



Angles des trajectoires de sortie de route lors d'accidents de perte de contrôle en courbe

Thierry Brenac* et Jean-Emmanuel Michel*

Résumé : Les programmes d'investigation en profondeur sur les accidents de la circulation routière, comme l'Étude détaillée d'accidents (EDA) de l'IFSTTAR, permettent de conduire des recherches sur l'étiologie de tels événements. Mais ils apportent également des informations plus descriptives sur les phénomènes accidentels, concernant notamment la cinématique des véhicules dans les phases finales du déroulement des accidents. Ces informations descriptives peuvent avoir une utilité directe pour les aménageurs. En particulier, la connaissance des angles sous lesquels les véhicules en perte de contrôle sortent de la chaussée peut être utile pour définir des stratégies et techniques de traitement des obstacles dans les abords des routes, ou de mise en place de glissières de sécurité, de façon à limiter la gravité de ces accidents. Dans le cadre de l'approfondissement de travaux antérieurs, nous avons étudié la distribution statistique des angles de sortie de chaussée dans les accidents de perte de contrôle en courbe, à partir de l'étude de 84 cas issus de l'EDA, survenus hors agglomération. Les résultats obtenus concernent la moyenne, l'écart-type et la forme de cette distribution, et distinguent les sorties de chaussée sur le côté droit, par rapport au sens de circulation initial du véhicule, et les sorties du côté gauche, qui se produisent en moyenne sous des angles plus importants. Pour la sortie finale de chaussée, les angles apparaissent distribués selon une loi normale ($m = 16,95^\circ$; $s = 7,33^\circ$) pour les sorties à gauche, et selon une loi Gamma à deux paramètres pour les sorties à droite ($m = 12,79^\circ$; $s = 7,39^\circ$).

Mots-clés : accident de la circulation, accident de perte de contrôle, angle de sortie de chaussée.

Abstract: *Roadway departure angles in loss-of-control accidents on curves.* In-depth investigation programmes on traffic crashes, such as the IFSTTAR In-Depth Accident Study (IDAS), make it possible to carry out research projects on the aetiology of accidents. However, they also contribute to provide more descriptive information on accident phenomena, notably as regards the kinematics of the involved vehicles during the final stages of the accident process. Such information may be of direct usefulness for road engineers and managers. In particular, the knowledge of the angles at which vehicles leave the road in loss-of-control accidents may be useful for the definition of strategies and techniques for the treatment of roadside obstacles or the installation of safety barriers, with the aim to reduce the severity of run-off-road crashes. As part of further development of previous work, we studied the statistical distribution of roadway departure angles for loss-of-control accidents on curves, based on 84 IDAS cases occurred in rural areas. The results obtained deal with the mean, standard deviation, and form of this distribution. Separate results are presented for right side departures and for left side departures which, on average, occur at higher angles. As regards the final roadway departure, the angles appear to be normally distributed for left side departures ($m = 16,95^\circ$; $s = 7,33^\circ$) whereas, for right side departures, they are better described by a two-parameter Gamma distribution ($m = 12,79^\circ$; $s = 7,39^\circ$).

Keywords: traffic accident, loss of control accident, roadway departure angle.

1. Introduction

La présente note rend compte d'un travail d'approfondissement d'une recherche antérieure traitant des accidents de perte de contrôle en courbe (Michel, Brenac, Magnin, Naude et Perrin, 2005). Elle porte sur un point particulier de cette recherche : les angles des trajectoires de sortie de chaussée. Par accidents de perte de contrôle, nous désignons les cas d'accidents

*IFSTTAR, TS2, LMA (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, département Transport, santé et sécurité ; laboratoire Mécanismes d'accidents), F-13300 Salon de Provence.

où une défaillance dans le contrôle de la vitesse ou de la trajectoire est à l'origine de l'accident, sans qu'une interaction préalable avec un autre usager n'explique cette défaillance.

Dans les travaux antérieurs, seule une analyse partielle des angles de sortie de chaussée avait été conduite. En effet, cette analyse s'intéressant plus particulièrement aux possibilités de manœuvres de récupération, ces angles n'avaient été étudiés que pour les cas de sorties de chaussée pour lesquels le véhicule n'était pas encore (au moment où il quitte la chaussée) dans une situation de perte de contrôle consommée. De ce fait, il s'agissait en général d'angles assez faibles, les valeurs moyennes étant de l'ordre de cinq degrés (Michel *et al.*, 2005, p. 73)¹.

Nous exposons dans cette note les résultats d'une analyse plus globale des angles de sortie de chaussée, pour l'ensemble de l'échantillon. La connaissance plus générale des angles de sorties de chaussée peut être en effet utile pour aider à définir des stratégies en matière de traitement des obstacles en bord de route, concernant en particulier la mise en œuvre de glissières de sécurité permettant d'isoler ces obstacles.

Cette note prend appui sur les 84 cas de pertes de contrôle en courbe utilisés dans la recherche de Michel *et al.* (2005), issus de l'Étude détaillée d'accidents de l'INRETS (aujourd'hui IFSTTAR) de Salon de Provence, et survenus entre 1992 et 1999. Parmi cet ensemble, dix cas où la perte de contrôle n'avait conduit à aucune sortie de chaussée² ont été écartés, ainsi que quatre autres cas pour lesquels il n'a pas été possible d'obtenir des données d'angle pertinentes. Reste donc un échantillon de 70 cas d'accidents pour lesquels des mesures d'angle ont pu être établies³. Parmi ces 70 cas, on relève une première sortie de chaussée suivie d'un retour sur chaussée et d'une sortie de chaussée finale dans 22 cas (groupe A), et dans les 48 cas restant, une seule sortie de chaussée est relevée (groupe B).

