site officiel

https://www.visitnorway.fr/planifier-voyage-norvege/securite-garantie /conduite-routes/velo/

Règle 1. En l'absence de piste cyclable, le cycliste est autorisé à rouler à allure modérée sur le trottoir, tant qu'il adapte sa vitesse à celle des piétons.

Règle 2. S'ils ont leur propre vélo, les enfants doivent être âgés d'au moins dix ans avant d'être autorisés à circuler sur une route ou une piste cyclable.

Règle 3. Le cycliste ne doit pas être ivre.

Le casque n'est obligatoire, ni pour les adultes, ni pour les enfants. En France, les enfants doivent rouler sur la route dès neuf ans, en espérant que leur casque les protègera en cas de choc avec un véhicule. Enfin, en Norvège, la conduite d'un véhicule motorisé est interdite si le taux d'alcool dans le sang dépasse 0.20 g/l et les contrôles d'alcoolémie plus fréquents qu'en France.

Annexe E. Une erreur d'enregistrement certaine.

Ci-dessous le texte d'actualités du site web du journal La Montagne sur un accident

de vélo le 31 décembre 2022 à Clermont-Ferrand [6].

"Un homme a été retrouvé inanimé par des passants, près de son vélo, samedi 31 décembre, à 16 h 25, à hauteur du 113 avenue du Puy-de-Dôme, à Clermont-Ferrand. Grièvement blessé, il a été évacué au CHU.
La police cherche à identifier cet homme qui ne portait aucun papier sur lui. Il est âgé environ de 60-70 ans et porte un appareil auditif. Il était au guidon d'un VTT électrique gris. Si vous avez des renseignements à apporter à la police, composer le 17.
Le cycliste n'aurait pas été percuté par un automobiliste mais aurait chuté seul de son vélo."

Ci-dessous le texte correspondant au même accident extrait des outils statistiques de l'ONISR (T= Tué).

Commune. 63113 - Clermont-Ferrand. **Date.** 31/12/2022 - 16h24. **Texte.** Accident mortel, En agglomération, Hors intersection, Plein jour, avec une météo normale et une surface chaussée: Normale. 1 Bicyclette circulant sur Route de métropole urbaine (VMA à 30) conduit par 1 usager masculin de 86 ans (T)

L'accident a été rangé dans la catégorie bicyclette, alors qu'il s'agissait d'un accident de VAE (VTT électrique), information connue de la police elle-même. Visiblement les méthodes d'enregistrement conduisent à des erreurs d'attribution dans la catégorie vélos.

Bases de données. Les bases de données comportent quatre fichiers par année: le fichier caractéristiques, le fichier lieux, le fichier véhicules et le fichiers usagers. L'accident a pour numéro (AccidentId ou NumAcc suivant les fichiers) le numéro 202200000684. Dans le fichier caractéristiques, sont notées l'adresse (avenue du Puy-de-Dôme), la date avec l'heure, ainsi que les conditions atmosphériques (normales), l'absence de collision (codée 7), hors intersection (codé 1) et en agglomération (codé 2). Dans le fichier véhicules, le véhicule de cet accident est codé 1 dans la colonne catégorie de véhicules (catv), ce qui correspond à une bicyclette. La motorisation indiquée (colonne motor) est 5 (humaine). Certes il faut pédaler sur un VAE, mais il y a aussi un moteur. Donc la motorisation indiquée n'est pas correcte. Enfin un VTT électrique est un VAE. Le code correct pour la colonne catv est, depuis 2019, le code 80. Enfin le fichier usagers donne les équipements de sécurité portés par Le cycliste. Lors de cet accident, le cycliste portait un casque (code 2 dans la colonne secu1). Le casque ne l'a pas sauvé.

