



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-04078609v3

HAL Id: hal-04078609

<https://hal.science/hal-04078609v3>

Preprint submitted on 3 Jul 2023 (v3), last revised 9 Mar 2024 (v5)

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 †

July 3, 2023

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 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 2010-2014 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 à bicyclette. 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 172, au lieu de 244. Nous estimons donc la surmortalité due à la dangerosité du VAE à de plus 70 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 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 2010-2014 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 e-bikes mileage

*Jérôme Dedecker, Université de Paris, 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.

in 2022 is approximately 25% of total non-motorized bicycles 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 172, instead of 244. We therefore estimate the excess of fatalities due to motorized bicycles to be over 70 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 des tués en 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	138	132,875

Année	2017	2018	2019	2020	2021	Moyennes
Tués	173	175	187	178	227	188
SVC	38	38	43	56	71	49,2
SVC(%)	22,5	21,7	23,5	32,0	31,3	26,2
BMV	135	137	144	122	156	138,8
Tués VAE	-	-	15	16	25	-

Pour le VAE, les statistiques de l’ONISR donnent 56 tués sur la période 2019 – 2021, soit 9.46% des cyclistes tués. On peut noter une augmentation continue du nombre de tués depuis 2015 (sauf en 2020, en raison des restrictions de circulation). De plus le pourcentage de cyclistes tués sans tiers est en augmentation rapide depuis 2017, 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 pas expliquer une telle hausse. Enfin le nombre de cyclistes tués avec tiers augmente beaucoup moins vite. Pour illustrer ceci, considérons les rapports

$$R_0 = (\text{tués sans tiers en 2021}) / (\text{nombre moyen de tués sans tiers de 2009 à 2016}) ,$$

$$R_1 = (\text{tués avec tiers en 2021}) / (\text{nombre moyen de tués avec tiers de 2009 à 2016}) .$$

Le calcul donne $R_0 = 3.381$, puis $R_1 = 1.175$. On peut noter que $(R_0/R_1) = 2.88$. 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 dix départements de l’ouest de la France peu montagneux et nous donnons des bornes probabilistes pour le nombre de tués sans tiers en VAE dans ces dix départements. 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. Enfin 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.

2 Régression pour les cyclistes tués et prédictions

On note $N_9, N_{10}, \dots, N_{22}$ le nombre de cyclistes tués en France en 2009, 2010, \dots , 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 $h_i = a_0 + a_1i + a_2i^2$. 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

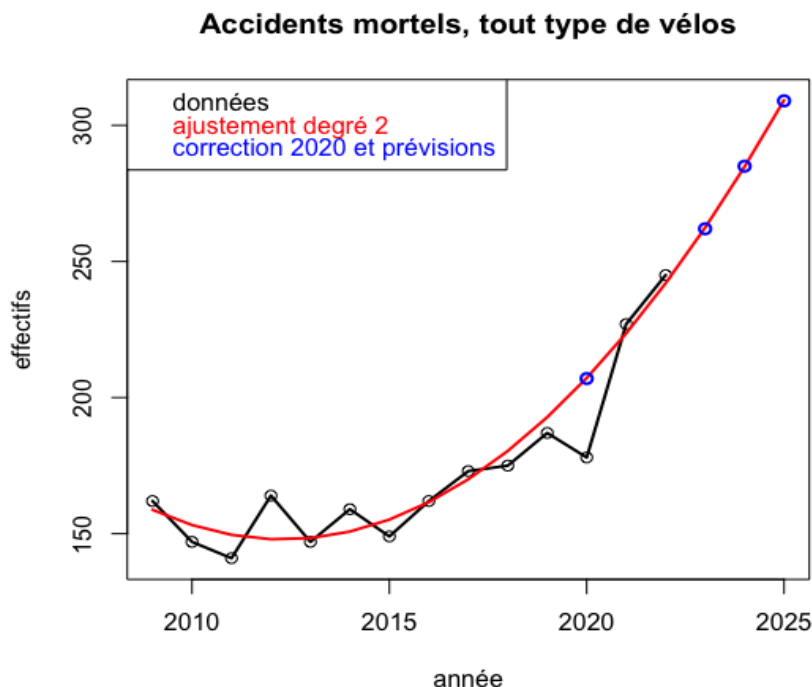
$$M_n = \sum_{i=9}^{22} N_i^{-1}(N_i - h_i)^2.$$

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

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

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.