Deux exploitations des données ont été conduites :

- 1) L'étude des *angles de première sortie de chaussée* (sortie unique pour les cas du groupe B, première sortie pour les cas du groupe A). Une mesure de l'angle de première sortie de chaussée a pu être établie pour 68 des 70 cas de l'échantillon.
- 2) L'étude des *angles de sortie de chaussée finale* (sortie unique pour les cas du groupe B, et seconde sortie de chaussée pour les cas du groupe A). Les mesures de l'angle de sortie finale ont pu être établies pour 65 des 70 cas de l'échantillon.

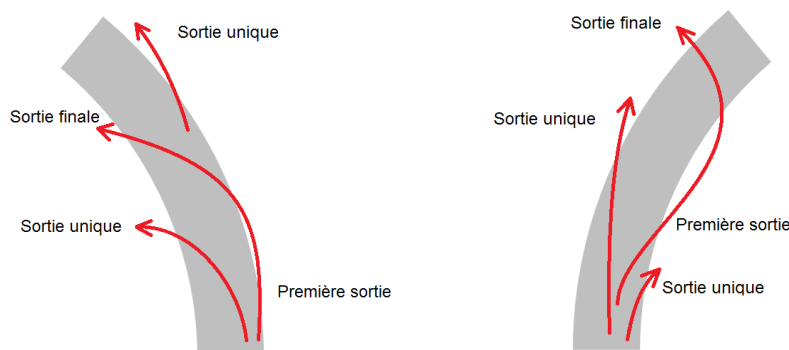


Figure 1. Exemples de configurations de sortie de chaussée : premières sorties, sorties finales et sorties uniques (pouvant être considérées à la fois comme des premières sorties et des sorties finales)

La section 2 ci-après précise quelques aspects méthodologiques. La section 3 traite des angles de première sortie de chaussée. La section 4 traite des angles de sortie finale. La

1. Pour davantage de détails sur l'articulation entre les résultats présentés dans cette note et ceux publiés dans la référence (Michel *et al.*, 2005), voir en annexe.

2. Cette situation correspond par exemple au cas où l'impliqué perd le contrôle de son véhicule puis percute un autre usager en sens inverse, sans sortir de chaussée.

3. Sur ces 70 cas, tous survenus hors agglomération, 57 ont eu lieu sur des routes à deux voies, 6 sur des routes à trois ou quatre voies sans séparateur central, 6 sur des bretelles d'échangeurs autoroutiers, et 1 sur autoroute.

section 5 expose quelques résultats complémentaires. La conclusion propose quelques commentaires concernant les possibilités d'utilisation de ces résultats à des fins pratiques.

2. Quelques points de méthode

Les angles de sortie de chaussée étudiés sont issus des investigations approfondies des équipes de l'Étude détaillée d'accidents de Salon de Provence, qui interviennent sur le site immédiatement après la survenue de l'accident, et collectent un grand nombre d'informations sur le moment ou, pour les données moins volatiles, dans les jours qui suivent l'accident. Ces informations concernent en particulier les éléments suivants : positions finales des véhicules, déformations des véhicules, traces et indices présents entre le point de choc et les positions finales, au point de choc lui-même, et en amont du point de choc ; autres éléments présents sur la scène tels que véhicules stationnés, obstacles, etc. ; conditions météorologiques, conditions de surface de chaussée, conditions de trafic ; aménagements ; conditions d'approche ; etc. Les entretiens avec les impliqués et témoins réalisés par l'enquêteur (ou enquêtrice) psychologue complètent ce recueil d'indices matériels et permettent d'accéder à une compréhension globale de l'accident et, le plus souvent, à une reconstruction cinématique de l'accident.

Les résultats présentés dans la suite de cette note concernent les distributions des angles de sortie de chaussée⁴. Au-delà des fonctions de répartition empiriques, intéressantes mais marquées par les fluctuations d'échantillonnage, nous examinons les ajustements possibles de diverses distributions statistiques théoriques à ces données. Pour certains groupes de cas (comme les sorties de chaussées du côté gauche), l'examen visuel des graphes obtenus et l'application de tests de normalité conduisent à considérer que la distribution des angles de sortie peut être raisonnablement modélisée par une loi de Laplace-Gauss. Mais pour d'autres groupes de cas le test de normalité de Shapiro-Wilk a conduit à rejeter une telle hypothèse, du fait de la dissymétrie de la distribution empirique. Nous avons alors tenté d'utiliser des lois statistiques de distribution dissymétrique – loi Gamma (à deux paramètres), loi log-normale, et loi Bêta prime⁵ – de même moyenne et de même écart-type⁶ que la distribution empirique.

Il n'est guère possible de donner une justification théorique au choix de l'une ou l'autre de ces distributions. Les connaissances générales dans le domaine de la sécurité suggèrent que les erreurs sont d'autant plus nombreuses qu'elles sont bénignes – ce qui signifierait en l'occurrence que les faibles déviations angulaires par rapport à la trajectoire optimale sont sans doute plus fréquentes que les fortes déviations. Ce serait un argument en faveur d'une distribution des angles de sortie ayant une densité de probabilité décroissante, comme la loi exponentielle. Mais il est probable aussi que les erreurs les plus bénignes sont les plus faciles à récupérer, ou celles qui donnent le moins souvent lieu à des conséquences dommageables : les sorties de chaussée sous de faibles angles donnent sans doute plus souvent lieu à des manœuvres de récupération réussies, ou du moins se terminent souvent sans collision ou sans dommage corporels. Les sorties de chaussée sous de faibles angles échappent donc en partie aux recueils de données d'accidents corporels (comme l'Étude détaillée d'accidents de Salon de Provence). Cela suggère que, s'agissant des angles de sortie de chaussée lors d'accidents corporels résultant de pertes de contrôle, la distribution statistique a probablement une densité de probabilité d'abord croissante dans le domaine des petits angles, puis décroissante pour les grands angles, sans qu'on puisse en spécifier la forme sur une base théorique certaine.