Une cause possible des erreurs d'enregistrement. Dans le document de l'ONISR intitulé "Description des bases de données annuelles des accidents corporels de la circulation routière. Années de 2005 à 2022" en date du 4 octobre 2023, les numéros associés aux catégories de véhicules sont donnés en page 8. En face du code 80 se situe l'abréviation VAE, sans aucune explication. L'abréviation VAE n'est jamais définie dans le document. Il s'agit de l'abréviation de "vélo à assistance électrique". Mais cette abréviation

pourrait aussi signifier “véhicule à assistance électrique”. Il nous semble que les erreurs d’enregistrements seraient réduites si cette abréviation VAE, peu claire, était remplacée par “vélo électrique (bridé à 25 km/h)”. De plus, comme cette catégorie de véhicule est nouvelle, il serait opportun, pour aider les forces de l’ordre, de remplacer la ligne 14 page 8, actuellement rédigée ainsi
01 - Bicyclette
par la ligne plus détaillée suivante
01 - Bicyclette **(sans moteur: pour les vélos électriques, coder 80)**

Remerciements. Nous remercions Ester Mariucci et Yvan Martel pour leurs conseils, Bernhard Elsner, Jean-François Le Gall et Florence Merlevède pour des discussions sur la bicyclette et le VAE ainsi que Thierry, ancien coureur élite, pour des discussions sur le montage des roues, la position du cycliste et l’augmentation des braquets en course.

References

[1] Bíl, M., Dobiás, M., Andrásik R., Bílova, M. and Hejna, P. Cycling fatalities: When a helmet is useless and when it might save your life. *Safety Science* **105** (2018), 71–76.

[2] Bliven, E., Rouhier, A., Tsau, S., Willinger, R., Bourdet, N. Deck, C. Madey, S. M. and Bottlang, M. Evaluation of a novel bicycle helmet concept in oblique impact testing. *Accident Analysis and Prevention* **124** (2019), 58-65.

[3] Bouwen, L. et Shoeters, A. Conséquences des accidents de la route en Belgique. Disability-Adjusted Life Years. Rapport n° 2023-R-22-FR.

[4] Elvik, R. The Power Model of the relationship between speed and road safety. Update and new analyses. TOI report 1034 (2009). Institute of Transports Economics. Norvegian Centre for Transport Research.

[5] Hertach, P., Uhr, A. Niemann, S. and Cavegn, M. Characteristics of single-vehicle crashes with e-bikes in Switzerland. *Accident Analysis and Prevention* **117** (2018), 232–238.

[6] https://www.lamontagne.fr/clermont-ferrand-63000/actualites/un-cycliste-grievement-blesse-a-clermont-ferrand-la-police-cherche-a-l-identifier_14240607/

[7] Nilsson, G. Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety. Doctoral thesis (2004). Lund Institute of Technology. Department of Technology and Society Traffic Engineering.

[8] Observatoire du Cycle. Marché 2019. Union Sport et Cycle.

[9] ONISR. La sécurité routière en France. Bilan de l'accidentalité de l'année. Années 2009 à 2022.

[10] Accidents corporels de la circulation routière. Document de travail. Observatoire National Interministériel de Sécurité routière. Années 2001 à 2008.

[11] Peng, Y., Chen, Y. Yang, J., Otte, D. and Willinger, R. A study of pedestrian and bicyclist exposure to head injury in passenger car collisions based on accident date and simulations. *Safety Science* **50** (2012), 1749–1759.

[12] Pigeau, S. L'aérodynamisme en question. *Le Cycle* **540** (2022), 46–59.

[13] Pondevie, F. Bilan e-road. Un marché en berne? *Le Cycle* **547** (2022), 84–87.

[14] Shepers, P., Wolt, K. K., Helbich, M. and Fishman, E. Safety of e-bikes compared to conventional bicycles: What role does cyclists' health condition play? *Journal of Transport and Health* **19** (2020) 100961, 1–9.

[15] Slootmans, F. Rapport Statistique 2023 – Accidents de la route 2022, Bruxelles, Belgique (2023). Institut Vias.

[16] Slootmans, F. Rapport Statistique 2022 – Accidents de la route 2021, Bruxelles, Belgique (2022). Institut Vias.

[17] Slootmans, F. Rapport Statistique 2021 – Accidents de la route 2020, Bruxelles, Belgique (2021). Institut Vias.