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 plupart), 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 France, 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 ventes 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 alors que les ventes de bicyclettes sont descendues à moins de deux millions d'unités.

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 cyclistes 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 dans 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, 29114. 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, aucune 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 quel 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 âge 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 Cyclistes tués sans tiers de 2011 à 2021 sur dix départements

Nous avons regardé l'évolution du nombre de tués dans tiers dans les départements de l'ouest de le France suivants: départements 16–17–22–29–49–50–53–56–79–85. Les départements considérés sont des départements peu concernés par le gel. et comportent peu des 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 des départements 35 (comprenant Rennes) et 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).

5A. Les données. 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
SVC Bi+VAE	1	2	0	2	0	4	8	8	6	12	12
SVC VAE	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	0

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 46 tués sans tiers sur les cinq années 2017, 2018, 2019, 2020 et 2021, soit une multiplication par 9.2 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 stagne partout sauf dans les grandes agglomérations, nous supposons 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 supposons 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 et 2021. 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 nombre vrai de tués sans tiers en VAE en 2020 et 2021.

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 $P(1.95a)$. Construisons d'abord un intervalle de confiance pour a , à l'aide de S_0 .

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

L'expression ci-dessus est décroissante en a , et $e^{-5a} \sum_{k=0}^5 \frac{(5a)^k}{k!} = 2.00 \cdot 10^{-2}$ 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 $P(1.95a)$ avec $a \leq a_0$. La loi de T_0 est donc stochastiquement majorée par la loi de Poisson $P(b_0)$, avec $b_0 = 1.95a_0 = 4.6917$. Pour tout entier naturel j , si a est dans l'intervalle de confiance

I_0 , alors

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

Dans le tableau ci-dessous nous donnons les valeurs numériques de p_j pour j entre 5 et 10.

Valeur de j	5	6	7	8	9	10
Valeur de p_j	0.661	0.797	0.888	0.941	0.969	0.982

Rappelons maintenant les données. En 2020 et 2021, il y a eu au total 24 cyclistes tués sans tiers. Donc, si T_1 est le nombre de tués sans tiers en VAE en 2020 et 2021, alors $T_0 + T_1 = 24$. Par conséquent, si $T_0 \leq j$ alors $T_1 \geq 18 - j$. Nous pouvons donc affirmer à l'aide du tableau que, avec un niveau de confiance de 98%,

$$\mathbb{P}(T_1 \geq 14) \geq 0.982, \mathbb{P}(T_1 \geq 15) \geq 0.969, \mathbb{P}(T_1 \geq 16) \geq 0.941.$$

Or les statistiques officielles (voir tableau, Section 5A) donnent deux cas en VAE en 2020 et zéro cas en 2021, soit deux cas au total.

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 0.982, il y a eu au moins douze vélos électriques non enregistrés sur les deux années 2020 et 2021 pour les crashes mortels sans tiers sur ces dix départements, et avec probabilité encore supérieure à 0.941, quatorze vélos électriques non enregistrés.

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 et en 2021, 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.

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 supposons 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 $Y_9, Y_{10}, \dots, Y_{21}$ est une suite de variables aléatoires indépendantes.

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

nous supposons 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 supposons 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 $s_{Y,[9,15]}^2$ l'estimateur sans biais de la variance.

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

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

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

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

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

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

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

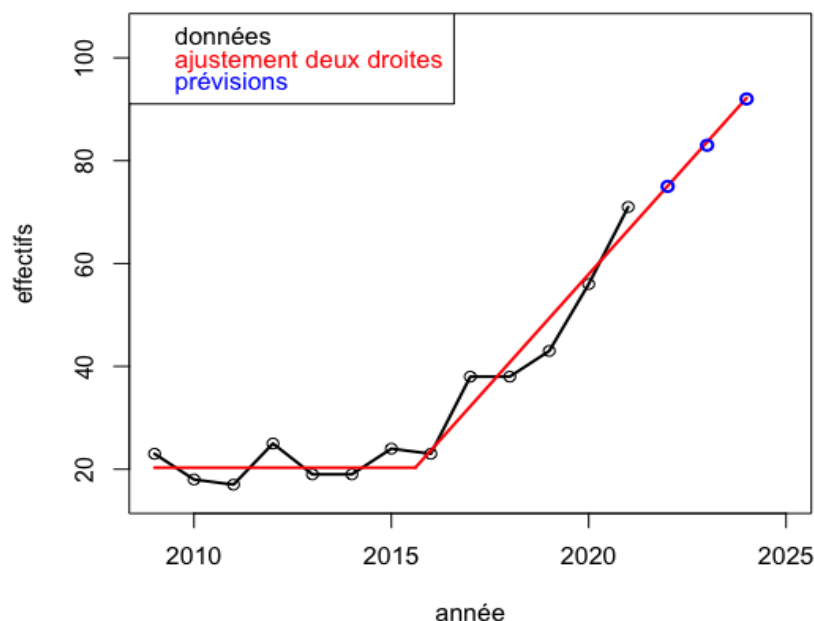
On note alors que \tilde{D}_n est la différentielle de $-\frac{1}{2}M_n$, avec