L'arbitrage entre différentes distributions théoriques peut alors s'appuyer sur des considérations de proximité avec la distribution empirique, au sens de la distance de Kolmogorov par exemple.

4. L'angle de sortie de chaussée est l'angle entre la tangente au bord de chaussée et la tangente à la trajectoire du centre de gravité du véhicule, au moment où le véhicule franchit le bord de chaussée.

5. Dite aussi loi Bêta du second type, ou loi de Pearson de type VI, ou « *inverted beta* ».

6. Plus précisément, l'écart-type utilisé est calculé avec l'estimateur $[(1/(n-1)) \sum (x_i - m)^2]^{0.5}$.

3. Angles de première sortie de chaussée ($n = 68$)

Globalement, sans distinguer sorties de chaussée à droite ou à gauche (par rapport au sens de circulation du véhicule avant l'accident), cet échantillon d'angles ne peut être considéré comme issu d'une variable de Laplace-Gauss (le test de Shapiro-Wilk conduit à rejeter l'hypothèse nulle de normalité ; $p = 0,00099$). Certaines distributions dissymétriques sont plus proches de la distribution empirique. Parmi elles, la distribution Gamma est la plus proche de la distribution empirique au sens de la distance de Kolmogorov. Elle reste cependant peu satisfaisante, en particulier dans la gamme des angles de 13 à 20 degrés (voir figure 2).

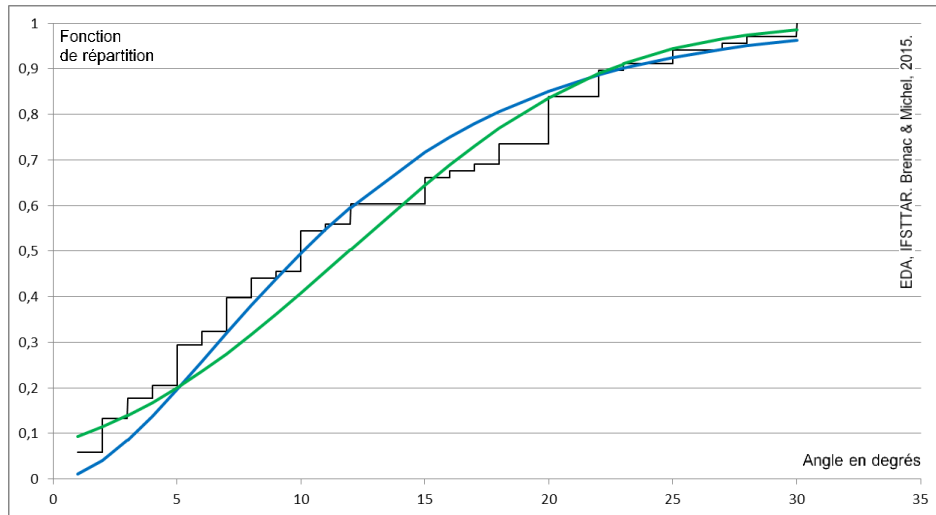


Figure 2. Distribution des angles de première sortie de chaussée ($n = 68$). Fonction de répartition empirique, en noir ; fonction de répartition de la loi Gamma, en bleu, et de la loi de Laplace-Gauss, en vert.

La figure 2 suggère également, de façon assez nette, l'existence d'un palier de la fonction de répartition (vers 12-15 degrés), et donc l'existence de plusieurs modes qui pourraient résulter d'une superposition de plusieurs distributions.

De ce point de vue, il est sans doute pertinent de distinguer les sorties de chaussée à droite des sorties de chaussée à gauche. En effet, un véhicule sortant sur sa droite passe plus rapidement de la trajectoire optimale à l'accotement qu'un véhicule sortant sur sa gauche, qui

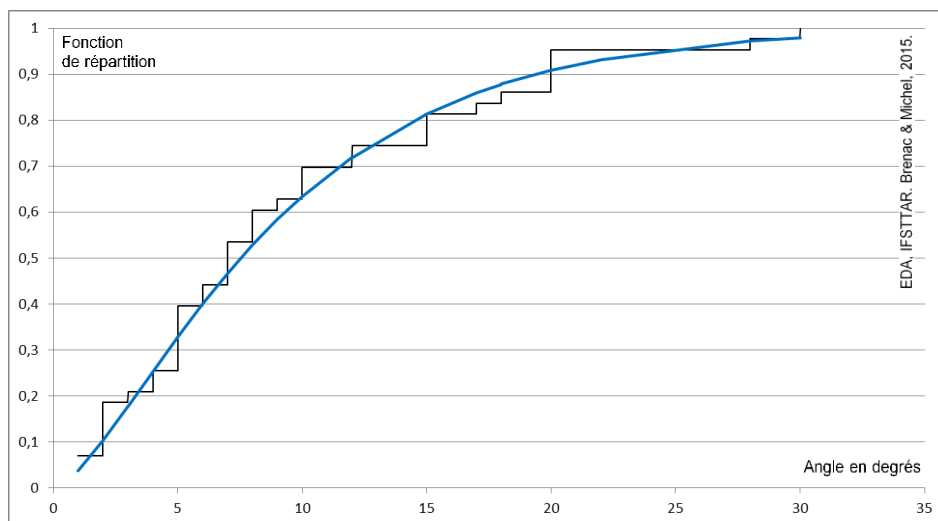


Figure 3. Distribution des angles de première sortie de chaussée à droite ($n = 43$). En noir : fonction de répartition empirique ; en bleu : fonction de répartition de la loi Gamma.

traverse d'abord la voie de sens inverse, dans le cas général. De ce fait, les sorties à droite, survenant dans un laps de temps assez court par rapport au début de l'écart de trajectoire, tendent probablement en moyenne à survenir sous des angles plus faibles. La distribution des angles de première sortie à droite apparaît sur la figure 3. L'application du test de Shapiro-Wilk conduit à rejeter l'hypothèse nulle de normalité ($p = 0,00034$). Parmi les distributions examinées, la distribution la mieux ajustée aux données empiriques, au sens de la distance de Kolmogorov, est la distribution Gamma.