[18] Slootmans, F. Rapport Statistique 2020 – Accidents de la route 2019, Bruxelles, Belgique (2020). Institut Vias.

[19] Uhr, A. und Hertach, P. Verkehrssicherheit von E-Bikes mit Schwerpunkt Alleinunfälle. *bfu-Report Nr.* **75** (2017). Bern.

15 Matériel supplémentaire

M1. Accidents particuliers en 2022. La liste qui suit n'est pas exhaustive.

Accident 1. 28 janvier 2022, Nancy, 54395. L'accident porte le numéro 42684 dans la base de données 2022. Il a eu lieu à côté de la rue Mollevaut, sur le canal de la Marne au Rhin. La rue Mollevaut longe ce canal, mais est séparée de celui-ci par un talus de plus de deux mètres de haut. Le cycliste roulait le long du canal, sur une petite sente en terre située à moins d'un mètre du canal. Son vélo (voir https://www.estrepublicain.fr/faits-divers-justice/2022/01/28), une bicyclette demi-course avec garde-boues était peu adapté

à la circulation sur une simple sente en terre ou layon. Une perte de contrôle l'a fait chuter dans le canal. Le vélo était muni de cale-pieds à courroie, ce qui a sans doute favorisé la noyade, le cycliste ne pouvant pas se dégager de sa bicyclette, qui a fait office de lest. Cet accident est particulier, car un layon est une voie présumée fermée à la circulation.

Accident 2. 30 janvier 2022, Merlevenez, 56130. L'accident porte le numéro d'accident 18542 dans la base de données 2022. Les données n'indiquent aucun choc (fichier véhicules). Les coordonnées GPS données sont: 47,732786 Nord, -3,252329 Ouest. Ces coordonnées indiquent que l'accident a eu lieu sur un chemin communal sans revêtement, ouvert à la circulation. Dans le fichier lieux, ce fait est confirmé par la nature de la route (catr= autre, ce qui indique que la chute a eu lieu hors réseau routier). Le cycliste a eu un accident vasculaire cérébral (AVC), auquel il n'a pas survécu, malgré une intervention rapide avec héliportage (voir l'actualité du 1 février fournie par Ouest France sur https://lorient.maville.com/actu). Un cavalier était présent, mais cet article met hors de cause le cavalier et son cheval, accusés dans un premier temps. Ici le décès ne semble pas être traumatique. Notons ici que les AVC sont souvent accompagnés de vertiges pouvant provoquer une perte d'équilibre, ce qui peut expliquer la chute.

Accident 3. 9 avril 2022, Aramits, 64029. Cycliste amateur tué en course (sortie de route). Notons que les accidents en compétition automobile sur route ne sont pas inclus dans le bilan de l'ONISR (par exemple le pilote et le copilote tués le 23 avril 2022 lors d'une spéciale d'un rallye en Ardèche ne sont pas inclus dans le bilan ONISR). Ceci nous semble être une anomalie.

M2. Les accidents de montagne (ne figurant pas dans le bilan ONISR). D'après le bilan donné dans le document "Bilan des accidents des sports de montagne 2009-2020", sur le site https://www.ensa.sports.gouv.fr/, le bilan pour le VTT de montagne est de 10 tués sur la période de six ans 2009-2014, et de 14 tués sur la période 2015-2020 (en augmentation de 40%), avec un maximum de 4 tués en 2019. Il est possible que des VTT électriques soient inclus dans ce bilan sur la seconde période.

Comparons avec les accidents traumatiques de piétons. Nous comptons ici les accidents en randonnée pédestres et les accidents en randonnée avec raquettes hors avalanches. Le nombre de décès traumatiques de piétons est de 273 sur la période de six ans 2009-2014, soit 45.5 par an en moyenne, et de 294, soit 49 par an en moyenne, sur la période 2015-2020. Sur la première période le rapport avec le VTT vaut 27.3 et sur la seconde période encore 21.