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

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

$$(6.2) \quad \hat{a} = 20.30, \quad \hat{c} = 8.52 \quad \text{et} \quad \hat{t} = 15.61.$$

Accidents mortels sans tiers, tout type de vélo



On voit ici que $\hat{t} = 15.61$. 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 $\hat{Q}(i) = 17.66 + 0.605(i - 11.97)^2$.

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

$$SCR(\hat{f}_i) = 5.22 \text{ et } SCR(\hat{h}_i) = 5.00.$$

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

Dans la suite, on pose

$$(6.3) \quad f_0(i) = 20.30 \text{ et } f_1(i) = 20.30 + 8.52(i - 15.61).$$

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

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

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 (languames 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 compléterons 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:

$$\beta = (BMV_{vae}(19) + BMV_{vae}(21))/(BMV(19) + BMV(21)) = 74/300 = 0.2467.$$

Ceci donne le tableau suivant:

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021
SVC (bi)	20	24	19	18	20	22
SVC (vae)	3	15	19	25	36	49
BMV (vae)	3	15	19	25	28	49
BMV (bi)	136	119	118	119	94	107

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. Le nombre T_i de tués en VAE pour $i \geq 22$ est estimé avec la prédiction

$$(6.5) \quad \mathbb{E}(T_i) = \mathbb{E}(Z_i)/0.50 = (f_1(i) - f_0(i))/0.50 = 17.04(i - 15.61),$$

ce qui donne le tableau suivant:

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Somme
Tués (bi)	156	143	137	137	114	129	136	952
Tués (vae)	6	30	38	50	64	98	109	395

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 139 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 212 tués en VAE sur les 592 cyclistes tués, de 2019 à 2021. Les cyclistes tués en VAE représentent donc 35.81% des cyclistes tués sur ces trois années, selon nos estimations. Dans la section suivante, nous comparons ces estimations avec les statistiques de la mortalité cycliste en Belgique.

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 Slootmans (2020, 2021 et 2022).

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

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

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 2019-2021, les statistiques belges donnent 96 tués en VAE, soit 36.64% du nombre total de cyclistes tués (262) sur la même période. Pour la France, les statistiques de l'ONISR donnent 9.46% de tués en VAE (56 tués en VAE pour 592 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'utilisateur 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 européenne (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.

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 2019-2021, il y a eu 96 tués enregistrés en VAE en Belgique, et, en France, 56 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,

$$(7.1) \quad N = 96 \times (388/251) \simeq 148 \text{ tués en VAE.}$$

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

Interpolation à l'aide des données belges. Nous supposons 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 2021 et le nombre de cyclistes tués en Belgique de 2010 à 2021. On estime alors le nombre N de tués en VAE de 2019 à 2021 par

$$(7.2) \quad N = 96 \times R = 96 \times (2009/992) \simeq 194.4 \text{ tués en VAE.}$$

Le chiffre obtenu est, somme toute, assez proche des prédictions faites en fin de section 6 (qui donnent 212 tués en VAE de 2019 à 2021).

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 une 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 et 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 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,

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

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.

Dérapiage 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 aérobie 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 Sloomans) sur les accidents de la route en Belgique et d'un article qui donne le 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 hospitalisés 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 hospitalisés 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

$$(9.2) \quad R = \frac{43532 \times 117}{7614 \times 331} = 2.0209 > 2.00.$$

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 bicyclette (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 vraisemblable 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 bicyclette.

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	80.0%	55.5%
VAE	20.0%	44.5%

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 25% 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 35 tués en VAE, soit au total 171 tués au lieu de 245 tués. La surmortalité due au VAE dépasse donc 70 tués.