La distribution des angles de première sortie de chaussée à gauche apparaît sur la figure 4. L'examen visuel de ce graphe, comme l'application du test de Shapiro-Wilk ($p = 0.34$), ne conduit pas à rejeter l'hypothèse de normalité. En outre, par rapport aux autres distributions théoriques ajustées (Gamma, log-normale, ou Bêta prime), la distribution de Laplace-Gauss est nettement plus proche des données empiriques au sens de la distance de Kolmogorov.

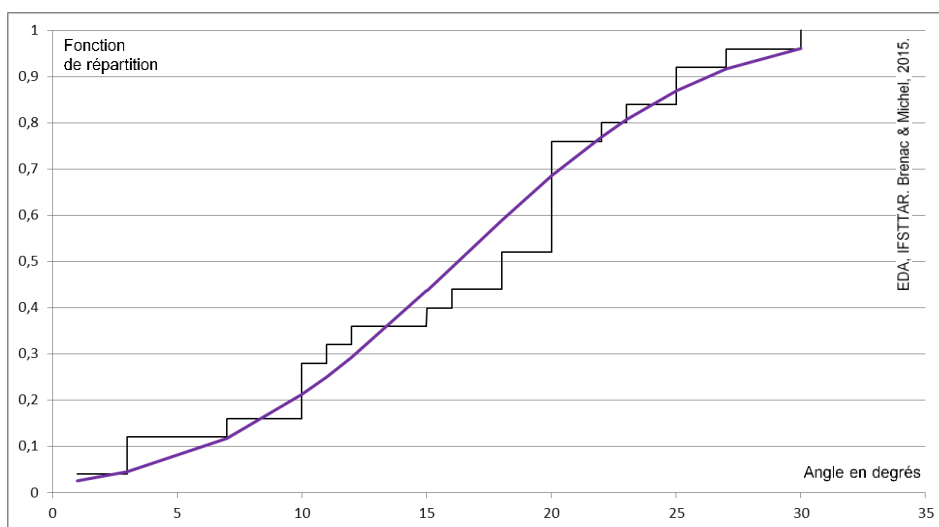


Figure 4. Distribution des angles de première sortie de chaussée à gauche ($n = 25$). En noir : fonction de répartition empirique ; en violet : fonction de répartition de la loi de Laplace-Gauss.

Table 1. Angles de première sortie de chaussée, à droite et à gauche (en degrés) : moyennes, écarts-types, et centiles des distributions ajustées.

| | Angles de première sortie, à droite ($n = 43$) | Angles de première sortie, à gauche ($n = 25$) |
|----------------------|--|--|
| Moyenne \hat{m} | 9,42 | 16,24 |
| Écart-type \hat{s} | 7,48 | 7,80 |
| | Valeurs des centiles (angles en degrés) | Valeurs des centiles (angles en degrés) |
| Centiles | Loi Gamma (1.584; 5.947)* | Loi de Laplace-Gauss (\hat{m} , \hat{s}) |
| 5 % | 1,21 | 3,41 |
| 10 % | 1,96 | 6,24 |
| 15 % | 2,64 | 8,15 |
| 20 % | 3,30 | 9,67 |
| 25 % | 3,95 | 10,98 |
| 30 % | 4,61 | 12,15 |
| 35 % | 5,29 | 13,23 |
| 40 % | 5,99 | 14,26 |
| 45 % | 6,74 | 15,26 |
| 50 % | 7,53 | 16,24 |
| 55 % | 8,38 | 17,22 |
| 60 % | 9,31 | 18,22 |
| 65 % | 10,34 | 19,25 |
| 70 % | 11,51 | 20,33 |
| 75 % | 12,86 | 21,50 |
| 80 % | 14,49 | 22,81 |
| 85 % | 16,54 | 24,33 |
| 90 % | 19,37 | 26,24 |
| 95 % | 24,09 | 29,07 |

*Ces deux nombres représentent les paramètres α et β de la distribution Gamma qui a été ajustée, de densité de probabilité $(1/\beta^\alpha) (1/\Gamma(\alpha)) x^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)$.

Il ressort des figures 3 et 4 que les premières sorties de chaussée à droite se produisent beaucoup plus fréquemment sous des angles modérés (plus de 60 % des cas se produisent avec des angles de moins de 10 degrés), par rapport aux premières sorties de chaussée à gauche (pour lesquelles environ 20 % des cas seulement se produisent avec des angles de moins de 10 degrés) – conformément aux hypothèses émises plus haut.

La table 1 donne les valeurs moyennes et les écarts-types pour les angles de première sortie de chaussée à droite et à gauche, ainsi que les valeurs des centiles pour les distributions ajustées (Gamma pour les premières sorties à droite, Laplace-Gauss pour les premières sorties à gauche).

4. Angles de sortie finale de chaussée ($n = 65$)

Globalement, sans distinguer sorties de chaussée à droite ou à gauche (par rapport au sens de circulation du véhicule avant l'accident), l'échantillon de 65 angles de sortie finale pourrait éventuellement être considéré comme issu d'une variable de Laplace-Gauss (le test de Shapiro-Wilk ne conduit pas à rejeter l'hypothèse nulle de normalité ; $p = 0,21$). Les distributions dissymétriques examinées sont plus éloignées de la distribution empirique (du point de vue de la distance de Kolmogorov). Néanmoins, la représentation graphique de la fonction de répartition empirique (figure 5) suggère, ici encore, l'existence de deux « bosses » séparées par un palier, qui pourrait traduire une densité de probabilité à deux modes, ce qui évoque la possible superposition de deux distributions.