Pour les décès non traumatiques sur la période 2015-2020, leur nombre est de 11 pour le VTT, et pour les piétons, de 282, soit 47 par an en moyenne. Le rapport est du même ordre, supérieur à 25. Au total, sur la période 2015-2020, 576 piétons ont perdu la vie

en montagne sur cette période, soit 96 par an en moyenne, contre 24 cyclistes, soit 4 par an en moyenne.

M3. Conséquences des accidents de la route (DALY). Comme les chiffrages ne sont pas disponibles en France, nous donnerons les chiffres fournis dans un document de Bouwen et Shoeters (2023) du VIAS Institute pour la Belgique. Nous regardons ici uniquement les rapports entre catégories d'usagers. Nous supposerons que, même si les risques pour les catégorise d'usagers ne sont pas identiques d'un pays à l'autre, les rapports sont proches.

Définition. DALY : Disability-Adjusted Life Year ; une mesure de la perte de santé d'une population exprimée en années de vie en bonne santé perdues. Les DALY se composent des années de vie perdues (Years of Life Lost - YLL) et des années vécues avec un handicap ou une déficience (Years Lived with Disability - YLD).

Les calculs faits dans le rapport du VIAS Institute que nous allons mentionner correspondent aux années 2016 et 2017. Comme les chiffres pour les cyclistes incluent les VAE, ils sont faussés pour les tranches d'âge roulant plus en VAE. Or seules les tranches 6-17 ans et 18-24 ans sont peu concernées par le VAE. Nous regarderons donc uniquement ces deux tranches d'âge. Ci-dessous les chiffres des risques relatifs par kilomètre parcouru pour ces deux tranches d'âge (2RM = deux-roues motorisé autre que VAE) donnés page 39. Nous donnons aussi les rapports de risques entre les autres modes de transport et la bicyclette par tranche d'âge (R (6-17) et R (18-24) dans le tableau) . Nous avons enlevé le chiffre concernant la voiture et les deux-roues motorisés pour les 6-17 ans, car ils sont le plus souvent passagers et non conducteurs (le risque dépend du conducteur et non du passager).

Mode	Piéton	Cycliste	2RM	Voiture
6-17 ans	21.2	13.4	—	—
18-24 ans	11.7	7.7	**4041.5**	2.8
R (6-17)	1.58	1.00	—	—
R (18-24)	1.52	1.00	**524.87**	0.36

Nous pouvons observer que le DALY de la voiture est plus faible. Cependant les DALY dûs à l'automobile hors accidents de la route sont considérables. D'une part l'automobile et les deux-roues motorisés engendrent près de 30% de la pollution de l'air, et d'autre part l'absence d'exercice physique induite par l'automobile augmente fortement les cancers, troubles musculo-squelettiques, maladies cardiovasculaires et maladies neurologiques (comme la maladie de Parkinson). Pour la pollution de l'air seule, en partant du tableau page 22 sur les DALY et en multipliant par 0.30, nous obtenons pour 2016 une valeur de $672 \times 0.30 \simeq 202$, soit 23.6% du DALY des accidents de la

route (857 en 2016). Pour les maladies, même en prenant seulement 10% pour la proportion de malades dûs à l'absence d'exercice physique induit par l'automobile pour les cancers, troubles musculo-squelettiques, maladies cardiovasculaires et maladies neurologiques, nous obtenons pour 2016 une valeur de $(4190 + 2655 + 1604) \times 0.10 = 1103$, soit 128.7% du DALY des accidents de la route. Donc les DALY induits par l'automobile sont très élevés, même si le DALY des accidents de la route est faible pour l'automobile. D'autre part, la publication donne les DALY des occupants de la voiture, mais pas les DALY occasionnés par les automobilistes (piétons renversés, cyclistes blessés etc). Pour cette raison nous ne comparerons pas l'automobile et les autres modes de transport.

Les faits déduits du tableau. Pour les deux tranches d'âge, la marche à pied augmente de plus de 50% le DALY. La bicyclette est plus sûre que la marche à pied pour les jeunes. Les chiffres restent cependant assez proches. Ce n'est pas le cas pour les deux-roues motorisés. Pour la tranche d'âge 18-24 ans, le DALY observé en Belgique pour les deux-roues motorisés est de plus de 500 fois le DALY de la bicyclette.