Dans la section qui suit, nous allons donner des prédictions de mortalité pour les années à venir.

10 Prédictions pour la période 2023-2027

10A. Prédictions. Pour ces prédictions, nous supposons 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 139 tués pour les cyclistes à bicyclette, et donc que les augmentations de vitesse décidées par les départements ne tuent que trois cyclistes à bicyclette par an de plus par rapport à la période 2018-2021 pour le moment. Le nombre de tués en VAE est estimé en considérant que l'augmentation du kilométrage effectué en VAE reste linéaire. Nous appliquerons ici la formule (6.5). Ceci conduit aux prédictions ci-dessous.

Année	2023	2024	2025	2026	2027
Tués (bi)	139	139	139	139	139
Tués (vae)	126	143	160	177	194
Total	265	282	299	316	333

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)	153	153	153	153
Tués (90vae)	150	168	186	204
Total (90)	303	321	339	357

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 Bîl 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 supposons 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

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

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.

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 obligatoire devenait obligatoire en 2024, pour les bicyclettes, le nombre de vies sauvées en 2024 serait $139 \times 0.079 = 11$ 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

$141 \times 0.136 = 19$ 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	139	139	139	139	139	139	128	167
VAE (C 2024)	126	124	138	153	168	384	384	384
Total	265	263	277	292	307	523	512	551

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:

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

Les arrêts (aux feux, à une intersection, pour faire une pause...) ne sont donc pas comptés. La vitesse instantanée 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,

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

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

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

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 lâchée 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 $g = 10$,

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

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

$$(11.6) \quad v_c = \sqrt{v_z^2 + v_x^2},$$

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,

$$(11.7) \quad v_z = \sqrt{10h} \quad \text{et} \quad v_x = v,$$

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

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

avec un angle de choc θ défini par

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

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,

$$(11.10) \quad h_u = 1.55 + 0.35 = 1.90 \text{ m}$$

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

$$(11.11) \quad h_{cb} = 0.95 + 0.35 = 1.30 \text{ m} \quad \text{et} \quad h_{ch} = 1.05 + 0.35 = 1.40 \text{ m}.$$

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 crâniennes 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 une probabilité élevée 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, nous 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 supposons 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,

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

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 percussioin 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 ville. 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 préfets: “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 une 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 395 tués sur la période 2016-2022 (voir section 6), il y aurait eu environ 130 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 nombre 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

$$(12.1) \quad R_0 = cv^2,$$

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

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

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 supposons 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

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

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

$$(12.4) \quad H = c_0 R_0 G.$$

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 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 Bîl et al (2018), dans 50% des cas, il y a une blessure mortelle dont le siège est ailleurs, et donc avec un niveau d’efficacité du casque de 60%, le RIM est réduit 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.

Si maintenant le propriétaire veut faire 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%. En effet, comme le montre l'article de Bîl et al (2018), dans 50% des cas, il y a une blessure mortelle dont le siège est ailleurs, et donc avec un niveau d'efficacité du casque de 60%, le RIMH est réduit de 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 crâniens 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

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

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 entraînement 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 $D = \pi = 3.14159\dots$

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 traversées 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 par habitant et par an 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 protégera 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.

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., Dobiáš, 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] 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. Norwegian Centre for Transport Research.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Observatoire du Cycle. Marché 2019. Union Sport et Cycle.

- [7] ONISR. La sécurité routière en France. Bilan de l'accidentalité de l'année. Années 2008 à 2021.
- [8] 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 data and simulations. *Safety Science* **50** (2012), 1749–1759.
- [9] Pigeau, S. L'aérodynamisme en question. *Le Cycle* **540** (2022), 46–59.
- [10] Pondevie, F. Bilan e-road. Un marché en berne? *Le Cycle* **547** (2022), 84–87.
- [11] 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.
- [12] Sloomans, F. Rapport Statistique 2022 – Accidents de la route 2021, Bruxelles, Belgique (2022). Institut Vias.
- [13] Sloomans, F. Rapport Statistique 2021 – Accidents de la route 2020, Bruxelles, Belgique (2021). Institut Vias.
- [14] Sloomans, F. Rapport Statistique 2020 – Accidents de la route 2019, Bruxelles, Belgique (2020). Institut Vias.
- [15] Uhr, A. und Hertach, P. Verkehrssicherheit von E-Bikes mit Schwerpunkt Alleinunfälle. *bfu-Report Nr. 75* (2017). Bern.