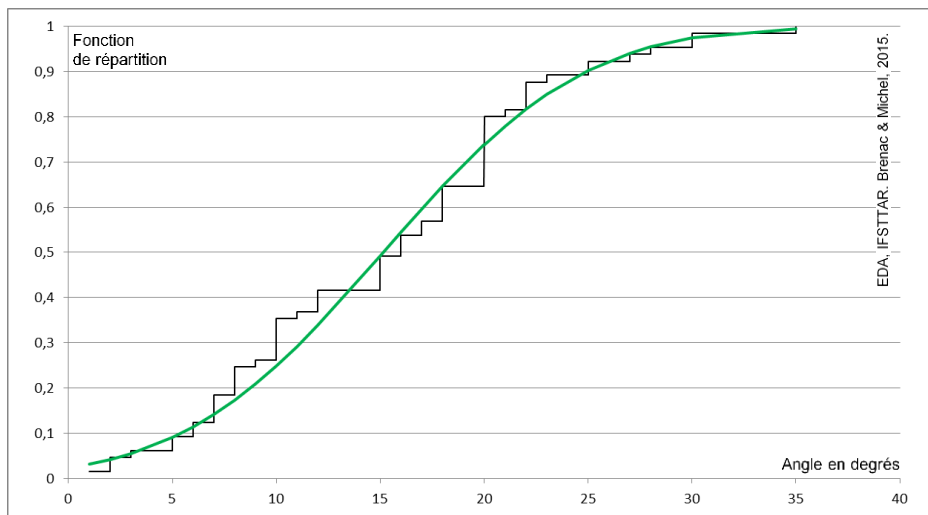


Figure 5. Distribution des angles de sortie finale de chaussée (sorties à droite et sorties à gauche confondues ; $n = 65$). En noir : fonction de répartition empirique ; en vert, fonction de répartition de la loi de Laplace-Gauss.

La distribution des angles de sortie finale à droite apparaît sur la figure 6. L'application du test de Shapiro-Wilk ne conduit pas à rejeter l'hypothèse de normalité ($p = 0,13$). Cependant, visuellement, l'ajustement de paraît pas très satisfaisant, et en outre la distribution Gamma est plus proche de la distribution empirique (au sens de la distance de Kolmogorov) que la distribution de Laplace-Gauss (et que les autres distributions dissymétriques étudiées).

La distribution des angles de sortie finale de chaussée pour les cas où cette sortie survient du côté gauche est représentée sur la figure 7. Le test de Shapiro-Wilk ne conduit pas à rejeter l'hypothèse de normalité ($p = 0,30$). De plus, parmi les différentes distributions examinées, la distribution de Laplace-Gauss est celle qui présente la plus faible distance de Kolmogorov par rapport à la distribution empirique. Ces différents éléments suggèrent de retenir la distribution de Laplace-Gauss, même si l'aspect du graphe n'est pas très satisfaisant. Un ressaut apparaît vers 20 degrés dans la fonction de répartition empirique, sans doute lié à des effets d'arrondi dans la mesure de l'angle (nombreux cas à 20 degrés, très peu à 19 et 21 degrés).

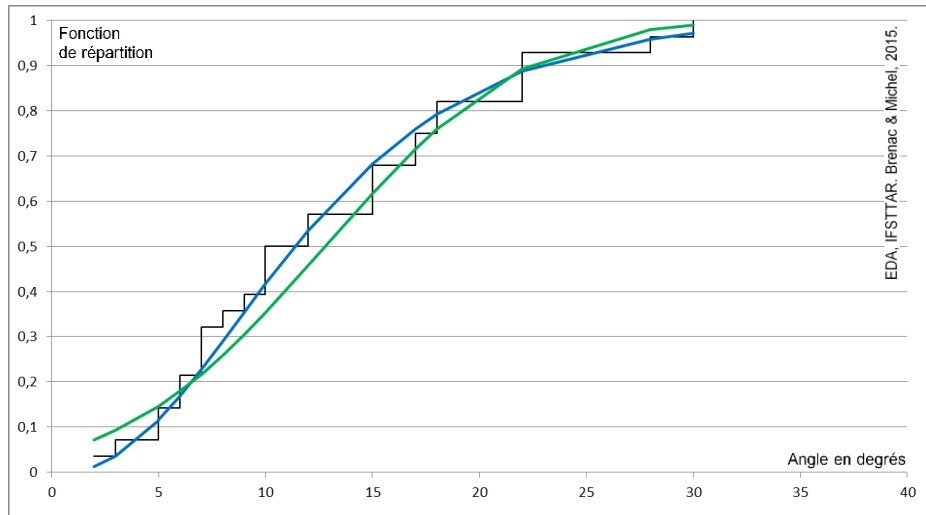


Figure 6. Distribution des angles de sortie finale de chaussée du côté droit ($n = 28$). En noir : fonction de répartition empirique ; en bleu : fonction de répartition de la loi Gamma ; en vert, fonction de répartition de la loi de Laplace-Gauss.

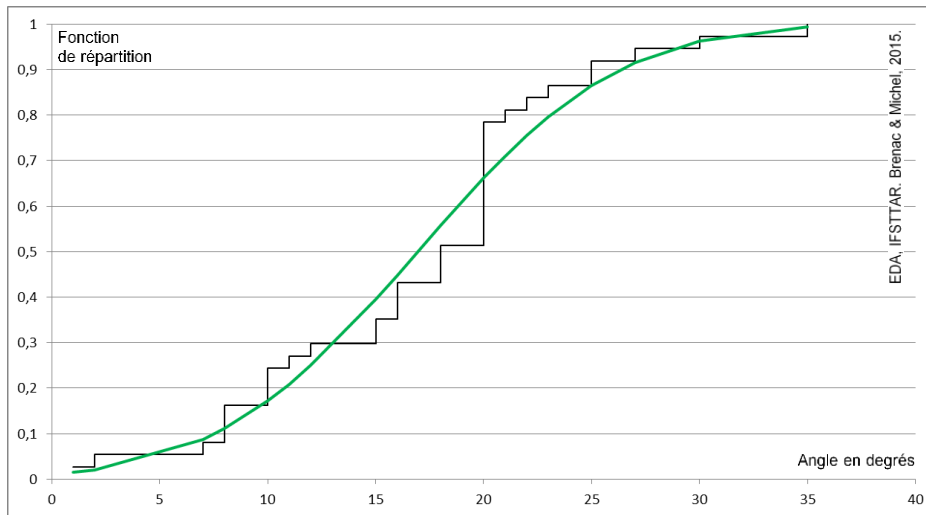


Figure 7. Distribution des angles de sortie finale de chaussée du côté gauche ($n = 37$). En noir : fonction de répartition empirique ; en vert, fonction de répartition de la loi de Laplace-Gauss.