M4. Port du casque en France et effets: période 2009-2014. Dans cette partie, nous regardons l'évolution du nombre de tués portant un casque en agglomération et hors-agglomération de 2009 à 2014. Ensuite nous regardons le nombre de blessés hospitalisés en fonction du milieu (ville ou campagne) et les rapports entre nombre de blessés hospitalisés et nombre de tués en fonction du milieu et du casque.

Pour commencer, nous donnons dans le tableau ci-dessous, le nombre de tués en ville (T-agglo) ou en campagne (T-Hagglo), les tués ne portant pas de casque dans les deux milieux (T-aggloSC et T-HaggloSC), ainsi que les pourcentages de non port du casque associés. Les quatre dernières lignes donnent les nombres totals de tués (Tués), avec casque (TuésC) ou sans casque (TuésSC) ainsi que le pourcentage de cyclistes tués sans casque. Les deux colonnes de droite donne les totaux par périodes de trois ans.

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	09-11	12-14
T-agglo	74	59	58	58	67	70	191	195
T-aggloSC	31	31	30	24	36	34	92	94
aggloSC(%)	41,9	52,5	51,7	41,4	53,7	48,6	48,2	48,2
T-Hagglo	88	88	83	106	80	89	259	275
T-HaggloSC	38	40	42	46	29	29	120	104
HaggloSC(%)	43,2	45,5	50,6	43,4	36,3	32,6	46,3	37,8
Tués	162	147	**141**	164	147	159	450	470
TuésC	93	76	69	94	82	96	238	272
TuésSC	69	71	72	70	65	63	212	198
TuésSC(%)	42,6	48,3	**51,1**	42,7	44,2	39,6	47,1	42,1

On remarque immédiatement que l'année 2011 est particulière: peu de tués et le plus fort pourcentage de tués sans casque. Or 2011 fut une année de mauvais temps (voir

section 13), pendant laquelle le cyclisme de loisir a été faible. Il est connu que le casque est beaucoup plus porté pour le cyclisme de loisir, et donc le faible nombre de tués avec casque indique seulement que le kilométrage vélo a été faible en 2011. Le pourcentage de tués hors agglomération portant un casque augmente fortement (en mettant à part 2011), alors que celui de tués sans casque en agglomération reste à peu près constant.

Regardons maintenant la corrélation entre le nombre total de tués que nous noterons T et nombre total de tués avec casque, que nous noterons W. Après calcul,

$$\bar{T} = 153.33,\ \bar{W} = 85, \sigma_T = 8.692,\ \sigma_W = 10.100, \mathrm{Corr}\,(T, W) = 0.951.$$

La corrélation est donc forte, suggérant une dépendance presque linéaire entre T et W Notons maintenant $Z = T - W$ le nombre de tués sans casque: $\bar{Z} = 68.33$, $\sigma_Z = 3.254$ et $\mathrm{Corr}\,(T, Z) = -0.2806$. Nous notons ici que la dépendance entre Z et T est faiblement négative. Ceci montre que les deux populations de cyclistes (avec casque ou sans casque) sont très différentes et ne correspondent pas au même usage: les cyclistes avec casque, beaucoup plus touchés les années de beau temps, sont sur des parcours de loisir, et les cyclistes sans casque, un peu plus touchés les années de mauvais temps, sur des parcours utilitaires. Les droites de régression des moindres carrés de W et Z par rapport à T ont pour équations

$$w - \bar{W} = 1.105(t - \bar{T}) \ \text{ et } z - \bar{Z} = -0.105(t - \bar{T}).$$

Le coefficient de la droite de régression de W par rapport à T est un peu plus grand que 1. Le trafic en plus ou en moins est donc surtout dû aux cyclistes sportifs avec casque.

Pour la seconde période, le pourcentage de tués sans casque baisse encore, indiquant une augmentation du port du casque par les cyclistes. Ajoutons une observation personnelle: il est devenu très rare de croiser un cycliste sur un vélo de course avec des pédales automatiques ne portant pas de casque, alors que c'était assez fréquent avant 2005.

Nous allons maintenant regarder le nombre de cyclistes blessés hospitalisés sur la période 2009-2014 en fonction du milieu (ville ou campagne) et du port du casque (C ou SC) et le comparer au nombre de tués dans la même catégorie. Pour effectuer cette comparaison, nous introduisons l'indice G de gravité suivant. Si T est le nombre de tués et B le nombre de blessés hospitalisés,

$$G = 100T/(T + B)$$

Ci-dessous le tableau correspondant (BH = blessés hospitalisés survivant).

Conditions	AggloC	AggloSC	HaggloC	HaggloSC
Tués	200	186	310	224
BH	2706	3318	1602	876
G	6.88	5.31	16.21	20.36

Remarquons d'abord que 70.9% des cyclistes hospitalisés roulaient en ville lors de leur accident. Ensuite, en ville, l'indice de gravité G est nettement plus faible pour les cyclistes sans casque, alors que en campagne l'indice G et nettement plus fort pour les cyclistes sans casque. Dans ce qui suit, nous allons expliquer pourquoi, en débutant par la ville.

La différence principale entre ville et campagne est la vitesse des véhicules motorisés. En ville, de nombreuses mairies ont fait des efforts considérables pour limiter la vitesse des véhicules motorisés et réduire ainsi le nombre d'accidents mortels. Comme conséquence, très peu de cyclistes tués en ville le sont par un véhicule venant de l'arrière (même en intersection). Par contre, il y a de nombreux chocs latéraux en intersection. Cependant la vitesse de l'automobile lors des chocs avec cyclistes est beaucoup plus faible que ce que l'on pourrait penser: Par exemple dans l'article de Peng et al. (2012, fig. 6, page 1752), sur l'échantillon considéré, 70% de chocs ont lieu à moins de 20 km/h et seulement 5% de chocs à plus de 40 km/h. Dans ces conditions la vitesse du cycliste est primordiale: on peut donc penser que le modèle de Nilsson peut être appliqué en considérant seulement la vitesse du cycliste. Ce modèle indique que, plus la vitesse est élevée, plus la proportion de cyclistes ne survivant pas à leurs blessures est élevée. Par conséquent G est une fonction croissante de la vitesse. Puisque G est plus élevé pour les cyclistes casqués malgré la protection du casque, nous en déduisons d'une part que ces cyclistes roulent nettement plus vite, et d'autre part que le casque ne compense pas la différence de vitesse.

Reprenons les équations de Nilsson. Si v est la vitesse du cyclistes, le taux de blessés graves ou tués τ_b et le taux de cyclistes tués τ_m vérifient

$$\tau_b = c_0 \beta^i v^3, \tau_m = c_1 \alpha^i v^{4.3},$$

avec $i = 0$ en cas de non port du casque et $i = 1$ en cas de port du casque, les facteurs α et β donnant le gain lié au casque. Comme les accidents ont lieu en agglomération, nous prendrons $\alpha = 0.688$, comme en section 10B. Pour β, nous considérerons que la tête est le siège de la blessure imposant l'hospitalisation en aglomération dans 35% des cas, et que cette blessure aurait pu être évitée dans 60% des cas avec le casque, ce qui donne $\beta = 1 - 0.21 = 0.79$. Avec cette modélisation, si v_1 est la vitesse des cyclistes sans casque et v_0 la vitesse de ceux avec casque, nous obtenons, pour les gravités G_{sc} et G_c sans ou avec casque

$$5.31 = G_{sc} = 100(c_0/c_1)v_1^{1.3} \text{ et } 6.88 = G_c = 100(c_0/c_1)(\beta/\alpha)v_0^{1.3},$$

ce qui conduit à

$$(M.1) \qquad (v_0/v_1) = \Big(\frac{\beta G_c}{\alpha G_{sc}}\Big)^{1/1.3} = 1.3581.$$