Il apparaît donc également une différence notable, concernant les angles de sortie finale de chaussée, entre sorties à gauche (angle dépassant 15 degrés dans environ 60 % des cas) et sorties à droite (pour lesquelles l'angle ne dépasse 15 degrés que dans un peu plus de 30 % des cas).

Incidemment, on peut relever la proportion importante de sorties finales de chaussée vers le côté gauche (37 cas sur 65), ce qui pourrait surprendre compte tenu de la nette prédominance des accidents de perte de contrôle dans les virages à gauche (45 cas sur 65 dans le présent échantillon) – où l'on tend plus naturellement à sortir à droite en cas de perte de contrôle⁷.

Cela tient certainement à la part notable de pertes de contrôle avec une première sortie à droite suivie d'un retour sur chaussée et d'une sortie finale à gauche (cette configuration correspond à 14 cas parmi les 37 cas de sorties finales à gauche de notre échantillon).

7. La forte prédominance des accidents en virage à gauche, déjà soulignée par Michel *et al.* (2005), s'explique très vraisemblablement en grande partie par le fait que dans les courbes à droite, la voie de sens inverse constitue en général (en l'absence de véhicule en sens inverse) une aire de récupération efficace et précieuse lorsqu'on quitte la trajectoire optimale vers l'extérieur du virage (voir cette référence).

La table 2 donne les valeurs moyennes et les écarts-types pour les angles de sortie finale de chaussée à droite et à gauche, ainsi que les valeurs des centiles pour les distributions ajustées (Gamma pour les sorties finales à droite, Laplace-Gauss pour les sorties finales à gauche).

Table 2. Angles de sortie finale de chaussée, à droite et à gauche (en degrés) : moyennes, écarts-types, et centiles des distributions ajustées.

| | Angles de sortie finale, à droite ($n = 28$) | Angles de sortie finale, à gauche ($n = 37$) |
|----------------------|--|---|
| Moyenne \hat{m} | 12,79 | 16,95 |
| Écart-type \hat{s} | 7,39 | 7,33 |
| | Valeurs des centiles (angles en degrés) Loi Gamma (2,994; 4,271)* | Valeurs des centiles (angles en degrés) Loi de Laplace-Gauss (\hat{m} , \hat{s}) |
| Centiles | | |
| 5 % | 3,48 | 4,89 |
| 10 % | 4,69 | 7,55 |
| 15 % | 5,66 | 9,35 |
| 20 % | 6,54 | 10,78 |
| 25 % | 7,36 | 12,00 |
| 30 % | 8,15 | 13,10 |
| 35 % | 8,94 | 14,12 |
| 40 % | 9,73 | 15,09 |
| 45 % | 10,55 | 16,02 |
| 50 % | 11,39 | 16,95 |
| 55 % | 12,28 | 17,87 |
| 60 % | 13,23 | 18,80 |
| 65 % | 14,27 | 19,77 |
| 70 % | 15,41 | 20,79 |
| 75 % | 16,71 | 21,89 |
| 80 % | 18,24 | 23,11 |
| 85 % | 20,14 | 24,54 |
| 90 % | 22,69 | 26,34 |
| 95 % | 26,85 | 29,00 |

*Ces deux nombres représentent les paramètres α et β de la distribution Gamma qui a été ajustée, de densité de probabilité $(1/\beta^\alpha) (1/\Gamma(\alpha)) x^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)$.

5. Quelques résultats complémentaires

La segmentation de l'échantillon selon le côté de sortie de chaussée paraît pertinente, au regard des différences d'angle moyen entre sorties à gauche et sorties à droite mises en évidence dans les sections précédentes.

Mais d'autres distinctions pourraient être introduites.

En particulier, Michel *et al.* (2005) ont distingué deux catégories principales de pertes de contrôle en courbe : les pertes de contrôle de type « dynamique », que l'on peut rapporter à une adaptation insuffisante de la vitesse à l'approche d'une courbe, cette vitesse étant trop élevée relativement aux capacités du conducteur, du véhicule et aux caractéristiques de l'infrastructure, et les pertes de contrôle de type « guidage », où il y a interruption du contrôle de la trajectoire (notamment dans les cas d'endormissement, somnolence, activité annexe, distraction, malaise, etc.) ou dégradation de ce contrôle (certains cas avec alcoolisation, par exemple). Ces deux catégories, cependant, ne donnent pas lieu à des angles de sortie de chaussée très différents. Les estimations de la moyenne (et de l'écart-type) de la distribution des angles de première sortie de chaussée sont respectivement de 12,69 degrés ($\hat{s} = 8,37$ degrés) et de 10,69 degrés ($\hat{s} = 8,02$ degrés) pour les pertes de contrôle de type « dynamique » et de type « guidage » ; ces valeurs étant calculées sur la base de 42 et 26 cas respectivement. S'agissant des angles de sortie finale, les estimations des moyennes (et écarts-types) sont respectivement de 14,80 degrés ($\hat{s} = 7,57$ degrés) et de 15,69 degrés ($\hat{s} = 7,73$ degrés) pour les pertes de contrôle de type « dynamique » et de type « guidage » ; ces valeurs étant calculées sur la base de 39 et 26 cas respectivement.

On peut aussi s'intéresser aux différences d'angle de sortie selon le sens de la courbe (figure 8, au centre, et table 3).

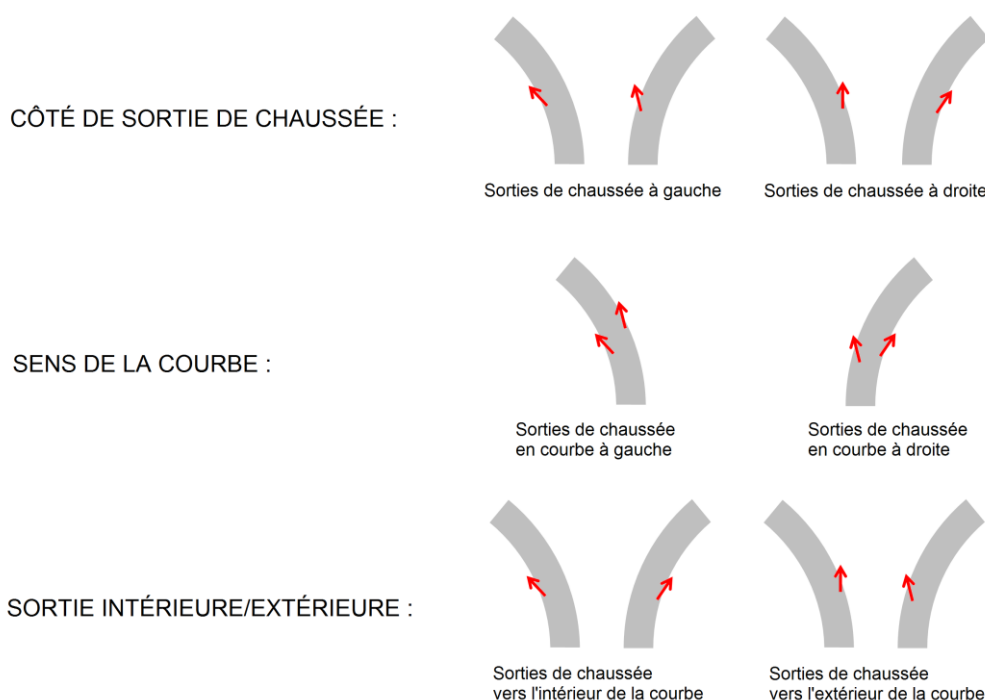


Figure 8. Distinctions entre sorties de chaussée selon le côté de sortie, le sens de la courbe, et la situation de la sortie de chaussée par rapport à la concavité de la courbe.

La table 3 ne fait pas apparaître de différence sensible, selon que la perte de contrôle se produit dans une courbe à droite ou à gauche, pour les angles de première sortie de chaussée. S'agissant des sorties finales de chaussée, il semble que les angles soient en moyenne un peu supérieurs dans les courbes à gauche.

Table 3. Angles de sortie de chaussée, en degrés, selon le sens de la courbe (courbe à gauche ou à droite) : estimations de la moyenne et de l'écart-type.

| Angle (1 ^e sortie) | Courbe à gauche (n = 47) | Courbe à droite (n = 21) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| \hat{m} | 11,72 | 12,38 |
| (\hat{s}) | (9,19) | (5,75) |
| Angle (sortie finale) | Courbe à gauche (n = 45) | Courbe à droite (n = 20) |
| \hat{m} | 16,00 | 13,25 |
| (\hat{s}) | (8,35) | (5,19) |

Enfin, on peut également examiner les différences d'angle de sortie de chaussée selon que la sortie de chaussée a lieu vers l'intérieur ou vers l'extérieur de la courbe (figure 8, en bas). Les estimations des moyennes et écarts-types correspondants apparaissent dans la table 4. Les angles paraissent supérieurs pour les sorties de chaussée vers l'intérieur. Ces résultats sont cependant difficiles à interpréter indépendamment de la différence entre sorties à gauche et sorties à droite, car il apparaît que les sorties de chaussée vers l'extérieur sont majoritairement des sorties vers la droite⁸ – donc sous de plus petits angles puisqu'il n'y a pas de traversée préalable de la voie de sens inverse. De même, les sorties de chaussée vers l'intérieur sont majoritairement des sorties vers la gauche, donc souvent sous de plus grands angles du fait que la sortie de chaussée est alors précédée de la traversée de la voie de sens inverse, dans le cas général (voir section 3).

8. Du fait de la prédominance des accidents en courbe à gauche, s'agissant des pertes de contrôle.

Table 4. Angles des sorties de chaussée vers l'extérieur de la courbe, et angles des sorties vers l'intérieur de la courbe (en degrés) : estimations des moyennes et écarts-types.

| Angle (1 ^e sortie) | Première sortie vers l'extérieur (n = 46) | Première sortie vers l'intérieur (n = 22) |
|-------------------------------|---|---|
| \hat{m} | 10,02 | 15,91 |
| (\hat{s}) | (7,84) | (7,78) |
| Angle (sortie finale) | Sortie finale vers l'extérieur (n = 34) | Sortie finale vers l'intérieur (n = 31) |
| \hat{m} | 13,38 | 17,10 |
| (\hat{s}) | (7,37) | (7,45) |

6. Conclusion

Les résultats exposés dans les sections précédentes sont le fruit d'une analyse principalement descriptive, et n'apportent pas d'éclairage nouveau d'un point de vue théorique ou méthodologique.

D'un point de vue plus pratique, les résultats présentés peuvent notamment contribuer à alimenter les réflexions nécessaires à la mise au point de dispositions techniques pour le traitement des obstacles en bord de route et l'isolement de ces obstacles par des glissières de sécurité ou d'autres équipements.