Pour les cyclistes non motorisés sans casque en ville, nous prendrons $v_1 = 18.00$ km/h pour les accidents graves. Ceci conduit à $v_0 = 24.45$ km/h d'après (M.1). Cette différence de vitesse peut sembler élevée pour des vélos identiques, mais, en fait les vélos des cyclistes casqués sont le plus souvent des vélos de course et ceux des cyclistes sans casque des vélos de ville. D'après l'équation (9.1), si le cycliste sans casque roule avec un vélo de ville et le cycliste casqué avec un vélo de course et des pédales automatiques, les puissances demandées pour rouler sur terrain plat à 18.00 km/h et 24.45 km/h respectivement sont $P_1 = P_1(v_1) = 75$ Watts et $P_0 = P_0(v_0) = 83$ Watts, soit seulement 8 Watts de plus pour le vélo de course, gain obtenu facilement avec des pédales automatiques, qui apportent un meilleur rendement du pédalage. Donc, même avec un effort modéré un cycliste sur un vélo de course moderne roule à une vitesse potentiellement dangereuse en cas de choc.

Conclusion pour les tués en ville. Probablement la plupart des tués avec casque avaient un vélo de course et roulaient beaucoup plus vite (au moins +6 km/h) que les cyclistes sans casque, qui sont le plus souvent les cyclistes avec des vélos de ville assez lents. Le casque ne compense pas une telle différence de vitesse.

Nous allons maintenant regarder la situation hors agglomération. L'article de Bil et al. indique que le casque est peu efficace hors agglomération, et ceci particulièrement hors intersection lorsque le véhicule vient de l'arrière. En France, entre 2009 et 2014, hors agglomération, un nombre très important de cyclistes ont été tués par un véhicule venant de l'arrière. Mais dans ce cas, plus le cycliste roule vite, moins la différence de vitesse entre les deux véhicules est importante. Le modèle de Nilsson ne peut pas s'appliquer avec les mêmes équations. Probablement, les vélos de course donnent de meilleures chances de survie dans ce cas. Dans ce qui suit, nous allons faire une tentative d'évaluation du risque en fonction du milieu et du casque

Pour la période 2009-2014, nous allons attribuer 60% du kilométrage aux vélos de course ou au VTT de loisir, et comme les cyclistes avec un vélo de course ou un VTT roulent peu en ville, une répartition du kilométrage de 25% en ville et 75% en campagne. Les 40% restants du kilométrage seront supposés faits pas des cyclistes urbains sans casque, avec une répartition inversée: 75% en ville et 25% en campagne. Ceci conduit aux chiffres suivants: le kilométrage en ville représente 45% du kilométrage total, et le kilométrage en campagne 55% du kilométrage total. Avec un taux de port du casque de 90% pour le cyclisme de loisir et de 30% pour les cyclistes urbains, nous obtenons les chiffres ci-dessous pour le trafic et les risques. Le tableau donne les tués par milieu et port du casque ainsi que la répartition du kilométrage, et les risques relatifs RM de décès par kilomètre parcouru (risque de décès par kilomètre tous milieux et équipement normalisé à 1.00) ainsi que les risques relatifs RBH d'être hospitalisé et de survivre

(même normalisation).

M+E	AggloC	AggloSC	HaggloC	HaggloSC	Agglo	Hagglo	Total
Tués	200	186	310	224	386	534	920
km(%)	22.5%	22.5%	43.5%	11.5%	45%	55%	100%
RM	0.966	0.899	**0.775**	**2.117**	0.932	1.055	1.00
BH	2706	3318	1602	876	6024	2478	8502
RBH	1.415	**1.734**	**0.435**	0.896	1.575	0.530	1.00

Ce calcul indique que sortir de la ville avec un vélo lent fait pour la ville est très dangereux. Par contre, en ville les vélos de ville sont plus sûrs que les vélos de course. Pour les blessés graves, le risque kilométrique est plus élevé en agglomération quelque soit le type de bicyclette. Hors agglomération, les vélos de course ou les VTT hors route sont les moins exposés.

Avertissement. Les risques ci-dessus ne sont pas du tout à vitesse égale, les cyclistes avec casque ayant tendance à rouler beaucoup plus vite.