Il faut cependant prendre en compte le fait que ces résultats concernent le cas des pertes de contrôle en courbe, et non des pertes de contrôle sur tout type de tracé. Les rayons moyens des courbes rencontrées dans cet échantillon de cas sont compris dans une gamme allant de 50 m à 700 m (seul un cas concerne une courbe de 1500 m de rayon moyen). Pour les pertes de contrôle de type « dynamique », une tendance à la diminution de l'angle de sortie de chaussée est perceptible lorsque le rayon de la courbe augmente⁹, mais nous n'avons pas mis en évidence de tendance comparable pour les pertes de contrôle de type « guidage ».

La comparaison avec quelques résultats publiés ces dernières années dans la littérature scientifique internationale (Albuquerque *et al.*, 2010 ; Doecke et Woolley, 2011), reposant sur des investigations approfondies sur des accidents de sortie de chaussée sur tous types de tracés (en courbe ou non), montre néanmoins que la distribution des angles de sortie de chaussée en courbe que nous avons obtenue ne s'écarte pas radicalement de celles rapportées dans ces publications, pour tous types de tracés. Aux États-Unis, Albuquerque *et al.* (2010) ont étudiés 890 accidents de sorties de chaussée de véhicules seuls sur des routes rurales ou suburbaines (avec des limites de vitesses supérieures ou égales à 45 miles par heure, soit environ 72 km/h). Ils obtiennent un angle moyen de sortie de route de 16,9 degrés, avec un écart-type de 10,5 degrés et un 85^{ème} centile à 28 degrés. Cela est à comparer à nos résultats concernant les sorties de chaussée finales en courbe, sorties à droite et sorties à gauche confondues : la moyenne est de 15,5 degrés, l'écart-type de 7,6 degrés, et le 85^{ème} centile est à 22 degrés. Sur un échantillon de 132 accidents de sortie de chaussée sur des routes rurales en Australie (État de South Australia), Doecke et Woolley (2011) obtiennent un angle moyen de sortie de chaussée de 14 degrés, avec une valeur maximale de 32 degrés (à comparer à 35 degrés dans notre échantillon). Ils relèvent une différence selon que le véhicule est déjà hors de contrôle au moment où il quitte la chaussée (angle moyen 17,6 degrés) ou n'est pas encore hors de contrôle (angle moyen 7,3 degrés).

Une autre limite des résultats présentés ici tient au fait qu'ils s'appuient sur un échantillon de cas survenus dans une région définie autour de la ville de Salon de Provence. On ne voit guère de raison de penser que les processus de perte de contrôle et leurs manifestations cinématiques diffèrent d'une région à l'autre. Il est certes possible que des différences géographiques ou dans les pratiques d'aménagement, conduisant à des conditions différentes des abords de chaussée (nature des accotements, niveau d'équipement en glissières de

9. Diminution de l'ordre de 4 degrés entre 100 m et 500 m de rayon, qu'il s'agisse de l'angle de première sortie de chaussée ou de l'angle de sortie finale.

sécurité, quantité et positions des obstacles en bord de route, etc.), aient pour conséquence des différences entre régions dans la distribution des angles de sortie de chaussée lors d'accidents corporels de perte de contrôle. Les différences climatiques pourraient jouer un rôle également. Mais la relative cohérence de nos résultats avec ceux obtenus aux États-Unis et en Australie, cités plus haut, inciterait cependant à ne pas accorder une importance excessive à l'influence éventuelle de particularités locales.

Annexe

Dans les travaux publiés antérieurement par Michel *et al.* (2005), la question de l'angle de sortie de chaussée avait été abordée du point de vue du rôle possible du traitement des abords immédiats de la chaussée pour la réalisation de manœuvres de récupération, permettant d'éviter les collisions ou autres conséquences dommageables. Dans cette perspective, les sorties de chaussée avaient été classées en deux catégories : (i) les sorties de chaussées dites « résultantes », au sens où elles résultaient d'une perte de contrôle déjà consommée au moment où le véhicule quitte la chaussée (le véhicule n'est déjà plus contrôlable compte tenu de la cinématique et de la dynamique de la situation) ; et (ii) les sorties de chaussées dites « initiales », pour lesquelles le véhicule était encore *a priori* contrôlable au moment où il quitte la chaussée – la sortie de chaussée contribuant donc, d'une certaine façon, à la perte de contrôlabilité du véhicule (on aurait pu qualifier ces sorties de chaussée de sorties de chaussée « initialisantes »). Les angles de sortie n'avaient été étudiés que dans le cas de ces sorties « initiales ». Les termes de sortie de chaussée résultante ou sortie de chaussée initiale ne correspondent donc en rien aux notions de sortie de chaussée finale (consécutive à une première sortie de chaussée suivie d'un retour sur chaussée) et de première sortie de chaussée (éventuellement unique, en l'absence de retour sur chaussée). Une sortie de chaussée résultante, par exemple, peut être aussi bien une première sortie de chaussée (souvent unique), qu'une sortie finale de chaussée après un retour sur chaussée. Une première sortie de chaussée n'est donc pas nécessairement une sortie de chaussée dite « initiale ». Il faut reconnaître que cette terminologie est source d'ambiguïté.

Références

- Albuquerque, F. D. B., Sicking, D. L., Stolle, C. S. (2010). Roadway departure and impact conditions. *Transportation Research Record* 2195, 106-114.
- Doecke, S. D., Woolley, J. E. (2011). Further investigation into the effective use of clear zones and barriers in a safe system's context on rural roads. Paper presented at the 2011 Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference, 6-9 November, Perth, Western Australia.
- Michel, J.-E., Brenac, T., Magnin, J., Naude, C., Perrin, C. (2005). *Les pertes de contrôle en courbe*. Les Collections de l'INRETS (n° 262). Arcueil : INRETS. 99 p.